

doi:10.3799/dqkx.2017.074

青海玉树尕龙格玛 VMS 型矿床流体包裹体 及 H-O-S-Pb 同位素特征

王 键, 孙丰月, 禹 禄, 姜和芳, 王 飞, 宁传奇

吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

摘要:为确定中国三江成矿带北段尕龙格玛 VMS(volcanogenic massive sulfide)型矿床的成矿物理化学条件、成矿物质来源、成矿流体来源,探讨成矿机制,对矿体特征、流体包裹体显微测温 and 激光拉曼光谱分析以及 S、Pb、H、O 同位素进行了系统研究。矿体赋存于晚三叠世巴塘群英安质火山岩中,具有 VMS 型矿床的双层结构,由下部热液流体补给通道相的脉状—网脉状矿化系统和上部海底盆地卤水池喷气—化学沉积系统组成。通道相中流体包裹体可分为富气相包裹体和水溶液包裹体,均一温度为 175.6~263.3 °C,盐度为 1.05%~6.29% NaCl eqv.,密度为 0.820~0.935 g/cm³,激光拉曼光谱分析包裹体气相成分为 H₂O、CO₂ 和少量 N₂;沉积相重晶石中仅发育水溶液包裹体,均一温度为 105.2~157.1 °C,盐度为 0.18%~5.55% NaCl eqv.,密度为 0.735~1.173 g/cm³,显示了流体由通道相向沉积相温度显著降低,盐度保持不变,密度变大的趋势,与典型 VMS 型矿床流体特征相似。氢氧同位素($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$:0.25‰~1.75‰, δD :−103.2‰~−65.3‰)研究表明,成矿流体主要来源于岩浆水和海水的混合。综合分析前人硫同位素研究结果($\delta^{34}\text{S}$:1.13‰~2.45‰,12.36‰~12.37‰)及本次获得硫同位素结果($\delta^{34}\text{S}$:−22.9‰~−14.7‰)表明硫来源于岩浆和细菌还原的海水硫酸盐或基底岩石。硫化物方铅矿的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 和 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 分别为 18.449~18.519、15.699~15.777 和 38.875~39.141,具有高放射性铅的特征, μ 值为 9.65~9.80,结果显示 Pb 等成矿物质主要来自于上地壳,并有岩浆物质参与成矿。成矿流体与海水的混合作用是尕龙格玛矿床形成的主要机制。

关键词:三江成矿带;尕龙格玛;成矿流体;矿床;S 同位素;Pb 同位素;H、O 同位素;岩石学。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2017)06-0941-16

收稿日期: 2016-12-10

Fluid Inclusions and H-O-S-Pb Isotope Systematics of the Galonggema Cu Deposit in Yushu, Qinghai Province, China

Wang Jian, Sun Fengyue, Yu Lu, Jiang Hefang, Wang Fei, Ning Chuanqi

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: In order to determine the metallogenic physicochemical condition, ore-forming materials, ore-forming fluid and metallogenic mechanism of Galonggema VMS (volcanogenic massive sulfide) deposit in the northern Sanjiang metallogenic belt, China, orebody features, fluid inclusion microthermometry, laser Raman spectroscopy, and S, Pb, H, O isotopes are studied in this paper. It is found that deposit is hosted in the Late Triassic Batang Group dacite-volcanic tuff and consists of two parts, namely, lower ore belt of vein-stockwork mineralization system belonging to hydrothermal fluid supply channel, and upper ore belt of exhalative-chemical deposit system of submarine basin brine pond. Fluid inclusions (FIs) in vein-stockwork mineralization are both aqueous and gas-rich, homogenization temperature from 175.6 to 263.3 °C, and salinities of 1.05%–6.29% NaCl equivalent (eqv.) and densities of 0.820–0.935 g/cm³. Laser Raman spectroscopic analyses of the gas phase components of FIs show they are dominated by H₂O, CO₂ and minor amounts of N₂. Fluid inclusions in barite in exhalative-chemical deposit system are only aqueous FIs, homogenization temperature from 105.2 to 157.1 °C, and salinities of 0.18%–5.55% NaCl eqv. and densities of 0.735–1.173 g/cm³ suggesting from lower ore belt to upper ore belt metallogenic temperature drops, salinities does

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41272093);中国地质调查局项目(No.12120113098300).

作者简介:王键(1987-),男,博士研究生,岩石学、矿床学、矿床学专业。ORCID: 0000-0002-8994-9823.E-mail: wjian118@hotmail.com

* **通信作者:**孙丰月, E-mail: sunfy_66@126.com

引用格式:王键,孙丰月,禹禄,等,2017.青海玉树尕龙格玛 VMS 型矿床流体包裹体及 H-O-S-Pb 同位素特征.地球科学,42(6):941-956.

not change, and the density of fluid increases. Hydrogen and oxygen isotopic study ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: 0.25‰–1.75‰, δD : -103.2‰ to -65.3‰) shows that metallogenic fluid is a mixture of seawater and magmatic water. The predecessors research results of sulfur isotope previous research indicates that the sulfur were provided by magma and bacteria reduction seawater sulfate or basement rock. Lead isotopic compositions of galena show $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios ranging from 18.449 to 18.519, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios from 15.677 to 15.777, and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios from 38.875 to 39.145, respectively. Lead isotopes has high radioactive lead isotope compositions with μ values of 9.65~9.80. It suggests that the lead mainly was sourced from crustal components and little from magma. The mixing of ore-forming fluid and seawater is the main metallogenic mechanism of Galonggema deposit.

Key words: Sanjiang metallogenic belt; Galonggema; ore-forming fluid; deposit; S isotope; Pb isotope; H, O isotopes; petrology.

0 引言

VMS(volcanogenic massive sulfide)型矿床是全球重要的铜、铅、锌来源之一,其成矿过程已经被古代和现代海底火山块状硫化物矿床所记录(Pirajno, 2009;孙华山等,2011).世界已经发现大型VMS矿床主要有:日本黑矿(Ishikawa *et al.*,1962)、欧洲伊比利亚黄铁矿带、辽宁红透山VMS型矿床(Zhang *et al.*, 2014)、澳大利亚VMS型矿床(Huston *et al.*,2001; Large *et al.*,2001)、美国红狗VMS型成矿区(Kelley *et al.*,2004)、现代海底热液矿床分布在东太平洋隆起北纬21°(Haymon and Kastner,1981)和西南太平洋的劳盆地之中(Herzig *et al.*,1993).

玉树地区位于中国西南三江成矿带北段青海省境内,是全球构造域尺度上特提斯—喜马拉雅构造域重要组成部分,也是冈瓦纳大陆与欧亚大陆强烈挤压地带.该构造成矿带经历了古生代—中生代特提斯多岛弧盆演化,同时叠加了新生代印度板块与欧亚板块陆—陆碰撞造山作用,形成第三纪前陆盆地、走滑拉分盆地、走滑断裂和逆冲推覆构造(侯增谦等,2006).成矿带内包含多种类型多金属矿床,包括VMS型、斑岩型和热液脉型(He *et al.*,2009;田世洪等,2009;唐菊兴等,2009;郑宗学等,2012;党院等,2014),其中VMS型矿床是该带内重要的矿床类型,主要形成于晚古生代到晚三叠世时期(杨喜安,2012;郑宗学等,2012;党院等,2014).前人对于三江成矿带南段的矿床研究较为系统(He *et al.*, 2009;唐菊兴等,2009;党院等,2014),而对于三江成矿带北段的研究相对较少.近些年来在青海玉树地区发现多处矿床及矿化点,包括尕龙格玛铜多金属矿床、查涌铜多金属矿床、撒纳龙哇铜矿点、多日茸铅锌矿点等.显示出良好的成矿潜力,尕龙格玛铜矿床为区内一大型VMS型铜矿床,前人对其主要从矿床地质特征、成矿模式、找矿前景及区内火山岩特征进行了研究(郑宗学等,2012;吴碧娟等,2013;辛

天贵等,2014).辛天贵等(2014)认为该矿床成矿经历了火山沉积、动力变形和热液叠加3个阶段,与VMS型有很大区别,而郑宗学等(2012)认为该矿床属于长英质火山岩容矿的块状硫化物矿床.对于两种不同的认识,主要是由于对成矿流体和成矿物质的来源研究不足,为此笔者对该矿床进行了流体包裹体岩相学、显微测温、激光拉曼以及氢、氧、硫、铅同位素研究,以探讨该矿床的成矿流体和成矿物质来源及演化,为准确厘清矿床成因以及建立成矿模式提供依据.

1 地质背景

尕龙格玛VMS型矿床位于三江成矿带北段青海玉树地区,处于青藏高原碰撞造山带东北部,大地构造上夹持于金沙江缝合带与龙木错双湖缝合带之间,北缘为北羌塘地体,南侧为南羌塘地体,北东侧为松潘甘孜地体(图1).区内出露地层主要为古生界和中生界,其次为新生界.古生界主要包括下石炭统杂多群和下、中二叠统开心岭群,主要出露于研究区西南侧,出露面积较小,呈北西向断块产出.中生界包括中三叠统结隆组、上三叠统巴塘群、上三叠统结扎群、查涌蛇绿混杂岩、多彩蛇绿混杂岩和侏罗系雁石坪群雀莫错组、布曲组和夏里组,在区内广泛发育,为中生代盆地内发育的碎屑岩—碳酸盐建造(图2).其中巴塘群为区内赋矿地层,主要由玄武岩—中性安山岩—流纹岩组成,构成一套从基性—中性—酸性的岩石组合,具较完全的演化序列,岩石化学表现为低 TiO_2 (<1%),高 Al_2O_3 ;稀土元素特征表现为轻稀土元素富集;在微量元素地球化学方面,表现为富集大离子亲石元素,亏损高场强元素, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 变化在-0.3~2.9, $\epsilon_{\text{Sr}}(t)$ 变化在14.4~39.2,具有弧火山岩特征(白云山等,2014).新生界为陆相沉积盆地沉积的古近系沱沱河组、新近系雅西错组和曲果组及第四系冰川堆积.区内褶皱构造和断裂构造发育,

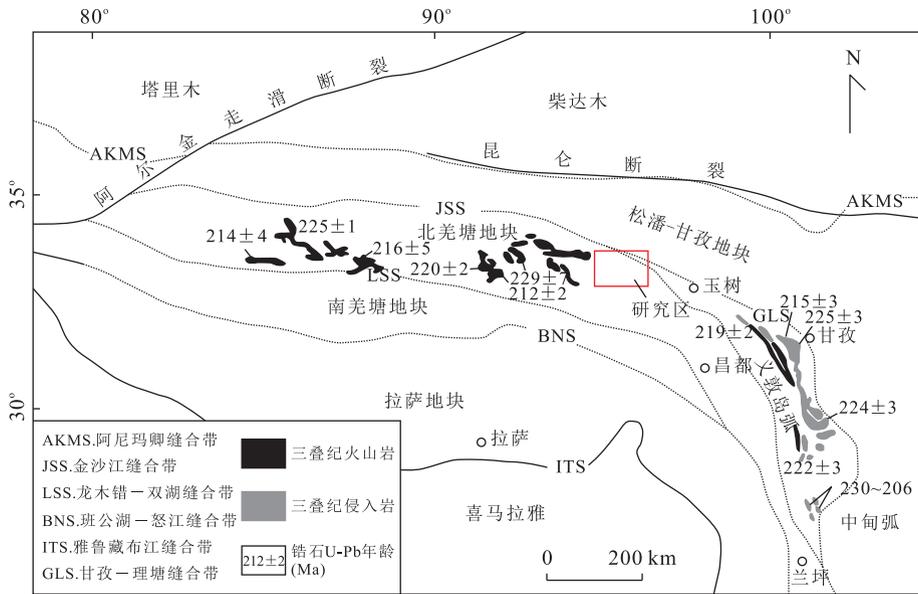


图 1 中国三江成矿带北段大地构造位置略图

Fig.1 Simplified geological map of the northern Sanjiang metallogenic belt in China showing major structures 据 Yin and Harrison(2000); Spurlin *et al.*(2005)修改

