

西藏哈姆曲锑(金)矿床曲珍矿段 S、Pb 同位素组成及意义

李保亮¹⁾, 王立强^{1)*}, 张相国²⁾, 平措多吉²⁾, 高 腾¹⁾, 王 勇³⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2) 西藏自治区地质矿产勘查开发局区域地质调查大队, 西藏拉萨 851400;

3) 成都理工大学, 地球科学学院, 四川成都 610059

摘 要: 西藏哈姆曲锑(金)矿床位于雅鲁藏布江结合带西缘, 矿体主要赋存于晚白垩世侵入岩中, 糜棱岩化闪长玢岩是其主要的赋矿围岩。矿体受 NNE—SSW 向断裂控制, 主要呈脉状、层状、透镜状产出。在野外地质调查和分析矿床成矿地质条件的基础上, 对矿床辉锑矿进行了 S、Pb 同位素研究, 探讨了矿床的成矿物质来源。辉锑矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 -4.7‰ ~ -3.2‰ 之间, 均值为 $(-3.97 \pm 0.05)\text{‰}$, 硫同位素组成分布较为集中, 近似于岩浆硫(花岗岩)的范围(-4‰ ~ 9‰), 指示硫同位素具有岩浆硫的特征。辉锑矿中 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围为 $18.557 \sim 18.690$, 平均值为 18.622 ± 0.002 ; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围为 $15.607 \sim 15.681$, 平均值为 15.647 ± 0.002 ; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的变化范围为 $38.793 \sim 39.147$, 平均值为 38.967 ± 0.002 。矿床铅同位素组成稳定, 为非放射性成因的正常铅; 结合其特征值 $\mu(9.46 \sim 9.59)$ 以及铅同位素构造演化图解, 判断矿床铅同位素组成具有壳幔混源的特征。

关键词: 硫同位素; 铅同位素; 成矿物质来源; 曲珍; 哈姆曲; 西藏

中图分类号: P611; P597.2 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.041501

Sulfur and Lead Isotope Compositions and Their Geological Significances in the Quzhen Sb Mineralization Section of the Hamuqu Sb-Au Deposit, Tibet

LI Bao-liang¹⁾, WANG Li-qiang^{1)*}, ZHANG Xiang-guo²⁾, PINGCUO Duo-ji²⁾, GAO Teng¹⁾, WANG Yong³⁾

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources,
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Regional Geological Survey Brigade, Tibet Geology and Mineral Exploration and Development Bureau, Lasa, Tibet 851400;

3) School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059

Abstract: The Hamuqu antimony deposit in Tibet is located in the western margin of the Yarlung Zangbo suture zone, and ore bodies are mainly found in the Late Cretaceous mylonitized diorite porphyrite. The ore bodies in the Quzhen mineralization section, which are mainly veined, layered and lenticular-like are controlled by NNE—SSW trending faults. On the basis of field geological investigation and analysis of ore-forming geological conditions, the S and Pb isotopes of stibnite in the deposit were studied, and the sources of metallogenic materials of the deposit were discussed. The $\delta^{34}\text{S}$ values of stibnite range from -4.7‰ to -3.2‰ , with an average of -3.97‰ . The distribution of sulfur isotope composition is relatively concentrated and similar to the range of magmatic sulfur

本文由国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项(编号: 2018YFC0604106)、中国地质科学院矿产资源研究所基本科研业务专项(编号: KK1903; SYSCR2019-03)、国家自然科学基金项目(编号: 41873046)和中国地质调查局地质调查项目(编号: DD2019167)联合资助。
收稿日期: 2021-02-26; 改回日期: 2021-04-06; 网络首发日期: 2021-04-16。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 李保亮, 男, 1994 年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: 503585986@qq.com。

*通讯作者: 王立强, 男, 1984 年生。研究员。主要从事矿床学与区域成矿规律研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: wlq060301@163.com。

(-4‰ to 9‰), indicating that sulfur isotope has the characteristics of magmatic sulfur. $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isotope compositions of stibnite ranges from 18.557 to 18.690, with an average value of 18.622; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ranges from 15.607 to 15.681, with an average of 15.647; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ isotope value ranges from 38.793 to 39.147, with an average of 38.967. The lead isotope composition of the deposit is little variable and shows normal lead features. Combined with the μ values (9.46~9.59) of lead isotope and the lead isotopic tectonic evolution features, we propose that the lead isotope of the deposit has the characteristics of crust-mantle mixed sources.

Key words: sulfur isotope; lead isotope; source of ore-forming materials; Quzhen; Hamuqu; Tibet

稳定同位素地球化学是示踪成矿物质来源的有力工具之一(郑永飞和陈江峰, 2000), S、Pb 同位素可以分别用于示踪成矿体系中的成矿流体来源以及成矿金属物质的来源, 被广泛的应用于矿床学研究中。哈姆曲锑(金)矿位于西藏阿里地区噶尔县狮泉河镇南东方向约 164 km 处。哈姆曲锑(金)矿床目前已完成详查工作, 但矿床成因的相关研究工作尚属空白。哈姆曲矿区共分为五个矿段, 即: 曲珍矿段、牛瑞矿段、强玛矿段、达让矿段和哈姆曲矿段。本研究在详细的野外地质调查和室内矿相学研究的基础上, 重点针对矿床勘查程度最高的曲珍矿段开展金属硫化物 S、Pb 同位素研究, 并与藏南金锑成矿带典型矿床进行对比, 旨在明确其成矿物质来源特征, 为进一步探讨矿床成因提供支撑。

1 区域地质背景

研究区大地构造位置上隶属于雅鲁藏布江结合带。区域地层主要出露为泥盆系、石炭系、二叠系、三叠系、古近系及第四系(图 1)。泥盆系主要出露有先钦组(D_1x)及曲门夏拉组($D_{2-3}q$)。二者均分布于研究区中, 前者主要由细晶白云岩夹强白云石化灰岩组成, 后者岩性主要为变质石英砂岩。石炭系主要为哲弄组(C_1z)和滚江浦组(C_2g)。哲弄组岩性由弱变质的砂岩、板岩组成; 滚江浦组岩石组合主要为石英、长石及岩屑砂岩。二叠系主要为普次丁组(P_1p)与曲嘎组($P_{2-3}q$), 分布于研究区南西部。其中普次丁组岩性主要为变质砂岩、白云岩等; 曲嘎组岩性以变质灰岩、板岩等为主。三叠系主要为穷果组($T_{1-2}Q$), 以板岩、变质砂(砾)岩、灰岩为主, 小范围分布于研究区北部。古近系主要出露柳区群($E_{1-2}Lq$), 呈北西向展布, 角度不整合于混杂岩之上; 岩性为复成分的砾岩、砂岩。

