云南哀牢山大坪金矿床成矿流体 H-O-C-S 同位素组成及其成矿意义*

石贵勇[1,2] 孙晓明[1,2,3**] 张燕[3,4] 熊德信[3,5] 翟伟[1,2] 潘伟坚[3] 胡北铭[3]

SHI GuiYong[1,2], SUN XiaoMing[1,2,3**], ZHANG Yan[3,4], XIONG DeXin[3,5], ZHAI Wei[1,2], PAN WeiJian[3] and HU BeiMing[3]

1. 中山大学海洋学院,广州 510275
2. 广东省海洋资源与近岸工程重点实验室, 广州 519275
3. 中山大学地球科学系, 广州 5102751
4. 华东有色地质勘查局, 南京 210007
5. 肇庆学院, 肇庆 526061

1. *School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou* 510275, *China*
2. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Marine Resources and Coastal Engineering, Guangzhou* 519275, *China*
3. *Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou* 510275, *China*
4. *Eastern China Geological & Mining Organization for Non-ferrous Metals, Nanjing* 210007, *China*
5. *Zhaoqing University, Zhaoqing* 526061, *China*

2010-02-28 收稿,2010-05-10 改回.

Shi GY, Sun XM, Zhang Y, Xiong DX, Zhai W, Pan WJ and Hu BM. 2010. H-O-C-S isotopic compositions of ore-forming fluids in Daping gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunan Province, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6):1751 – 1759

Abstract Daping is one of the largest Cenozoic orogenic type gold deposits in Ailaoshan gold belt. Gold ores in the Daping may be divided into two types: (1) Late Proterozoic diorite hosted; (2) Maludong Formation of Middle Devonian (D_2m) limestone hosted. In this study, H-O-C-S isotopic compositions of fluid inclusions, hydrothermal carbonate minerals and sulphides from the Daping auriferous quartz veins were analysed, and the results show that: In the diorite hosted gold ores, the $\delta^{18}O_{H_2O}$ and δD are 2.39‰ ~ 7.59‰ and −85‰ ~ −60‰, the $\delta^{13}C$ of hydrothermal carbonate minerals are −4.7‰ ~ −4.6‰, $\delta^{34}S$ of pyrite and galena are −2.8‰ ~ 7.6‰ (average 3.1‰) and 0.2‰ ~ 6.3‰ (average 2.0‰), respectively, while in the Middle Devonian (D_2m) limestone hosted gold ores, the $\delta^{18}O_{H_2O}$ and δD are 4.36‰ ~ 6.82‰ and −75‰ ~ −67‰, $\delta^{13}C$ of hydrothermal carbonate minerals are −7.6‰ ~ −0.5‰, $\delta^{34}S$ of pyrite are 2.2‰ ~ 10.2‰ (average 6.5‰), respectively, suggesting that stable isotopic compositions of ore-forming fluids in the two different type gold ores are nearly the same. Both of their ore-forming fluids and materials might have derived from same source: Lower crust and upper mantle. Daping is a typical ductile shear zone controlled mesothermal gold deposit, crust-mantle interaction occurred at the early of Himalayan Orogeny might have played an important role in its mineralization. At about 33Ma ago, the middle and lower crust in the Daping area suffered high temperature and high pressure metamorphism because of ductile deformation and upwelling upper mantle magmas. The ore-forming fluids enriched in CO_2, which were generated by granulitization and firing of the upwelling upper mantle magma, were transported to the middle to upper crust along the ductile shear zone, and finally precipitated auriferous sulfide-quartz veins in the brittle structures in diorite batholith or D_2m limestone because of declined temperature and pressure and subsequent boiling. Lithologic characters of wall rocks is not an important controlling factors in mineralization of Daping gold mine.

Key words Ore-forming fluids; H-O-C-S isotopic composition; Cenozoic orogenic type gold deposit; Daping gold deposit; Ailaoshan gold belt

---

* 本文受国家重点基础研究发展规划("973")项目(2009CB421006、2002CB412610)、国家自然科学基金项目(40830425、40673045、40373027)、中央高校基本科研业务费专项基金和高等学校博士学科点专项科研基金(200805580031)联合资助.

第一作者简介: 石贵勇,男,1966 年生,讲师,研究方向为矿床地球化学,E-mail:eessgy@mail.sysu.edu.cn

** **通讯作者**: 孙晓明,男,1963 年生,教授,博士生导师,主要从事矿床地球化学和海底矿产资源研究,E-mail:eessxm@mail.sysu.edu.cn

摘 要 大坪金矿是云南哀牢山金矿带中最大的新生代造山型金矿之一,其矿体可分为两种类型:晚元古代闪长岩岩体中金矿和中泥盆统马鹿洞组(D_2m)灰岩地层中金矿。成矿流体 H-O-C-S 同位素研究表明,闪长岩岩体中金矿 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 2.39‰~7.59‰,δD 为 -85‰~ -60‰,热液方解石的 $\delta^{13}C$ 值为 -4.7‰~ -4.6‰,黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 -2.8‰~7.6‰,平均 3.1‰,方铅矿 $\delta^{34}S$ 值为 0.2‰~6.3‰,平均 2.0‰,而灰岩地层中金矿的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值为 4.36‰~6.82‰,δD 为 -75‰~ -67‰,热液铁白云石和方解石 $\delta^{13}C$ 为 -7.6‰~ -0.5‰,黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 2.2‰~10.2‰,平均 6.5‰,显示大坪金矿中两种主要金矿类型成矿流体的组成和来源基本一致,均主要为来自下地壳的变质流体组成,但有地幔流体加入。大坪金矿属于剪切带控制的中深中温热液型金矿,其成矿与哀牢山金矿带在喜马拉雅早期强烈的壳幔相互作用有关。来自下地壳和地幔的深源流体沿超壳剪切带上升,在地壳浅部向次级断裂构造流通,分别在闪长岩体和灰岩地层中成矿。围岩不是大坪金矿的主要控矿因素。

关键词 成矿流体;H-O-C-S 同位素组成;新生代造山型金矿;大坪金矿;哀牢山金矿带

中图法分类号 P597.2; P618.51

云南哀牢山金矿带是我国最重要的喜马拉雅期金矿带,其中已发现镇源(老王寨)、墨江、大坪和长安等多个大中型金矿。位于云南元阳境内的大坪金矿是哀牢山金矿带规模最大、研究程度最高的含金多金属硫化物热液石英脉型金矿之一。该金矿自被发现以来,已有不少学者对其成矿作用进行了研究,但在成矿物质来源和成矿机制等问题上仍存在争议,一些学者认为其成矿流体是在拉张构造环境下的岩浆热液或深源流体与大气降水相混合的热液(韩润生和金世昌,1994;韩润生等,1997;胡瑞忠等,1998;毕献武和胡瑞忠,1999;胡瑞忠和毕献武,1999),但最近的研究认为该矿主要是沿剪切带上升的壳(下地壳)幔混合流体成矿(孙晓明等,2006a,b,c,2007;熊德信等,2006a,b,2007a,b;Sun *et al.*,2009)。此外,前人的研究主要集中于研究闪长岩岩体中金矿矿体成矿特征,而对于近年来发现的占大坪金矿较大部分的 D_2m 灰岩地层中的金矿成矿特征和成矿机制还缺乏研究。本文在前人工作基础上,主要对大坪金矿闪长岩岩体和灰岩地层中含金石英脉成矿流体中的 H-O-C-S 同位素组成进行研究,以期较全面地探讨该矿成矿物质来源和成矿机制。