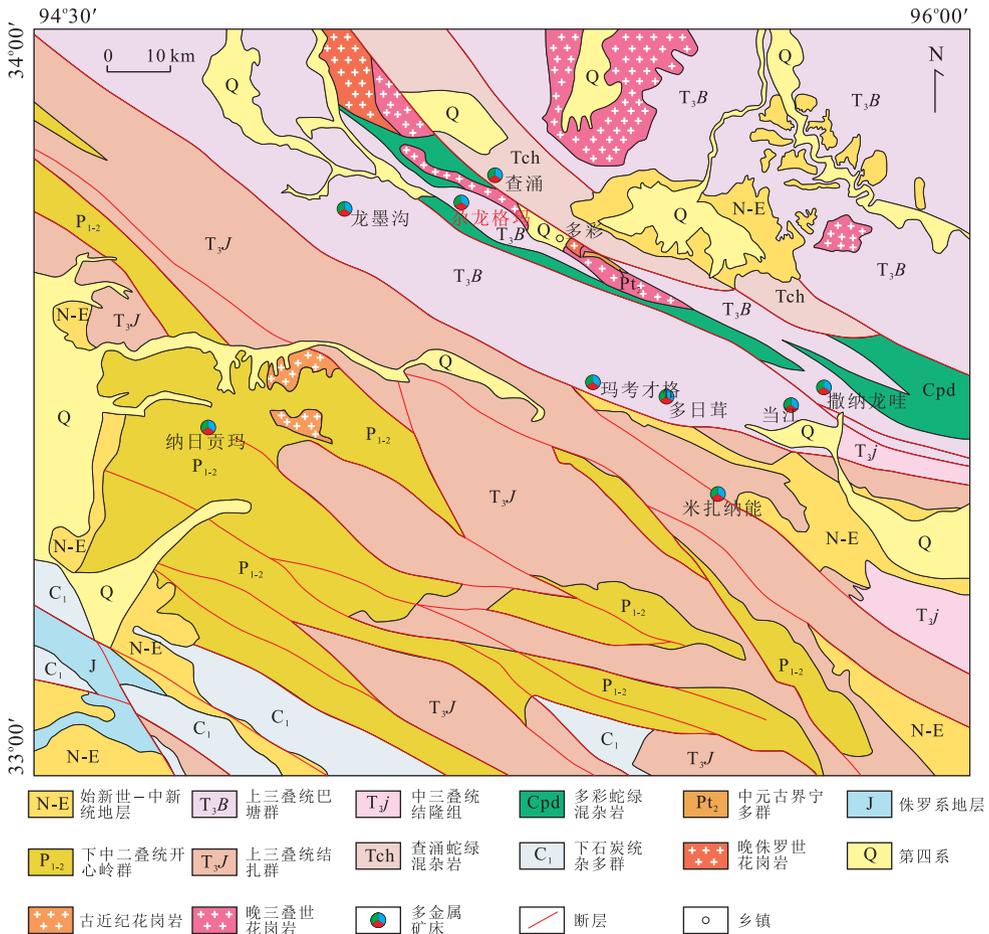


图 2 杂龙格玛矿床区域地质图

Fig.2 Regional geological map of Galonggema deposit

巴塘群的褶皱是较为典型的线性褶皱,向南逐渐变得较为开阔,在复背、向斜上的次一级褶皱也十分发育,它们与复背、向斜轴向一致,但形态则较为开阔.区内断裂构造可分为 NW 向、NE 向和近 EW 向 3 组,NW 向断裂为区内主断裂,延伸都较长,对区内地层、岩浆活动、后期的变质改造具有明显的控制作用,NE 向和 EW 向断裂延伸都较短,错断地层和早期构造,形成时代较晚,为喜山期产物(辛天贵等, 2014).区内侵入岩出露面积不大,岩浆侵入期次主要有:晚三叠世(赵少卿等, 2015)、晚侏罗世和古近纪.以印支期侵入次数多,岩石类型复杂,从基性岩到酸性岩均有出露,以中酸性岩为主.火山岩主要集中于晚三叠世,为海相裂隙喷发岩,呈层状,主要为酸性—中性—基性熔岩与火山碎屑岩,岩性为安山岩、凝灰岩、玄武岩、安山玄武岩、火山角砾岩、流纹岩等.

2 矿床地质特征

尕龙格玛 VMS 型矿床分为东西两个矿区,其中东矿区勘探和研究程度较高,目前共圈出铜铅锌矿体 6 条,铜矿体 4 条,铅锌(铜)矿体 2 条(图 3,图 4).其中 2 号矿体,为整个区内最为厚大、且品位较高的矿体.其他矿体均为一些隐伏矿体.东矿区相对于西矿区

各矿体品位较高.本次工作主要在东矿区进行.

矿区地层总体向北东陡倾,倾角 $65^{\circ}\sim 80^{\circ}$.主体为海相火山喷发岩,岩性由北至南依次为火山角砾夹集块岩、火山角砾岩、安山质火山凝灰岩、岩屑晶屑凝灰岩和长石石英砂质板岩,局部夹灰岩.矿体赋存于安山质火山凝灰岩中,该安山质凝灰岩属于钙碱性—过碱性系列,偏铝质,轻稀土富集, Eu 异常不明显,形成于活动大陆边缘的岛弧活动带(吴碧娟等, 2013).矿区断层不发育,有 NE 向逆断层、正断层和平移断层,对矿体起着一定的破坏作用,但由于断层规模不大,破坏影响程度较小.尕龙格玛矿区未发现侵入岩,然而从遥感影像特征上看,矿区出现两个环形构造,初步认为深部可能有隐伏岩体存在(郑宗学等, 2012).火山岩以英安质角砾熔岩、集块熔岩为主(集块可达 $40\sim 50\text{ cm}$),其次为英安质凝灰岩、英安岩,属于近火山口相火山岩组合.

矿体主体赋存于安山质火山凝灰岩中,层控特征明显,矿体具有双层结构:上部沉积相矿体呈条带状、块状,具沉积特征,条带状矿体产于重晶石中(图 5a, 5b),块状矿体与铁白云石相伴生(图 5c, 5d);下部通道相矿体呈脉状和细脉浸染状产于层状矿体下部或穿切层状矿体(图 5e~5f),具有 VMS 型矿床的双层结构(郑宗学等, 2012).矿体沿 NW 向区域构造线展布,少数沿 NE 向断层切断矿体,矿体规模较大,品位较高(辛天贵等, 2014).其中 2 号矿体长

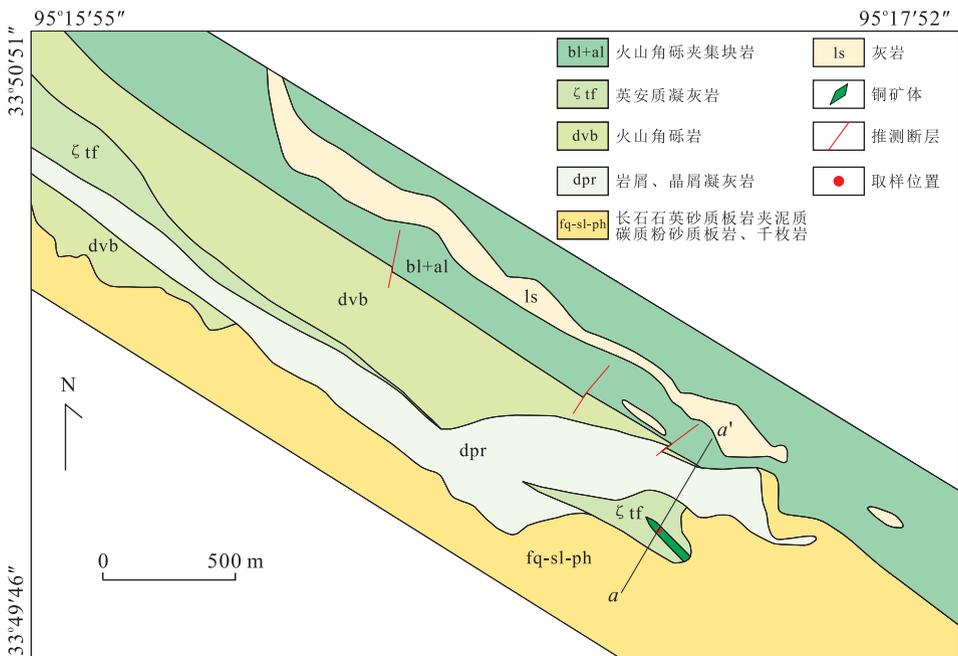


图 3 尕龙格玛东矿区地质图

Fig.3 Geological map in the east ore district of Galonggema deposit

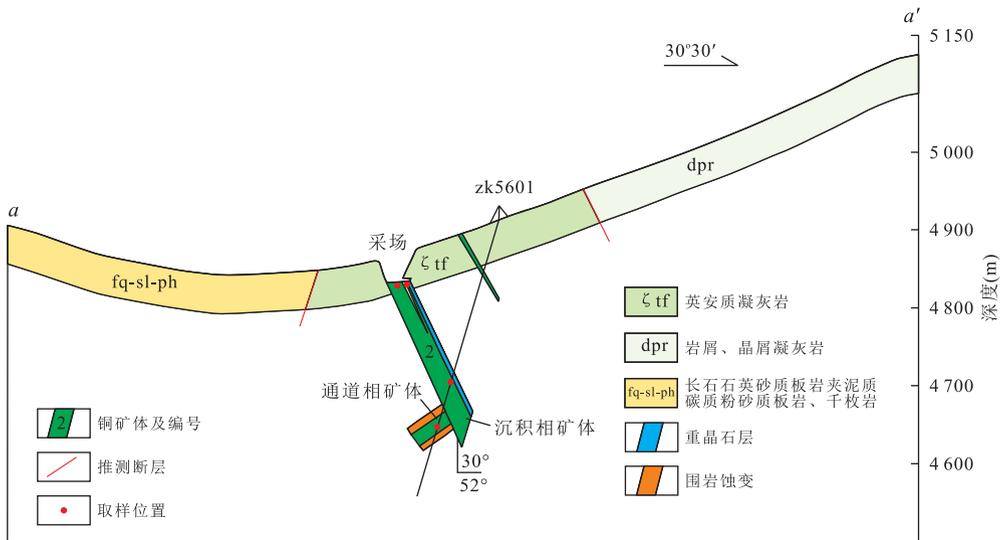


图4 尕龙格玛东矿区 56 线勘探线剖面

Fig.4 Cross section along exploration line 56 in the east ore district of Galonggema deposit