区内混杂岩主要为扎朗混杂岩和你扎混杂岩, 两者均由岩块和基质组成。扎朗混杂岩主要分布于区内北部, 属蛇绿质混杂岩亚类, 基质以方辉橄榄岩为主; 岩块既有与基质同成分的原地岩块, 又含有大量硅质岩、生物碎屑灰岩、灰岩等外来岩块。你扎混杂岩分布于区内中部, 属泥砂质混杂岩亚类, 基质成分为灰色变质细砂岩、板岩、粉砂质板岩; 岩

块主要为来自其自身变形过程中的砂岩, 还有少量的砂砾岩、辉橄岩、灰岩及硅质岩等外来岩块。

除蛇绿混杂岩带内的基性岩外, 区域内岩浆岩发育极少, 仅在哈姆曲矿区内有少量露头出现, 岩性为石英闪长岩。受雅鲁藏布江缝合带影响, 区域内发育一系列的近 NW-SE 向断裂及构造。其中, 以 NWW-SEE 向的 F_1 深大断裂为主, 与其他次级断裂共同构成了区域主体构造格架。

2 矿床地质特征

曲珍矿段出露的地层由老到新包括: 古近系柳区群($E_{1-2}Lq$)、第四系香孜组(Qpx)及第四系冲洪积物(Qh^{alp})(图 2)。其中, 柳区群($E_{1-2}Lq$)在区内分布较为广泛, 角度不整合于矿区东南部的混杂岩带上, 为一套山间磨拉石沉积。根据其出露岩性组合特征,

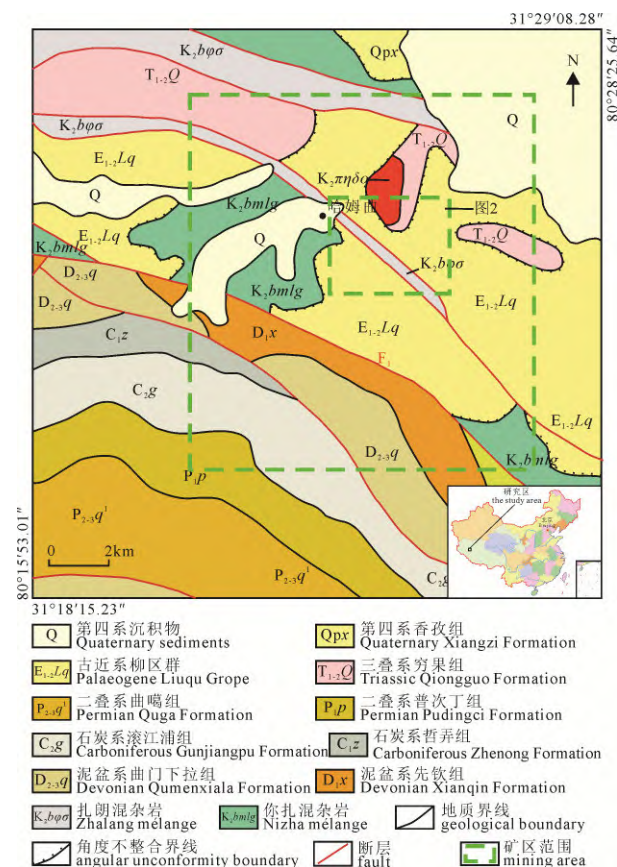


图 1 哈姆曲锑(金)矿区域地质简图
(改自张相国等, 2014)

Fig. 1 Regional geological map of Hamuqu Sb-Au deposit
(after ZHANG et al., 2014)

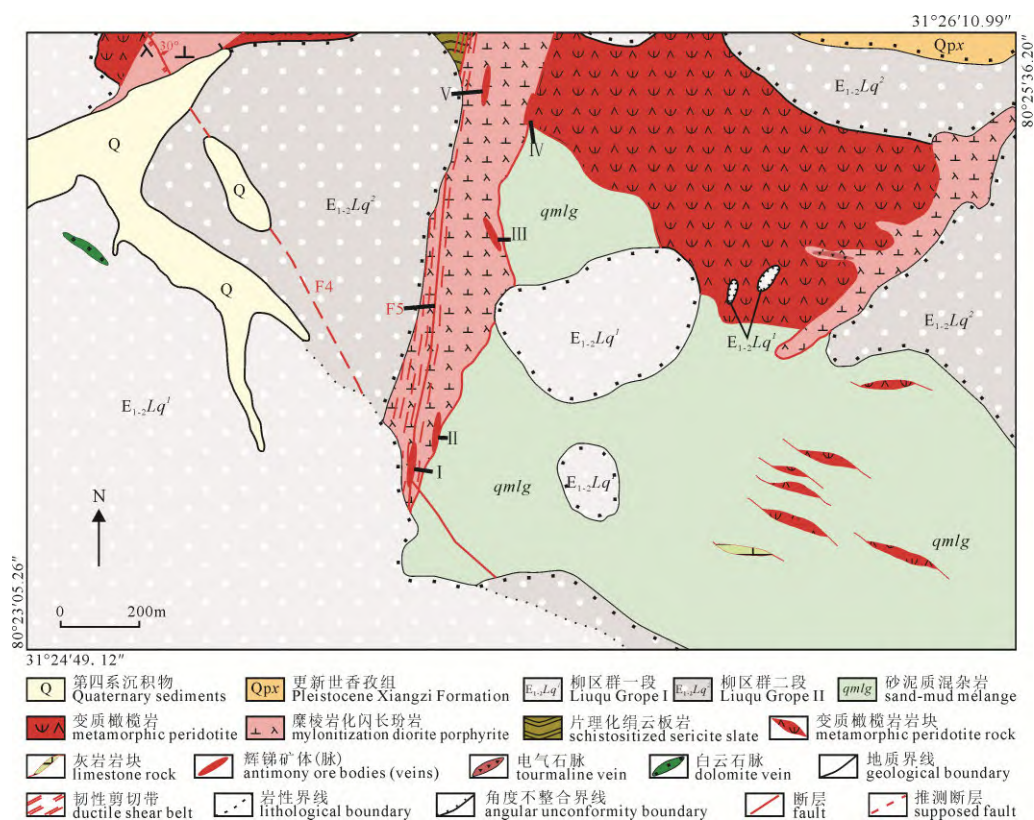


图2 哈姆曲锑(金)矿曲珍矿段地质简图(改自张相国等, 2014)

Fig. 2 Simplified geological map of the Quzhen mineralization section, Hamuqu Sb-Au deposit (after ZHANG et al., 2014)