1 区域与矿床地质概况

大坪金矿区处于哀牢山深大断裂西侧的浅变质岩带内,受哀牢山深大断裂的次级断裂-小寨金平断裂、小新街断裂和三家河断裂所控制(图 1)。矿区约 60% 被面积约 100km^2 的桃家寨岩体占据,南部及外围零星出露奥陶系、志留系、泥盆系的碎屑沉积岩和碳酸盐岩地层。桃家寨岩体主要由闪长岩组成,其中侵入有喜马拉雅期的煌斑岩脉。由于受后期强烈构造运动的作用,多期次、多类型的浅色中酸性岩,煌斑岩脉侵入,致使闪长岩体接触边部发生蚀变,局部较为强烈,故岩相分带不明显。闪长岩原生色为暗绿色,具有全晶质半自形细-粗粒结构,块状构造。金世昌等用 Rb-Sr 等时线法测得闪长岩的成岩年龄为 481Ma 左右,属于加里东期侵入岩(金世昌和韩润生,1994;胡云中等,1995)。但是,最近的研究表明其年龄为晚元古代(773 ± 12Ma)(张燕等,2010)。此外,矿区北部外围出露有与闪长岩时代相近的斜长花岗岩体。矿区内断裂构造发育,其中小新街断裂呈北北西向贯穿闪长岩体,该断裂两侧的次一级北西向断裂控制着含金石英脉的分布。位于矿区南部的中志留到中泥盆统主要由碳酸盐的层组成,其中灰岩呈灰色,不规则似层状,主要矿物成分为方解石,约占 60%,绢云母约占 10%,黏土矿物约占 5% ~ 30%;次要矿物为石英、黄铁矿等。

矿床主要由数百条含金多金属硫化物石英矿脉组成,矿脉成带出现,且具薄而长的特点,矿脉多数长约 200 ~ 1500m,厚度多为 0.2 ~ 0.8m。矿脉由石英脉、少部分构造破碎蚀变闪长岩和蚀变破碎灰岩组成。其中闪长岩中金矿脉在矿物组成上具有明显的分带性,从矿脉中心到边部分别是团块状含金多金属硫化物带(矿石带)→少量硫化物(主要为黄铁矿)含金石英脉带→含白钨矿石英脉带,另外有晚期方解石细脉穿插于含金多硫化物带中。野外和显微镜下观察可将此类闪长岩中矿脉划分为四个大期次:白钨矿期(阶段 I)、主成矿期(阶段 II)、碳酸盐期(阶段 III)和无矿期(阶段Ⅳ)。其主要矿石矿物为自然金、白钨矿、多种硫化物(黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、斑铜矿和闪锌矿等),而脉石矿物主要为石英、方解石、白云石、绿泥石、绢云母等。前人对大坪金矿近矿绢英岩化蚀变岩中的绢云母等进行了 ^{40}Ar-^{39}Ar 定年,得出其成矿年代为 33.76Ma(孙晓明等,2006a),显示大坪金矿床主体形成于喜马拉雅期碰撞造山运动,但该矿床具有多期成矿的特征,早在晋宁造山运动中就有金的初步富集(张燕等,2010)。

近年来在矿区南部中泥盆统马鹿洞组(D_2m)碳酸盐地层(主要岩性为灰岩和白云质灰岩,夹白云岩、角砾状灰岩和板岩)也发现了较多的金矿体。这类金矿的矿体形态均为不规则似层状,矿脉长度约 1000m,厚度 0.14 ~ 2.55m,平均 0.75m。矿脉主要为含金硫化物-碳酸盐-石英脉,在断裂带中断续分布,尖灭再现,脉间距离一般小于 2m,有时被后期断层及煌斑岩脉错断,错距小,一般 1 ~ 2m,局部大于 3m。其矿化可分为两个期次:主成矿期(阶段 II)和碳酸盐期(阶段 III)。其中硫化物主要为黄铁矿,多呈团块状和浸染状分布于矿脉中,含量一般 <5%,但在局部高度富集;碳酸盐矿物主要有热液铁白云石和热液方解石,局部菱铁矿高度富集。两类金矿矿床详细地质特征参见胡云中等(1995)和中

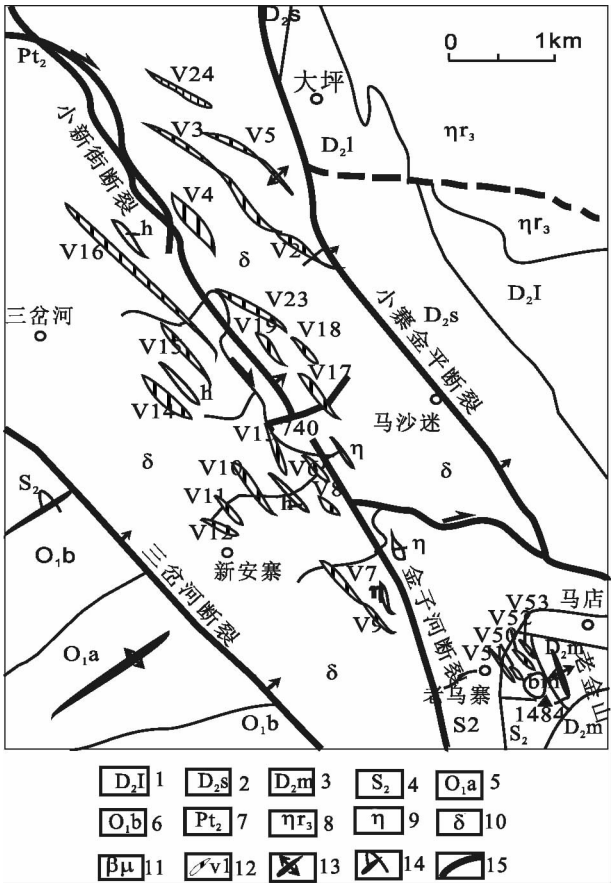


图 1 大坪金矿区矿脉分布图（据应汉龙，1998；武警黄金部队第十支队，2006① 改编）

1-中泥盆统老阱寨组灰岩；2-中泥盆统宋家寨组碳泥质页岩夹硅质页岩及灰岩；3-中泥盆统马鹿洞组微晶灰岩、白云质灰岩、白云岩夹角砾状灰岩、板岩；4-中志留统白云岩、白云质灰岩；5-下奥陶统中组砂岩夹板岩；6-下奥陶统下组；7-哀牢山群阿龙组片岩和片麻岩；8-黑云二长花岗岩；9-二长岩、石英二长岩；10-闪长岩、花岗闪长岩；11-煌斑岩；12-含金石英脉及其代号；13-背斜；14-向斜；15-推测断裂