750 m, 平均厚度为 15.64 m, 最厚处为 48.73 m, 倾向延伸约 450 m, 倾角 $40^{\circ}\sim 62^{\circ}$, 走向 $300^{\circ}\sim 310^{\circ}$, 平均品位 Cu 为 1.850%, Pb 为 1.914%, Zn 为 2.032%。整体来看, 矿体厚度向东有逐渐变薄的趋势, 且整个矿体与火山岩产状一致向 NE 倾伏。矿体倾角向 SE 逐渐变缓。矿石矿物成分比较简单, 金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黝铜矿, 次生矿石矿物主要为辉铜矿、铜蓝和孔雀石。脉石矿物主要为重晶石、方解石和石英, 其次为钠长石、绢云母。矿石结构有细粒粒状结构、交代结构和共生结构, 矿石构造有条带状、块状、脉状等(图 5g~5o)。矿体矿石矿物组合具有一定的垂直分带性, 上部为条带状闪锌矿—方铅矿—重晶石—黄铜矿—黝铜矿, 下部为块状黄铁矿—黄铜矿—闪锌矿—方铅矿。依据矿物组合及矿物之间的穿切关系可将尕龙格玛热液成矿期划分为 3 个阶段:(1)黄铁矿阶段: 为主成矿阶段, 矿石矿物组合为黄铁矿, 在主要分布在沉积相块状矿石中, 呈草莓状, 具有热水喷流沉积的特点(图 5h~5j); (2)多金属硫化物阶段: 矿石矿物组合为黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黝铜矿、石英和重晶石, 在重晶石中呈条带状分布(图 5a、5b 和 5g), 在块状矿石中, 黄铜矿、方铅矿和闪锌矿具有明显沉积作用形成的固溶体分离结构(图 4j 和 4k), 并可见黄铜矿交代早阶段黄铁矿充填于草莓状黄铁矿颗粒间隙之中(图 5i、5j 和 5m); (3)碳酸盐—石英阶段: 矿石矿物组合主要为碳酸盐、石英并有少量方铅矿和闪锌矿, 主要呈脉状网脉状穿切块状矿石。围岩蚀变主要发育于下部脉状矿体周围, 以硅化、绢英

岩化、碳酸盐化为主, 其次为绿泥石化、绿帘石化等。其中硅化和碳酸盐化发育最为广泛。围岩蚀变具有对称水平分带性, 内带为硅化带, 形成大量自形一半自形黄铁矿, 伴随有铜、铅和锌矿化。外带为青磐岩化带, 带宽 100~500 m, 以绿泥石化和绿帘石化为主(郑宗学等, 2012)。

3 流体包裹体研究

3.1 包裹体岩相学

为进一步研究尕龙格玛铜多金属矿床的成矿流体特征, 笔者分别对上部沉积相块状矿石中重晶石和下部通道相脉状矿石石英中流体包裹体进行了研究, 依据包裹体在室温下的相态特征、加热过程中的相变及激光拉曼光谱分析结果, 可将包裹体分为以下 2 种类型。

(1)水溶液两相包裹体(L-V 型)。该类包裹体在通道相石英硫化物中和沉积相重晶石中均有发育, 石英中包裹体较多, 多呈椭圆形、圆形和不规则状, 大小为 $4\sim 20\ \mu\text{m}$, 主要集中在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 气液比为 5%~30%; 在重晶石中包裹体含量较少, 呈椭圆形、圆形和不规则状, 多在 $4\sim 10\ \mu\text{m}$, 气液比为 5%~20%(图 6a~6f)。

(2)富气相包裹体(V 型)。主要发育于通道相中脉状网脉状石英硫化物之中, 包裹体多为椭圆状、圆状、长条状和不规则状, 大小为 $6\sim 12\ \mu\text{m}$, 主要集中在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$, 气液比为 60%~100%, 主要集中在

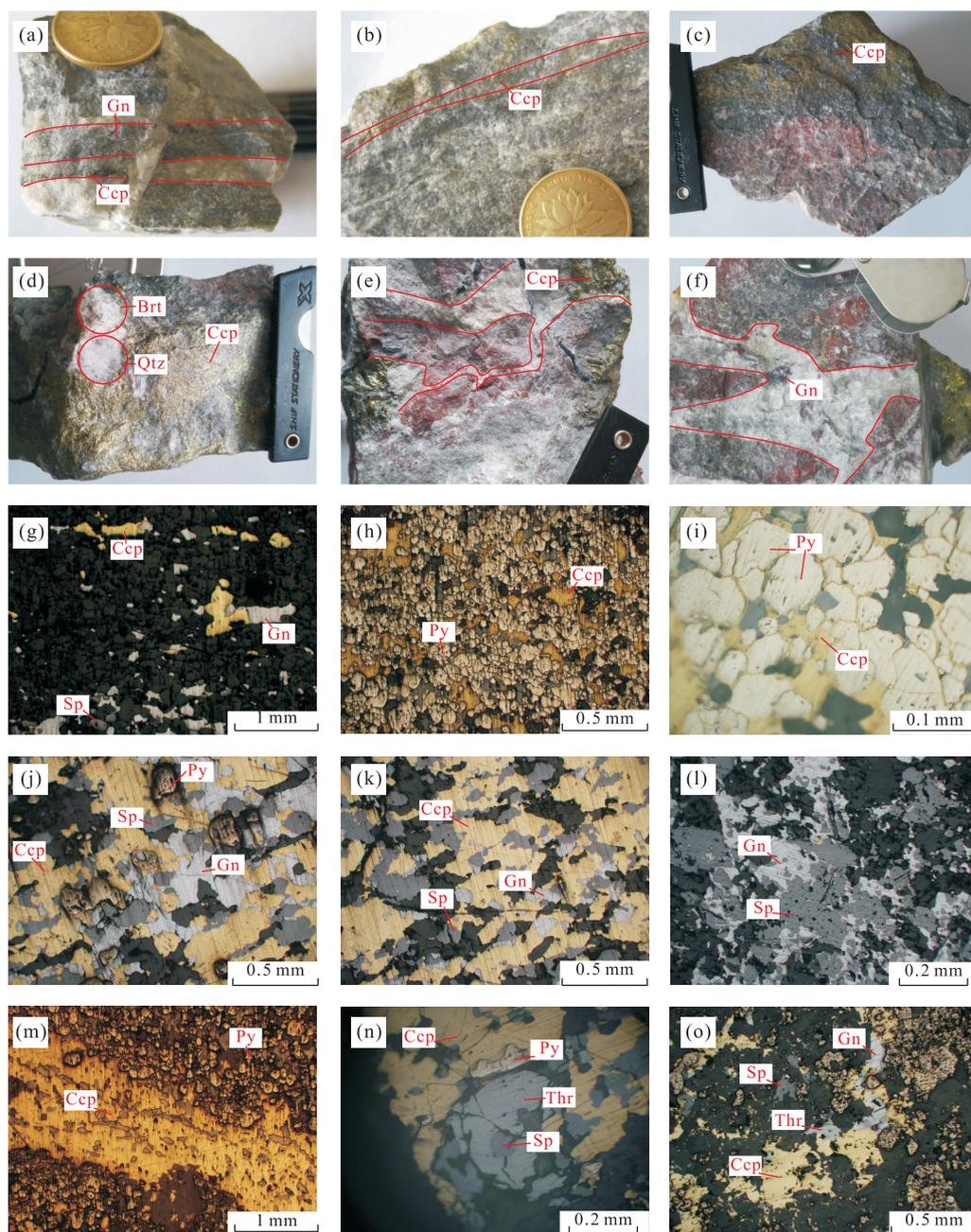


图 5 尕龙格玛铜多金属矿床主要矿石矿物特征及显微照片

Fig.5 Representative photograph of ores from the Galonggema deposit

a, b. 重晶石中条带状硫化物矿石; c, d. 2 号矿体中沉积相中块状硫化物矿石; e, f. 通道相石英硫化物脉穿切如沉积相块状矿石中; g. 重晶石层中条带状矿石中黄铜矿和方铅矿, 正交偏光; h. 沉积相中块状硫化物矿石草莓状黄铁矿, 正交偏光; i. 沉积相中, 黄铜矿沿黄铁矿裂隙分布, 正交偏光; j. 沉积相块状矿石中, 黄铜矿、方铅矿、闪锌矿交代草莓状黄铁矿, 正交偏光; k. 沉积相块状矿石中方铅矿、闪锌矿、黄铜矿共生, 固溶体分离结构, 正交偏光; l. 沉积相浸染状矿石中方铅矿交代闪锌矿; m. 通道相矿石中的黄铜矿脉; n. 沉积相中黝铜矿包裹闪锌矿, 正交偏光; o. 通道相中黝铜矿与黄铜矿共同产出, 正交偏光; Py. 黄铁矿; Ccp. 黄铜矿; Gn. 方铅矿; Sp. 闪锌矿; Thr. 黝铜矿; Brt. 重晶石; Qtz. 石英

70%~90%, 少数为纯气相包裹体(图 6g, 6i).

3.2 包裹体显微测温

包裹体显微测温实验在吉林大学地球科学学院地质流体实验室 Linkman THMS-600 冷热台上进行。冷热台测温范围 $-196 \sim +600$ °C, 接近冰点

(T_i)时的升温速率为 0.1 °C · min⁻¹, 接近均一温度(T_h)时的升温速率为 1 °C · min⁻¹. 包裹体盐度采用 Hall *et al.* (1988) 公式求出, 密度采用 Bodnar (1983) 经验公式求出, 数据综合列入表 1.