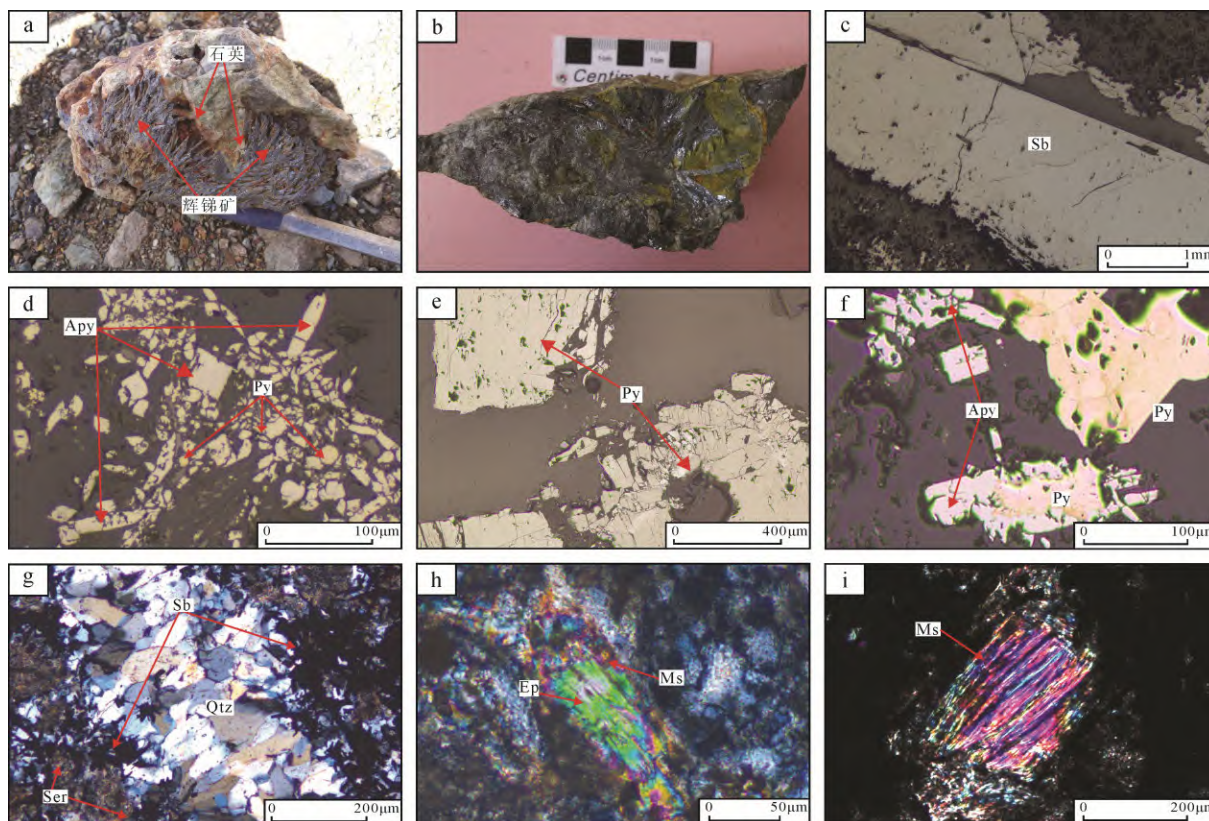
将其分为两个岩性阶段: 柳区群一段($E_{1-2}Lq^1$), 由蛇纹质砂砾岩及砂岩组成, 砾石成分主要为蛇纹石化橄榄岩、二辉橄榄岩、辉石岩、白云石等, 岩石普遍具碳酸盐化、硅化; 柳区群二段($E_{1-2}Lq^2$), 岩性主要为复成分砂砾岩(图 2)。第四系香孜组(Qpx)仅在东北角出露, 小面积不整合覆盖于柳区群二段($E_{1-2}Lq^2$)之上, 岩性主要为复成分的砾岩。

矿区内主要发育NW-SE向(F_4)和NNE-SSW向(F_5)两条断层(图 2)。其中, F_4 断层位于矿区西部, 大部分被第四系掩盖, 倾向 $38^\circ\sim 40^\circ$, 倾角为 $30^\circ\sim 34^\circ$; F_5 为重要的容矿构造, 下盘岩性为灰色砂板岩, 上盘为炭质泥岩, 断层倾向 $282^\circ\sim 284^\circ$, 倾角为 $75^\circ\sim 79^\circ$ 。岩浆岩在曲珍矿段北部出露较多, 总体呈NW-SE 走向展布, 岩性为糜棱岩化和碎裂角砾化的闪长玢岩及变质橄榄岩。其中, 糜棱岩化闪长玢岩为矿区内重要的赋矿岩石, 与成矿关系较为密切。矿区内亦发育有大量混杂岩, 其基质成分为灰色的变质细砂岩、板岩、粉砂质板岩, 偶夹薄层灰岩, 岩块主要为来自其自身变形过程中的砂岩, 此外还有少量的变质橄榄岩和灰岩等外来岩块。此外, 矿区中还发育有少量电气石脉和白云石脉。其中, 白云石脉出露于矿区西北部的柳区群地层中, 地表出露宽度 $1\sim 2$ m, 长度约 140 m; 电气石脉位于矿区东部的糜棱岩化闪长玢岩中, 地表出露宽度 $0.5\sim 1$ m,

长度约 100 m。

目前矿区地表圈出矿体 5 条, 由南向北依次为 I、II、III、IV、V 号矿体, 所有矿体全部受控于 F_5 断裂。除 III 号矿体外, 基本为 NE—SW 延伸, 主要呈脉状、似层状和透镜状产出。矿体规模相差不多, 其中 I 号矿体规模略大, 主要赋存于闪长玢岩的破碎带内, 地表出露宽度 $1.5\sim 5$ m, 长约 150 m, 延伸方向与断层带走向一致。曲珍矿段内金属矿物主要为辉锑矿、黄铁矿和毒砂(图 3a-f), 次为锡华、褐铁矿等; 非金属矿物主要为石英、白云母、绢云母、绿泥石和绿帘石等(图 3g-i)。矿石构造以块状、晶簇状为主(图 3a, b); 矿石结构以结晶作用形成的自形、半自形结晶结构为主, 可见碎裂结构、交代结构等。结晶结构主要表现为自形-半自形柱状的辉锑矿(图 3c)、针状(菱形)毒砂以及他形粒状的黄铁矿(图 3d); 碎裂结构表现为受应力作用影响发生碎裂的黄铁矿(图 3e); 交代结构以后生毒砂交代黄铁矿呈港湾状结构为主(图 3f)。