Fig. 1 Distribution of auriferous quartz veins in Daping gold deposits (modified after Ying, 1998)

1-Limestone of Laojingzhai Fm. of Middle Devonian; 2-Carbonaceous to argillaceous shale intercalated with siliceous shale and limestone of Songjiazhai Fm. of Middle Devonian; 3-Micritic limestone, dolomitic limestone, limestone and slate of Maludong Fm. of Middle Devonian; 4-Dolostone and dolomitic limestone of Middle Silurian; 5-Sandstone intercalated with slate of Lower Ordovician; 6-Lower formation of Lower Ordovician; 7-Gneiss and schist of Precambrian Ailaoshan Group; 8-Biotite monzonitic granite; 9-Monzonite and quartz monzonite; 10-Diorite and granodiorite; 11-Lamprophyre; 12-Auriferous quartz veins and their number; 13-Anticline; 14-Syncline; 15-Hypothetical fault

国人民武装警察部队黄金第十支队（2006）编写的大坪矿区金矿普查报告。

作者等对大坪两类金矿流体包裹体进行了较为系统的显微测温和激光拉曼分析，发现其主成矿期流体包裹体为 CO_2-H_2O 型包裹体和纯 CO_2 包裹体两种类型，成矿流体为富 CO_2 的低到中等盐度的 CO_2-H_2O-NaCl 体系流体，其中闪长岩岩体中金矿石主成矿阶段的包裹体中气相组成为 CO_2、N_2 和 C_2H_4，盐度为 4.80% ~ 12.23% NaCleqv，全均一温度 290.6 ~ 460.1℃，而 D_2m 灰岩地层中主成矿阶段的包裹体气相组成为 CO_2 和 CH_4，盐度为 0.63% ~ 8.66% NaCleqv 之间，均一温度 249.6 ~ 360.7℃。比较而言，灰岩中主成矿期金矿石流体包裹体的均一温度和盐度均较闪长岩中者为低，显示闪长岩中金矿成矿可能早于灰岩中者（熊德信等，2007a；张燕等，2009）。

2 样品和测试方法

本次研究的石英、热液碳酸盐矿物和硫化物样品主要采集于大坪金矿 3 号、6 号、8 号、14 号、51 号和 52 号等主要含金石英脉的采矿坑道中和马店村后山采矿点（图 1），其近矿围岩是晚元古代蚀变闪长岩和 D_2m 灰岩，其采样位置和样品描述见表 1 到表 3。

将含金矿石碎至 0.25 ~ 0.3mm 粒级，在双目镜下手选石英、方解石、铁白云石和硫化物样品，纯度均大于 99%。样品的氢、氧、碳同位素分析由中国国家地质测试中心同位素实验室完成，硫同位素分析核工业北京地质研究院进行。石英流体包裹体氢同位素分析采用爆裂法取水，锌法制氢；矿物氧同位素采用 BrF_5 法；方解石的碳同位素用 100% 磷酸法；硫同位素样品用硫化物与 Cu_2O 和 V_2O_5 混合氧化剂在高温真空条件下反应制取 SO_2。氢、氧、碳同位素采用 MAT251EM 质谱计测定，硫同位素采用 MAT251C 质谱计测定。氢、氧同位素采用的国际标准为 SMOW，碳同位素采用国际标准为 PDB，硫同位素采用国际标准为 CDT。氧、碳、硫同位素分析精度为 ±0.2‰，氢同位素分析精度为 ±2‰。根据石英、方解石或铁白云石中流体包裹体的均一温度和矿物-水氧同位素方程，计算出流体的 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 值。流体的均一温度取其平均值，石英与水的氧同位素平衡公式采用 $\Delta_{Q\text{-}H_2O} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.40$（Clayton *et al.*, 1972），方解石和铁白云石与水的氧同位素平衡公式分别采用 $\Delta_{方解石\text{-}水} = 2.78 \times 10^6/T^2 - 2.89$（O'Neil *et al.*, 1969；Friedman and O'Neil, 1977）和 $\Delta_{铁白云石\text{-}水} = 4.12/T^2 - 4.62/T + 1.71$（Zheng, 1999）。

3 测试结果和讨论

3.1 成矿流体 δD-$\delta^{18}O$ 同位素组成

大坪金矿石英脉流体包裹体 δD-$\delta^{18}O$ 同位素分析结果

① 中国人民武装警察部队黄金第十支队. 2006. 云南省元阳县大坪矿区金矿普查报告

表 1 大坪金矿石英脉流体包裹体 δD-$\delta^{18}O$ 同位素组成

Table 1 δD-$\delta^{18}O$ compositions of fluid inclusions in quartz vein of Daping gold deposit

样品号	采样位置	样品描述	金矿围岩	均一温度 Th(℃)*	$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$‰	$\delta D_{V\text{-}SMOW}$‰	$\delta^{18}O_{H_2O}$‰**
07302	900 平硐掌子面	富铜金矿石	晚元古代闪长岩	350.62	12.2	−85	6.91
07303		富铜金矿石		355.25	12.0	−83	6.84
07305		富铜金矿石		326.4	12.6	−76	6.59
07306		硫化物石英脉		376.61	12.2	−60	7.59
07307		硫化物石英脉		296.13	12.7	−87	5.66
07310		含金石英脉		370.78	11.3	−68	6.54
07319		反倾石英脉		248.86	11.4	−75	2.39
07320		反倾石英脉		240.64	13.8	−78	4.39
07346	51 号矿体	含硫化物石英脉	D_2m 灰岩	293.2	11.5	−75	4.36
07347	52 号矿体	含硫化物石英脉		311.87	13.3	−70	6.82
07353	马店村后山	含金石英脉		274.09	12.9	−73	5.01
07355	马店村后山	浸染状硫化物矿脉		309.21	13.1	−67	6.53
04107	6 号矿体	硫化物石英脉	闪长岩	312.08	10.5	−73	4.03
04114		石英脉		346.14	11.8	−81	6.38
04116		富硫化物石英脉		333.38	10.6	−74	4.81
04120	8 号矿体	硫化物石英脉		350.37	12.8	−62	7.50
04130	8 号矿体	含白钨矿石英脉		316.39	12.4	−80	6.07

* 其中 04107、04114、04116、04120 和 04130 的 Th 值据熊德信等,2007; ** 根据石英与水的氧同位素平衡公式($\Delta_{Q\text{-}H_2O} = 3.38 \times 10^6/T^2 - 3.4$(Clayton *et al.*, 1972))计算获得

表 2 大坪金矿热液碳酸盐 $\delta^{13}C$-$\delta^{18}O$ 同位素组成

Table 2 $\delta^{13}C$-$\delta^{18}O$ compositions of hydrothermal carbonates in Daping gold deposits

