

doi: 10.12029/gc20190620

辛存林, 徐明儒, 安国堡, 胡菊英, 杨涛, 董凯. 2019. 川西南马头山铜金矿床地质和流体包裹体特征及成因[J]. 中国地质, 46(6): 1556–1572.
Xin Cunlin, Xu Mingru, An Guobao, Hu Juying, Yang Tao, Dong Kai. 2019. Deposit geology, fluid inclusion characteristics and ore genesis of the Matoushan Cu–Au deposit in Southwest Sichuan Province[J]. Geology in China, 46(6): 1556–1572(in Chinese with English abstract).

川西南马头山铜金矿床地质和流体包裹体特征及成因

辛存林¹, 徐明儒¹, 安国堡², 胡菊英³, 杨涛¹, 董凯⁴

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 四川省核工业地质局二八二大队, 四川 德阳 618000;
3. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 马头山铜金矿床位于康定—锦屏山矿集区, 处于锦屏山断裂与康定—水城断裂的交汇部位, 是川西南地区新发现的中型铜金矿床。矿体呈现为硫化物石英脉状, 赋存于泥盆系泥质粉砂质板岩、碳酸盐泥晶灰岩和二叠系变质玄武岩中, 受断裂构造控制, 矿石中硫化物矿物多见黄铁矿、斑铜矿、黄铜矿、方铅矿等。矿石中石英原生流体包裹体观测和激光拉曼光谱分析显示, 马头山铜金成矿流体为 H₂O–CO₂–NaCl 体系, 均一温度 108.1~439.1℃, 盐度 3.55%~22.78% NaCleq, 密度 0.51~1.12 g/cm³, 主成矿阶段流体包裹体具有中低温、中低盐度、低密度、富含 CO₂ 的特征。矿石中硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}=-4.6\text{‰}\sim 8.4\text{‰}$, 具有岩浆来源硫的特征, 石英脉中原生流体包裹体的 $\delta\text{D}=-78.8\text{‰}\sim -48.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}=-2.1\text{‰}\sim 9.3\text{‰}$, 白云石的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}=-5.3\text{‰}\sim 1.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}=19.4\text{‰}\sim 25.9\text{‰}$, 表明成矿流体主要为岩浆水, 并有地层流体和大气水加入。综合矿床地质特征、流体包裹体特征和 S、C、O、H 同位素证据, 认为马头山铜金矿床为中低温–岩浆热液型铜金矿床。

关键词: 流体包裹体; 稳定同位素; 热液; 马头山; Cu–Au 矿床; 冕宁; 地质调查工程

中图分类号: P618.41; P618.51; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2019)06–1556–17

Deposit geology, fluid inclusion characteristics and ore genesis of the Matoushan Cu–Au deposit in Southwest Sichuan Province

XIN Cunlin¹, XU Mingru¹, AN Guobao², HU Juying³, YANG Tao¹, DONG Kai⁴

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. No. 282 Geological Party, Sichuan Bureau of Geology for Nuclear Industry, Deyang 618000, Sichuan, China; 3. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730071, Gansu, China; 4. College of Geography and Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The Matoushan copper–gold deposit is located in the Kangding–Jinping mountain metallogenic concentration area. It is located in the junction of the Jinping–kangding–Shuicheng fault. It is a one of medium–size copper gold deposit in Southwest Sichuan Province. Ore bodies was presented as sulfide quartz vein, which occur in Devonian carbonated mudstone limestone and Permian metamorphic basalt. They are obviously controlled by structures. Pyrite, bornite, chalcopyrite and galena are common

收稿日期: 2018–07–30; 改回日期: 2018–12–27

基金项目: 中国地质调查局区域地质调查项目(K15–1–LQ17)、国家自然科学基金项目(41262001)联合资助。

作者简介: 辛存林, 男, 1967年生, 教授, 硕士生导师, 主要从事地质矿产方面研究; E-mail: xincunling@163.com。

sulfide minerals in the ore. The observation of primary fluid inclusions of quartz in the ore and Laser Raman spectroscopy analysis show that, the ore-forming fluid of Matoushan Cu-Au deposit is a system of H₂O-CO₂-NaCl, the average temperature of fluid inclusions ranged from 108.1 to 439.1°C, and the salinity ranged from 3.55% to 22.78% NaCleq with a density ranged of 0.51 to 1.12 g/cm³, the fluid inclusions at the major metallogenic stage has the characteristics of medium temperature, medium-low salinity, low density, and rich in CO₂. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ was -4.6‰ to 8.4‰ of sulfide minerals in ores, indicating that the characteristics of S isotopic are from the magmatic; the primary fluid inclusions in quartz veins are $\delta\text{D} = -78.8\text{‰} - -48.7\text{‰}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = -2.1\text{‰} - -9.3\text{‰}$, the carbon and oxygen isotopic compositions of the dolomite are $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}} = -5.3\text{‰} - -1.7\text{‰}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}} = 19.4\text{‰} - 25.9\text{‰}$, which indicates that the ore-forming fluid is magmatic water-mixed with meteoric water and formation fluid. Based on the geological features of ore deposit, fluid inclusions and the isotopic evidence of S, C, O and H, it can be concluded that the Matoushan copper-gold deposit belongs to the type of medium-low temperature-magmatic hydrothermal Cu-Au deposit.

Key words: fluid inclusions; stable isotopes; hydrothermal liquid; Matoushan; Cu-Au deposit; Mianning; geological survey engineering

About the first author: XIN Cunlin, male, born in 1967, professor, mainly engages in the study of geology and mineral resources; E-mail: xincunling@163.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey(No. K15-1-LQ17), National Natural Science Foundation of China (No. 41262001).

1 引言

川西南冕宁地区位于扬子板块西南缘、康滇地轴北部,是中国金、铜、稀土矿的重要产区。近些年来,随着矿产勘查力度的加大,在该矿集区内发现了诸多具有重要意义的矿床,如巴丹燕子沟、金林、张家坪子等大型—中小型金矿床,牦牛坪、冕宁—德昌等稀土矿床(骆耀南等,2001;李晓峰等,2005;侯增谦,2006)。已有的研究表明,扬子地台西缘的大型铜金多金属矿床的成矿作用与裂谷构造、韧性剪切带、构造破碎带、变质变形作用、造山带密切相关,其在“叠加裂谷-多源-热水”三种作用下发生成矿(刘肇昌等,1995;葛茂先,1996;黎功举等,1996;吴键民等,1996;喻安光等,1997;王小春等,1999;侯林等,2010)。前人对紧邻马头山铜金矿床的冕宁金林金矿、张家坪子金矿等金矿床的成矿流体和成矿物质来源研究显示,其成矿流体主要为岩浆水与大气降水混合的H₂O-CO₂-NaCl体系,成矿物质以幔源为主(杨铸生等,1986;辛存林等,2016)。以上这些研究成果加深了笔者对该区域大地构造与成矿系统间的关系、矿床地质特征、成矿物质与成矿流体来源、矿床成因等问题的认识。

马头山铜金矿床位于四川省冕宁县西约25 km处,四川省核工业地质局在2012—2016年对其进行了普查和详查,该矿床成矿潜力较大,矿床规模有望达到中型。本文在野外地质调查的基础上,采集相应样品,研究了马头山矿床的地质特征、流体包

裹体特征、稳定同位素地球化学特征,探讨了成矿物质与成矿流体来源,分析了矿床成因类型,为矿床的后续勘查和研究提供理论依据。

2 区域地质背景

马头山Cu-Au矿床大地构造位置处于扬子地台西南缘,以小金河—中甸断裂为界,西北部为松潘甘孜褶皱系,南东部为扬子地台川滇黔菱形地块盐源—丽江裂陷带。区域内出露的地层主要有泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系及少量的第四系堆积物,泥盆系为一套浅海滨海相的碎屑岩及碳酸盐建造;石炭系出露的地层为黄龙组,岩性为硅质条带结晶灰岩;二叠系分为下二叠统和中二叠统,前者为浅海相碳酸盐建造,后者为夹少量角砾岩和凝灰岩的峨眉山玄武岩;三叠系出露的地层主要为岩塘组,其下段岩性为灰绿色片岩,上段为灰色、黑色层状结晶灰岩。区内构造形迹以断裂构造和褶皱构造为主,断裂构造主要有NNE向的锦屏山断裂、青纳断裂和马头山断裂;褶皱构造的形态相对简单,有司依诺背斜、马路塘向斜和牦牛坪背斜,断裂和褶皱轴向均为NNE(图1)。

区域内岩浆活动强烈,地层中广泛分布二叠纪、三叠纪火山岩。二叠纪峨眉山玄武岩,在箐河—程海断裂以西为典型海相玄武岩,是峨眉地幔柱演化过程晚阶段的喷发产物(刘平等,2008);三叠纪玄武岩呈透镜体或层状、似层状夹于中三叠统盐塘组下段中。区域内南部的里庄一带分布有印支

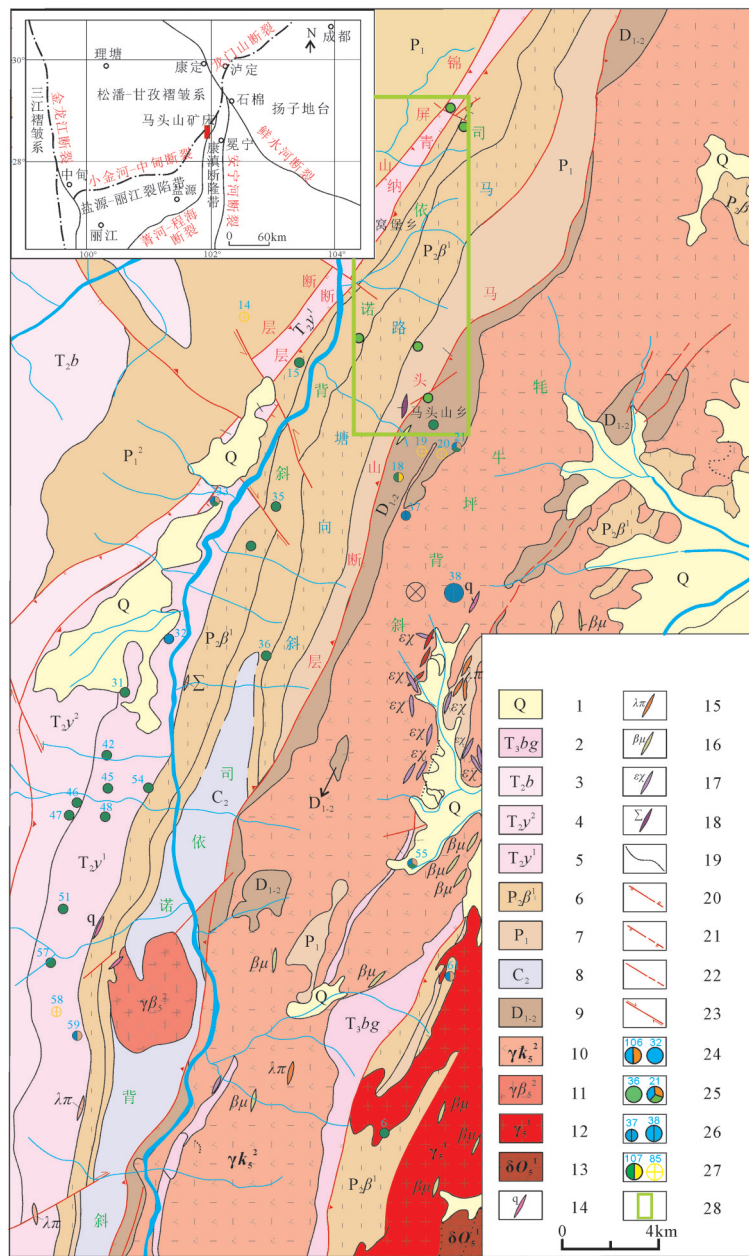


图1 马头山铜金矿床区域地质图(据四川省核工业地质局,2016[●]改绘)