围岩蚀变类型主要为硅化、绢云母化、绿泥石化和绿帘石化、碳酸盐化等, 蚀变分带特征不太明显。其中, 硅化多以脉状石英的形式产出, 或弥散状石英颗粒形式发育于围岩中, 与成矿关系最为密切, 辉锑矿常伴随强硅化或石英脉产出(图 3g)。绢云母化发育于蚀变的闪长玢岩中, 表现为细小鳞片



a—呈放射状集合体形式产出的辉锑矿; b—伴随强硅化产出的辉锑矿; c—呈自形-半自形柱状的辉锑矿; d—呈自形-半自形针状、菱形的毒砂和他形粒状黄铁矿; e—受应力作用影响发生碎裂的黄铁矿; f—毒砂交代黄铁矿呈港湾状; g—伴随强硅化(石英脉)产出的柱状辉锑矿, 鳞片状绢云母; h—闪长玢岩黑云母斑晶发生绿帘石化和白云母化; i—呈片状集合体的白云母; Sb—辉锑矿; Apy—毒砂; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Ser—绢云母; Ep—绿帘石; Ms—白云母。
a—radioactive aggregate stibnite; b—stibnite ore produced with strong silicification; c—automorphic-hypautomorphic columnar stibnite; d—automorphic-hypautomorphic needle-like arsenopyrite, anhedral and granular pyrite; e—fractured pyrite; f—arsenopyrite replacement pyrite in harbor structure; g—columnar stibnite with strong silicification (quartz vein), flake sericite associated; h—epidotization and muscovitization of biotite phenocryst in diorite porphyrite; i—flake aggregate muscovite; Sb—Stibnite; Apy—Arsenopyrite; Py—Pyrite; Qtz—Quartz; Ser—Sericite; Ep—Epidote; Ms—Muscovite.

图 3 用于 S、Pb 同位素测试的辉锑矿矿石样品特征

Fig. 3 Characteristics of stibnite ore samples for S and Pb isotope analyses in the Quzhen mineralization section

状的绢云母(图 3g)。绿帘石化以细脉状或团块状形式产出(图 3h)。局部发育白云母化, 以片状及鲜艳的干涉色为特点(图 3h, i)。

3 样品采集与测试

本文用于 S、Pb 同位素测试的辉锑矿样品采自曲珍矿段南部 I 号矿体平硐 01 及平硐 02 的原生矿石。挑选新鲜辉锑矿样品, 将矿石破碎至 60 目, 在双目镜下手工完成挑纯。S、Pb 同位素组成于核工业北京地质研究院分析测试中心完成。其中, 硫同位素测试, 将处理好的辉锑矿单矿物与氧化亚铜按一定比例研磨、混合后进行氧化反应, 收集生成 SO_2 后用 Delta v plus 气体同位素质谱仪测试硫同位素组成, 测试精度优于 $\pm 0.05\text{‰}$; 铅同位素测试, 先将样品用混合酸(盐酸与氢溴酸按 2:1 混合)分解, 后用树脂交换法分离出铅, 最后用 Phoenix 热表面电离质谱仪进行同位素测试, 测试精度优于 $\pm 2\text{‰}$ 。

4 测试结果

测得的曲珍矿段六件辉锑矿的 S、Pb 同位素数据列于表 1 和表 2。

4.1 硫同位素

根据表 1 可知, 哈姆曲锑(金)矿床的辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值较为集中, 分布在 $-4.7\text{‰} \sim -3.2\text{‰}$ 之间, 极差为 1.5‰ , 平均值为 $-3.97 \pm 0.05\text{‰}$ 。6 件样品硫同位素的组成变化范围较窄具塔式分布特征(图 4), 显示硫的来源相对统一。

表 1 哈姆曲锑(金)矿床曲珍矿段辉锑矿硫同位素测试结果

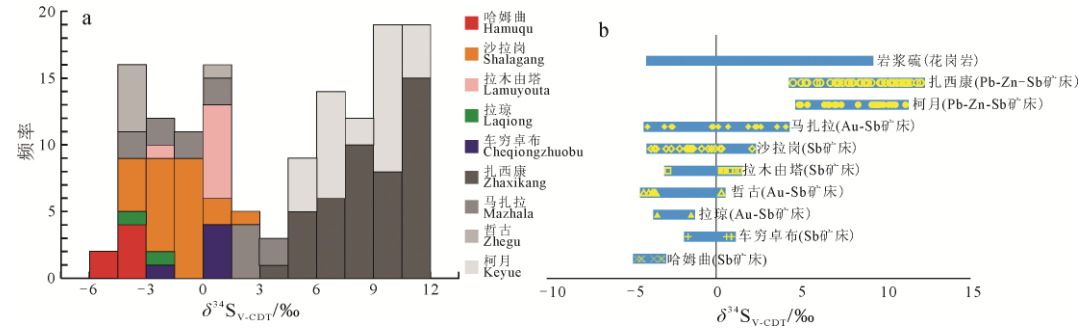
Table 1 Sulfur isotope test results of stibnite in the Quzhen mineralization section of the Hamuqu Sb-Au deposit

样品号	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$	样品号	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
HMQ-1	-4.4	HMQ-5	-3.3
HMQ-2	-3.7	HMQ-7	-4.7
HMQ-3	-4.5	HMQ-8	-3.2

表 2 哈姆曲锑(金)矿床曲珍矿段辉锑矿铅同位素测试结果

Table 2 Lead isotope test results of stibnite in Quzhen mineralization section of the Hamuqu Sb-Au deposit

样品号	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	误差	μ	ω	Th/U
HMQ-1	18.603	0.002	15.618	0.002	38.857	0.002	9.48	37.33	3.81
HMQ-2	18.557	0.002	15.626	0.002	38.803	0.002	9.50	37.44	3.81
HMQ-3	18.632	0.002	15.672	0.003	39.058	0.003	9.58	38.49	3.89
HMQ-5	18.690	0.003	15.681	0.001	39.147	0.002	9.59	38.61	3.90
HMQ-7	18.567	0.001	15.607	0.002	38.793	0.002	9.46	37.17	3.80
HMQ-8	18.684	0.002	15.679	0.002	39.144	0.002	9.59	38.61	3.90



沙拉岗锑矿床数据引自李金高, 2000; 李金高等, 2002; 戚学祥等, 2008; Yang et al., 2009; 拉木由塔锑矿床数据引自杜泽忠等, 2011; 拉琼金锑矿床数据引自戚学祥等, 2008; 车穷卓布锑矿床数据引自戚学祥等, 2008; 邓舟等, 2019; 扎西康铅锌锑多金属矿床数据引自 Yang et al., 2009; 张建芳等, 2010; Sun et al., 2017; 马扎拉锑金矿床数据引自杨竹森等, 2006; 张刚阳, 2012; 谢玉玲等, 2019; 哲古金锑矿床数据引自 Yang et al., 2009; 柯月铅锌锑多金属矿床数据引自阿旺加措等, 2017; 缪华清等, 2017。