样品号	测试矿物	采样位置	样品描述	金矿围岩	$\delta^{13}C_{V\text{-}PDB}$ (‰)	$\delta^{18}O_{V\text{-}PDB}$ (‰)	$\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ (‰)	均一温度 Th(℃)	$\delta^{18}O_{H_2O\text{-}SMOW}$ (‰)*
07307	方解石	900 平硐掌子面	硫化物石英脉	闪长岩	−4.6	−19.5	10.8	274	4.40
07326	铁白云石	51 号矿脉	硫化物方解石脉	D_2m 灰岩	−3.8	−20.1	10.1	270	2.93
07328	铁白云石		灰岩		−5.5	−16.4	14.0	270	6.83
07331	铁白云石		铁白云石		−5.3	−16.5	13.9	270	6.93
07335	铁白云石		铁白云石		−7.6	−16.5	13.9	270	6.93
07336	铁白云石		铁白云石石英脉		−4.5	−19.3	11.0	270	4.03
07350	方解石	52 号矿脉	硫化物方解石脉		−5.5	−15.5	14.9	274	8.50
07353	铁白云石	马店后山	含金硫化物石英脉		−2.3	−16.2	14.2	270	7.03
07355	方解石		硫化物方解石脉		−2.4	−15.8	14.6	274	8.20
04107	方解石	6 号脉	白钨矿硫化物石英脉	闪长岩	−4.7	−18.3	12.0	274	5.60

* 根据 $\Delta_{方解石\text{-}水} = 2.78 \times 10^6/T^2 - 2.89$(O'Neil *et al.*, 1969; Friedman and O'Neil, 1977)和 $\Delta_{铁白云石\text{-}水} = 4.12/T^2 - 4.62/T + 1.71$ (Zheng, 1999)计算获得

表 3 大坪金矿床硫化物 $\delta^{34}S$ 同位素组成

Table 3 Sulfur isotope data of Daping gold deposits

样品号	测试矿物	采样位置	样品描述	金矿围岩	$\delta^{34}S_{V\text{-}CDT}$(‰)
07302			富铜金矿石		7.6
07303			富铜金矿石	闪长岩	3.0
07305		900 平硐掌子面	富铜金矿石		-2.8
07310			含金硫化物石英脉		1.2
07332		51 号矿体	硫化物		9.1
07334		51 号矿体	硫化物		10.2
07346	黄铁矿	51 号矿体	含硫化物石英脉		2.2
07347		52 号矿体	含硫化物石英脉	D_2m 灰岩	4.0
07348		52 号矿体	含金石英脉硫化物		6.7
07353		马店后山矿堆	含金硫化物石英脉		3.8
07354		马店后山矿堆	浸染状矿脉		8.8
07355		马店后山矿堆	硫化物方解石脉		7.5
07374		14 号矿体 S2 测点	方铅矿石英矿脉		2.5
07375	方铅矿	14 号矿体 S2 测点	方铅矿石英矿脉		-0.8
04107	黄铁矿	6 号矿体	含白钨矿硫化物石英脉		5.4
04114	方铅矿	6 号矿体	含白钨矿硫化物石英脉	闪长岩	6.3
04116	黄铁矿	6 号矿体	富硫化物矿石		4.6
04120	方铅矿	8 号矿体	硫化物石英脉		0.2
04130	方铅矿	8 号矿体	白钨矿石英脉		2.2

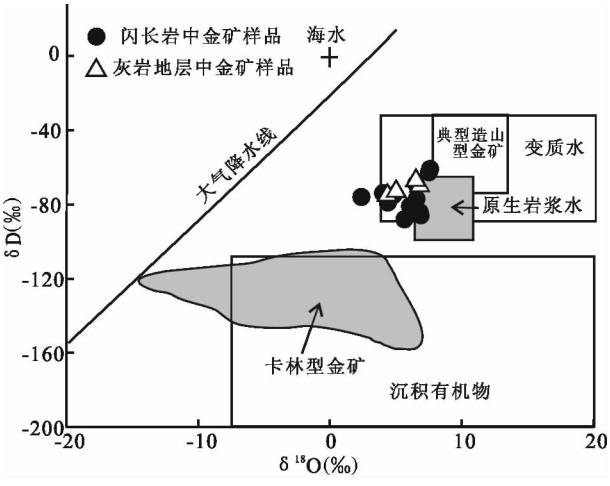


图 2 大坪金矿石英脉流体 δD-$\delta^{18}O$ 同位素组成图(据 Goldfarb *et al.*, 2004 改编)

图中不同成因水的 δD-$\delta^{18}O$ 同位素组成据 Sheppard (1986);卡林型金矿范围据 Field *et al.* (1985)

Fig. 2 Plot of δD vs. $\delta^{18}O$ for ore-forming fluids from Daping gold deposit (Modified after Goldfarb *et al.*, 2004)

Magmatic, metamorphic, and organic (e.g., devolatilization of organic matter in sediments) water fields after Sheppard (1986); fields for Nevada Carlin deposits after Field *et al.* (1985)

(表 1)中可见,晚元古闪长岩岩体中金矿 δD 为-85‰ ~ -60‰,$\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 2.39‰ ~ 7.59‰;D_2m 灰岩地层中金矿 δD 为 -75‰ ~ -67‰,$\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 4.36‰ ~ 6.82‰,显示二者成矿流体 δD-$\delta^{18}O$ 同位素基本一致,可能具有相似的来源和演化过程。

在 δD-$\delta^{18}O$ 图上,闪长岩岩体和 D_2m 灰岩中金矿样品的投点基本重合,多数落在变质水和原始岩浆水之间(图 2),再次证实了大坪金矿的成矿流体主要由来自下地壳的富 CO_2 变质流体和幔源流体组成(孙晓明等,2006c; 熊德信等,2007a;Sun *et al.*, 2009),同时说明大坪金矿的成矿流体组成与围岩的性质没有太大的关系。同时在图 2 上还可见:大坪金矿的落点虽然接近典型造山型金矿 (Goldfarb *et al.*, 2004) 的范围,但更偏向原生岩浆水,显示大坪金矿成矿流体中可能含有较多的地幔流体。

前人对对大坪金矿(主要是闪长岩中金矿体)的成矿流体的氢氧同位素也进行了一些研究:李定谋和李保华(2000)研究表明大坪含金石英脉流体 δD 是 -113‰ ~ -70‰,$\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 3.1‰ ~ 4.3‰;葛良胜等(2007)研究表明含金石英脉流体 δD 变化范围是 -113‰ ~ -64‰, $\delta^{18}O_{H_2O}$ 为 2.9‰ ~ 5.54‰。比较而言,本次研究得出的数据与前人基本一致,但 δD 组成变化范围更小,而 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 组成变化相对较大。

