

doi:10.3799/dqkx.2010.113

# 北喜马拉雅扎西康铅锌锑银矿床 成因的多元同位素制约

张建芳<sup>1</sup>, 郑有业<sup>2,3\*</sup>, 张刚阳<sup>1</sup>, 高顺宝<sup>1</sup>, 叶先仁<sup>4</sup>, 张 众<sup>1</sup>, 刘敏院<sup>5</sup>, 李及秋<sup>5</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 中国科学院兰州地质研究所, 甘肃兰州 730000

5. 西藏华钰矿业有限公司, 西藏拉萨 850000

**摘要:** 扎西康矿床是北喜马拉雅金锑多金属成矿带中发现的唯一一个大型 Pb-Zn-Sb-Ag 共生矿床, 矿体赋存于 SN 向的高角度张扭性断裂带中, 该矿床的黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、硫锑铅矿和辉锑矿等硫化物的  $\delta^{34}\text{S}$  值为  $4.5\% \sim 12.0\%$ , 多数集中在  $8\% \sim 11\%$ , 富集重硫且变化较小, 表明其硫源是一致的, 主要来源于围岩中的海相地层还原硫。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  比值分别在  $18.474 \sim 19.637$ 、 $15.649 \sim 15.774$  和  $39.660 \sim 40.010$  范围内, 并成一条直线, 具有放射性异常铅的特征, 投图落在上地壳铅演化线附近。流体包裹体的  $\delta\text{D}_{\text{V-SMOW}}$  为  $-127\% \sim -135\%$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  为  $-13.7\% \sim -12.4\%$ , 偏向于西藏地热水的分布范围; He-Ar 同位素组成表明成矿流体主要为地壳流体和饱和大气水的混合, 没有明显的地幔流体成分混入。其多元同位素组成与北喜马拉雅成矿带的金或金锑等其他矿床具有明显的差异, 表明其成矿作用具有特殊性, 在中新世随着印度与欧亚板块后碰撞挤压向伸展走滑阶段转换, 在北喜马拉雅构造带内形成一系列的 SN 向高角度断裂, 并促使地壳发生部分熔融形成熔融层, 引起局部热流值剧增, 地温异常梯度增大, 驱动地下水对流循环, 萃取晚三叠世—早侏罗世的一套浊流或喷流灰黑色碳硅泥岩系地层中的成矿物质, 沿着 SN 向断裂带充填交代成矿, 属于沉积—构造—热泉水改造的多阶段充填交代热液脉状矿床。

**关键词:** 同位素; 铅锌锑银矿; 矿床地质; 矿床成因; 地球化学; 北喜马拉雅。

中图分类号: P618.4

文章编号: 1000-2383(2010)06-1000-11

收稿日期: 2010-05-27

## Genesis of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag Deposit in Northern Himalaya: Constraints from Multi-Isotope Geochemistry

ZHANG Jian-fang<sup>1</sup>, ZHENG You-ye<sup>2,3\*</sup>, ZHANG Gang-yang<sup>1</sup>, GAO Shun-bao<sup>1</sup>, YE Xian-ren<sup>4</sup>,  
ZHANG Zhong<sup>1</sup>, LIU Min-yuan<sup>5</sup>, LI Ji-qi<sup>5</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

5. Tibet Huayu Mining Industry Company Limited, Lhasa 850000, China

**Abstract:** Zhaxikang deposit is the only large Pb-Zn-Sb-Ag symbiotic deposit in the northern Himalayas gold-antimony polymetallic belt, with its ore body located in the high-angle twisting fault zone striking SN direction. The  $\delta^{34}\text{S}$  of pyrite, sphalerite, galena, jamesonite, stibnite ranges from  $4.5\%$  to  $12.0\%$ , with the majority ranging from  $8\%$  to  $11\%$ , and it is enriched in sulfur with a narrow range, indicating that the same sulfur source, mainly from the rock formation in the marine sulfur reduction. The ratio of  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  is at  $18.474 \sim 19.637$ ,  $15.649 \sim 15.774$  and  $39.660 \sim 40.010$  respectively.

**基金项目:** 教育部重大项目(No. 308018); 国家科技支撑计划项目(No. 2006BAB01A04)。

**作者简介:** 张建芳(1985—), 男, 在读硕士, 矿物岩石矿床学专业. E-mail: zhjianfang@126.com.

\* 通讯作者: 郑有业(1962—), E-mail: zhyouye@163.com

spectively, falling near the upper crust of lead evolution line within the investment plan, and into a straight line.  $\delta D_{V-SMOW}$  values of water in fluid inclusions of quartz varies from  $-127\text{‰}$  to  $-135\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  to  $-13.7\text{‰}$  to  $12.4\text{‰}$ , in the distribution of geothermal water in Tibet. He-Ar isotopes shows that the ore-forming fluid was mainly derived from rustal fluids and saturated meteoric water, and apparently there is no mixing mantle fluid composition. The multi-isotope composition of the deposit has significant difference with gold or gold-antimony deposit in North Himalayan metallogenic belt, which indicates its unique mineralization of Zhaxikang deposits. As the Indian plate colliding to Eurasian plate in Miocene post-collisional transition environment from intra-continental orogeny to extension slip in North Himalayan belt, there formed a series of high-angle fault zones of SN direction, causing partial melting of crust which increased local heat flux sharply and geothermal gradient anomalies driving groundwater convection cycle, extracting metallogenic elements from Late Triassic-Early Cretaceous turbidite or black carbon and silicon gray mudstone strata. The deposit formed by replacement and filling along the SN fault zone, which belongs to sedimentary-structural-geothermal water multi-stage replacement and hydrothermal vein deposits.