Shalagang antimony deposit data after LI, 2000; LI et al., 2002; QI et al., 2008; Yang et al., 2009; Lamuyouta antimony deposit data after DU et al., 2011; Laqiong gold-antimony deposit data after QI et al., 2008; Cheqiong Zhuobu antimony deposit data after QI et al., 2008; DENG et al., 2019; Zhaxikang lead-zinc-antimony polymetallic deposit after Yang et al., 2009; ZHANG et al., 2010; Sun et al., 2017; Mazhala antimony-gold deposit data after YANG et al., 2006; ZHANG et al., 2012; XIE et al., 2019; Zhegu old-antimony deposit data after Yang et al., 2009; Keyue lead-zinc-antimony polymetallic deposit data after AWANG et al., 2017; MIAO et al., 2017.

图 4 藏南金锑成矿带典型矿床硫同位素频率分布直方图(a)和硫同位素组成图(b)

Fig. 4 Sulfur isotope frequency distribution histogram (a) and sulfur isotope (b) of typical deposits in the Southern Tibet gold-antimony metallogenic belt

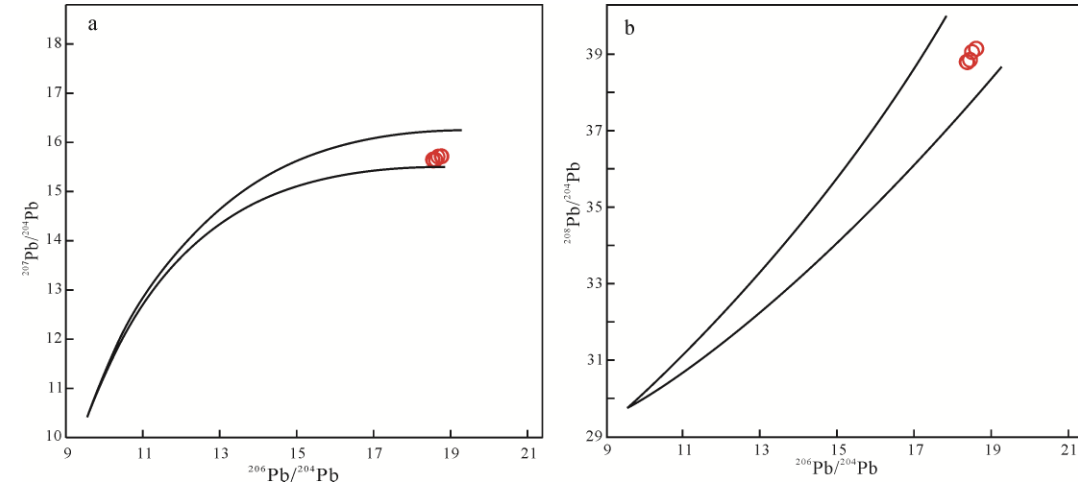


图 5 正常铅的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb(a)和 ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb(b)判别图
(底图据地质部宜昌地质矿产研究所同位素地质研究室, 1979)

Fig. 5 ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (a) and ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb (b) discriminant graph of normal lead
(base map after Department of Isotopic Geology, Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, 1979)

4.2 铅同位素

哈姆曲锑(金)矿床的辉锑矿铅同位素组成见表 2。其中, ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 的变化范围为 18.557~18.690, 极差为 0.133, 平均值为 18.622±0.002; ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 的变化范围为 15.607~15.681, 极差为 0.074, 平均值为 15.647±0.002; ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 的变化范围为 38.793~

39.147, 极差为 0.354, 平均值为 38.967±0.002。6 件辉锑矿的上述各同位素比值离散程度很低, 变化范围较小, 显示正常铅的特征(图 5)。

利用 H-H 单阶段铅演化模式(Cannon et al., 1961; 地质部宜昌地质矿产研究所同位素地质研究室, 1979), 计算的到曲珍矿段辉锑矿铅同位素的相

关参数见表 2。其中, μ 值变化范围为 9.46 ~ 9.59, 均值为 9.53; ω 值变化范围为 37.17 ~ 38.61, 均值为 37.94; Th/U 值变化范围为 3.8 ~ 3.9。其中, ω 值与 Th/U 值都在正常铅的变化范围之内, μ 值略大于正常铅的范围。在铅同位素单阶段铅演化(正常铅)的判别图中(图 5), 曲珍锑矿 6 件辉锑矿样品点分布十分集中, 均落在两条演化线之内, 表明辉锑矿中的铅为不含放射性成因的正常铅。

5 讨论

5.1 硫的来源

当矿床中存在硫酸盐矿物时, 那么 ^{34}S 更倾向于进入硫酸盐矿物中, 代表了高氧逸度条件 ($\delta^{34}\text{S}_{\text{硫酸盐矿物}} \approx \delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$); 相反, 则代表了低氧逸度条件 (Ohmoto, 1972; 邓舟等, 2019)。对于一个矿床中硫的来源的研究需要借助流体的总硫同位素特征 ($\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$), 但是当矿床中没有硫酸盐存在时(低氧逸度条件), 矿床矿物组合为硫化物时, 那么硫化物的硫同位素组成大致可以代表矿床总硫同位素的组成 (Ohmoto, 1972)。哈姆曲锑(金)矿曲珍矿段的野外地质调查及光、薄片镜下鉴定过程中, 均未发现硫酸盐矿物, 含硫矿物组合以辉锑矿、毒砂、黄铁矿等金属硫化物为主。因此, 本次所研究的辉锑矿样品硫同位素特征基本可以代表热液的硫同位素组成。哈姆曲锑(金)矿曲珍矿段的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 -3.97‰ ($-4.7\text{‰} \sim -3.2\text{‰}$), 接近于岩浆硫(花岗岩)的 $\delta^{34}\text{S}$ 值 ($-4\text{‰} \sim 9\text{‰}$), 推测哈姆曲锑(金)矿曲珍矿段成矿流体中的硫主要来源于岩浆。

藏南金锑成矿带内的锑矿床中, 扎西康铅锌锑多金属矿床金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值在 $4.5\text{‰} \sim 12\text{‰}$ 之间、柯月铅锌锑多金属矿床金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $4.9\text{‰} \sim 11.2\text{‰}$, 二者硫同位素组成基本一致。其余矿床锑(金)矿床硫同位素组成变化范围较窄: 车穷卓布锑矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-1.7\text{‰} \sim 0.9\text{‰}$ 、拉琼锑矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-1.5\text{‰} \sim -3.5\text{‰}$ 、沙拉岗锑矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-3.9\text{‰} \sim 2.1\text{‰}$ 、拉木由塔锑矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-2.9\text{‰} \sim 1.3\text{‰}$ 、马扎拉金锑矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.1\text{‰} \sim 4.09\text{‰}$ 、哲古锑金矿床 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 $-4.3\text{‰} \sim 0.3\text{‰}$ (图 4b)。