本次对沉积相重晶石及通道相石英中的流体包

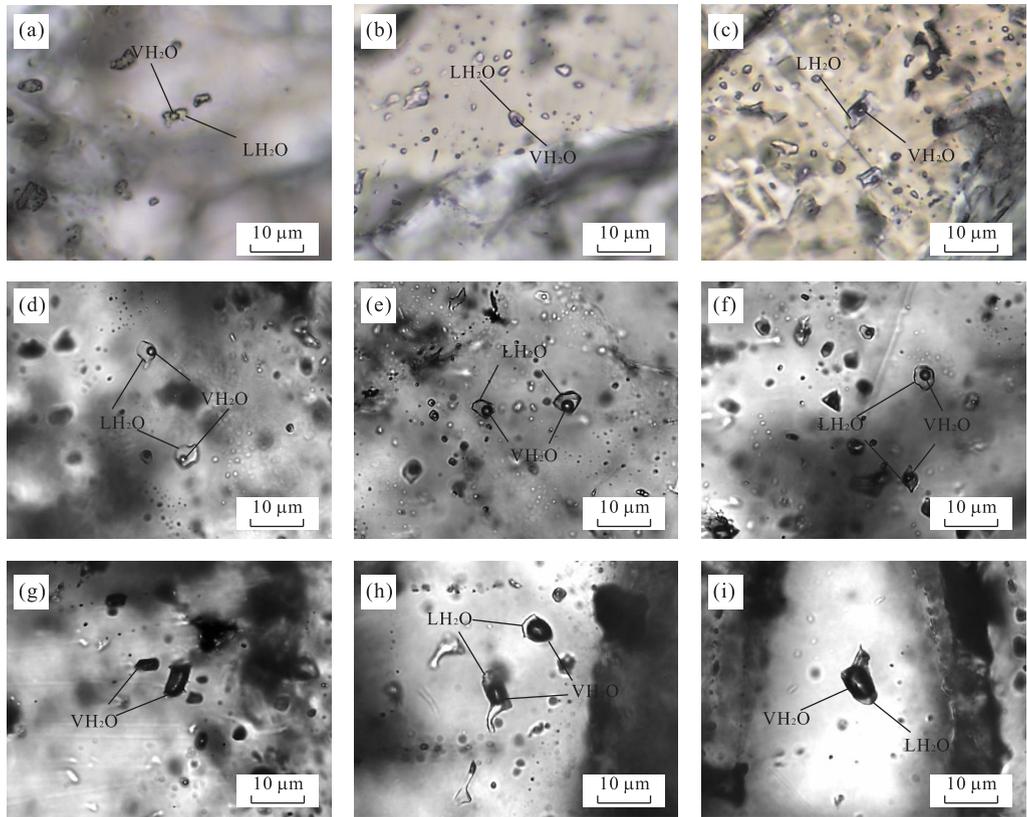


图 6 尕龙格玛东矿区重晶石和石英中流体包裹体显微照片

Fig.6 Photomicrographs of representative FIs from the Galonggema deposit
a,b,c.重晶石中气液两相包裹体;d,e,f.石英中气液两相包裹体;g,h,i.石英中富气相包裹体

表 1 矿床流体包裹体显微测温结果及参数

Table 1 Microthermometric data and relative parameters of fluid inclusions of the Galonggema deposit

矿石类型	包裹体类型	大小(μm)	气液比(%)	冰点温度 T_i (°C)	均一温度 T_h (°C)	S(%NaCl)	ρ (g/cm ³)
通道相	V 型	6~12	60~90	-1.6~-0.6	241.7~263.3(9)	1.05~2.73	0.820~0.882
通道相	L-V 型	4~20	5~30	-3.9~-1.2	175.6~259.8(67)	2.06~6.29	0.838~0.935
沉积相	L-V 型	4~10	5~20	-3.4~-0.1	105.2~157.1(34)	0.18~5.55	0.735~1.173

注:括号内数字为流体包裹体个数。

裹体进行了流体包裹体显微测温,结果如下。

(1)通道相.石英中流体包裹体主要为水溶液包裹体及少量富气相包裹体.富气相包裹体(V 型)升温时大部分气泡变大最终均一至气相,少数发生临界均一,均一温度为 241.7~263.3 °C,冰点温度为 -1.6~-0.6 °C,对应盐度为 1.05%~2.73% NaCl eqv.,密度为 0.820~0.882 g/cm³(图 7a,7b). 盐水溶液包裹体(L-V 型)升温过程中包裹体均一至液相,均一温度为 175.6~259.8 °C,冰点温度为 -3.9~-1.2 °C,盐度为 2.06%~6.29% NaCl eqv.,密度为 0.838~0.935 g/cm³.可见同一视域下富气相包裹体与盐水溶液包裹体共存,且均一方式不同,向气相均一、液相均一和临界均一均存在,最

终均一温度相近,显示出沸腾流体包裹体的特征.成矿流体属于中温中低盐度低密度流体。

(2)沉积相.重晶石中包裹体均为盐水溶液包裹体(L-V),升温时均一至液相,均一温度为 105.2~157.1 °C,峰值温度为 110~150 °C,冰点温度为 -3.4~-0.1 °C,盐度为 0.18%~5.55% NaCl eqv.,密度为 0.735~1.173 g/cm³(图 7c,7d). 重晶石中发育盐水溶液包裹体,总体与通道相石英中流体性质较为接近,应为同一流体不同演化阶段的产物,但均一温度有明显降低,成矿流体属于低温中低盐度低密度流体。

3.3 激光拉曼光谱分析

激光拉曼探针分析在吉林大学地球科学学院地

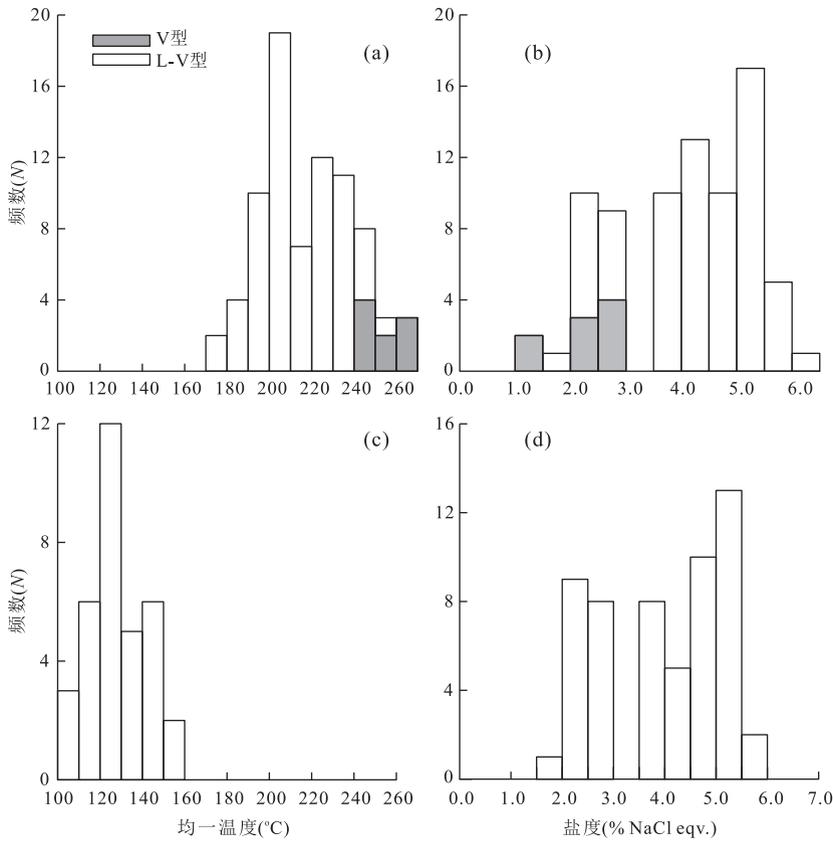


图 7 尕龙格玛矿床流体包裹体均一温度盐度直方图

Fig.7 Histograms of salinities and homogenization temperatures of FIs in Galonggema VMS deposit

a.通道相石英中流体包裹体均一温度直方图;b.通道相石英中流体包裹体盐度直方图;c.沉积相重晶石中流体包裹体均一温度直方图;d.沉积相重晶石中流体包裹体盐度直方图;盐度为质量百分含量

质流体实验室进行,测试仪器型号为 Renishaw 公司 RM-1000 型,实验条件为 532 nm 半导体泵浦激光器,光谱计数时间为 30 s,分辨率 $1\sim 2\text{ cm}^{-1}$,激光束斑 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。

本次主要针对通道相石英中富气相包裹体及气液两相包裹体进行激光拉曼分析,结果在激光拉曼位移 $3\ 399\sim 3\ 500\text{ cm}^{-1}$ 附近显示非常清晰的 H_2O 谱峰。部分谱图列于图 8。可以看出脉状矿石石英中包裹体的气相在 $1\ 285\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 388\text{ cm}^{-1}$ 处显示了明显的峰值,表明其中存在 CO_2 ; 在 $2\ 331\text{ cm}^{-1}$ 处的明显峰值,表明气相成分中 N_2 的存在。结果表明尕龙格玛 VMS 型矿床通道相石英中成矿流体中富含 H_2O 、 CO_2 和少量 N_2 ,属于 $\text{H}_2\text{O}\text{-NaCl}\text{-CO}_2\text{-N}_2$ 体系,本次包裹体成分的分析是该地区同类型矿床的首次报道。

4 稳定同位素研究

4.1 氢氧同位素

为了解成矿演化过程中的流体性质,笔者对尕

龙格玛矿床主成矿阶段中石英进行了氢、氧同位素分析。样品测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,使用质谱型号为 MAT253,石英的氧同位素分析方法用 BrF_5 法,水中的氢同位素分析方法用锌还原法,分析结果见表 2。

尕龙格玛 4 件石英样品中流体包裹体中 $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$ 值为 $103.2\text{‰}\sim -65.3\text{‰}$,平均值为 81.93‰ ,极差 37.90‰ 。由于包裹体发生沸腾,所以均一温度可以代表包裹体的捕获温度,依据 Clayton *et al.* (1972) 石英-水氧同位素平衡交换分馏方程:

$$1\ 000\times\ln\alpha_{\text{石英-水}}=3.38\times 10^6/T^2-3.40,$$

峰值均一温度可以代表其成矿温度,脉状矿石峰值均一温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$,计算出流体中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值为 $0.25\text{‰}\sim 1.75\text{‰}$,平均值 0.85‰ ,极差 1.50‰ 。

4.2 硫同位素

硫同位素分析在北京燕都中实测试技术有限公司实验室 MAT-251EM 型质谱计上完成,硫化物样品直接以 Cu_2O 作氧化剂制备 SO_2 ,分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$,相对标准为 V-CDT。详细分析流程见 Giese-

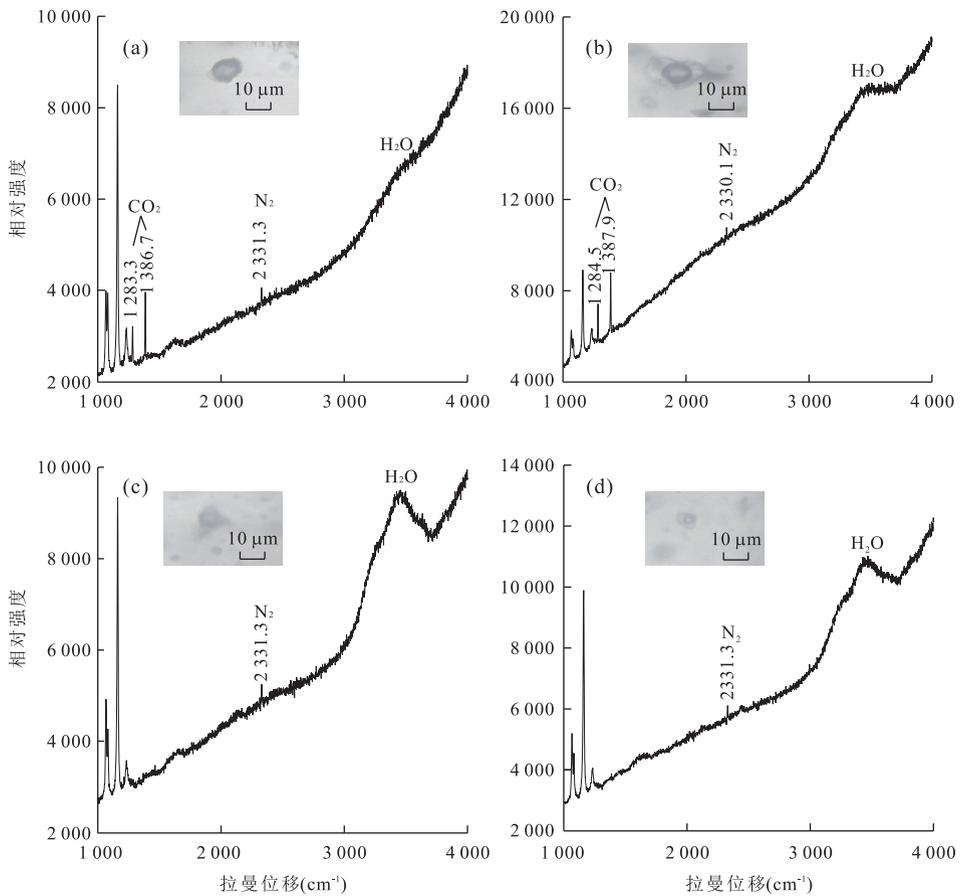


图 8 尕龙格玛通道相石英中流体包裹体激光拉曼光谱分析结果
Fig.8 Laser Raman spectra of FIs the Galonggema deposit
a,b,c.通道相石英中富气相包裹体;d.通道相石英中气液两相包裹体