1—第四系;2—上三叠统白果湾组;3—中三叠统白山组;4—中三叠统岩塘组上段;5—中三叠统岩塘组下段;6—中二叠统峨眉山玄武岩下段;
7—下二叠统;8—上石炭统;9—中下泥盆统;10—燕山期钾长花岗岩;11—燕山期黑云母花岗岩;12—印支期花岗岩;13—印支期石英闪长岩;
14—石英脉;15—霏细岩脉;16—辉绿岩脉;17—云煌岩脉;18—超基性岩脉;19—地质界线;20—正断层;21—逆断层;22—性质不明断层;
23—平推断层;24—铅锌/铅矿化点及编号;25—铜\多金属矿化点及编号;26—钼矿点/矿床及编号;27—铜金/金矿化点及编号;28—马头山矿床

Fig. 1 Regional geological map of the Matoushan Cu-Au deposit (modified from Sichuan Bureau of Geology for Nuclear Industry, 2016[●])

1—Quaternary; 2—Upper Triassic baiguowan formation; 3—Middle Triassic baishan formation; 4—Upper member of middle Triassic yantang formation; 5—Lower member of middle Triassic yantang formation; 6—Lower member of middle Permian emeishan basalt formation; 7— Lower Permian; 8— Upper Carboniferous; 9— Middle-lower Devonian; 10— Yanshanian K- feldspar granite; 11—Yanshanian biotite granite; 12—Indosinian granite; 13—Indosinian quartz diorite; 14—Quartz vein; 15—Felsite vein; 16—Dolerite vein; 17—Fraidronite vein; 18—Ultrabasic rocks vein; 19—Geological boundary; 20—Normal fault; 21—Strike fault; 22—Unidentified fault; 23—Blatt fault; 24—Pb-Zn/Pb mineralization and number; 25—Cu\polymetal mineralization and number; 26—Mo mineralization\Mo deposit and number; 27—Cu-Au/Au mineralization and number; 28—Matoushan deposit

期(晚三叠世)花岗岩、燕山期(白垩纪)黑云母花岗岩和喜马拉雅期富稀土碱性杂岩等(图1)。

3 矿床地质特征

矿床位于二叠纪玄武岩西岩区,为典型海相玄武岩,岩性为杏仁状、气孔状辉石玄武岩和斜长石玄武岩。5件玄武岩样品化学分析结果表明(表1), SiO_2 含量为43.54%~47.48%,平均46.03%;全碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)含量为0.84%~5.86%,平均3.2%, Na_2O 含量为0.56%~3.69%,平均2.31%, K_2O 含量为0.28%~2.87%,平均0.89%, Na_2O 含量高于 K_2O 含量,除XWH02号样品的里特曼指数 σ 为3.6外,其余为0.3~1.59,表明其为钙碱性系列玄武岩; Al_2O_3 含量为9.71%~17.16%,平均13.87%,铝饱和指数 A/CNK (0.92~7.67)显示其为的一套偏铝质到过铝质玄武岩。马头山矿床的玄武岩与204个峨嵋山玄武岩(主要为石英拉斑玄武岩和橄榄拉斑玄武岩)样品的平均值(邱家骧,1985)相比,岩石更偏基性;与玄武岩中元素的平均含量相比(赵伦山,1988),岩石Cu、Au、Ag含量变化较大,分异明显,平均值偏高。

矿区内由老到新依次出露泥盆系中下统、二叠系下统及中统和三叠系中统。泥盆系中下统为浅海—滨海相的碎屑岩和碳酸盐岩;二叠系下统下段岩性以泥质板岩为主夹泥灰岩薄层,上段主要岩性为结晶灰岩、变质砂岩与板岩;二叠系中统在矿区分布广泛,岩性主要为玄武岩,三叠系中统岩性主要为灰色、灰白色结晶灰岩,它们均为矿体的赋矿围岩。区内断层分布较多,主要为NNE向、NE向和NW向断裂。NNE向构造规模大,控制了区内地层和矿体的展布(图2a)。

马头山铜金矿床自北而南划分为I、II、III三个矿段,圈出规模较大的铜金矿体6个。各矿体严格受断裂控制,I矿段(图2b、c)以Cu矿化为主,Au次之;II矿段以Cu和Ag为主,Au次之;III矿段III-1为单一Cu矿体,III-2矿体以Cu和Ag为主,Au具有综合利用的价值,矿床内主要矿体的基本特征见表2。矿石的自然类型以硫化矿石为主,氧化矿石次之,矿石中金属矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、方铅矿、铜蓝、辉铜矿、蓝辉铜矿、孔雀石、蓝铜矿、氯铜矿,脉石矿物有石英、玉髓、绿泥石、绢云母、白云母、方解石、白云石、斜长石(包括

钠长石)、钾长石。矿石结构复杂,主要有半自形、自形和他形晶的粒状、鳞片状变晶结构(图3a);交代残余结构;变余凝灰结构(图3b)、变余泥质结构(图3c);角砾状结构(图3d)和碎裂结构。矿石构造主要为浸染状(图3e)、脉状(图3f)、网脉状、块状(图3b)等。矿体围岩蚀变包括广泛发育于火山岩和板岩中的面型蚀变和沿构造破碎带发育的线型蚀变两种类型。线型蚀变主要见于矿体及两侧近矿蚀变围岩中,在矿体及其外围形成带状分布的蚀变褪色带,是深色岩石在发生热液蚀变后,岩石中的大量铁镁组分淋失,深色矿物消失,岩石颜色变浅的结果,并可以此作为找矿标志。面型蚀变主要蚀变类型有绿泥石化、碳酸盐化、硅化、钠长石化、绢云母化和黄铁矿化等,其中,黄铁矿是矿床内最主要的载金矿物,也是区内最重要的找矿标志。

根据矿石中矿物的生成顺序和共生组合(图4)、矿脉的穿插、交代充填关系,可将成矿过程划分为两期5个阶段(图5),即热液成矿期和表生期。其中,热液成矿期是区内的主要成矿期,可划分为4个阶段:S1——石英—中粗粒黄铁矿阶段,形成的主要矿物为石英和少量的赤铁矿、中粗粒黄铁矿;S2——石英—细脉状黄铁矿阶段,该阶段是区内铜金矿化开始形成的阶段,所形成的细粒状黄铁矿是最主要的载金矿物。以出现钠长石—黄铁矿—黄铜矿—磁黄铁矿—辉铜矿组合为特征。该阶段和早期的石英—中粗粒黄铁矿阶段所形成的金属矿物多被后期多金属硫化物和方解石脉穿插交代。S3——石英—多金属硫化物阶段,在中低温条件下,成矿流体中金属矿物大量析出,包括黄铜矿、磁黄铁矿、斑铜矿、黝铜矿、辉铜矿和方铅矿等,是铜金成矿最主要的阶段。S4——碳酸盐阶段,以发育后期热液脉为特征。

4 样品选取与分析方法

4.1 流体包裹体分析

本文流体包裹体样品主要采自马头山矿床I、III两个矿段矿体的热液期S1~S3阶段的石英与方解石。

石英与方解石的单个包裹体显微测温在核工业北京地质研究院地质矿产研究所的包裹体显微测温实验室完成。测试仪器为英国LINKAM THMS 600型显微冷热台,测定温度范围为-196~

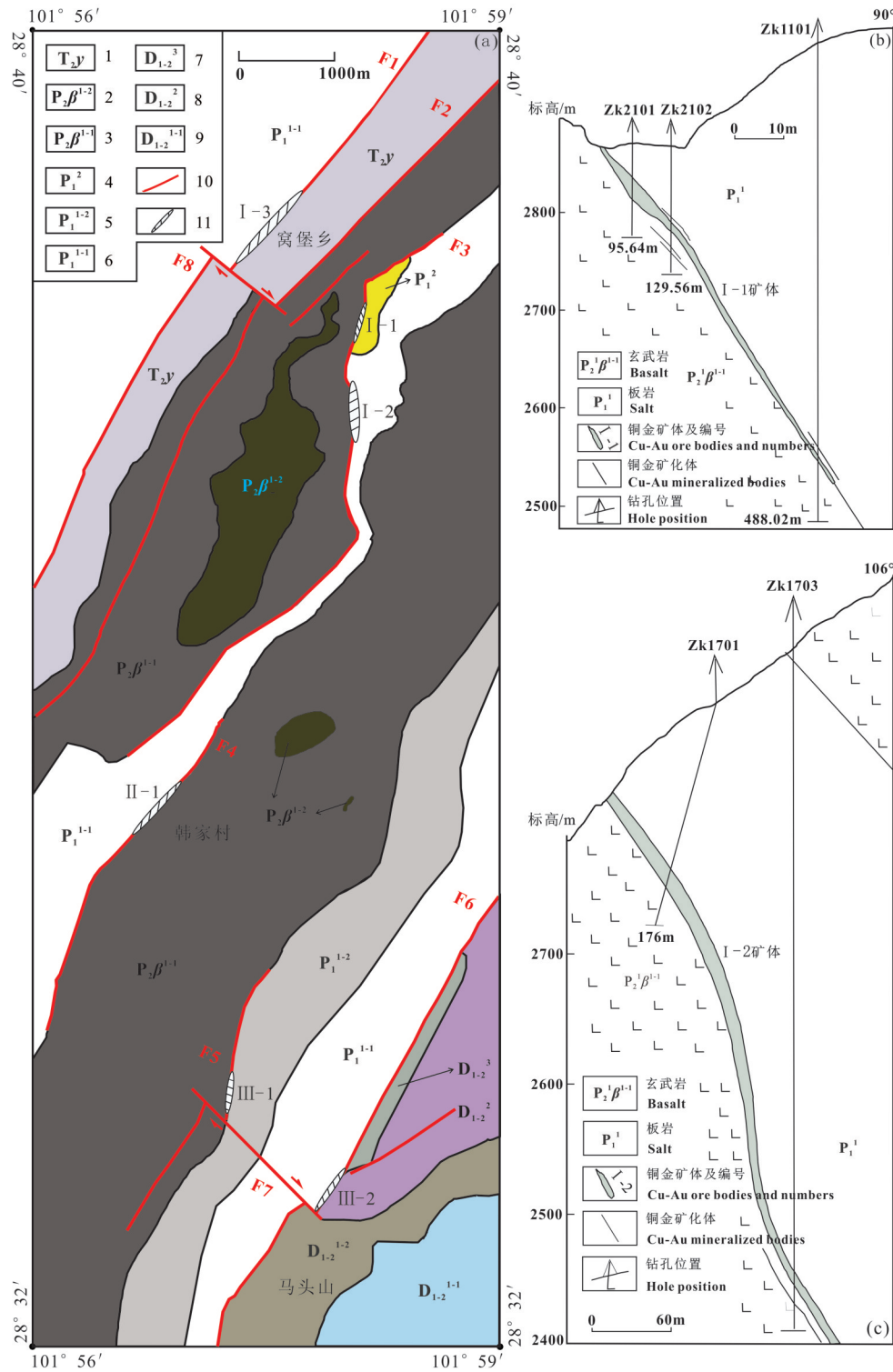


图2 马头山铜金矿床地质简图(a)与 I 矿段 17号(b)、21号(c)勘探线剖面图(据四川省核工业地质局, 2016^①改绘)
 1—中三叠统; 2—中二叠统上一、二段; 3—中二叠统下段; 4—下二叠统上段; 5—下二叠统上一、二段; 6—下二叠统下段; 7—中下泥盆统上段;
 8—中下泥盆统中段; 9—中下泥盆统下段; 10—断裂; 11—矿脉