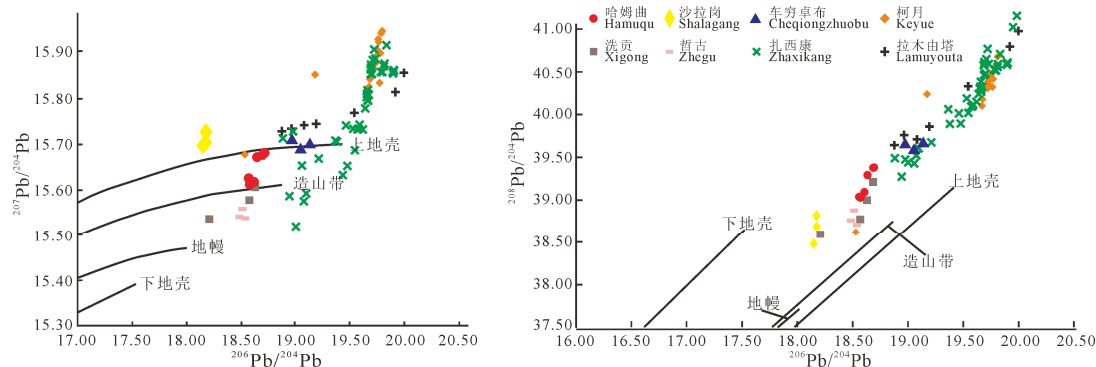
从藏南成矿带主要矿床硫同位素组成图解上可以看到(图 4), 典型金锑、铅锌锑多金属矿床的硫同位素组成大致可以分为两类(图 4a)。第一类是以扎西康、柯月为代表的铅锌锑多金属矿床, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值在 $9\text{‰} \sim 12\text{‰}$ 之间, 与其所在研究区的赋矿地层—日当组 ($4.9\text{‰} \sim 11.5\text{‰}$) 相似(张刚阳, 2012), 显示地层物质明显参与了矿床的成矿过程 (Sun et al., 2017; Zhou et al., 2017)。第二类是以车穷卓布、拉琼、哲古、拉木由塔、沙拉岗和马扎拉等锑-金锑矿

床为代表, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 峰值在 $-4.5\text{‰} \sim 1\text{‰}$ 之间, 基本都在 0 附近, 与扎西康、柯月多金属矿床存在明显差异(图 4); 具有岩浆硫的特征, 成矿与岩浆作用密切相关 (Zhou et al., 2017)。本次研究的曲珍矿段硫同位素组成与第二类矿床硫同位素组成一致, 均显示成矿过程中明显的岩浆来源硫的特征。从成矿元素组成方面来看, 包括曲珍在内的、具有岩浆来源硫的矿床以锑或锑金矿化为主; 而地层参与成矿的矿化元素组合多以铅锌为主, 伴生锑的多金属矿床。硫同位素组成对于识别矿床类型和藏南成矿带矿种找矿方向具有一定指示意义。

5.2 铅的来源

一般来说, 铅同位素的特征值 μ 的变化可以反映铅的来源 (王立强等, 2010), 高 μ 值 (大于 9.58) 的铅通常被认为是主要来自 U、Th 相对富集的上地壳物质 (Zartman and Doe, 1981; 吴开兴等, 2002)。哈姆曲锑(金)矿曲珍矿段 6 件辉锑矿矿石的 μ 值变化范围为 9.46 ~ 9.59 其中有三件样品的 μ 值小于 9.58, 大于地幔铅 μ 值 (8 ~ 9), 表明铅来源主要为上地壳物质, 并且伴有幔源物质的混入。为了进一步明确铅的来源, 将 6 件辉锑矿铅同位素组成数据投到 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 构造演化图解上(图 6), 所有样品点均落于上地壳与造山带增长曲线之间。其中, 有 3 个样品点靠近上地壳演化曲线, 其余 3 个样品点靠近造山带演化曲线。这一分布特征亦显示矿床铅的来源部分为上地壳物质, 另有部分为幔源来源, 与铅同位素特征值 μ 所反映的结果基本一致。

本次研究亦对藏南金锑成矿带内典型矿床的 Pb 同位素组成资料进行了收集。在该成矿带主要锑多金属矿床的铅同位素构造演化图解(图 6)中可以看出, 沙拉岗、拉木由塔、车穷卓布锑矿床以及柯月铅锌锑多金属矿床的样品点几乎全部分布于上地壳演化线之上, 指示其铅的来源均为上地壳物质; 扎西康铅锌锑多金属矿床的铅同位素绝大部分位于上地壳铅演化线附近, 少量样品位于造山带演化曲线附近, 指示扎西康矿床铅主要来源于上地壳, 同时有少量幔源铅的混入; 洗贡、哲古金锑矿床和本次研究的哈姆曲锑(金)矿床的铅同位素主要位于造山带与地幔演化线之间, 显示幔源物质明显参与成矿的特征 (Stacey and Hedlund, 1983)。曲珍矿段及藏南锑金成矿带中主要矿床铅同位素组成特征表明, 锑成矿以上地壳来源物质为主, 并伴有少量幔源物质的加入; 金锑矿或锑金矿成矿金属物源中有明显幔源物质的参与。尤其, 本次研究的曲珍矿段位于雅鲁藏布江结合带内, 其成矿物质中幔源铅的特征



沙拉岗锑矿床数据引自李金高, 2000; 车穷卓布锑矿床数据引自邓舟等, 2019; 柯月铅锌锑多金属矿床数据引自阿旺加措等, 2017; 缪华清等, 2017; 洗贡金锑矿床数据引自张刚阳, 2012; 哲古金锑矿床数据引自张刚阳, 2012; 扎西康铅锌锑多金属矿床数据引自张建芳等, 2010; Duan et al., 2016; Sun et al., 2017; 拉木由塔锑金矿床数据引自杜泽忠等, 2011。
Shalagang antimony deposit data after LI, 2000; Cheqiongzhubu antimony deposit data after DENG et al., 2019; Keyue lead-zinc-antimony polymetallic deposit data after AWANG et al., 2017; MIAO et al., 2017; Xigong gold-antimony deposit data after ZHANG, 2012; Zhegu gold-antimony deposit data after ZHANG, 2012; Zhaxikang lead-zinc-antimony polymetallic deposit after ZHANG et al., 2010; Duan et al., 2016; Sun et al., 2017; Lamuyouta antimony-gold deposit data after DU et al., 2011。