**Key words:** isotope; lead-zinc-antimony and silver ore deposit; deposit geology; deposit genesis; geochemistry; North Himalayan.

西藏北喜马拉雅地区是一个典型的金锑多金属成矿带,目前发现的矿床主要有查拉普金矿、浪卡子金矿、哲古金锑矿、马扎拉锑金矿、沙拉岗锑矿、车穷卓布锑矿以及扎西康铅锌锑银矿等。前人对该带的基础地质特征,尤其在拆离构造、变质核杂岩等方面研究取得一些重要成果(尹安,2001)。近年来对该带金和锑矿床(点)的类型、时空分布特征以及成因也有初步的研究:(1)将金锑矿床成因类型划分为喷流—沉积型、卡林型、浊积岩型和浅成低温热液型(包括低硫浅成热液型、碱性杂岩型和热泉型)(郑有业等,2004);(2)变质核杂岩驱动的地热系统是控制金和锑成矿的重要因素,在变质核杂岩附近形成浪卡子式金矿床,向外形成马扎拉式锑—金矿床,远离核杂岩形成沙拉岗式锑矿床(付伟等,2005;杨竹森等,2006;Yang *et al.*, 2009);(3)以沙拉岗为代表的锑矿床包含了早白垩世的喷流沉积成矿和喜马拉雅期岩浆侵位后的叠加成矿,而以前者为主要因素(李金高,2000)。然而,对于整个北喜马拉雅成矿带的典型矿床的成矿机制及成因类型研究甚少。扎西康矿床是目前该带唯一的大型铅、锌、锑和银共生矿床,也是规模最大的矿床,经过勘探已经达到大型以上规模。本文拟通过分析扎西康铅锌锑银矿床的S、Pb、H、O、He和Ar同位素组成特征,探讨成矿物质来源及其成因,这对丰富北喜马拉雅成矿带的成矿理论及认识,为该带进一步寻找和评价与热泉水有关的大型—特大型矿床提供指导与借鉴,具有重要的理论及现实意义。

## 1 矿床地质

扎西康铅锌锑银矿床位于北喜马拉雅金锑多金属成矿带的羊卓雍—拿日雍复式向斜东南端北翼。

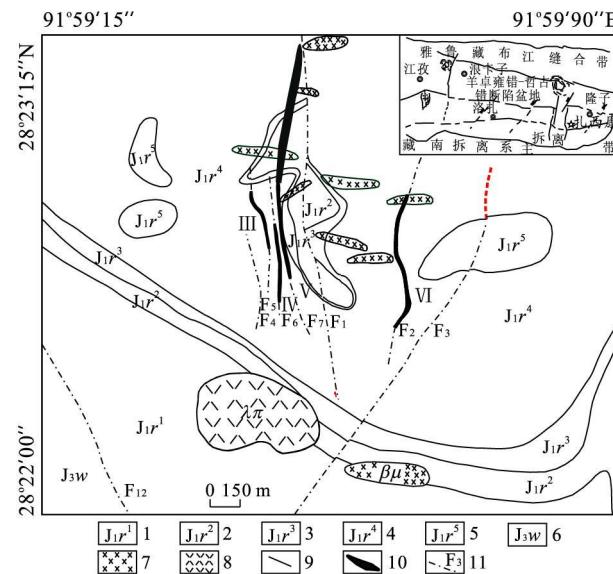


图1 扎西康铅锌锑银矿床地质图(据西藏华钰矿业有限公司修编)

Fig. 1 Geological map of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit

1. 黄褐色粗粒石英砂岩;
2. 灰黑色炭质板岩;
3. 灰绿色石英砂岩;
4. 灰黑色含碳质板岩夹褐黄色变钙质砂岩;
5. 灰绿色石英砂岩与灰黑色板岩互层;
6. 上侏罗统维美组;
7. 辉绿岩;
8. 流纹斑岩;
9. 地质界限;
10. 矿体;
11. 断裂

矿区出露地层主要为下侏罗统日当组( $J_1 r$ ),根据岩性不同将日当组划分为5个岩性段,从下至上依次为:(1)黄褐色粗粒变石英砂岩;(2)灰黑色板岩;(3)灰绿色变石英砂岩;(4)灰黑色炭质板岩夹褐黄色变钙质砂岩及少量不连续分布的灰岩和凝灰岩;(5)灰绿色变石英砂岩与灰黑色板岩互层,并夹着少量的薄层状灰岩。矿体主要产在第四岩性段(图1)。在矿区西南部出露少量上侏罗统维美组( $J_3 w$ )的变质细粒石英砂岩、粉砂质板岩以及砂屑灰岩。矿区内出露的岩浆岩主要为辉绿岩和流纹斑岩,另在流纹斑岩体中见少量的花岗斑岩脉。辉绿岩顺层侵入于侏罗