Fig. 2 Geological map of the Matoushan deposit and 17, 21 Section of exploration line of I ore body in Matoushan Cu-Au deposit (modified after Sichuan Bureau of Geology for Nuclear Industry, 2016^①)

- 1—Middle Triassic; 2—Upper-lower member of middle Permian; 3—Lower member of middle Permian; 4—Upper member of lower Permian;
- 5—Upper-lower member of lower Permian; 6—Lower member of lower Permian; 7—Upper member of middle-lower Devonian;
- 8—Middle member of middle-lower Devonian; 9—Lower member of middle-lower Devonian; 10—Fault; 11—Ore body

表1 马头山矿区玄武岩化学成分
Table 1 Chemical composition of the basalt in Matoushan Cu-Au deposit

样品编号	SiO ₂ /10 ⁻²	TiO ₂ /10 ⁻²	Al ₂ O ₃ /10 ⁻²	Fe ₂ O ₃	MnO/10 ⁻²	MgO/10 ⁻²	CaO/10 ⁻²	Na ₂ O/10 ⁻²	K ₂ O/10 ⁻²	P ₂ O ₅ /10 ⁻²	Cu/10 ⁻⁶	Au/10 ⁻⁹	Ag/10 ⁻⁹	烧失量 /10 ⁻²	总和 /10 ⁻²
XWH01	46.69	2.01	14.78	13.64	0.16	4.14	9.80	3.08	2.78	0.20	289.00	4.33	450.00	2.35	99.63
XWH02	43.54	2.03	17.16	20.07	0.11	11.88	0.29	1.28	0.67	0.05	67.30	2.00	20.00	2.68	99.76
XWH03	45.50	1.00	9.71	10.57	0.17	5.78	9.66	0.56	0.28	0.11	258.00	8.79	75.00	4.37	87.71
XWH04	47.48	1.67	13.71	12.75	0.20	4.61	10.45	2.95	0.34	0.16	195.00	12.5	65.00	2.37	96.69
XWH05	46.93	2.75	13.97	14.55	0.17	4.90	7.50	3.69	0.36	0.38	102.00	3.73	70.00	3.08	98.28
均值	46.03	1.89	13.87	14.32	0.16	0.26	7.54	2.31	0.89	0.18	182.26	6.27	136.00	2.97	96.41
峨眉山 玄武岩	49.60	3.31	13.28	14.06	0.20	6.07	8.56	2.71	1.34	0.34					100.01
玄武岩中 平均含量											100.00	4.00	100.00		
富集倍数											1.82	1.57	1.36		

注:样品在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行测试,测试标准依据GB/T14506.28—2010《硅酸盐岩石化学分析方法第28部分:16个主次成分测定》。峨眉山玄武岩化学元素含量据邱家骧(1985),玄武岩中元素含量平均值据赵伦山(1988)。

600℃,测定时室温温度为23℃,湿度为35%,测定精度为±0.1℃。水溶液包裹体的盐度由Hall(1988)流体包裹体冰点与盐度公式 $W=0.00+1.78T_m-0.0442T_m^2+0.000557T_m^3$ 计算得到,含CO₂包裹体的盐度由Collins(1979)的CO₂笼合物熔化温度与盐度的关系对应表得出,包裹体密度利用公式 $D=A+Bt+Ct^2$ (刘斌等,1987)计算得到。

单个包裹体激光拉曼成分分析在核工业北京地质研究院地质矿产研究所的激光拉曼实验室测试完成。测试仪器为LABHR-VIS LabRAM HR800研究级显微激光拉曼光谱仪,光源为Yag晶体倍频固体激光器,波长为532 nm,扫描范围为100~4200 cm⁻¹,测试时温度为25℃,湿度为50%。

4.2 稳定同位素分析

采集马头山矿床不同矿段不同矿(岩)体的8件硫化物样品、4件白云石样品,有针对性地进行了硫同位素和碳、氢、氧同位素测试。

硫同位素分析:样品测试前,对野外采集的矿(岩)石样品进行加工处理,选取不同成矿阶段的矿石样品进行破碎,粒度一般为30~60目,筛选后在超声波清洗仪中清洗,在60℃的温度条件下烘干,然后在双目镜下进行挑选,使单个矿物纯度达到98%。最后将>5 g的样品送至核工业北京地质研究院地质矿产研究所,采用MAT253质谱仪进行测试,沿用V-CDT国际标准,记为δ³⁴S_{V-CDT},标准物质日常分析精度为±0.2‰。

碳氧同位素分析:碳氧同位素测试在核工业北京地质研究院地质矿产研究所采用磷酸法测定,测试仪器为MAT253气体同位素质谱仪,测定结果记做δ¹³C_{V-PDB}、δ¹⁸O_{V-PDB},利用Friedman(1977)的公式 $\delta^{18}O_{V-SMOW}=1.03086\delta^{18}O_{V-PDB}+30.86$ 计算出δ¹⁸O_{V-SMOW}的值。

氢氧同位素分析:氢同位素分析针对石英中的流体包裹体,采用爆裂法。测试结果以V-SMOW为标准,记为δD_{V-SMOW},分析精度优于±1‰。氢同位素参考标准为北大标准水(δD_{V-SMOW}=-64.8‰)及兰州标准水(δD_{V-SMOW}=-84.55‰)。氧同位素分析针对石英矿物,测试应用BrF₅法,在MAT253气体同位素质谱仪上分析样品的氧同位素组成,测试结果以SMOW为标准,记为δO_{V-SMOW},分析精度优于±0.2‰。再利用公式 $10^3\ln\alpha=\delta^{18}O_{V-SMOW}-\delta^{18}O_{H_2O}$ 计算出δ¹⁸O_{H₂O}的值,其中 $10^3\ln\alpha=3.38\times 10^6/T^2-3.40$ (Clayton et al., 1972), $T=T_h+273^\circ\text{C}$, T_h 为包裹体均一温度。

5 流体包裹体特征

5.1 流体包裹体岩相学特征

结合镜下观察和显微测温数据,马头山矿床热液成矿期S1—S3成矿阶段的原生流体包裹体主要为两种类型。

(1)富液相水溶液包裹体(L型)。室温下大部分为气液两相(V_{H₂O}+L_{H₂O}),少部分为单一液相(图

表2 马头山铜金矿床中主要矿体基本特征

Table 2 The basic features of the ore body in the Matoushan Cu-Au deposit

矿体编号	规模/m			形态	产状/ $^{\circ}$		平均品位 (Au/10 ⁻⁶ , Ag/10 ⁻⁶ , Cu/10 ⁻²)		
	长度	斜深	厚度		倾向	倾角	Au	Ag	Cu
I-1AuCu	80	242	1.34	脉状似层状	102~110	62~74	1.06		0.88
I-2AuCu	535	403	4.86	脉状似层状	102~110	62~74	0.63		0.64
I-3Cu	850	未控制	2.05	脉状似层状	128~135	30~35			1.84
II-1AgCu	120	未控制	1.40	似层状	137~150	42~61		77.1	2.27
III-1Cu	139	未控制	3.69	似层状	64~93	30~37			1.25
III-2AgCu	110	未控制	11.01	脉状	86~116	67~87	0.30	137.73	0.87

6a, b)。见于S1阶段、S2阶段和S3阶段。包裹体成群分布,体积小、形状多呈圆形、椭圆形,大小为8~15 μm ,呈透明或半透明色,充填度(液相部分体积)大于70%,加热后为均一液相。

(2)含CO₂包裹体(C型)。见于S2阶段、S3阶段。该类包裹体主要为CO₂三相包裹体(图6c),少数为纯CO₂包裹体(图6c)。含CO₂三相包裹体呈条带状或成群分布,形状呈圆形、椭圆形,大小为4~16 μm ,室温下为三相(V_{CO₂}+L_{CO₂}+L_{H₂O}),其中,CO₂相(V_{CO₂}+L_{CO₂})所占比列约为50%~70%,部分均一主要为L_{CO₂},完全均一主要为L_{CO₂}和L_{H₂O}。纯CO₂包

裹体数量较少,室温下表现为两相(V_{CO₂}+L_{CO₂}),形状呈椭圆形,大小约为3 μm ,部分均一为L_{CO₂}。

5.2 包裹体显微测温研究

对不同成矿阶段的石英(样品B65、B36)与方解石(样品ZK01)中的原生流体包裹体进行了显微测温,其结果如下(表3,图7)。

(1)均一温度:S1阶段的均一温度范围为120.0~181.2 $^{\circ}\text{C}$,峰值为120~130 $^{\circ}\text{C}$,平均值为136.1 $^{\circ}\text{C}$ (图7a);S2阶段的均一温度范围为201.8~287.1 $^{\circ}\text{C}$,峰值为260~270 $^{\circ}\text{C}$,平均值为264.8 $^{\circ}\text{C}$ (图7b);S3阶段的均一温度范围为108.1~490.2 $^{\circ}\text{C}$,温度

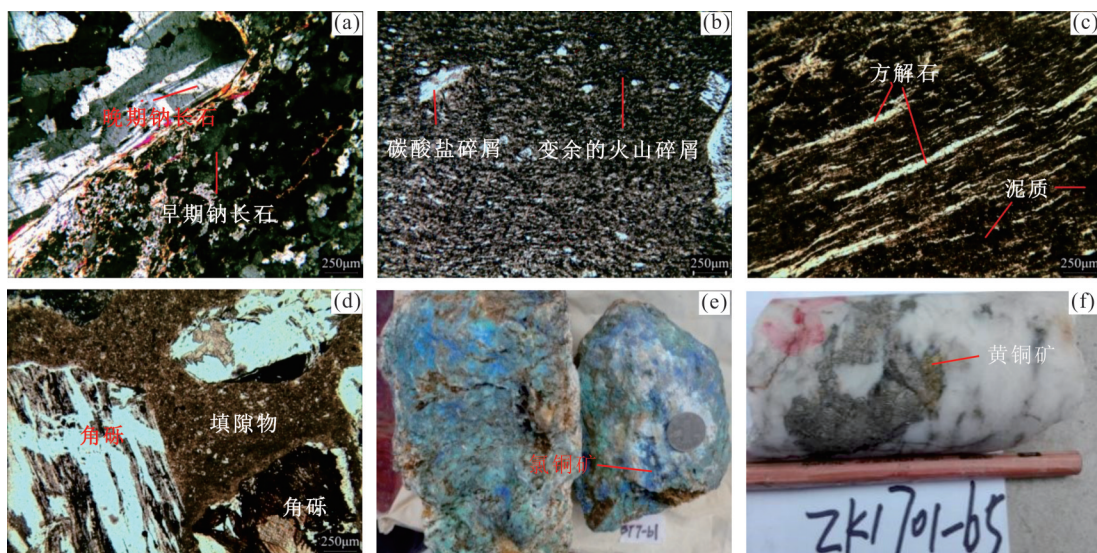


图3 马头山铜金矿床典型矿石手标本及镜下照片

a—黝铜矿黄铜矿化强钠长石化板岩,粒柱变晶结构,板状构造;b—黄铜矿黄铁矿化弱碳酸盐凝灰岩,变余凝灰结构,块状构造;c—黄铁矿化碳酸盐板岩,变余泥质结构,板状构造;d—含黝铜矿黄铜矿黄铁矿构造角砾岩,压碎角砾结构;e—浸染状硫化矿石;f—石英脉矿石