3.2 热液碳酸盐矿物 $\delta^{13}C$-$\delta^{18}O$ 同位素组成

对大坪金矿体中热液碳酸盐矿物的 $\delta^{13}C$-$\delta^{18}O$ 同位素组

成进行了分析(表2),从中可见:(1)闪长岩岩体中金矿石热液方解石的 $\delta^{13}C$ 值为 -4.7‰ ~ -4.6‰, $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 10.8‰~12.0‰;D_2m 灰岩地层中金矿石热液铁白云石的 $\delta^{13}C$ 为 -7.6‰ ~ -2.3‰, 平均 -4.78‰, $\delta^{18}O_{V\text{-}SMOW}$ 为 10.1‰~14.9‰, 两种金矿矿石热液碳酸盐矿物的C同位素组成相差不大;(2)根据热液碳酸盐矿物和水之间氧同位素分馏计算得出的闪长岩岩体中金矿石成矿流体 $\delta^{18}O$ 为 4.4‰ ~ 5.6‰, 灰岩中金矿石为2.93‰~8.50‰,与根据石英-水氧同位素分馏计算得出的成矿流体 $\delta^{18}O$ 组成基本一致,显示这些热液碳酸盐矿物主要形成于金矿的主成矿期。

Ohmoto (1972)的研究显示:在较还原条件下,热液碳酸盐矿物的 $\delta^{13}C$ 应高于或等于成矿流体的C同位素组成。大坪金矿矿石组合和流体包裹体研究均显示其成矿流体的 f_{O_2} 较低(熊德信等,2007a; 张燕等,2009),说明大坪成矿流体的 $\delta^{13}C$ 应高于或接近 -4.78‰。

成矿热液中的碳主要有3种可能来源(田世洪等,2007):(1)地幔射气或岩浆来源。地幔射气和岩浆来源的碳同位素组成 $\delta^{13}C$ 变化范围分别为 -5‰ ~ -2‰和 -9‰ ~ -3‰ (Taylor ,1986);(2)沉积岩中碳酸盐岩的脱气或含盐卤水与泥质岩相互作用。这种来源 $\delta^{13}C$ 变化范围为 -2‰ ~ +3‰,平均集中在0‰左右。海相碳酸盐 $\delta^{13}C$ 大多稳定在0‰左右(Veizer *et al.*, 1980);(3)各种岩石中的有机碳。有机碳一般富集^{12}C,因而碳同位素组成很低,其 $\delta^{13}C$ 变化范围为 -30‰ ~ -15‰,平均为 -22‰ (Ohmoto, 1972; Ohmoto and Rye, 1979)。比较而言,大坪金矿成矿流体的C应主要来自幔源或深源岩浆。

前人对大坪金矿的碳同位素也进行了一些研究:应汉龙(1998)对大坪金矿脉中热液铁白云石的 $\delta^{13}C$ 值进行了分析,得出其 $\delta^{13}C$ 值为 -4.81‰, $\delta^{18}O$ 值为 +13.78% ;毕献武和胡瑞忠和毕献武(1999)研究表明大坪金矿主成矿阶段脉体中热液方解石的 $\delta^{13}C$ 为 -4.48‰ ~ -2.65‰,平均值 -3.75‰,从而提出大坪金矿成矿热液中的碳可能主要是在幔源碳的基础上,有部分地壳碳酸盐碳混入;熊德信等(2007b)对大坪金矿白钨矿和石英单矿物样品进行了流体包裹体 CO_2 碳同位素比值测定,显示大坪成矿流体中 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 为 -6.50‰ ~ -2.51‰,平均为 -4.37‰。上述分析值和本次研究得到的的碳同位素组成非常接近(图3),均接近上地幔部分熔融所形成的原始岩浆值范围(-5‰ ±2‰)的均值,而相对远离沉积碳酸盐岩、有机碳和大气平均 CO_2 的 $\delta^{13}C$ 值(-7‰)(图3),也表明成矿流体中的碳质主要源于幔源或深源岩浆。

在 $\delta^{13}C$-$\delta^{18}O$ 图上(图4),也可发现大坪金矿热液碳酸盐矿物的投点主要落在地幔或原生碳酸岩的范围,而远离沉积碳酸盐和沉积岩中有机碳范围,也进一步说明大坪金矿无论闪长岩中或 D_2m 灰岩中的金矿,其成矿过程中的碳主要来源于幔源或深部岩浆体系,而不是来自围岩。

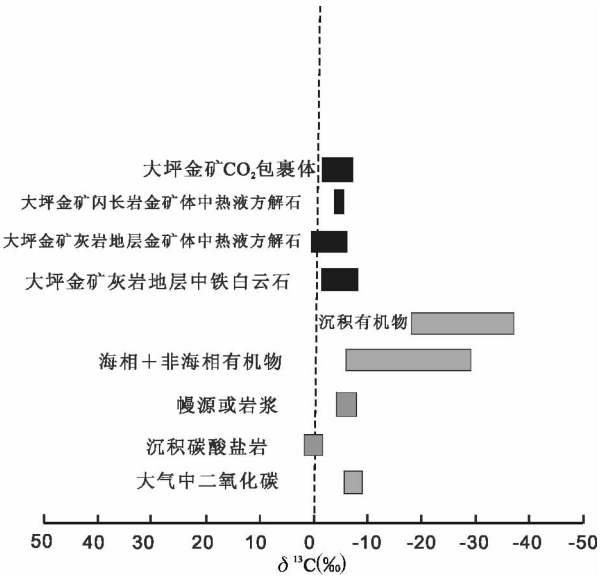


图3 大坪金矿方解石和铁白云石碳同位素组成图(据Hoefs,2004)

Fig. 3 Carbon isotope compositions of calcites and akerite in Daping gold deposit (after Hoefs,2004)

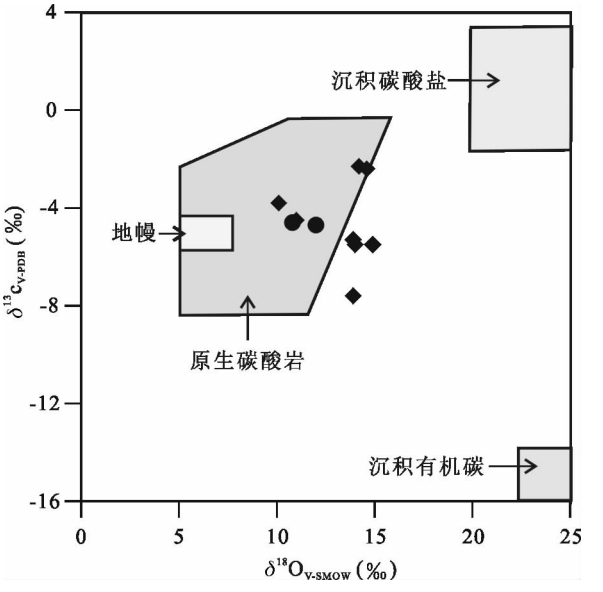


图4 大坪金矿成矿流体C-O同位素组成图(据刘建明等,2003修改)

●为闪长岩中金矿;◆为灰岩地层中金矿

Fig. 4 Diagram of Carbon and oxygen isotopic composition of ore-forming fluids in Daping gold deposit (modified after Liu *et al.*, 2003)