表 2 尕龙格玛铜多金属矿床主成矿阶段石英中氢、氧同位素组成

Table 2 Hydrogen and oxygen isotope compositions of the Galonggema deposit

样品号	$\delta D_{V-SMOW} (\text{‰})$	$\delta^{18}O_{V-SMOW} (\text{‰})$	计算温度($^{\circ}C$)	$\delta^{18}O_{H_2O} (\text{‰})$
GLGM-CK-B1	-65.9	10.7	250	1.75
GLGM-CK-B2	-65.3	9.2	250	0.25
GLGM-KSD-W6	-103.2	9.4	250	0.45
GLGM-KSD-B10	-93.3	9.9	250	0.95

表 3 尕龙格玛铜多金属矿床硫同位素结果

Table 3 Sulphur isotopic compositions of the Galonggema deposit

样品编号	测试矿物	$\delta^{34}S_{V-CDT} (\text{‰})$
GLGM-CK-B2	黄铜矿	-16.6
GLGM-CK-B3	黄铜矿	-17.2
GLGM-CK-B4	黄铁矿	-14.7
GLGM-KSD-B1	黄铁矿	-15.4
GLGM-KSD-B1	方铅矿	-19.7
GLGM-KSD-B2	方铅矿	-22.9
GLGM-KSD-B5	黄铁矿	-16.4

mann *et al.* (1994).

选取主成矿阶段 2 件黄铜矿、3 件黄铁矿、2 件方铅矿共 7 件样品进行了硫同位素分析,分析结果见表 3.可以看出,2 件黄铜矿 $\delta^{34}S$ 为 -17.2‰ 和 -16.6‰ , 3 件黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值为 $-16.4\text{‰} \sim -14.7\text{‰}$, 2 件方铅矿 $\delta^{34}S$ 值为 -22.9‰ 和 -19.7‰ .

4.3 铅同位素

铅同位素分析由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,同位素分析采用 ISOPROBE-T 热电离质谱计,用磷酸硅胶将样品点在铯带上,用静态接受方式测量铅同位素比值.NBS981 未校正结

表 4 尕龙格玛铜多金属矿床铅同位素结果

Table 4 Lead isotopic compositions of the Galonggema deposit

样品号	样品名称	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	μ
GLGM-CK-B2	方铅矿	18.519	15.777	39.141	9.80
GLGM-CK-B3	方铅矿	18.500	15.755	39.065	9.76
GLGM-KSD-B1	方铅矿	18.449	15.699	38.875	9.65
GLGM-KSD-B2	方铅矿	18.464	15.720	38.949	9.69
GLGM-KSD-B5	方铅矿	18.497	15.763	39.091	9.78

注： $\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$.

果： $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 2.164\ 940 \pm 15$ ， $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.914\ 338 \pm 7$ ， $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.059\ 110\ 7 \pm 2$ ，全流程本底 $\text{Pb} < 100 \times 10^{-12}\ \text{g}$ 。

选取矿床主成矿阶段 5 件方铅矿样品进行了铅同位素分析，分析结果见表 4，数据点的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 投影图解见图 7。从表 4 和图 7 中可以看出，5 件方铅矿 Pb 同位素组成较为接近，方铅矿的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 分别为 18.449~18.519、15.699~15.777、38.875~39.141， μ 值为 9.65~9.80。

5 讨论

5.1 成矿物质和成矿流体来源

5.1.1 氢、氧来源 尕龙格玛主成矿阶段两个样品 (GLGM-CK-B1 和 GLGM-CK-B2) 的氢氧同位素结果 (δD : $-65.9\text{‰} \sim -65.3\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: $0.25\text{‰} \sim 1.75\text{‰}$) 显示氢同位素组成具有岩浆水的特点 (δD : $-50\text{‰} \sim -85\text{‰}$; Taylor, 1974)，氧的同位素组成略低于岩浆水 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: $5.5\text{‰} \sim 10.0\text{‰}$; Taylor, 1974)。在图 9 中投点落入岩浆水区域附近，与三江成矿带南段大屏掌 VMS 型矿床的氢氧同位素值 (δD : $-78\text{‰} \sim -59\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: $-5.7\text{‰} \sim 2.9\text{‰}$; 钟宏等, 2000) 相似，表明主成矿阶段早期成矿流体具有岩浆水的特征。另外两个样品 (GLGM-KSD-W6 和 GLGM-KSD-B10) 氢氧同位素结果 (δD : $-103.2\text{‰} \sim -93.3\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: $0.45\text{‰} \sim 0.95\text{‰}$) 尤其氢同位素明显低于岩浆水。一般引起 δD 值降低的主要因素有：(1) 氧逸度的改变；(2) 氢同位素的分离作用，例如 CH_4 或 H_2 的溢出 (Taylor, 1974)；(3) 岩浆脱气作用 (Rye, 1993)；(4) 大气降水或海水的混合 (Taylor, 1974)。由于主成矿阶段硫化物大量持续的沉淀，表明氧逸度未发生明显的变化 (Calagari, 2003)。本次对流体包裹体进行激光拉曼光谱分析未

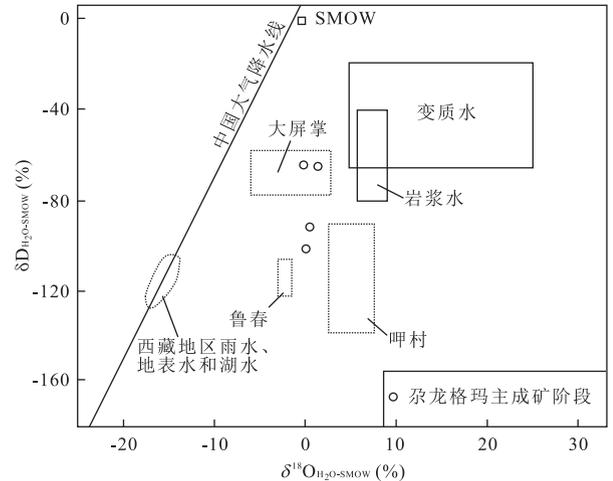


图 9 尕龙格玛铜多金属及邻区热液矿床 δD - $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 图解

Fig.9 δD - $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ diagram of the Galonggema deposit 底图据 Taylor(1974); 西藏地区雨水、地表水和湖水数据引自郑淑蕙等(1982); 大屏掌数据引自钟宏等(2000); 鲁春数据引自杨喜安(2012); 呷村数据引自党院等(2014); SMOW. 标准平均大洋水

发现有 CH_4 或 H_2 的存在。由于岩浆阶段只有少量的水存在，所以大气降水或海水的混合作用可能是引起尕龙格玛成矿流体中 δD 值降低的主要原因。在图 9 中投点落入岩浆水区域与西藏地区雨水、地表水和湖水区域之间，位于三江成矿带南段成矿流体以海水为主的鲁春 (δD : $-123\text{‰} \sim -107\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: $-2.74\text{‰} \sim -1.25\text{‰}$; 杨喜安, 2012) 和呷村 (δD : $-130.6\text{‰} \sim -90.2\text{‰}$ ， $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: $3.30\text{‰} \sim 6.80\text{‰}$; 党院等, 2014) VMS 型矿床区域附近，表明主成矿阶段晚期成矿流体中逐渐有海水的加入。

5.1.2 硫来源 硫在各种金属矿床中广泛存在，是不同成因类型矿床硫化物矿石的主要组成元素之一，通过硫同位素组成的研究，可以帮助了解和判断成矿物质来源 (Ohmoto, 1986)。

尕龙格玛 7 件硫化物样品的 $\delta^{34}\text{S}$ 值介于 $-22.9\text{‰} \sim -14.7\text{‰}$ ，极差为 8.2‰ ，平均为 -17.6‰ ，具有还原硫的特点。2 件黄铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 -17.2‰ 和 -16.6‰ ，3 件黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为

-16.4‰~-14.7‰, 2 件方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -22.9‰ 和 -19.7‰。硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值呈黄铁矿 > 黄铜矿 > 方铅矿, 表明尕龙格玛硫化物基本上达到了硫同位素分馏平衡(郑永飞和陈江峰, 2000)。一般认为火山成因块状硫化物矿床(VMS)硫有两个主要来源, 即岩浆硫 ($\delta^{34}\text{S} \approx 0\text{‰}$) 和海水硫酸盐 ($\delta^{34}\text{S} \approx 20\text{‰}$) (Rye *et al.*, 1984; 贾群子, 1996)。例如, 三江成矿带南带 VMS 型矿床, 大屏掌、呷村和鲁春中硫均具有岩浆硫的特点(图 10), 郑宗学获得尕龙格玛矿床 3 件矿石样品中黄铁矿硫同位素 $\delta^{34}\text{S} = 1.13\text{‰} \sim 2.45\text{‰}$, 黄铜矿硫同位素 $\delta^{34}\text{S} = 12.36\text{‰} \sim 12.37\text{‰}$, 表明岩浆硫和海水硫酸盐均为成矿提供了硫(郑宗学, 2010。《治多多彩地区铜多金属矿普查阶段性总结》报告, 青海)。而本次获得尕龙格玛 VMS 型矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为较大负值, 具有还原硫的特点, 并非来源于岩浆硫, 而是应来自于细菌还原硫。三江成矿带北段热液矿床查涌 ($\delta^{34}\text{S}$: -21.8‰~-19.2‰, 未发表数据) 和多日茸 ($\delta^{34}\text{S}$: -24.3‰~-7.2‰, 未发表数据) 中均具有负硫值的特点, 热液矿床莫海拉亨与东莫扎抓同样显示出富集轻硫的特点, 多数研究者均认为该宽负硫值特点的硫应来源于海水硫酸盐的细菌还原作用或是来自于底部岩石。尕龙格玛宽泛的硫同位素组成与伊比利亚黄铁矿成矿带 ($\delta^{34}\text{S}$: -33‰~9‰; Tornos *et al.*, 2008) 和阿尔泰成矿带 ($\delta^{34}\text{S}$: -23.2‰~14‰; Wan *et al.*, 2010) 中 VMS 型矿床硫同位素组成具有相似性。综上所述, 我们认