Fig. 3 Photograph and micrograph of the typical ore from Matoushan Cu-Au deposit

a—tetrahedrite and chalcopyrite mineralized mightly albization slate, granular columnar blastic texture, slaty structure; b—chalcopyrite and pyrite mineralized weakly carbonated tuff, blastotuff texture, massive structure; c—pyrite mineralized carbonated slate, pelitic texture, slaty structure; d—tectonic breccia containing tetrahedrite chalcopyrite and pyrite, cataclastic brecciated texture; e—disseminated sulfide ore; f—quartz vein ore

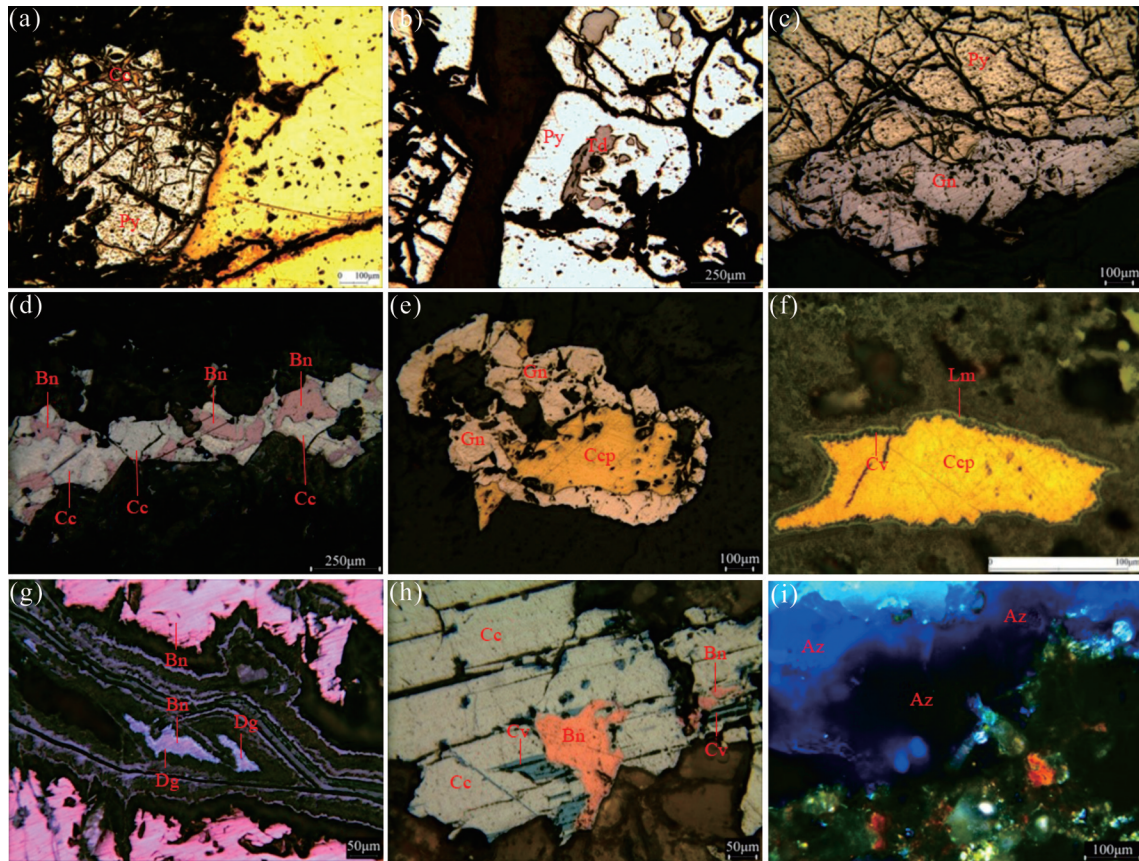


图4 马头山铜金矿床中矿物交代关系显微照片

a—黄铁矿被黄铜矿包嵌或交代; b—黄铁矿被黝铜矿交代; c—黄铁矿被方铅矿交代; d—辉铜矿被斑铜矿交代; e—黄铜矿被方铅矿包围交代; f—黄铜矿被铜蓝、褐铁矿交代成残余或假象; g—斑铜矿被蓝辉铜矿交代; h—辉铜矿被斑铜矿和铜蓝交代; i—氧化中生成蓝铜矿; Py—黄铁矿; Ccp—黄铜矿; Cc—辉铜矿; Td—黝铜矿; Gn—方铅矿; Bn—斑铜矿; Cv—铜蓝; Dg—蓝辉铜矿; Az—蓝铜矿; Lm—褐铁矿

Fig. 4 Micrograph of the intergenetic relationship of the minerals in Matoushan Cu-Au deposit

a—pyrite is embedded or metasomatized by chalcopyrite; b—pyrite is metasomatized by tetrahedrite; c—pyrite is metasomatized by galena; d—chalcocite is metasomatized by bornite; e—chalcopyrite bounding and metasomatized by galena; f—chalcopyrite is metasomatized by covellite and limonite into residual or pseudomorph; g—bornite is metasomatized by digenite; h—chalcocite is metasomatized by bornite and covellite; i—azurite was generated in oxidation; Py—Pyrite; Ccp—Chalcopyrite; Cc—Chalcocite; Td—Tetrahedrite; Gn—Galena; Bn—Bornite; Cv—Covellite; Dg—Digenite; Az—Azurite; Lm—Limonite

区间较大,从低温到高温皆有分布,平均值为206.9°C(图7c)。

(2)盐度:S1阶段的盐度范围为5.41%~19.60% NaCl_{eq}(图7d),平均为11.8% NaCl_{eq};S2阶段的盐度范围为4.49%~14.87% NaCl_{eq}(图7e),平均为11.4% NaCl_{eq};S3阶段的盐度范围为3.55%~22.78% NaCl_{eq}(图7f),平均为11.3% NaCl_{eq}。

(3)密度:S1阶段的密度范围为0.96~1.12 g/cm³(图7g),平均为1.04 g/cm³;S2阶段的密度范围为0.81~0.94 g/cm³(图7h),平均为0.87 g/cm³;S3阶段的密度范围为0.51~1.08 g/cm³(图7i),平均为0.89 g/cm³。

5.3 包裹体激光拉曼测定

S2、S3阶段的原生流体包裹体激光拉曼光谱测试结果显示(图8):含CO₂包裹体在1283~1388 cm⁻¹处显示较强的宽峰,指示有一定量的CO₂,在3428~3432 cm⁻¹显示较宽的峰值,表明成分为H₂O溶液。激光拉曼光谱结果表明,马头山Cu-Au矿床的成矿流体为含CO₂的H₂O-CO₂体系的盐水溶液。

6 稳定同位素地球化学特征

6.1 硫同位素

硫同位素实验测试结果表明(表4),马头山矿床不同硫化物的硫同位素组成差别较大。1件斑铜

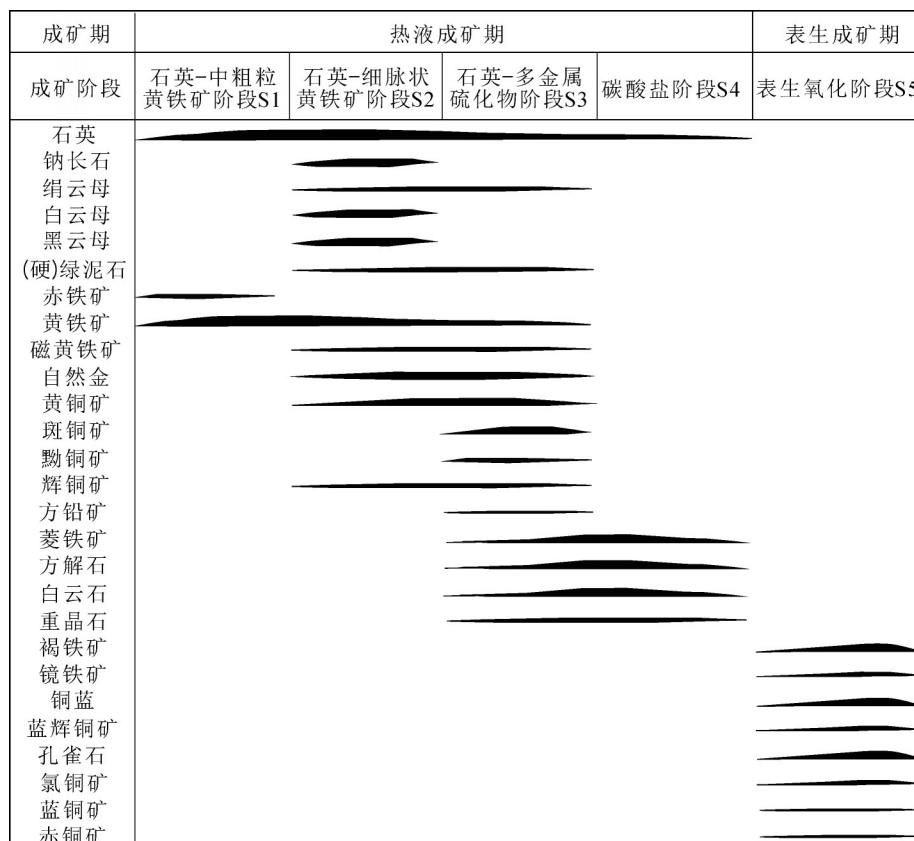


图5 马头山铜金矿床成矿期、成矿段及矿物组合

Fig.5 The metallogenic period, metallogenic stages and mineral assemblages of the Matoushan Cu-Au deposit

矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 2.2‰; 4 件黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值介于 -4.6‰~8.4‰; 2 件黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 1.9‰和 2.9‰, 平均 2.4‰; 1 件黝铜矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 7.1‰。通过上述分析结果得出 $\delta^{34}\text{S}_{\text{黝铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{斑铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}}$ 。可以看出, 本矿床主要硫化物矿石之间, 硫同位素分馏基本达到平衡。

6.2 碳氧同位素

通过马头山矿床中含黄铁矿的热液白云石的碳、氧同位素组成的测试结果(表5)可以看出, 4 件白云石的碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 为 -5.3‰~1.7‰, 氧同位