图6 藏南金锑成矿带典型锑和锑多金属矿床铅同位素构造演化图解(底图据王立强等, 2012)

Fig. 6 Lead isotopic tectonic evolution of typical antimony and antimony polymetallic ore deposits in the Southern Tibet gold-antimony metallogenic belt(base map after WANG et al., 2012)

反应了结合带演化过程中幔源物质参与成矿的可能。因此, 本次研究结果支持前人研究的锑成矿过程中有幔源物质参与的观点(Pavlova and Borisenko, 2009; 陈娴等, 2016)。

6 结论

(1) 哈姆曲锑(金)矿床曲珍矿段辉锑矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布在 $-4.7\text{‰} \sim -3.2\text{‰}$ 之间, 平均值为 -3.97‰ , 反映出矿床的硫主要为岩浆来源。

(2) 曲珍矿段辉锑矿铅同位素 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值均较为稳定, 为普通铅; 其特征值 μ 及其组成位于上地壳与造山带演化曲线之间的特征, 指示成矿金属物质主要源自上地壳并有幔源物质的加入。

(3) 藏南锑多金属成矿带内主要铅锌锑多金属矿床成矿流体中有地层硫参与, 成矿金属物质则主要为上地壳来源; 而锑矿和锑金矿成矿物质中硫主要源自岩浆岩, 成矿金属物质则显示出上地壳来源物质为主, 壳幔混合的特征。

致谢: 野外得到了西藏坤成矿业的大力支持, 得到西藏自治区地质矿产勘查开发局区域地质调查大队相关人员帮助; 审稿专家与编辑部老师给予了建设性意见与建议, 在此一并表示衷心感谢。

Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFC0604106), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (Nos. KK1903 and SYSCR2019-03), National Natural Science Founda-

tion of China (No. 41873046), and China Geological Survey (No. DD2019167).

参考文献:

- 阿旺加措, 郑有业, 杨万涛, 索朗欧珠. 2017. 藏南柯月铅锌多金属矿床矿物标型特征及成矿物质来源[J]. 地质科技情报, 36(3): 53-63.
- 陈娴, 苏文超, 黄勇. 2016. 贵州晴隆锑矿床成矿流体 He-Ar 同位素地球化学[J]. 岩石学报, 32(11): 3312-3320.
- 邓舟, 张刚阳, 郑有业, 陈友良. 2019. 藏南车穷卓布锑矿 S-Pb 同位素对成矿物质来源的指示[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 42(3): 337-345.
- 地质部宜昌地质矿产研究所同位素地质研究室. 1979. 铅同位素地质研究的基本问题[M]. 北京: 地质出版社: 35-185.
- 杜泽忠, 顾雪祥, 李关清, 章永梅, 程文斌, 景亮兵, 张兴国. 2011. 藏南拉木由塔锑(金)矿床 S、Pb 同位素组成及指示意义[J]. 现代地质, 25(5): 853-860.
- 李金高, 王全海, 陈健坤, 姚鹏, 彭勇民. 2002. 西藏江孜县沙拉岗锑矿床成矿与找矿模式的初步研究[J]. 成都理工学院学报, 29(5): 533-538.
- 李金高. 2000. 西藏中南部中生代大陆边缘复合式 Sedex 型锑、铜矿床研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 缪华清, 李光明, 张志, 夏祥标, 梁维. 2017. 藏南柯月铅锌矿床成矿物质来源: 来自硫—铅同位素的证据[J]. 沉积与特提斯地质, 37(2): 14-22.
- 戚学祥, 李天福, 孟祥金, 于春林. 2008. 藏南特提斯喜马拉雅前陆断褶带新生代构造演化与锑金多金属成矿作用[J]. 岩石学报, 24(7): 1638-1648.
- 王立强, 顾雪祥, 程文斌, 唐菊兴, 钟康惠, 刘晓吉. 2010. 西藏蒙亚啊铅锌矿床 S-Pb 同位素组成及对成矿物质来源的示踪[J]. 现代地质, 24(1): 52-58.
- 王立强, 罗茂澄, 袁志洁, 陈伟, 冷秋锋, 张学全. 2012. 西藏邦铺铅锌矿床 S、Pb、C、O 同位素组成及成矿物质来源研

究[J]. 地球学报, 33(4): 435-443.

- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 唐群力. 2002. 矿石铅同位素示踪成矿物质来源综述[J]. 地质地球化学, 30(3): 73-81.
- 谢玉玲, 杨科君, 李应棚, 李光明, 曲云伟, 董磊. 2019. 藏南马扎拉金-锑矿床: 成矿流体性质和成矿物质来源[J]. 地球科学, 44(6): 1998-2016.
- 杨竹森, 侯增谦, 高伟, 王海平, 李振清, 孟祥金, 曲晓明. 2006. 藏南拆离系锑金成矿特征与成因模式[J]. 地质学报, 80(9): 1377-1391.
- 张刚阳. 2012. 藏南金锑多金属成矿带成矿模式与找矿前景研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 张建芳, 郑有业, 张刚阳, 高顺宝, 叶先仁, 张众, 刘敏院, 李及秋. 2010. 北喜马拉雅扎西康铅锌锑银矿床成因的多元同位素制约[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 35(6): 1000-1010.
- 张相国, 尼采, 扎西, 丹增它青, 洛扎, 达瓦, 李正亮, 措涌. 2014. 西藏噶尔县阿布纳布矿区锑矿详查阶段报告[R]. 拉萨: 西藏自治区地质矿产勘查开发局地质调查院.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 218-266.