为尕龙格玛 VMS 型矿床硫具有多源性, 岩浆硫和细菌还原的海水硫酸盐或其基底岩石均为成矿提供了硫。

5.1.3 铅来源 硫化物通常含有少量的 U 和 Th 以及少量的放射性 Pb (Zhang, 1992)。因此, 不管硫化物中总的 Pb 含量是多少, Pb 同位素组成通常可以用来确定铅的来源 (Goldfarb, 2004; Zhao *et al.*, 2006; Mortensen *et al.*, 2008, 2010; Bozkaya, 2011), 而方铅矿被认为是最有效的矿石矿物用来确定铅的来源之一 (McNaughton and Groves, 1996)。

尕龙格玛 VMS 型矿床 5 件方铅矿 Pb 同位素组成较为相近, 矿石矿物方铅矿中铅具有高放射性铅的特征, μ 值为 9.65~9.80, 高于上地壳平均 Pb 的 μ 值 9.58 (Zartman and Doe, 1981), 表明铅主要来源于上地壳。尕龙格玛地区上地壳主要成分为英安质火山岩和火山碎屑岩等海相火山岩, 可能为成矿提供还原铅。在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中投点落入上地壳演化线上部, 呈线性分布; 在 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图上投点落入造山带演化线与下地壳演化线之间, 靠近造山带演化线一侧, 与三江成矿带南段呷村、鲁春 VMS 型矿床铅同位素分布特征相似(图 11a, 11b)。研究显示该 Pb-Pb 等时线没有年龄意义, 应该为一个二元混合铅, 表明成矿物质铅部分来源于岩浆。遥感影像特征显示, 在矿区深部可能有隐伏岩体存在(郑宗学等, 2012), 氢、氧和硫同位素研究均显示岩浆为成矿提供了部分流体和成矿物质, 说明岩浆可能为成矿

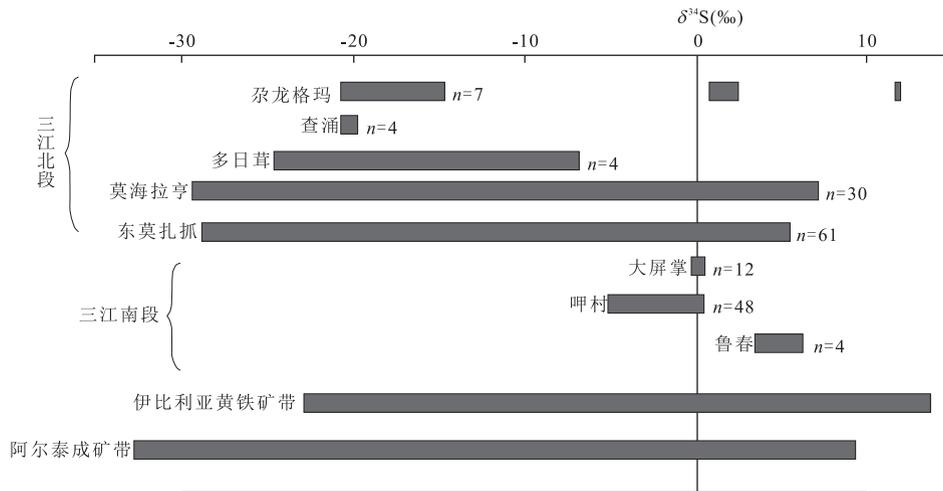


图 10 青海三江成矿带典型热液矿床硫化物中 $\delta^{34}\text{S}$ 分布

Fig.10 Distribution range of sulfur isotope data in the Galonggema deposit

大屏掌引自钟宏等(2000);伊比利亚黄铁矿带引自 Tornos *et al.*(2008);阿尔泰成矿带引自 Wan *et al.*(2010);尕龙格玛部分数据引自郑宗学, 2010。《治多多彩地区铜多金属矿普查阶段性总结》报告, 青海;东莫扎抓引自田世洪等(2011a);莫海拉亨引自田世洪等(2011b);鲁村引自杨喜安等(2012);呷村引自党院等(2014);多日茸、查涌、撒纳龙哇引自于作者未发表数据

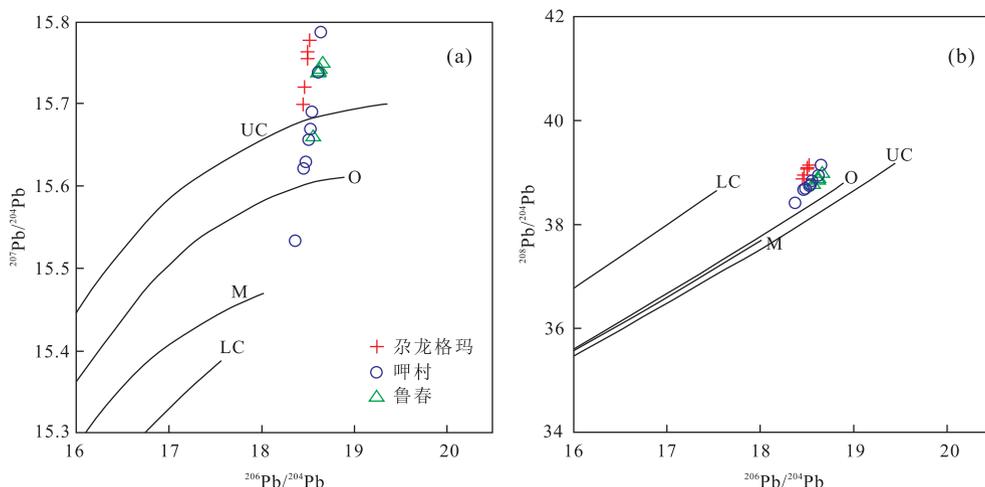


图 11 尕龙格玛矿床硫化物铅同位素组成

Fig.11 Lead isotopic compositions of sulfides in the Galonggema deposit

底图据 Zartman and Doe(1981); 呷村数据引自朱维光等(2001); 鲁春数据引自杨喜安等(2012); UC.上地壳; O.造山带; M.地幔; LC.下地壳

提供了铅等成矿物质。以上研究表明尕龙格玛成矿物质铅来源于上地壳中的还原铅和岩浆铅,与呷村(朱维光等,2001)和鲁春(杨喜安等,2012)矿床具有相似的铅来源。

5.2 成矿流体性质

笔者对尕龙格玛 VMS 型矿床沉积相重晶石和通道石英中流体包裹体显微测温,结果显示流体性质具有一定的规律性:通道相石英中流体温度为 175.6~259.8 °C,主要集中在 190~250 °C,温度较高,而重晶石中流体温度为 105.2~157.1 °C,主要集中在 110~150 °C,温度明显降低;通道相流体盐度(1.05%~6.29% NaCl eqv.)与沉积相流体盐度(0.18%~5.55% NaCl eqv.)相近;通道相流体密度为 0.820~0.935 g/cm³,小于沉积相流体密度 0.735~1.173 g/cm³。总体上,从通道相到沉积相即由深部向浅部表现为成矿温度明显下降,流体盐度基本保持不变,而流体密度增大的特点,暗示通道相中的热液主要为加热循环的海水以及部分岩浆后期热液,在喷流口处与海水发生混合作用,导致温度有明显的下降,而盐度基本不变,密度增大。这与氢氧同位素的分析结果一致。

前人已经对 VMS 型矿床流体特征进行了大量研究(Ishihara,1974)。VMS 型矿床通道相中流体包裹体均一温度较高,而沉积相中流体包裹体温度明显降低(Urabe and Sato,1978; Yoshida,1979),这与本次所测通道相流体温度(175.6~263.3 °C)高于沉积相流体温度(105.2~157.1 °C)相吻合。与三江成矿带南部呷村西矿带流体包裹体温度(下部脉状

矿石,平均为 258.0 °C)和东矿带流体包裹体温度(上部块状矿石,平均 209.8 °C)一致(党院等,2014)。VMS 型矿床成矿流体一般为简单的盐-水体系,盐度接近或略高于正常海水盐度(Ulrich *et al.*,2003; Zaw *et al.*,2003),包裹体研究表明 VMS 型矿床成矿流体盐度为 0%~6.5% NaCl eqv.,与海水盐度接近(Ishihara,1974; 卢焕章等,2004),这与本次所获得的尕龙格玛矿床流体盐度特征一致,笔者推测流体主要来源于海水,与氢氧同位素研究结果一致。同时成矿流体盐度从深到浅基本保持不变,该特征与日本 Kokuriku 地区 4 个 VMS 型矿床和三江成矿带南部呷村 VMS 型矿床成矿盐度基本不随成矿温度的变化而变化的特征一致(Visut and Hiroshi,1983; 党院等,2014)。综上所述,我们认为尕龙格玛矿床成矿流体主要来源于海水,尕龙格玛脉状矿石和块状矿石流体包裹体特征与典型黑矿型矿床成矿流体特征相吻合,表明尕龙格玛矿床类型为 VMS 型矿床。

5.3 成矿机制

尕龙格玛矿床赋存于晚三叠世巴塘群火山岩中,迄今为止,前人对尕龙格玛矿床成因的认识比较一致,均认为其是产于火山弧环境的海相火山喷流沉积块状硫化物矿床(郑宗学等,2012; 吴碧娟等,2013)。

综合前人及本文研究结果,尕龙格玛矿床的成矿机制可归纳如下:晚三叠世(赵少卿等,2015)期间,金沙江洋向南俯冲,在玉树地区发生火山作用,形成上三叠统巴塘群火山角砾岩、英安质凝灰岩、岩屑晶屑凝灰岩等。在火山活动的间歇期,下部岩浆发

生底侵作用,同时带来部分成矿物质和成矿流体,并对上覆海水进行加热,发生对流,萃取基底岩石和火山岩中铜铅锌等成矿,沿火山通道或火山机构的裂隙系统依次向上运移和循环(侯增谦,1991).在上升的过程中,由于成矿热液与围岩不断进行物质交换以及压力降低等原因,成矿流体的温度不断下降.当温度降至 200 °C 左右,盐度为 5% NaCl eqv.左右,密度为 0.900 g/cm³ 时,金属离子溶解度迅速下降,黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿以及黝铜矿等硫化物大量沉淀,表现为热液流体在火山热液通道中以充填交代的形式成矿,并形成脉状、网脉状矿体;同时形成硅化、绢英岩化、碳酸盐化等围岩蚀变.由于 CO₂ 和 N₂ 不断挥发逸出,所以包裹体中挥发性组分除含量最高的 H₂O 外还含有 CO₂ 和 N₂ 气体.随着成矿流体继续向上运移和循环,喷出海底与海水相混合,成矿流体性质发生变化,成矿流体的温度显著降低、盐度基本不变和密度增大,当温度降低至 120 °C 左右,密度上升至 1.000 g/cm³ 范围时,矿床顶部形成以及黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物沉淀,即与盆地中海水混合形成成矿卤水池,成矿物质在一定物理化学条件下析出并沉积形成块状硫化物矿体和条带状含硫化物重晶石矿体.尕龙格玛的成矿作用是一个连续统一的过程,下部通道相和上部沉积相矿体处于同一热液系统中,为成矿流体在不同环境(沉积洼地、热液通道)下的沉积产物.