素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 19.4‰~25.9‰。

6.3 氢氧同位素

马头山矿床中石英的氢、氧同位素样品测试结果(表6)显示, 含铜金石英脉中的流体包裹体的 δD 为 -78.8‰~-48.7‰, $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SNOW}}$ 为 11.5‰~17.6‰, 经过计算得出 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 -2.1‰~9.3‰。

7 讨 论

7.1 成矿流体及成矿物质的来源与演化

7.1.1 成矿流体来源与演化

表3 马头山铜金矿床热液期不同阶段的原生流体包裹体测温结果

Table 3 Thermometric result of fluid inclusions for different stages of the hydrothermal period of the Matoushan Cu-Au deposit

阶段	样品	类型及数量	$T_{\text{m,cla}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{h,co2}}/^\circ\text{C}$	冰点/ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{h}}/^\circ\text{C}$	盐度/ NaCl_{eq}	密度/ (g/cm^3)
S1	B65	L(16)			-16.2~4.1	120.0~141.1	5.41~19.60	0.98~1.12
	ZK01	L(3)			-11.2~-5.2	167.8~181.2	8.14~15.17	0.96~1.12
S2	B36	L(5)			-8.8~-5.1	201.8~287.1	4.49~12.62	0.81~0.92
		C(9)	0.6~4.6	28.4~31.1		258.0~278.2	9.59~14.87	0.84~0.94
S3	B65	L(26)			-20.6~-2.1	108.1~490.2	3.55~22.78	0.51~1.08
		C(4)	0.4~4.2	24.6~31.1		308.1~439.1	10.19~15.09	0.86~1.03

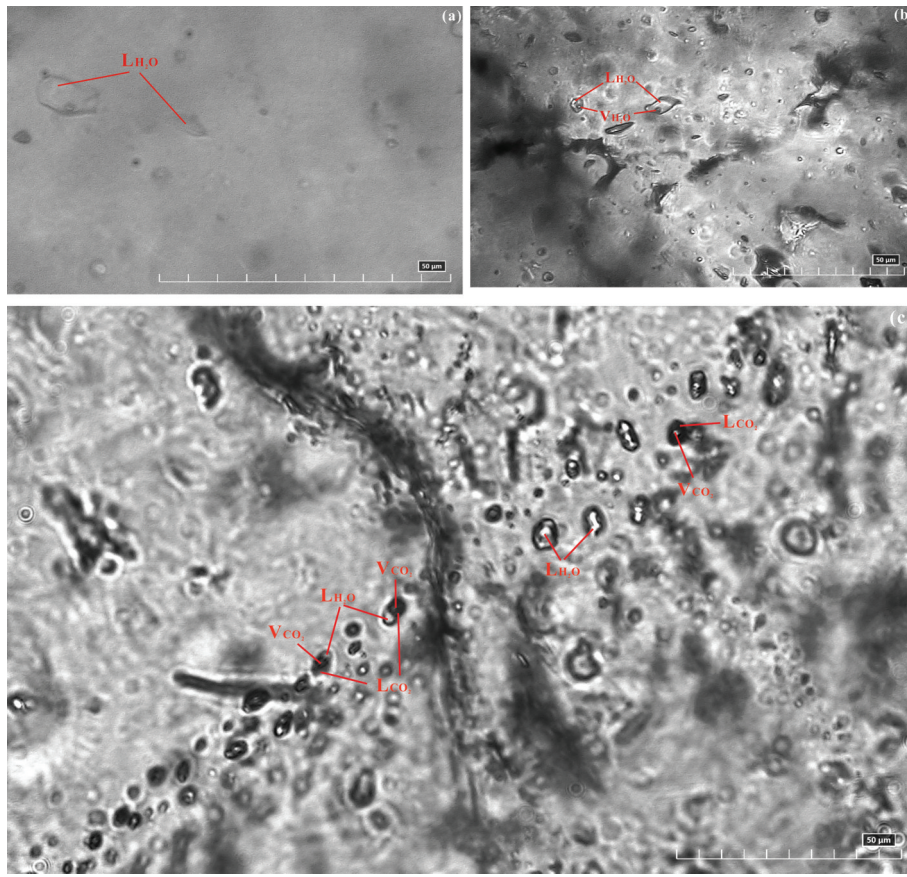


图6 马头山铜金矿床热液期不同阶段流体包裹体镜下照片

Fig.6 Microphotographs of fluid inclusions at different stages of the hydrothermal period of the Matoushan Cu-Au deposit

马头山矿床流体包裹体测温结果显示,矿床不同阶段的成矿流体呈现出明显的各自特点:S1阶段流体包裹体均一温度平均值为136.1℃,盐度平均值为11.8% NaClevq,密度平均值为1.04 g/cm³,属低温、中低盐度、中密度流体,包裹体为水溶液型;S2阶段流体包裹体均一温度平均值为264.8℃,盐度平均值为11.4% NaClevq,密度平均值为0.87 g/cm³,属中低温、中低盐度、低密度流体,包裹体中富含CO₂;S3阶段流体包裹体均一温度平均值为206.9℃,盐度平均值为11.3% NaClevq,密度平均值为0.89 g/cm³,属中低温、中低盐度、低密度流体,包裹体为水溶液型和含CO₂型。总体上,成矿流体的温度变化范围较大,经历了上升—下降的过程,盐度与密度的变化范围不大,但随着S2—S3阶段成矿流体温度的下降盐度与密度仍呈现出下降的趋势,说明S2—S3阶段成矿流体是自然冷却的过程,且经历了地表流体的稀释。

氢氧同位素测试结果显示,马头山矿床石英矿

物中的 δD 与 $\delta^{18}O_{H_2O}$ 变化范围较大,说明可能存在混合流体。在 δD - $\delta^{18}O_{H_2O}$ 图解中(图9),S1阶段的3个样品落入四川盆地卤水区域,已有研究表明,该流体的PH值为6左右,密度约为1.22 g/cm³,呈酸性(林耀庭等,1997),说明该阶段的成矿流体为层间水与大气降水混合的低温流体,其可能属于早期区域变质作用的产物,对成矿作用的影响较小;S2阶段的流体成分发生变化,3个样品均落入原生岩浆水区域,说明该阶段成矿流体来源于岩浆,且不排除幔源流体的加入;S3阶段的2个样品落入岩浆水与雨水线之间,结合流体包裹体显微测温结果所显示的该阶段流体的温度有低温和高温2个区间,说明成矿流体受到了大气降水混入的影响,推测低温流体为大气降水,而高温流体为岩浆热液。

热液方解石与白云石的C、O同位素是示踪成矿流体来源的有效手段(郑永飞等,2000)。成矿流体中碳的来源主要有3种:①沉积岩中碳酸盐岩脱气或含盐卤水与泥质岩相互作用,这种来源的碳同

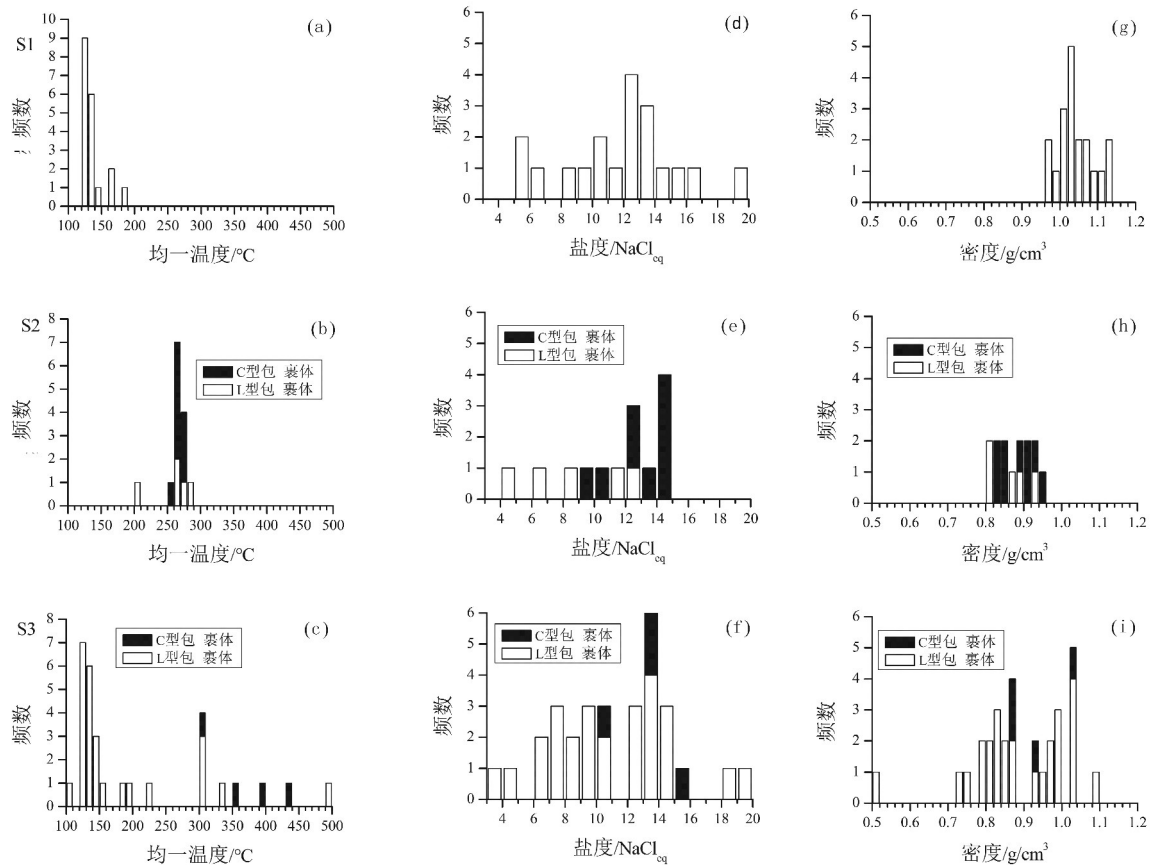


图7 马头山铜金矿床热液期S1—S3阶段流体包裹体均一温度、盐度和密度直方图

Fig.7 Histogram of homogenization temperature, salinity and density of fluid inclusions in the S1—S3 stage of the hydrothermal period of the Matoushan Cu—Au deposit

位素组成具有重碳同位素的特征,一般 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化范围为 $-2\text{‰}\sim 3\text{‰}$,海相碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化范围很小($-1\text{‰}\sim 2\text{‰}$,平均 0‰);②深部来源的碳,来自地幔射气或岩浆,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化范围分别为 $-5\text{‰}\sim -2\text{‰}$ 和 $-9\text{‰}\sim -3\text{‰}$;③各种岩石中的有机碳,其 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 值变化范围分别为 $-30\text{‰}\sim -15\text{‰}$,平均 -22‰ (仲文斌等,2017)。通过对马头山矿床岩矿的野外勘查和识别鉴定,发现矿床中未出现石墨等矿物,因而可以把碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 近似地代表流体中总碳($\delta^{13}\text{C}_{\Sigma\text{C}}$)同位素组成(张理刚,1989)。马头山矿床I-1矿体ZK0101-B05的2个矿石样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值与深源岩浆一致,但 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值明显高于岩浆成因,在 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}-\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 图解中(图10)投影点位于碳酸盐溶解作用线的下方,表明成矿流体除来源于由深源岩浆外,还有区域内地层中碳酸盐的溶解作用产生的流体参与。Ⅲ-2矿体B62的2个样品