●-gold bodies hosted in diorite batholith; ◆-gold bodies hosted in D_2m carbonate rocks

3.3 成矿流体 $\delta^{34}S$ 同位素组成

Ohmoto(1972)和 Ohmoto and Rye(1979)研究显示,在较还原条件下,矿石矿物中硫化物的 $\delta^{34}S$ 基本等于成矿流体的总 S 的 $\delta^{34}S$ 值。大坪金矿早阶段石英脉中大量石墨的存在(熊德信等,2006b)及白钨矿的稀土元素特征(熊德信等,2006a)均表明原始成矿流体为还原性的流体,成矿流体中硫主要以 HS^-、S^{2-} 形式存在,故大坪热液硫化物的 $\delta^{34}S$ 应与整个流体 $\delta^{34}S$ 近似,即 $\delta^{34}S_{\Sigma S} \approx \delta^{34}S_{硫化物}$。

本次研究得到的大坪金矿黄铁矿和方铅矿的 $\delta^{34}S$ 同位素分析结果如表 3,结果显示,闪长岩中金矿脉黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值变化相对较大,为 -2.8‰~7.6‰,平均 3.1‰,方铅矿 $\delta^{34}S$ 值为 -0.8‰~6.3‰,平均 2.0‰;D_2m 灰岩地层中金矿黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 2.2‰~10.2‰,平均 6.5‰。对于同一矿床同一采样点处样品中的不同硫化物之间,$\delta^{34}S$ 值的变化顺序为黄铁矿 > 方铅矿,说明不同的硫化物之间硫同位素达到了平衡,可以利用硫同位素值来估算硫化物形成时的温度。

根据同位素平衡分馏方程 $1000\ln\alpha_{黄铁矿\text{-}方铅矿} = 1.1 \times 10^6 T^{-2}$(Kajiwara and Krouse, 1971)计算了黄铁矿-方铅矿之间同位素分馏平衡时的温度,得出富硫化物石英脉阶段硫化物形成的平衡温度为 304℃,与流体包裹体测温的全均一温度基本一致(张燕等,2009)。

地球上硫同位素主要有 3 个储存库,一是幔源硫($\delta^{34}S = 0 \pm 3‰$)(Chaussidon and Lorand, 1990);二是海水硫,现代海水中 $\delta^{34}S \backsimeq 20‰$;第三种是沉积物中还原硫,这种硫的同位素主要以具有较大的负值为特征(Rollinson, 1993)。比较而言,大坪金矿硫化物 S 的同位素组成相对靠近幔源 S,显示成矿流体 S 主要来自幔源岩浆,但个别样品出现 S 同位素副值,显示其中可能混入沉积岩中的还原态 S。

前人对大坪金矿闪长岩中金矿脉硫化物的 S 同位素组成也进行了分析,如韩润生和金世昌(1994)的研究表明,大坪金矿硫化物(黄铁矿、方铅矿、黄铜矿和闪锌矿)的 $\delta^{34}S$ 为 -4.0‰~11.1‰,以正值为主,且具有一定的塔式效应;胡瑞忠等(1998)测得大坪黄铁矿和方铅矿的 $\delta^{34}S$ 为 -1.57‰~6.55‰,平均 2.30‰;应汉龙(1998)测得大坪硫化物的 $\delta^{34}S$值为 0.5‰~6.6‰,平均 3.96‰;葛良胜等(2007)对大坪黄铁矿和方铅矿的 $\delta^{34}S$ 进行了测定,得出 0.3‰~4.9‰,平均 2.74‰。上述分析结果与本此测定结果基本一致,也显示大坪金矿区成矿过程中的 S 主要源于地幔,但局部有沉积岩中有机 S 的混入。

3.4 成矿机制探讨

前人对大坪闪长岩岩体中金矿的成因和成矿流体来源进行了较系统的研究,多数学者认为该矿为喜马拉雅造山运动早期拉张构造背景下,深源地幔流体上升,和地壳浅部的大气饱和水混合,由于温压等物理化学条件的改变引起矿石矿物的沉淀,成矿物质主要来自加里东期的闪长岩围岩(金

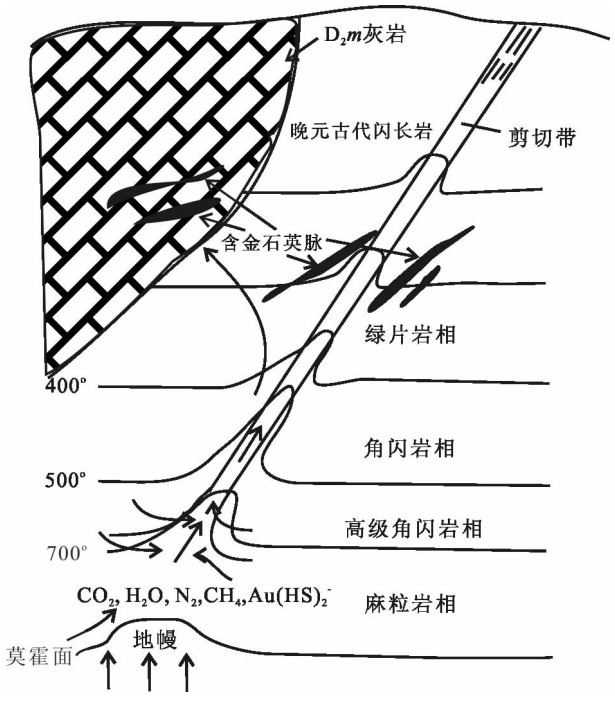


图 5 大坪金矿成矿模式图

Fig. 5 Metallogenic model of Daping gold deposit

世昌和韩润生,1994;胡云中等,1995;韩润生等,1997;应汉龙,1998;毕献武和胡瑞忠,1999;Burnard *et al.*, 1999),但作者等最近研究发现,大坪含金石英脉中存在大量麻粒岩相高结晶度的石墨微粒,显示大坪成矿流体和成矿物质部分来自下地壳,大坪白钨矿 Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位素研究以及其中大量含 N_2 纯 CO_2 包裹体的发现也证实此点(熊德信等,2006a)。惰性气体同位素研究再次证实大坪金矿成矿流体中除了深源地幔流体外,还有富 ^{40}Ar、^{136}Xe 和 ^{4}He 的地壳流体组份,而基本不含大气成分,因此,大坪金矿的形成应与哀牢山金矿带的壳幔相互作用有关(孙晓明等,2006c; Sun *et al.*, 2009)。本次的研究证实大坪金矿 D_2m 灰岩地层中的金矿具有相似的成矿流体来源和成因机制,金矿主要受到区域性韧性剪切带的次级脆性构造的控制,围岩不是主要的控矿因素。其成矿过程大致是:距今约 33Ma 的喜马拉雅构造活动早期,由于欧亚板块碰撞产生侧向挤压,使本区沿红河断裂带形成大型左旋走滑剪切带,在拉张和强烈韧性剪切条件下,莫合面上升,地幔物质上涌,发生强烈排气作用,并对下地壳进行热烘烤,地幔排气形成的深源地幔流体和下地壳脱水形成的富 CO_2 流体混合,沿韧性剪切带上升,成矿流体一部分向闪长岩中的次级构造破碎带流动,并与受到韧性剪切和糜棱岩化的闪长岩围岩发生水岩反应,局部发生沸腾作用,导致成矿流体物理化学条件的改变和矿石矿物的沉淀,最后在剪切带张性构造中形成白钨矿硫化物含金石英脉,另一部分流体流向 D_2m 灰岩地层中的次级构造破碎带,在其中由于温度压力的下降,形成含金碳酸盐硫化物石英脉,其成矿模式见图 5。