6 结论

(1) 矿体赋存于晚三叠世巴塘群英安质火山岩中,具有双层结构,上部沉积相矿体呈条带状、块状,下部通道相矿体呈脉状.通道相脉状石英硫化物中流体包裹体可分为富气相包裹体和水溶液包裹体,均一温度为 175.6~263.3 °C,盐度为 1.05%~6.29% NaCl eqv.,密度为 0.820~0.935 g/cm³,沉积相重晶石中仅发育水溶液包裹体,均一温度为 105.2~157.1 °C,盐度为 0.18%~5.55% NaCl eqv.,密度为 0.735~1.173 g/cm³,显示了流体由深部向浅部温度显著降低,盐度保持不变,密度变大的趋势,与典型 VMS 型矿床流体特征相似.(2) 氢氧同位素结果($\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$: 0.25‰~1.75‰, δD : -103.2‰~-65.3‰) 研究表明,成矿流体来自于岩浆水和海水的混合流体.(3) 尕龙格玛矿床矿石矿物硫同位素研究结果表明,硫来源于岩浆硫和细菌还原的海水硫酸盐或其基底岩石.铅同位素研究结果显示铅主要来源于上地壳中的还

原铅、部分由岩浆提供.

致谢:衷心感谢吉林大学地球科学学院地质流体实验室在流体包裹体显微测温和激光拉曼光谱分析给予的支持,同时感谢核工业北京地质研究院分析测试研究中心在氢、氧、铅同位素分析中给予的帮助,感谢北京燕都中实测试技术有限公司在硫同位素分析中给予的帮助;最后,由衷地感谢审稿人以及编辑给出的宝贵意见.

References

- Bai, Y. S., Zhu, Z. J., Duan, Q. F., et al., 2014. Geochemical Characteristics and Its Tectonic Significance of Upper Triassic Batang Group Volcano Rocks in Zhahe Area, Zhiduo County, Southern Qinghai Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, 30(4): 319-327 (in Chinese with English abstract).
- Barrie, T.C., Amelin, Y., Pascual, E., 2002. U-Pb Geochronology of VMS Mineralization in the Iberian Pyrite Belt. *Mineralium Deposita*, 37(8): 684-703. doi: 10.1007/s00126-002-0302-7
- Bodnar, R.J., 1983. A Method of Calculating Fluid Inclusion Volumes Based on Vapor Bubble Diameters and P-V-T-X Properties of Inclusion Fluids. *Economic Geology*, 78(3): 535-542. doi: 10.2113/gsecongeo.78.3.535
- Bozkaya, G., 2011. Sulphur- and Lead-Isotope Geochemistry of the Arapuçandere Lead-Zinc-Copper Deposit, Biga Peninsula, Northwest Turkey. *International Geology Review*, 53(1): 116-129. doi: 10.1080/00206810902945090
- Calagari, A.A., 2003. Stable Isotope (S, O, H and C) Studies of the Phyllic and Potassic-Phyllic Alteration Zones of the Porphyry Copper Deposit at Sungun, East Azarbaijan, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(7): 767-780. doi: 10.1016/s1367-9120(02)00083-4
- Clayton, R.N., O'Neil, J.R., Mayeda, T.K., 1972. Oxygen Isotope Exchange between Quartz and Water. *Journal of Geophysical Research*, 77(17): 3057-3067. doi: 10.1029/jb077i017p03057
- Dang, Y., Chen, M. H., Mao, J. W., et al., 2014. Geochemistry of Ore-Forming Fluid of Gacun-Youre Ore District in Baiyu County, Sichuan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 30(1): 221-236 (in Chinese with English abstract).
- Giesemann, A., Jaeger, H. J., Norman, A. L., et al., 1994. Online Sulfur-Isotope Determination Using an Elemental Analyzer Coupled to a Mass Spectrometer. *Analytical Chemistry*, 66(18): 2816-2819. doi: 10.1021/ac00090a005
- Goldfarb, R.J., 2004. The Late Cretaceous Donlin Creek Gold Deposit, Southwestern Alaska: Controls on Epizonal

- Ore Formation, *Economic Geology*, 99 (4): 643 — 671. doi:10.2113/99.4.643
- Hall, D. L., Sterner, S. M., Bodnar, R. J., 1988. Freezing Point Depression of NaCl-KCl-H₂O Solutions. *Economic Geology*, 83 (1): 197 — 202. doi:10.2113/gsecongeo.83.1.197
- Haymon, R. M., Kastner, M., 1981. Hot Spring Deposits on the East Pacific Rise at 21°N: Preliminary Description of Mineralogy and Genesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 53 (3): 363 — 381. doi:10.1016/0012-821x(81)90041-8
- He, L. Q., Song, Y. C., Chen, K. X., et al., 2009. Thrust-Controlled, Sediment-Hosted, Himalayan Zn-Pb-Cu-Ag Deposits in the Lanping Foreland Fold Belt, Eastern Margin of Tibetan Plateau. *Ore Geology Reviews*, 36 (1-3): 106 — 132. doi:10.1016/j.oregeorev.2008.11.001
- Herzig, P. M., Hannington, M. D., Fouquet, Y., et al., 1993. Gold-Rich Polymetallic Sulfides from the Lau Back Arc and Implications for the Geochemistry of Gold in Sea-Floor Hydrothermal Systems of the Southwest Pacific. *Economic Geology*, 88 (8): 2182 — 2209. doi: 10.2113/gsecongeo.88.8.2182
- Hou, Z. Q., 1991. Ore Fluid Chemistry, Thermal Evolution History and Ore-Forming Process of the Gacun Kuroko Type Polymetallic Deposit in Western Sichuan. *Mineral Deposits*, 10 (4): 313 — 324 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Song, Y. C., Li, Z., et al., 2008. Thrust-Controlled, Sediments-Hosted Pb-Zn-Ag-Cu Deposits in Eastern and Northern Margins of Tibetan Orogenic Belt: Geological Features and Tectonic Model. *Mineral Deposits*, 27 (2): 123 — 144 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Yang, Z. S., Xu, W. Y., et al., 2006. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: I. Mineralization in Main Collisional Orogenic Setting. *Mineral Deposits*, 25 (4): 337 — 358 (in Chinese with English abstract).
- Huston, D. L., Brauhart, C. W., Driehg, S. L., et al., 2001. Metal Leaching and Inorganic Sulfate Reduction in Volcanic-Hosted Massive Sulfide Mineral Systems: Evidence from the Paleo-Archean Panorama District, Western Australia. *Geology*, 29 (8): 687 — 690. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0687:mlair>2.0.co;2
- Ishihara, S., 1974. Geology of Kuroko Deposits. *Mining Geology Special Issue*, 6: 1 — 435.
- Ishikawa, H., Kuroda, R., Sudo, T., 1962. Minor Elements in Some Altered Zones of “Kuroko” (Black Ore) Deposits in Japan. *Economic Geology*, 57 (5): 785 — 798. doi: 10.2113/gsecongeo.57.5.785
- Jia, Q. Z., 1996. Geological Characteristics and Metallogenic Environment of the Ashele Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 15 (3): 267 — 277 (in Chinese with English abstract).
- Kelley, K. D., 2004. Textural, Compositional, and Sulfur Isotope Variations of Sulfide Minerals in the Red Dog Zn-Pb-Ag Deposits, Brooks Range, Alaska: Implications for Ore Formation. *Economic Geology*, 99 (7): 1509 — 1532. doi:10.2113/99.7.1509
- Large, R. R., McPhie, J., Gemmill, J. B., et al., 2001. The Spectrum of Ore Deposit Types, Volcanic Environments, Alteration Halos, and Related Exploration Vectors in Submarine Volcanic Successions: Some Examples from Australia. *Economic Geology*, 96 (5): 913 — 938. doi:10.2113/gsecongeo.96.5.913
- Lu, H. Z., Fan, H. R., Ni, P., et al., 2004. Fluid Inclusion. Science Press, Beijing, 168 — 169 (in Chinese).
- McNaughton, N. J., Groves, D. I., 1996. A Review of Pb-Isotope Constraints on the Genesis of Lode-Gold Deposits in the Yilgarn Craton, Western Australia. *J.R. Soc. West. Aust.*, 79 (1): 123 — 129.
- Mortensen, J. K., Craw, D., MacKenzie, D. J., et al., 2010. Age and Origin of Orogenic Gold Mineralization in the Otago Schist Belt, South Island, New Zealand: Constraints from Lead Isotope and ⁴⁰Ar/³⁹Ar Dating Studies. *Economic Geology*, 105 (4): 777 — 793. doi:10.2113/gsecongeo.105.4.777
- Mortensen, J. K., Hall, B. V., Bissig, T., et al., 2008. Age and Paleotectonic Setting of Volcanogenic Massive Sulfide Deposits in the Guerrero Terrane of Central Mexico: Constraints from U-Pb Age and Pb Isotope Studies. *Economic Geology*, 103 (1): 117 — 140. doi:10.2113/gsecongeo.103.1.117
- Ohmoto, H., 1986. Stable Isotope Geochemistry of Ore Deposits. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16 (1): 491 — 559.
- Pirajno, F., 2009. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Springer, Netherlands, Germany. doi: 10.1007/978-1-4020-8613-7
- Rye, R. O., 1993. The Evolution of Magmatic Fluids in the Epithermal Environment: The Stable Isotope Perspective. *Economic Geology*, 88 (3): 733 — 752. doi: 10.2113/gsecongeo.88.3.733
- Rye, R. O., Roberts, R. J., Snyder, W. S., et al., 1984. Textural and Stable Isotope Studies of the Big Mike Cupriferous Volcanogenic Massive Sulfide Deposit, Pershing County, Nevada. *Economic Geology*, 79 (1): 124 — 140. doi: 10.2113/gsecongeo.79.1.124
- Spurlin, M. S., Yin, A., Horton, B. K., et al., 2005. Structural Evolution of the Yushu-Nangqian Region and Its Relationship to Syncollisional Igneous Activity, East-Central Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 117 (9): 1293 — 1317. doi:10.1130/b25572.1