$\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值与海相碳酸盐一致,样品投影点落在海相碳酸盐岩区域(图10),但较扬子地台川滇黔地区泥盆系、石炭系碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值略高,表明Ⅲ-2矿体中碳酸盐脉的C、O来自矿体围岩的泥盆系泥晶-细晶灰岩(D₁₋₂)地层。C、H、O同位素结果综合显示:成矿流体主要来源于岩浆且有地层流体和大气降水加入,成矿流体的演化过程为由早期的酸性氧化流体向主成矿期的碱性还原流体转变。

7.1.2 成矿物质来源

根据矿床中S同位素的组成,可以分析矿床中硫的来源,进而可以探讨矿床的成矿物质来源。地球上硫有3个储存库,一是幔源硫,其同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $-3\text{‰}\sim 3\text{‰}$,二是海水硫,其同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 为 20‰ 左右,三是沉积物中的还原硫,其硫同位素主要以具有较大的负值为特征(郭波等,2009)。通过马头山矿床硫同位素的组成图(图11)可以看出,矿

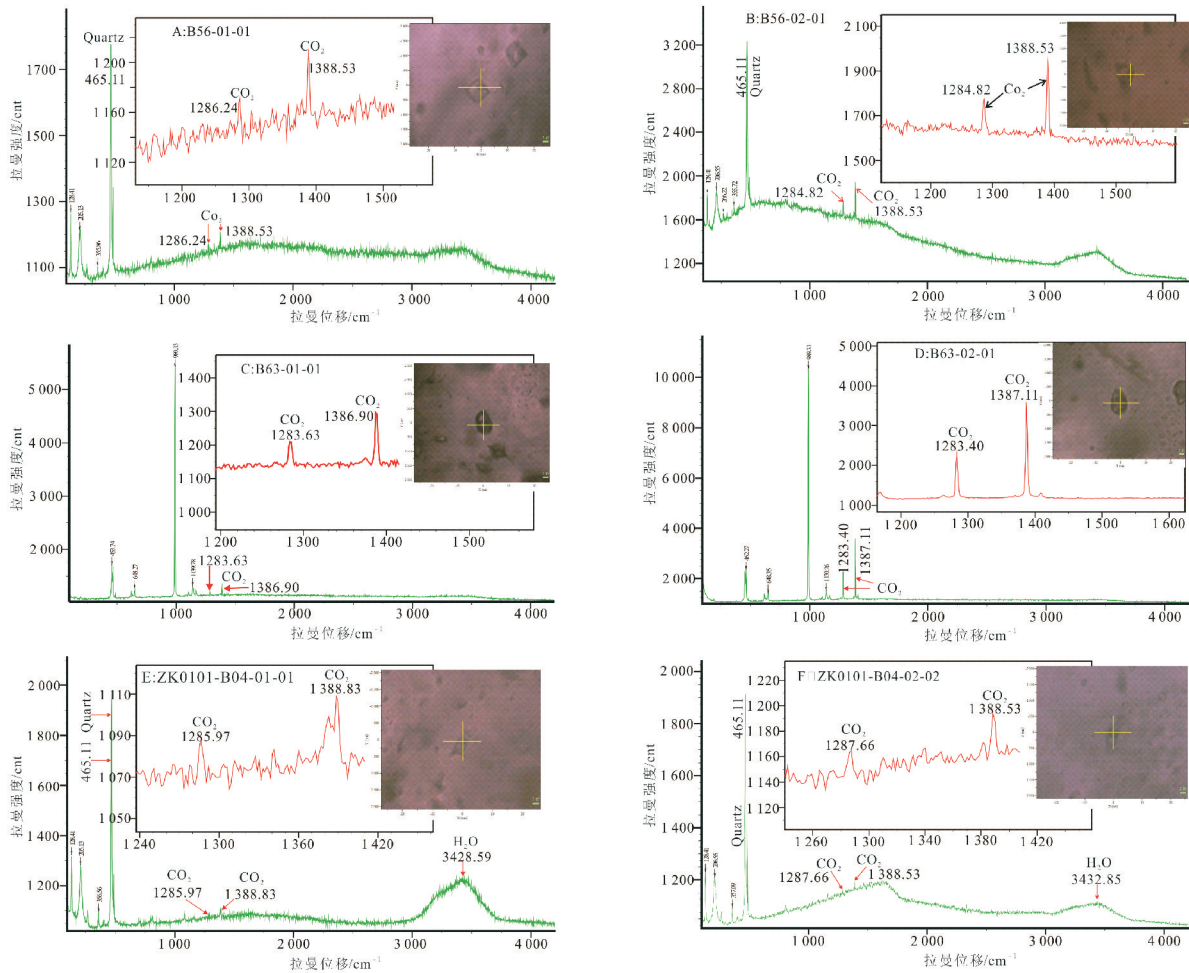


图8 马头山铜金矿床流体包裹体激光拉曼图谱

Fig.8 Laser Raman atlas of fluid inclusions of the Matoushan Cu-Au deposit

床的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布范围较宽,表明其硫同位素来源较为复杂。

前人研究表明,热液矿床中硫化物的S同位素组成受成矿溶液中总S同位素组成、氧逸度、pH值、温度等物理化学条件的影响(Ohmoto, 1972),因此,热液形成的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值一般并不等于热液总的 $\delta^{34}\text{S}$ 值。但成矿系统的总硫值($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$)可以通过矿石中的矿物共生组合比较法来判断(田世洪等, 2003)。根据 Ohmoto(1972)的理论计算,在高氧逸度条件下,可能的矿物组合为重晶石+方解石,此时有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{重晶石}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$;在中等氧逸度条件下,硫化物与硫酸盐共存,有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}} < \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} < \delta^{34}\text{S}_{\text{重晶石}}$;如果氧逸度再低些,硫酸盐不能存在,可能的矿物组合为黄铁矿+磁黄铁矿+方解石,并有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 。I-1矿体、I-2矿体、II-1矿体和III-1矿体的矿物

组合为黄铁矿+磁黄铁矿+白云石,未出现重晶石等硫酸盐矿物,因此有 $\delta^{34}\text{S}_{\text{硫化物}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$, I-1和I-2矿体样品的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{Pv}}$ 值范围为 $-1.2\text{‰} \sim 3.6\text{‰}$,与区域上喜山期碱性杂岩的 $\delta^{34}\text{S}$ 值相似(田世洪等, 2003),不同于二叠系玄武岩(11.8‰)和燕山期花岗岩($0 \sim 21.4\text{‰}$)(李生, 2001),具幔源硫同位素组成特征; II-1矿体1件斑铜矿样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 2.2‰ ; III-1矿体2个样品 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.6\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$,皆呈现岩浆来源的S同位素特征。整体上,该4个矿体的6件硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 均值为 0.8 ,显示出深源硫同位素的特点。III-2矿体矿物组合为黄铁矿+黝铜矿+重晶石+白云石,硫化物与硫酸盐共存,2件硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 7.1‰ 和 8.4‰ ,此时的硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值远低于 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值,结合III-2矿体产出地质特征和矿石镜下的鉴定结果,推测该矿段的

表4 马头山铜金矿床硫同位素组成(‰)

Table 4 The sulfur isotopes form of the Matoushan Cu-Au deposit (‰)

样品编号	采样位置	矿物	样品描述	成矿阶段	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$
B56	I-2AuCu矿体地表剥土	黄铁矿	黄铁矿黄铜矿化石英脉	S2	3.60
B57	I-2AuCu矿体地表剥土	黄铜矿	黄铁矿黄铜矿化石英脉	S2	1.90
ZK2101-b03	I-2AuCu矿体ZK2101岩心	黄铁矿	黄铜矿黄铁矿化碳酸盐化 硅化硬绿泥片岩	S2	-1.20
LD1-b1	III-1Cu矿体,老硐LD1	黄铜矿	黄铁矿黄铜矿构造角砾岩	S2	2.9
LD1-b1	III-1Cu矿体,老硐LD1	黄铁矿	黄铁矿黄铜矿构造角砾岩	S2	-4.6
B63	III-2AgCu矿体地表露头	黝铜矿	黝铜矿黄铁矿含重晶石硫铜矿石	S3	7.1
B64	III-2AgCu矿体地表露头	黄铁矿	黝铜矿黄铁矿含重晶石硫铜矿石	S3	8.4
B54	II-1 AgCu矿体地表露头	斑铜矿	孔雀石斑铜矿化钠长石岩	S2	2.2

表5 马头山铜金矿床碳、氧同位素组成(‰)

Table 5 The carbon and oxygen isotopes of the Matoushan Cu-Au deposit (‰)

样品编号	采样位置	矿物	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$
B62	III-2AgCu 白云石	白云石	1.7	-4.9	25.9
	地表露头 白云石	白云石	0.9	-5.8	24.8
ZK0101-B05	I-1AuCu 白云石	白云石	-4.8	-9.3	21.3
	矿体钻孔 白云石	白云石	-5.3	-11.2	19.4

$\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值应接近川西南地区泥盆纪—二叠纪海水硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ 值(18‰~30‰)(Claypool et al., 1980),说明区域内海相硫酸盐经热化学还原作用(TRS)为矿床提供了部分还原硫。

7.2 成矿机制

7.2.1 成矿动力学背景

龙门山—锦屏山造山带呈南北向纵贯四川省中部,在构造上位于扬子地台西缘,在地貌上组成青藏高原的东部边界(骆耀南等,2001)。它是由“陆块对接”机制所引起的,即自66 Ma以来,由于印度板块与亚洲板块边界发生局部碰撞和持续自南而北的楔入,使碰撞边界以北的陆块发生破裂,并依次向南东方向挤出,其前缘受阻于扬子陆块,导致两陆块边缘部位成为应力集中带,从而引起强烈的新生代陆内造山作用。马头山铜金矿床位于龙门山—锦屏山造山带的转折部位,是显著的构造变异带。前人对区域内金属矿床和稀土矿床的研究结果表明:喜山期的多期岩浆活动为区域内矿床的形成即提供了成矿物质又提供了充足的成矿动力,矿床的形成时代在35.5~25 Ma(四川省地矿局,2000^⑥;阳正熙等,2000;王登红等,2002;田世洪等,2006)。根据骆耀南等(2001)提出的龙门山—锦屏山陆内造山带喜马拉雅期的“上冲下楔”模式,扬子

表6 马头山铜金矿床氢、氧同位素组成(‰)

Table 6 The hydrogen and oxygen isotopes of the Matoushan Cu-Au deposit (‰)

成矿阶段	样品编号	测试矿物	$\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英}}$	均一温度	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$
S1	B65	石英	-55.9	17.1	136.1	0.3
S1	ZK01-01	石英	-56.8	14.7	136.1	-2.1
S1	ZK01-02	石英	-48.7	16.1	136.1	-0.7
S2	B36	石英	-65.2	17.6	264.8	9.3
S2	B37	石英	-60.1	16.7	264.8	8.4
S2	B72	石英	-74.5	14.5	264.8	6.2
S3	B73	石英	-66.2	14.7	206.9	3.4
S3	B74	石英	-78.8	11.5	206.9	0.2