4 结论

成矿流体 H-O-C-S 同位素研究显示,大坪金矿中两类主要金矿类型(晚元古代闪长岩中和 D_2m 灰岩地层中金矿)可能具有相似的成矿物质来源和成矿机制,围岩不是该金矿的主要控矿因素。其成矿流体主要由含 CO_2 的变质流体组成,但有幔源流体的加入。金矿的成矿与喜马拉雅早期哀牢山金矿带强烈的壳幔相互作用有关,在拉张和强烈韧性剪切条件下,地幔排气形成的深源地幔流体和下地壳脱水形成的富 CO_2 流体混合,沿韧性剪切带上升,并分别在闪长岩和灰岩地层中的构造破碎带中形成含金矿脉。

致谢 野外工作得到云南省地质调查局李文昌局长和云南元阳大坪金矿杨夕辉总经理的大力支持,矿区资料的收集工作得到云南元阳大坪金矿地质科、云南省地质调查局、云南省地质矿产勘查开发局、武警黄金部队第十支队的大力帮助;美国地质调查所 Richard Goldfarb 博士给予了指导。核工业北京地质研究院刘汉彬老师和中国国家地质测试中心同位素实验室万德芳老师等在同位素测定中给予了大力协助,在此一并表示感谢!

References

Bi XW and Hu RZ. 1999. Mineralizer source and its constraint on gold mineralization of the Daping gold deposit, Yunnan. Acta Mineralogica Sinica, 19(1): 28 – 33 (in Chinese with English abstract)

Burnard PG, Hu RZ, Turner G *et al.* 1999. Mantle, crustal and atmospheric noble gases in Ailaoshan gold deposits, Yunnan Province, China. Geochimica et Cosmochimica Acta, 63(10): 1595 – 1604

Chaussidon M and Lorand JP. 1990. Sulphur isotope composition of orogenic spinel lherzolite massifs from Ariege (North-Eastern Pyrenees, France): An ion microprobe study. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54: 2835 – 2846

Clayton RN, O'neil JR and Mayeda TK. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water. Journal of Geophysical Research, B77: 3057 – 3067

Field CW and Fifarek RH. 1985. Light stable-isotopes systematics in the epithermal environment. Reviews in Economic Geology, 2: 99 – 128.

Friedman I and O´Neil JR. 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. U. S. Washington: Gov. Printing Office, Sixth Edition, Chapter KK

Ge LS, Deng J, Yang LQ *et al.* 2007. Geology and geochemistry of Daping super-large gold-polymetallic deposit in Yunnan Province, China. Geology and Prospecting, 43(3): 17 – 24 (in Chinese with English abstract)

Goldfarb RJ, Ayuso R, Miller ML *et al.* 2004. The Late Cretaceous Donlin Creek gold deposit, southwestern Alaska: Controls on epizonal ore formation. Economic Geology, 99(4): 643 – 671

Han RS and Jin SC. 1994. Genesis and criteria for ore prospecting in the Yuanyang gold deposit, Yunnan Province. Geological Exploration and Non-ferrous Metals, 3(4): 218 – 222 (in Chinese with English abstract)

Han RS, Jin SC and Lei L. 1997. Geochemistry of ore-forming hydrothermal system of Daping reworked gold deposit, Yuanyang, Yunnan. Acta Mineralogica Sinica, 17(3): 337 – 344 (in Chinese with English abstract)

Hoefs J. 2004. Stable Isotope Geochemistry. 5th Edition. Berlin: Springer-Verlag, 1 – 244

Hu RZ, Bi XW, He MY *et al.* 1998. Mineralizer constraint on gold mineralization of Ailaoshan gold belt. Science in China (Series D), 28(Supp.1): 24 – 30 (in Chinese)

Hu RZ and Bi XW. 1999. He and Ar isotope geochemistry of ore-forming fluid in Ailaoshan gold metallogenic belt. Science in China (Series D), 29(4): 321 – 330 (in Chinese)

Hu YZ, Tang SC, Wang HP *et al.* 1995. Geology of Gold Deposits in Ailaoshan. Beijing: Geological Publishing House, 194 – 206 (in Chinese)

Jin SC and Han RS. 1994. Geochemical characteristics of metallogenic hydrothermal system of the reformed deposit. Yunnan Geology, 13(1): 17 – 22 (in Chinese with English abstract)

Kajiwara Y and Krouse HR. 1971. Sulfur isotope partitioning in metallic sulfide systems, Canadian. Journal of Earth Science, 8: 1397 – 1408

Li DM and Li BH. 2000. The mineralization conditions of Ailaoshan gold deposits in Yunnan. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 20(1): 60 – 77 (in Chinese with English abstract)

Liu JM, Ye J, Xu JH *et al.* 2003. C-O and Sr-Nd isotopic compositions of carbonate minerals from gold deposits in East Shangdong, China. Acta Petrologica Sinica, 19(4): 775 – 784 (in Chinese with English abstract)

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

Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits. Economic Geology, 67: 551 – 578

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

Rollinson HR. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman, U K, 1 – 352

Sheppard SMF. 1986. Characterization and isotopic variations in natural waters. Reviews in Mineralogy, 16: 165 – 183

Sun XM, Shi GY, Xiong DX *et al.* 2006a. ^{39}Ar-^{40}Ar dating of Daping ductile shear zone hosted gold deposit, Yunnan Province, China. Acta Geologica Sinica, 81(1): 88 – 92 (in Chinese with English abstract)

Sun XM, Xiong DX, Shi GY *et al.* 2006b. Crust-mantle interaction in the Ailaoshan gold belt and its contribution to gold mineralization: A case study of Daping gold mine in Yunnan Province, China. In: Chen J (ed.). Research Progress in Geology and Geochemistry. Nanjing: Nanjing University Press, 269 – 279 (in Chinese with English abstract)

Sun XM, Xiong DX, Shi GY *et al.* 2006c. Noble gas isotopic compositions of scheelites in Daping gold mine in Yunnan Province, China, and their metallogenic significances. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 725 – 732 (in Chinese with English abstract)

Sun XM, Shi GY, Xiong DX *et al.* 2007. Platinum group elements geochemistry and Re-Os isotopic compositions and their metallogenic implications of Daping gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunnan Province, China. Acta Geologica Sinica, 81(3): 394 – 404 (in Chinese with English abstract)