References:

- AWANG Jia-cuo, ZHENG You-ye, YANG Wan-tao, SUOLANG Ouzhu. 2017. Mineral Typomorphic Characteristics and Source of Ore-Forming Materials of Keyue Lead-Zinc Polymetallic Deposit, Southern Tibet[J]. Geological Science and Technology Information, 36(3): 53-63(in Chinese with English abstract).
- CANNON R S, PIERCE A P, ANTWEILER J C. 1961. The date of lead isotope geology related to problems of ore genesis[J]. Economic Geology, 56(1): 18.
- CHEN Xian, SU Wen-chao, HUANG Yong. 2016. He and Ar isotope geochemistry of ore-forming fluids for the Qinglong Sb deposit in Guizhou Province, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 32(11): 3312-3320(in Chinese with English abstract).
- DENG Zhou, ZHANG Gang-yang, ZHENG You-ye, CHEN You-liang. 2019. S-Pb isotope constrains for origin of ore-forming material in Cheqiongzhubu antimony deposit in southern Tibet[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 42(3): 337-345(in Chinese with English abstract).
- DU Ze-zhong, GU Xue-xiang, LI Guan-qing, ZHANG Yong-mei, CHENG Wen-bin, JING Liang-bing, ZHANG Xing-guo. 2011. Sulfur, lead isotope composition characteristics and the relevant instructive significance of the Lamuyouta Sb(Au) deposit, South Tibet[J]. Geoscience, 25(5): 853-860(in Chinese with English abstract).
- DUAN Ji-lin, TANG Ju-xing, LIN Bin. 2016. Zinc and lead isotope signatures of the Zhaxikang Pb Zn deposit, South Tibet: Implications for the source of the ore-forming metals[J]. Ore Geology Reviews, 78(58): 58-68.
- Isotope Geological Laboratory, Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Geology. 1979. Basic Issues of Lead Isotope Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 35-185(in Chinese).
- LI Jin-gao, WANG Quan-hai, CHEN Jian-kun, YAO Peng, PENG Yong-min. 2002. Study of metallogenic and prospecting models for the Shalagang antimony deposit, Gyangze, Tibet[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 29(5): 533-538(in Chinese with English abstract).
- LI Jin-gao. 2000. Study on the Mesozoic composite Sedex antimony and copper deposits in the continental margin of central and southern Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese).
- MIAO Hua-qing, LI Guang-ming, ZHANG Zhi, XIA Xiang-biao, LIANG Wei. 2017. Origin of the Keyue Pb-Zn polymetallic deposit in southern Xizang: Evidences from sulfur and lead isotopic compositions[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 37(2): 14-22(in Chinese with English abstract).
- OHMOTO H. 1972. Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposit[J]. Economic Geology, 67(5): 551-578.
- PAVLOVA G G, BORISENKO A S. 2009. The age of Ag-Sb deposits of Central Asia and their correlation with other types of ore systems and magmatism[J]. Ore Geology Reviews, 35(2): 164-185.
- QI Xue-xiang, LI Tian-fu, MENG Xiang-jin, YU Chun-lin. 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Tethyan Himalayan foreland fault-fold belt in southern Tibet, and its constraint on antimony-gold polymetallic minerogenesis[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(7): 1638-1648(in Chinese with English abstract).
- STACEY J S, HEDLUND D C. 1983. Lead-isotopic compositions of diverse igneous rocks and ore deposits from southwestern New Mexico and their implications for early Proterozoic crustal evolution in the western United States[J]. Geological Society of America Bulletin, 94(1): 43-57.
- SUN Xiang, ZHENG You-ye, PIRAINO F, CAMPBELL M T, YU Miao, XIA Shen-lan, SONG Qing-jie, CHANG Hui-fang. 2017. Geology, S-Pb isotopes, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit in Southern Tibet: implications for multiple mineralization events at Zhaxikang[J]. Mineralium Deposita, 53(3): 435-458.
- WANG Li-qiang, GU Xue-xiang, CHENG Wen-bin, TANG Ju-xing, ZHONG Kang-hui, LIU Xiao-ji. 2010. Sulfur and lead isotope composition and tracing for the source of ore-forming materials in the Mengya'a Pb-Zn deposit, Tibet[J]. Geoscience, 24(1): 52-58(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-qiang, LUO Mao-cheng, YUAN Zhi-jie, CHEN Wei, LENG Qiu-feng, ZHANG Xue-quan. 2012. Sulfur, lead, carbon and oxygen isotope composition and source of ore-forming materials of the Bangpu Pb-Zn ore deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 435-443(in Chinese with English abstract).
- WU Kai-xing, HU Rui-zhong, BI Xian-wu, PENG Jian-tang,

- TANG Qun-li. 2002. Ore lead isotopes as a tracer for ore-forming material sources: A Review[J]. *Geology-Geochemistry*, 30(3): 73-81(in Chinese with English abstract).
- XIE Yu-ling, YANG Ke-jun, LI Ying-xu, LI Guang-ming, QU Yun-wei, DONG Lei. 2019. Mazhala Gold-Antimony deposit in Southern Tibet: The characteristics of ore-forming fluids and the origin of gold and antimony[J]. *Earth Science*, 44(6): 1998-2016(in Chinese with English abstract).
- YANG Zhu-sen, HOU Zeng-qian, GAO Wei, WANG Hai-ping, LI Zhen-qing, MENG Xiang-jin, QU Xiao-ming. 2006. Metallogenic characteristics and genetic model of antimony and gold deposits in South Tibetan Detachment System[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 80(9): 1377-1391(in Chinese with English abstract).
- YANG Zhu-sen, HOU Zeng-qian, MENG Xiang-jin, LIU Ying-chao, FEI Hong-cai, TIAN Shi-hong, LI Zhen-qing, GAO Wei. 2009. Post-collisional Sb and Au mineralization related to the South Tibetan detachment system, Himalayan orogen s[J]. *Ore Geology Review*, 36(1-3): 194-212.
- ZARTMAN R E, DOE B R. 1981. Plumbotectonics-the model[J]. *Tectonophysics*, 75(1/2): 135-162.
- ZHANG Jian-fang, ZHENG You-ye, ZHANG Gang-yang, GAO Shun-bao, YE Xian-ren, ZHANG Zhong, LIU Min-yuan, LI Ji-qiu. 2010. Genesis of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag Deposit in Northern Himalaya: Constraints from Multi-Isotope Geochemistry[J]. *Earth Science -Journal of China University of Geosciences*, 35(6): 1000-1100(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Xiang-guo, NI Cai, ZHA Xi, DANZENG Ta-qing, LUO Zha, DA Wa, LI Zheng-liang, CUO Yong. 2014. Report on the stage of detailed investigation of antimony deposits in Abunabu mining area, Gaer, Tibet[R]. Lhasa: Regional Geological Survey Brigade, Tibet Geology and Mineral Exploration and Development Bureau(in Chinese).
- ZHANG Gang-yang. 2012. Metallogenic Model and Prospecting Potential in Southern Tibet Au-Sb Polymetallic Belt[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yong-fei, CHEN Jiang-feng. 2000. Stable isotope geochemistry[M]. Beijing: Science Press: 218-266(in Chinese).
- ZHOU Qing, LI Wen-chang, QING Cheng-shi, LAI Yang, LI Ying-xu, LIAO Zhen-wen, WU Jian-yang, WANG Sheng-wei, DONG Lei, TIAN En-yuan. 2017. Origin and tectonic implications of the Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit in northern Himalaya: evidence from structures, Re-Os-Pb-S isotopes, and fluid inclusions[J]. *Mineralium Deposita*, 53(4): 585-600.