地块呈楔形体插入龙门山地壳中,造成其上岩片和中下部地壳分别逆冲和俯冲。在深部,受挤压的中下部地壳及上地幔顶部向前陆深处发生俯冲,并使莫霍面发生错断,地幔物质沿深断裂上涌,导致幔源碱性岩浆作用,携带成矿物质的岩浆在上涌的过程中不断萃取区域地层中的成矿物质,最终形成了金和铜的大规模成矿作用。

7.2.2 成矿过程

马头山Cu-Au矿床位于康定—锦屏山成矿集中区的上、下二叠统的变质玄武岩、变质板岩以及围岩的结晶灰岩中,处于锦屏山断裂和康定—水城断裂的交接部位,矿区内多级断裂和褶皱构造发育,热液成矿期的流体包裹体具有中低温、中低盐度、低密度、个体小、富含 CO_2 的特征,成矿流体主要为岩浆水,并有地层流体和大气降水加入。由以上可知,马头山Cu-Au矿床的成矿过程可以简要概括如下:在二叠纪时期,中国西南地区大面积喷发基性岩流,形成面积广阔的峨眉山玄武岩,其含有丰度值较高的Cu、Au、Ag等金属矿质,形成了初始的

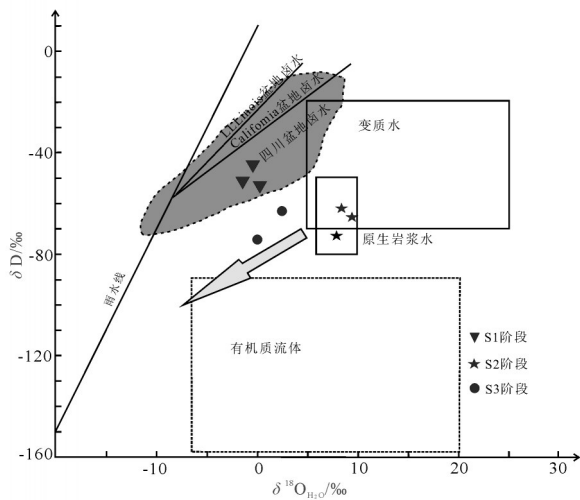


图9 马头山矿床 $\delta D - \delta^{18}O_{H_2O}$ 同位素组成图(底图据仲文斌等, 2017)

Fig.9 Plot of $\delta D - \delta^{18}O_{H_2O}$ isotopes form of the Matoushan deposit (after Zhang Wenbin et al., 2017)

矿源层。随后锦屏山韧性断裂带的岩石区经过一系列中—低程度的区域性变质作用使初始矿源层产生新的岩石组合,矿物成分也发生变化,其中Cu、Au、Ag等被活化并释放出来,为后期矿床的形成准备了矿质条件;在主成矿期内,因喜马拉雅期的扬子地块向龙门山地壳下逆冲和俯冲,并使莫霍面发生错断,地幔物质沿深断裂上涌,导致幔源碱性岩浆作用,并产生富含CO₂的深部流体,该流体在上涌过程中与地层和围岩发生物质交换的水岩反应,不断萃取区域地层及围岩中的成矿物质及硫等矿化剂使其成矿元素逐渐富集,结合主成矿期包裹体特征、氢氧同位素特征及矿脉附近围岩的绿泥石化、绢云母化、绿帘石化的特征,说明有以H₂O为主要成分的大气降水向下运移加入成矿流体,且由于此期间区域内次级脆性断裂发育,产生大量的裂隙,使成矿流体的压力突然释放,结合在此期的包裹体镜下照片中观察到了不同类型、不同充填度的包裹体以及三相包裹体共存(图6c),说明流体包裹体形成于非均一的流体介质条件,即该时期的流体混合与区域断裂减压导致流体发生沸腾作用(Roedder et al., 1984; 卢焕章等, 2004; 王松等, 2017; 丁辉等, 2018; 门兰静等, 2018),诱发成矿流体中的CO₂逃逸,使成矿流体向碱性还原流体转化,降低铜、金在流体中的氧逸度,从而形成铜金矿质的沉淀。

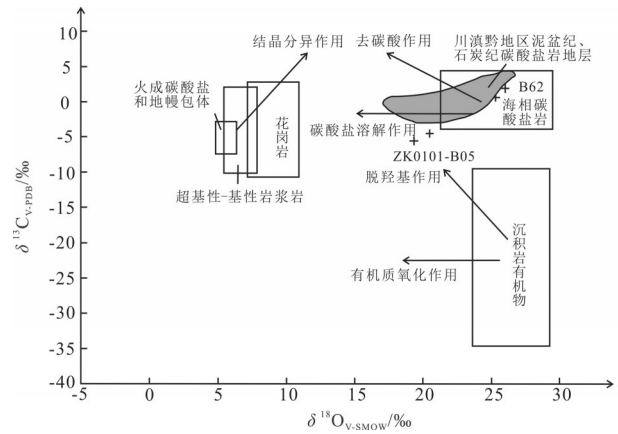


图10 马头山矿床 $\delta^{13}C_{V-PDB} - \delta^{18}O_{V-SMOW}$ 图解(底图据仲文斌等, 2017)

Fig.10 Plot of $\delta^{13}C_{V-PDB} - \delta^{18}O_{V-SMOW}$ isotopes form of the Matoushan deposit (after Zhong Wenbin et al., 2017)

7.3 矿床成因类型

综合马头山Cu-Au矿床地质特征、流体包裹体特征与稳定同位素地球化学特征,马头山Cu-Au矿床具有如下特点:矿体以脉状产出,严格受断裂构造控制;早成矿阶段矿物组合以石英-黄铁矿为主;主成矿阶段以石英-多金属硫化物为主,主要矿物有黄铜矿、斑铜矿、黝铜矿、辉铜矿和方铅矿等,且黄铁矿为主要的载金矿物,晚成矿阶段为石英-碳酸盐脉;矿石组构显示马头山Cu-Au矿床成矿过程具有多阶段性,主要围岩蚀变为绿泥石化、绿帘石化、硅化(次生石英岩化)、碳酸盐化、钠长石化、绢云母化等,且蚀变分带不明显;马头山矿床的流体包裹体在整体上具有体积小、盐度中低、密度低、富含CO₂的特征,主成矿阶段成矿温度高于200℃,属于中低温,成矿物质来源为深源岩浆和区域地层,成矿流体主要为岩浆水,且有地层流体和大气降水的加入。综上所述,马头山矿床具有中低温-热液矿床的一般特点,可将其厘定为中低温-岩浆热液型铜金矿床。

8 结论

川西南马头山铜金矿床主要受断裂构造控制,矿体呈脉状产出,围岩蚀变显著,矿石具有复杂的矿物组分,交代结构明显,内生热液成矿经历4个阶段。铜金成矿流体属H₂O-CO₂-NaCl体系,具中低温、中低盐度和富含CO₂的特征,从早成矿阶段相对

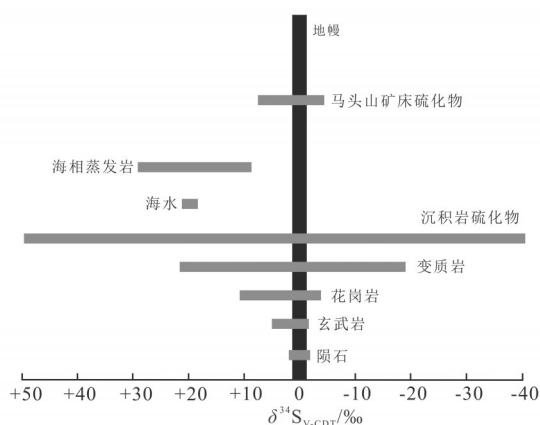


图11 马头山铜金矿床硫同位素组成(底图据胡太平等,2017)
Fig.11 Plot of $\delta^{34}\text{S}$ isotopes form of the Matoushan Cu-Au deposit
(after Hu Taiping et al., 2017)

的酸性氧化流体转化为主成矿阶段的碱性还原流体。铜金、硫等成矿物质和成矿流体主要来源于岩浆。综合矿床地质特征、流体包裹体特征和稳定同位素地球化学特征,认为矿床属中低温-岩浆热液型铜金矿床。

致谢:笔者在流体包裹体测温 and 成分测定过程中,得到核工业北京地质研究院地质矿产研究所的老师大力支持,审稿专家及责任编辑对论文提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

注释

①四川省核工业地质局. 2016. 1:1万四川省冕宁县马头山多金属矿普查报告.

②四川省地矿局物探队. 2000. 1:5万里庄幅地质调查报告.

References

- Claypool G E, Holser W T, Kaplan I R, Sakai H, Zak I. 1980. The age curves of sulfur and oxygen isotopes in marine sulfate and their mutual interpretation[J]. *Chemical Geology*, 28: 199-260.
- Clayton R N, O'Neil J R, Mayeda T K. 1972. Oxygen isotope exchange between quartz and water[J]. *Geophysical Research letters*, 77: 3057-3067.
- Collins P L. 1979. Gas hydrates in CO_2 -bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity[J]. *Economic Geology*, 74: 1435-1444.
- Ding Hui, Ge Wensheng, Dong Lianhui, Deng Gang, Jia Hongxu, Zhang Jiuru, Chen Jiang, Yuan Qiang. 2018. Genesis of the Luyuan

- gold deposit, east Junggar, Xinjiang: Constraints from fluid inclusions and isotopic compositions[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92 (4): 787-803(in Chinese with English abstract).
- Friedman I, O'Neil J R, Fleischer M. 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest[J]. *US Geological Survey Professional Paper*, 1-55.
- Ge Maoxian. 1996. Geological features and prospecting perspective of JinLin gold deposit in MianNing, SiChuan[J]. *Acta Geological Sichuan*, 16 (4): 322-325(in Chinese with English abstract).
- Guo Bo, Zhu Laimin, Li Ben, Xu Jiang, Wang Jianqi, Gong Hujun. 2009. Isotopic and element geochemical study of Jinduicheng superlarge porphyry Mo deposit in East Qinling area[J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 265-281(in Chinese with English abstract).
- Hall D L, Sterner S M, Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$ solutions[J]. *Economic Geology*, 83: 197-202.
- Hu Taiping, Wang Minfang, Ding Zhenju, He Mou, Wang Yanbo, Guo Xiaonan. 2017. C, O, S and Pb isotopic characteristics and sources of metallogenic materials of Limei Pb-Zn deposit in Huayuan county, western Hunan Province[J]. *Mineral Deposits*, 36(3): 623-642(in Chinese with English abstract).
- Hou Lin, Deng Jun, Ding Jun, Wang Xiongwu, Peng Huijuan. 2012. Ore-forming fluids features of the Yanzigou orogenic gold deposit Danba county, Sichuan Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1957-1971(in Chinese with English abstract).
- Li Gongju. 1996. Direction and progress in prospecting for skarn gold deposits in China[J]. *Geology and Prospecting*, 10 (1): 17-21(in Chinese with English abstract).
- Li Sheng. 2001. The source beds and mineralization model for the gold deposits in the Jinpingshan area Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 21(3): 48-59(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Mao Jingwen, Chen Wen. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of sericite from two types of ore its geological significance in the Miansawa gold deposit, Sichuan[J]. *Geological Review*, 51(3): 334-339(in Chinese with English abstract).
- Lin Yaoting, Yan Yangji, Wu Yinglin. 1997. Discovery of potassium-rich and high-grade brines in western Sichuan basin: geochemistry and significance[J]. *Geology and Geochemistry*, (3): 31-39(in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Liao Youchang, Yin Kehua, Ye Deshu, Zhu Hua, Han Zhonghua, Yang Guanglong. 2008. Hydrothermal sedimentary manganese deposits associated to volcanic activities-Permian manganese deposit in Guizhou[J]. *Geology in China*, 32(5): 992-1006(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhaochang, Li Fanyou, Zhong Kanghui, Li Wei. 1995. The rift (depression) and metallogenesis of the western margin of the Yangtze Platform and its neighbouring region[J]. *Geological Exploration for Non-Ferrous Metals*, 4(2): 70-76(in Chinese with