Sun XM, Zhang Y, Xiong DX *et al.* 2009. Crust and mantle contributions to gold-forming process at the Daping deposit, Ailaoshan gold belt, Yunnan, China. Ore Geology Reviews, 36(1 – 3): 235 – 249

Taylor BE. 1986. Magmatic volatiles: Isotope variation of C, H and S. In: Stable Isotopes in High Temperature Geological Process. Mineralogical Society of America. Reviews in Mineralogy, 16: 185 – 226

Tian SH, Hou ZQ, Yang ZS *et al.* 2007. REE and stable isotope

geochemical characteristics of the Mashan Au-S deposit in Tongling, Anhui Province. Acta Geologica Sinica, 81(7): 929 – 938 (in Chinese with English abstract)

Veizer J, Holser WT and Wilgus CK. 1980. Correlation of $^{13}C/^{12}C$ and $^{34}S/^{32}S$ secular variation. Geochimica et Cosmochimica Acta, 44: 579 – 588

Xiong DX, Sun XM, Shi GY *et al*. 2006a. Trace elements, REE and Nd-Sr isotopic compositions in scheelites and their significances for the mineralization in Daping gold mine in Yunnan Province, China. Acta Petrologica Sinica, 22(3): 733 – 741 (in Chinese with English abstract)

Xiong DX, Sun XM, Zhai W *et al*. 2006b. Graphite inclusions with high crystallinity in the auriferous quartz veins from Daping gold deposit in Yunnan Province, China: Evidence for involvement of metamorphic fluid from granulite-facies lower crust in the mineralization. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1448 – 1456 (in Chinese with English abstract)

Xiong DX, Sun XM, Zhai W *et al*. 2007a. CO_2-rich fluid inclusions in auriferous quartz veins from the Daping ductile shear zone hosted gold deposit in Yunnan Province, China, and its implications for gold mineralization. Acta Geologica Sinica, 81(5): 640 – 653 (in Chinese with English abstract)

Xiong DX, Sun XM, Shi GY *et al*. 2007b. Geochemistry and Metallogenic Model of Ailaoshan Cenozoic Orogenic Gold Belt in Yunnan Province, China. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 144 (in Chinese with English abstract)

Ying HL. 1998. The Geochemistry characteristics of wall rock alteration and isotopes of the Daping gold deposit. Gold Science and Technology, 16(4): 14 – 23 (in Chinese with English abstract)

Zhang Y, Sun XM, Shi GY *et al*. 2009. Fluid inclusions and H-O isotopic compositions of Daping Cenozoic orogenic type gold deposit in Yunnan Province, China. Mineral Deposits, 28(S): 13 – 27 (in Chinese with English abstract)

Zhang Y, Sun XM, Shi GY *et al*. 2010. SHRIMP U-Pb dating of zircons from diorite batholith hosting Daping Cenozoic orogenic gold deposit in Ailaoshan gold belt, Yunan Province, China. Acta Petrologica Sinica (in press)

Zheng YF. 1999. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. Geochemical Journal, 33: 109 – 126

附中文参考文献

毕献武，胡瑞忠. 1999. 云南大坪金矿床矿化剂来源及其对金成矿的制约. 矿物学报，19(1)：28 – 33

葛良胜，邓军，杨立强等. 2007. 云南大坪超大型金多金属矿床地质地球化学特征. 地质与勘探，43(3)：17 – 24

韩润生，金世昌. 1994. 云南元阳金矿床成因及找矿标志. 有色金属矿产与勘查，3(4)：218 – 222

韩润生，金世昌，雷丽. 1997. 云南元阳大坪改造型金矿床的成矿热液系统地球化学. 矿物学报，17(3)：337 – 344

胡瑞忠，毕献武，何明友等. 1998. 哀牢山金矿带矿化剂对金成矿的制约. 中国科学(D 辑)，28(增)：24 – 30

胡瑞忠，毕献武. 1999. 哀牢山成矿带成矿流体的 He 和 Ar 同位素地球化学. 中国科学(D 辑)，29(4)：321 – 330

胡云中，唐尚鹑，王海平等. 1995. 哀牢山金矿地质. 北京：地质出版社，194 – 260

金世昌，韩润生. 1994. 改造型矿床的成矿热液系统的地球化学特征——以元阳金矿床为例. 云南地质，13(1)：17 – 22

李定谋，李保华. 2000. 云南哀牢山金矿床的成矿条件. 沉积与特提斯地质，(1)：60 – 77

刘建明，叶杰，徐九华等. 2003. 胶东金矿床碳酸盐矿物的碳-氧和锶-钕同位素地球化学研究. 岩石学报，19(4)：775 – 784

孙晓明，石贵勇，熊德信等. 2006a. 云南哀牢山金矿带大坪剪切带型金矿成矿 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 定年. 地质学报，81(1)：88 – 92

孙晓明，熊德信，王生伟等. 2006b. 壳幔相互作用及其对哀牢山金矿带金成矿的贡献：以云南大坪金矿为例. 见：陈骏主编. 地质地球化学研究进展. 南京：南京大学出版社，269 – 279

孙晓明，熊德信，石贵勇等. 2006c. 云南大坪金矿白钨矿惰性气体同位素组成特征及其成矿意义. 岩石学报，22(3)：725 – 732

孙晓明，石贵勇，熊德信等. 2007. 云南哀牢山金矿带大坪金矿铂族元素(PGE)和 Re-Os 同位素地球化学及其矿床成因意义. 地质学报，81(3)：394 – 404

田世洪，侯增谦，杨竹森等. 2007. 安徽铜陵马山金硫矿床稀土元素和稳定同位素地球化学研究. 地质学报，81(7)：929 – 938

熊德信，孙晓明，石贵勇等. 2006a. 云南大坪金矿白钨矿微量元素、稀土元素和 Sr-Nd 同位素组成特征及其意义. 岩石学报，22(3)：733 – 741

熊德信，孙晓明，翟伟等. 2006b. 云南大坪金矿含金石英脉中高结晶度石墨包裹体：下地壳麻粒岩相变质流体参与成矿的证据. 地质学报，80(9)：1448 – 1456

熊德信，孙晓明，翟伟等. 2007a. 云南大坪韧性剪切带型金矿富 CO_2 流体包裹体及其成矿意义. 地质学报，81(4)：640 – 653

熊德信，孙晓明，石贵勇. 2007b. 云南哀牢山喜马拉雅期造山型金矿带矿床地球化学及成矿模式. 北京：地质出版社，1 – 144

应汉龙. 1998. 云南大坪金矿床围岩蚀变和同位素地球化学特征. 黄金科学技术，16(4)：14 – 23

张燕，孙晓明，石贵勇等. 2009. 云南大坪喜马拉雅期碰撞造山型金矿流体包裹体特征及其 H-O 同位素组成. 矿床地质，28(增)：13 – 27

张燕，孙晓明，石贵勇等. 2010. 云南大坪金矿床赋矿闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报（待刊）