- Sun, H.S., Wu, G.B., Liu, L., et al., 2011. Research Advances in Metallogenic Tectonic Environment of Massive Sulfide Deposits. *Earth Science*, 36(2): 299—306 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J.X., Wang, C.H., Qu, W.J., et al., 2009. Re-Os Isotopic Dating of Molybdenite from the Yulong Porphyry Copper-Molybdenum Deposit in Tibet and Its Metallogenic Significance. *Rock and Mineral Analysis*, 28(3): 215—218 (in Chinese with English abstract).
- Taylor, H.P., 1974. The Application of Oxygen and Hydrogen Isotope Studies to Problems of Hydrothermal Alteration and Ore Deposition. *Economic Geology*, 69(6): 843—883. doi:10.2113/gsecongeo.69.6.843
- Thomas, H. V., Large, R. R., Bull, S. W., et al., 2011. Pyrite and Pyrrhotite Textures and Composition in Sediments, Laminated Quartz Veins, and Reefs at Bendigo Gold Mine, Australia; Insights for Ore Genesis. *Economic Geology*, 106(1): 1—31. doi:10.2113/econgeo.106.1.1
- Tian, S.H., Yang, Z.S., Hou, Z.Q., et al., 2009. Rb-Sr and Sm-Nd Isochron Ages of Dongmohazhua and Mohailaheng Pb-Zn Ore Deposits in Yushu Area, Southern Qinghai and Their Geological Implications. *Mineral Deposits*, 28(6): 747—758 (in Chinese with English abstract).
- Tian, S. H., Yang, Z. S., Hou, Z. Q., et al., 2011a. Sulfur, Lead, Strontium and Neodymium Isotope Compositions of the Dongmohazhua Lead-Zinc Ore Deposit in the Yushu Area, Southern Qinghai; Implications for the Sources of Ore-Forming Material in the Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2173—2183 (in Chinese with English abstract).
- Tian, S.H., Hou, Z.Q., Yang, Z.S., et al., 2011b. Sulfur, Lead, Strontium and Neodymium Isotope Compositions of the Mohailaheng Lead-Zinc Ore Deposit in the Yushu Area, Southern Qinghai; Implications for the Sources of Ore-Forming Material in the Deposit and Comparison with Those of Dongmohazhua Lead-Zinc Ore Deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 27(9): 2709—2720 (in Chinese with English abstract).
- Tornos, F., Solomon, M., Conde, C., et al., 2008. Formation of the Tharsis Massive Sulfide Deposit, Iberian Pyrite Belt; Geological, Lithochemical, and Stable Isotope Evidence for Deposition in a Brine Pool. *Economic Geology*, 103(1): 185—214. doi:10.2113/gsecongeo.103.1.185
- Ulrich, T., Golding, S.D., Kamber, B.S., et al., 2003. Different Mineralization Styles in a Volcanic-Hosted Ore Deposit; The Fluid and Isotopic Signatures of the Mt Morgan Au-Cu Deposit, Australia. *Ore Geology Reviews*, 22(1—2): 61—90. doi:10.1016/s0169—1368(02)00109—9
- Urabe, T., Sato, T., 1978. Kuroko Deposits of the Kosaka Mine, Northeast Honshu, Japan; Products of Submarine Hot Springs on Miocene Sea Floor. *Economic Geology*, 73(2): 161—179. doi:10.2113/gsecongeo.73.2.161
- Uyeda, S., Kanamori, H., 1979. Back-Arc Opening and the Mode of Subduction. *Journal of Geophysical Research*, 84(B3): 1049—1061. doi:10.1029/jb084ib03p01049
- Visut, P. A., Hiroshi, O., 1983. Thermal History, and Chemical and Isotopic Compositions of the Ore-Forming Fluids Responsible for the Kuriko Massive Sulfide Deposits in the Hokuroku District of Japan. *Economic Geology (Monograph)*, (5): 523—558.
- Wan, B., Zhang, L. C., Xiao, W. J., 2010. Geological and Geochemical Characteristics and Ore Genesis of the Keketale VMS Pb-Zn Deposit, Southern Altai Metallogenic Belt, NW China. *Ore Geology Reviews*, 37(2): 114—126. doi:10.1016/j.oregeorev.2010.01.002
- Wu, B. J., 2013. Metallogenic Conditions and Genesis of the Galonggema Cu-Polymetal Deposit, Qinghai Province (Dissertation). Central South University, Changsha (in Chinese with English abstract).
- Wu, B. J., Lai, J. Q., Zheng, Z. X., et al., 2013. Characteristics of Volcanic Rocks from Galonggema Cu-Zn Polymetallic Mining Area. *Mineral Resources and Geology*, 27(4): 283—291 (in Chinese with English abstract).
- Xin, T.G., Zhao, S.Q., Yang, W.L., et al., 2014. Geology and Assessment of Prospecting Potential of Galonggema Copper-Polymetallic Deposit in the South of Qinghai Province. *Geological Science and Technology Information*, 33(3): 145—153 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X.A., Liu, J.J., Han, S.Y., et al., 2012. S, Pb, H, O Isotopic Characteristics of the Luchun Cu-Pb-Zn Deposit, Deqin County, Yunnan and Geological Implications. *Geochimica*, 41(3): 240—249 (in Chinese with English abstract).
- Yao, F.L., Sun, F.Y., 2006. Deposits Tutorial. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280. doi:10.1146/annurev.earth.28.1.211
- Yoshida, T., 1979. Fluid Inclusion Study and Ore Forming Process of the Iwami Deposit, Shimane Prefecture, Japan. *Mining Geol.*, 29(153): 21—31. doi:10.11456/shigenchishitsu1951.29.21
- Zartman, R. E., Doe, B. R., 1981. Plumbotectonics—The Model. *Tectonophysics*, 75(1—2): 135—162.
- Zaw, K., Hunns, S. R., Large, R. R., et al., 2003. Microthermometry and Chemical Composition of Fluid Inclusions from the Mt Chalmers Volcanic-Hosted Massive Sulfide

- Deposits, Central Queensland, Australia; Implications for Ore Genesis. *Chemical Geology*, 194(1-3): 225-244. doi:10.1016/s0009-2541(02)00279-6
- Zhang, L. G., 1992. Present Status and Aspects of Lead Isotope Geology. *Geol. Prospect.*, 28: 21-29.
- Zhang, Y. J., Sun, F. Y., Li, B. L., et al., 2014. Ore Textures and Remobilization Mechanisms of the Hongtoushan Copper-Zinc Deposit, Liaoning, China. *Ore Geology Reviews*, 57: 78-86. doi:10.1016/j.oregeorev.2013.09.006
- Zhao, K. D., Jiang, S. Y., Ni, P., et al., 2006. Sulfur, Lead and Helium Isotopic Compositions of Sulfide Minerals from the Dachang Sn-Polymetallic Ore District in South China; Implication for Ore Genesis. *Mineralogy and Petrology*, 89(3-4): 251-273. doi:10.1007/s00710-006-0148-2
- Zhao, S. Q., Fu, L. B., Wei, J. H., et al., 2015. Petrogenesis and Geodynamic Setting of Late Triassic Quartz Diorites in Zhiduo Area, Qinghai Province. *Earth Science*, 40(1): 61-76 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, S. H., Zhang, Z. F., Ni, B. L., et al., 1982. Hydrogen and Oxygen Isotopic Studies of Thermal Waters in Xizang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 18(1): 99-106 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. F., Chen, J. F., 2000. Stable Isotope Geochemistry. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Zheng, Z. X., Wang, X. C., Qin, Z. L., 2012. Study of the Geological Characteristics and Metallogenetic Model of Galonggema Copper Polymetallic Deposit, Qinghai Province. *Gold Science and Technology*, 20(1): 66-70 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, H., Hu, R. Z., Ye, Z. J., 2000. Sulfur, Lead, Hydrogen and Oxygen Isotopic Geochemistry of the Dapingzhang Copper-Polymetallic Deposit, Yunnan Province. *Geochimica*, 29(2): 136-142 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, W. G., Li, C. Y., Deng, H. L., 2001. Sulfur and Lead Isotope Geochemistry of the Xiaocun Silver-Polymetallic Ore Deposit in Sichuan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 21(2): 219-224 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 白云山, 牛志军, 段其发, 等, 2014. 青海南部治多县扎河一带上三叠统巴塘群火山岩特征及其构造环境. 华南地质与矿床, 30(4): 319-327.
- 党院, 陈懋弘, 毛景文, 等, 2014. 四川省白玉县呷村—有热矿区成矿流体地球化学. 岩石学报, 30(1): 221-236.
- 侯增谦, 1991. 川西哩村黑矿型多金属矿床成矿流体化学和热演化历史与成矿过程. 矿床地质, 10(4): 313-324.
- 侯增谦, 宋玉财, 李政, 等, 2008. 青藏高原碰撞造山带 Pb-Zn-Ag-Cu 矿床新类型: 成矿基本特征与构造控矿模型. 矿床地质, 27(2): 421-441.
- 侯增谦, 杨竹森, 徐文艺, 等, 2006. 青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用. 矿床地质, 25(4): 337-358.
- 贾群子, 1996. 新疆阿舍勒块状硫化物矿床成矿特征及形成环境. 矿床地质, 15(3): 267-277.
- 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等, 2004. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 168-169.
- 孙华山, 吴冠斌, 刘浏, 等, 2011. 块状硫化物矿床成矿构造环境研究进展. 地球科学, 36(2): 299-306.
- 唐菊兴, 王成辉, 屈文俊, 等, 2009. 西藏玉龙斑岩铜铅矿辉铜矿铋-钨同位素定年及其成矿学意义. 岩矿测试, 28(3): 215-218.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等, 2009. 玉树地区东莫扎抓和莫海拉亨铅锌矿床 Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 矿床地质, 28(6): 747-758.
- 田世洪, 杨竹森, 侯增谦, 等, 2011a. 青海玉树东莫扎抓铅锌矿床 S、Pb、Sr-Nd 同位素组成: 对成矿物质来源的指示. 岩石学报, 27(7): 2173-2183.
- 田世洪, 侯增谦, 杨竹森, 等, 2011b. 青海玉树莫海拉亨铅锌矿床 S、Pb、Sr-Nd 同位素组成: 对成矿物质来源的指示——兼与东莫扎抓铅锌矿床的对比. 岩石学报, 27(9): 2709-2720.
- 吴碧娟, 2013. 青海尕龙格玛铜多金属矿成矿条件与矿床成因研究(学位论文). 长沙: 中南大学.
- 吴碧娟, 赖健清, 郑宗学, 等, 2013. 尕龙格玛铜多金属矿区火山岩特征. 矿产与地质, 27(4): 283-291.
- 辛天贵, 赵少卿, 杨文龙, 等, 2014. 青海南部尕龙格玛铜多金属矿床地质特征及找矿潜力评价. 地质科技情报, 33(3): 145-153.
- 杨喜安, 刘家军, 韩思宇, 等, 2012. 云南德钦鲁春铜铅锌矿床硫铅氢氧同位素特征及地质意义. 地球化学, 41(3): 240-249.
- 姚凤良, 孙丰月, 2006. 矿床学教程. 北京: 地质出版社.
- 郑淑蕙, 张知非, 倪葆龄, 1982. 西藏地热水的氢氧稳定同位素研究. 北京大学学报(自然科学版), 18(1): 99-106.
- 郑永飞, 陈江峰, 2000. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社.
- 郑宗学, 王旭春, 覃泽礼, 2012. 青海尕龙格玛铜多金属矿床地质特征及成矿模式研究. 黄金科学技术, 20(1): 66-70.
- 钟宏, 胡瑞忠, 叶造军, 2000. 云南大平掌铜多金属矿床硫、铅、氢、氧同位素地球化学. 地球化学, 29(2): 136-142.
- 赵少卿, 付乐兵, 魏俊浩, 等, 2015. 青海治多地区晚三叠世石英闪长岩地球化学特征及成岩动力学背景. 地球科学, 40(1): 61-76.
- 朱维光, 李朝阳, 邓海琳, 2001. 四川西部呷村银多金属矿床硫铅同位素地球化学. 矿物学报, 21(2): 219-224.