- English abstract).
- Liu Bin, Duan Guangxian. 1987. The density and isochoric formulae for NaCl-H₂O fluid inclusions (salinity≤25wt%) and their applications[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(4): 345-352(in Chinese with English abstract).
- Luo Yaonan, Yu Rulong. 2001. Orogenic evolution and metallogenic time-space distribution in Jinshajiang-Lancangjiang and Nujiang region, Southwest China[J]. *Journal of mineral Petrology*, 21 (3): 153-159(in Chinese with English abstract).
- Men Lanjing, Zhang Xinwen, Sun Jinggui, Zhao Junkang, Wang Haojun, Liu Chengxian. 2018. Metallogenic mechanism of the Xiaoxinancha Au-rich Cu deposit in Yanbian area, Jilin Province: Constrains from fluid inclusions and isotope geochemistry[J]. *Geology in China*, 45(3): 544-563(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotopes in hydrothermal ore deposits[J]. *Economic Geology*, 67(5): 551-578.
- Qiu Jiexiang. 1985. *Magmatic Petrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 110(in Chinese with English abstract).
- Roedder E, Ribbe P H. 1984. Fluid inclusions[M]. *Mineralogical Society of America Washington, DC*, 1-644.
- Tian Shihong, Ding Tiping, Mao Jingwen. 2003. Mantle fluids involved in the ore-forming process of the Maoniuping REE deposit, Sichuan: Evidence of C, H, O and S isotopes[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24 (6): 543-547(in Chinese with English abstract).
- Tian Shihong, Hou Zengqian, Yuan Zhongxin, Chen Wen, Xie Yuling, Yin Shuping, Fei Hongcai, Yi Longsheng, Zhou Su. 2006. ⁴⁰Ar-³⁹Ar geochronology of rocks and ores from the Muluozhai REE deposit in Mianning County, Sichuan[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (10): 2431-2436 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Yang Jianmin, Yan Shenghao, Xu Jue, Chen Yuchuan, Xue Chunji, Luo Yaonan, Ying Hanlong. 2002. Cenozoic ore concentration areas in the Sanjiang region, Southwest China: tectonic setting and exploration[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(2): 135-140 (in Chinese with English abstract).
- Wang Song, Zhao Yuanyi, Wang Ao, Li Yubin, Li Xiaosai, Guo Shuo. 2017. The study of faciology-mineragraphy, fluid inclusions, and geochemical characteristics and mineralization in Nadun Cu(Au) deposit, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(7): 1565-1588(in Chinese with English abstract).
- Wang Wei, Li Wenyuan, Tang Xiaodong, Li Tianhu, Xiong Zhongyi, Gao Manxin, Su Xiaohong, Guo Zhouping, Meng Yong, Quan Shoucun, Chen Chuanqing. 2018. Ore-forming fluid features and mineralization of the Dishui copper deposit in the northwest of Tarim block[J]. *Geology and Exploration*, 54(3): 441-455(in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaochun, Lu Shengming, Hu Jiang, He Gang. 1999. Geological and geochemical features of the Mianshawa gold deposit in Sichuan Province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 18(3): 26-28(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianmin, Huang Yongping, Li Gongju. 1996. Superimposition rift-poly sources-hydrothermal mineralization of large copper deposits in the belt along the western edge of the Yangtze Platform[J]. *Mineral Resources and Geology*, 10 (1): 17-21(in Chinese with English abstract).
- Xin Cunlin, Bao Xiaoqiang, An Guobao. 2016. Geological characteristics and metallogenesis of Zhangjiapingzi gold deposit in Sichuan Province[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 52(6): 713-721(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhengxi, Jones A W, Pu Guangping. 2010. Geological features of maoniuping REE deposit, Sichuan, China[J]. *Mineralogy and Petrology*, 20(2): 28-34 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhusheng, Gu Jialiang, Hu Xiurong. 1986. The geological characteristics of the stratabound gold deposits in western Mianning, Sichuan[J]. *Earth Science*, 51(3): 334-339(in Chinese with English abstract).
- Yu Anguang, Guo Jianqiang. 1997. Control of ductile shear zone over gold ores in the western margin of Yangtze Platform[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 17(4): 262-264(in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1989. *Diagenesis and Metallogenic Theory and Prospecting*[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 64(in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei, Xu Baolong, Zhou Gentao. 2000. Geochemical studies of stable isotopes in minerals[J]. *Earth Science Frontiers(China University of Geosciences, Beijing)*, 7(2): 299-320(in Chinese with English abstract).
- Zhong Wenbin, Zhang Jun, Wang Jian, Yang Qing, Zhang Zhekun, Cheng Yuanlu. 2017. A comprehensive analysis of present situation of geochemical researches on stable isotopes of lead-zinc deposits in Sichuan-Yunan-Guizhou area[J]. *Mineral Deposits*, 36(1): 200-218(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 丁辉, 葛文胜, 董连慧, 邓刚, 贾红旭, 张佳儒, 陈疆, 元强. 2018. 新疆东准格尔绿源金矿床成因研究: 流体包裹体及氢、氧同位素制约[J]. *地质学报*, 92(4): 787-803.
- 葛茂先. 1996. 四川冕宁金林金矿地质特征及找矿前景[J]. *四川地质学报*, 16(4): 322-325.
- 郭波, 朱赖民, 李犇, 许江, 王建其, 弓虎军. 2009. 东秦岭金堆城大型斑岩铜矿床同位素及元素地球化学研究[J]. *矿床地质*, 28(3): 265-281.
- 胡太平, 王敏芳, 丁振举, 何谋, 王彦博, 郭晓南. 2017. 湘西花垣李梅铅锌矿床C、O、S、Pb同位素特征及成矿物质来源[J]. *矿床地质*, 36(3): 623-642.
- 侯林, 邓军, 丁俊, 汪雄武, 彭惠娟. 2012. 四川丹巴燕子沟造山型金矿床成矿流体特征研究[J]. *地质学报*, 86(12): 1957-1971.
- 黎功举. 1996. 大陆边缘构造成矿模式——以扬子地台西缘铜多金

- 属矿床为例[J]. 地质与勘探, 32(4): 14-18.
- 李生. 2001. 四川锦屏山地区金矿矿源层及成矿模式[J]. 沉积与特提斯地质, 21(3): 48-59.
- 李晓峰, 毛景文, 陈文. 2005. 四川缅萨洼金矿两类矿石绢云母⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 51(3): 334-339.
- 林耀庭, 颜仰基, 吴应林. 1997. 四川盆地西部富钾富矿卤水的发现及其地球化学特征和意义[J]. 地质地球化学, 3:31-39.
- 刘平, 廖友常, 殷科华, 叶德书, 朱华, 韩忠华, 杨光龙. 2008. 与火山活动有关的热热水沉积锰矿——以贵州二叠纪锰矿为例[J]. 中国地质, 32(5): 992-1006.
- 刘肇昌, 李凡友, 钟康惠, 李伟. 1995. 扬子地台西缘及邻区裂谷(陷)构造与金矿成矿[J]. 有色金属矿产与勘查, 4(2): 70-76.
- 刘斌, 段光贤. 1987. NaCl-H₂O溶液包裹体的密度式和等容式及其应用[J]. 矿物学报, 7(4): 345-352.
- 骆耀南, 俞如龙. 2001. 西南三江地区造山演化过程及成矿时空分布[J]. 矿物岩石, 21(3): 153-159.
- 门兰静, 张馨文, 孙景贵, 赵俊康, 王好均, 刘城先. 2018. 延边地区小西南盆富金铜矿床的成矿机理: 矿物流体包裹体和同位素的制约[J]. 中国地质, 45(3): 544-563.
- 邱家骧. 1985. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 110.
- 田世洪, 丁梯平, 毛景文. 2003. 四川牦牛坪稀土矿床地幔流体成矿的碳、氢、氧、硫同位素证据[J]. 地球学报, 24(6): 543-547.
- 田世洪, 侯增谦, 袁忠信, 陈文, 谢玉玲, 费红彩, 尹淑苹, 衣龙升, 周肃. 2006. 四川木落寨稀土矿床成岩成矿的⁴⁰Ar-³⁹Ar年代学研究[J]. 岩石学报, 22(10): 2431-2436.
- 王登红, 杨建民, 闫升好, 徐珏, 陈毓川, 薛春纪, 骆耀南, 应汉龙. 2002. 西南三江新生代矿集区的分布格局及找矿前景[J]. 地球学报, 23(2): 135-140.
- 王松, 赵元艺, 汪傲, 李玉彬, 李小赛, 郭硕. 2017. 西藏拿顿铜(金)矿床岩矿相学、流体包裹体和地球化学特征与成矿作用研究[J]. 地质学报, 91(7): 1565-1588.
- 王伟, 李文渊, 唐小东, 李天虎, 熊中乙, 高满新, 宿晓红, 郭周平, 孟勇, 全守村, 陈传庆. 2018. 塔里木陆块西北缘滴水铜矿成矿流体特征与成矿作用[J]. 地质与勘探, 54(3): 441-455.
- 王小春, 卢盛明, 胡江, 何刚. 1999. 四川缅萨洼金矿地质地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 18(3): 26-28.
- 吴健民, 黄永平, 黎功举. 1996. 扬子地台西缘内带大型铜矿床的“叠加裂谷-多源-热水”成矿作用[J]. 矿产与地质, 10(1): 17-21.
- 辛存林, 包小强, 安国堡. 2016. 四川张家坪子金矿床地质特征及成矿作用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 52(6): 713-721.
- 阳正熙, Jones A W, 蒲广平. 2000. 四川冕宁牦牛坪稀土矿床地质特征[J]. 矿物岩石, 20(2): 28-34.
- 杨铸生, 古家良, 胡秀蓉. 1986. 四川冕宁西部层控型金矿的地质特征[J]. 地球科学, 11(6): 645-651.
- 喻安光, 郭建强. 1997. 扬子地台西缘韧性剪切带对金矿的控制特征[J]. 四川地质学报, 17(4): 262-264.
- 张理刚. 1989. 成岩成矿理论与找矿[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 64.
- 赵伦山, 张本仁. 1988. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 40.
- 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 2000. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 7(2): 299-320.
- 仲文斌, 张均, 王健, 杨青, 张哲坤, 程元路. 2017. 川滇黔地区铅锌矿床稳定同位素地球化学研究现状综合分析[J]. 矿床地质, 36(1): 200-218.