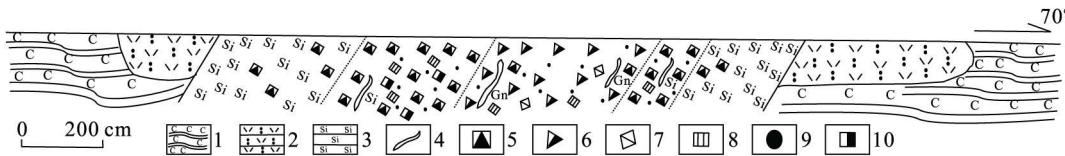


图 2 扎西康铅锌锑银矿床 V 号矿体横截面图 (XD8 号硐)

Fig. 2 Cross section map of V orebody of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit (XD8 adit)

1. 炭质板岩; 2. 火山凝灰岩; 3. 热泉硅质岩; 4. 粗粒方铅矿脉体; 5. 中细粒方铅矿(多金属); 6. 闪锌矿; 7. 菱铁矿; 8. 黄铁矿; 9. 黄铜矿; 10. 辉锑矿

系日当组地层中, 其产出的构造环境和时代与区域基性岩墙群一致。流纹斑岩主要出露于矿区南部, 矿区断裂构造发育, 多为近 SN 向的张(扭)性高角度正断层, 其中 F<sub>2</sub>、F<sub>4</sub>、F<sub>5</sub>、F<sub>6</sub> 和 F<sub>7</sub> 为矿区主要控矿断层, F<sub>1</sub>、F<sub>10</sub> 断层中局部矿化。

扎西康矿区共圈出了 9 条铅锌锑银矿(化)体。IV、V 和 VI 号矿体是矿区的主要矿体, 以 V 号矿体目前工作程度最高。根据野外观察, V 号矿体为一条多期次充填改造的复合矿体, 表明 SN 向断裂发生过多次构造运动, 为成矿提供了有利的空间。矿体深部比较连续且厚度变化较小, 而浅部连续性差且厚度变化较大, 具有尖灭、膨大、侧列再现现象。V 号矿体矿石类型及矿物组分具有一定的水平和垂直分带性。垂向上从上至下矿石类型变化依次为放射状、指状石英—辉锑矿矿石→块状、浸染状铅锌锑银矿石→角砾状、条带状、块状菱铁矿—闪锌矿矿石以及块状铅矿石, 角砾多为闪锌矿且从上至下角砾由小到大, 先被菱铁矿胶结包裹, 之后又被石英一方铅矿胶结包裹; 横向上矿石类型变化(图 2): 中间为块状、角砾状菱铁矿—闪锌矿矿石→往两边为块状、浸染状铅锌锑银矿石→两边再往外为硅华包裹角砾状矿石→最外为硅华, 矿体两侧有许多体积大小不等的空洞。

矿石构造主要有块状、条带状、脉状—网脉状、角砾状、环状、晶簇状、放射状和指状构造等; 矿石结构主要有自形一半自形粒状结构、它形粒状结构、骸晶结构、填隙结构、交代结构、包含状结构和共结边结构等。矿石矿物复杂, 主要有闪锌矿、方铅矿、辉锑铅矿、硫锑铅矿、辉锑矿, 少量黄铜矿、车轮矿、银黝铜矿、硫锑铅银矿和方锑矿等, 偶见蓝铜矿、孔雀石; 脉石矿物主要有黄铁矿、石英、菱铁矿和方解石等。蚀变类型主要为硅化、黄铁矿化、毒砂化、菱铁矿化、方解石化、绿泥石化、绿帘石化和绢云母化等。其中以硅化、菱铁矿化、黄铁矿化、毒砂化与铅锌锑矿化关系最为密切。

根据矿体交切和矿物交代充填关系, 将成矿阶

段分为: I. 黄铜矿—黄铁矿一方铅矿—闪锌矿阶段; II. 菱铁矿—微细黄铁矿一方铅矿—闪锌矿脉阶段; III. 石英—毒砂—黄铁矿阶段; IV. 石英—黄铁矿—车轮矿—硫锑铅矿—辉锑矿—闪锌矿一方铅矿(中细粒)阶段; V. 黄铁矿一方铅矿(粗粒脉状)阶段; VI. 热泉硅华(包裹矿石角砾)阶段。

## 2 样品及分析方法

本次分析的样品均采自扎西康铅锌锑银矿床的 V 号矿体地下平硐, 样品均比较新鲜。笔者将岩矿石样品粉碎到 40~60 目, 清洗、干燥之后在双目镜下挑纯达 99% 以上。

矿石矿物 S、Pb 同位素测试在武汉地质矿产研究所的国土资源部同位素地球化学重点实验室进行。S 同位素测试仪器为 MAT251EM, 以 Cu<sub>2</sub>O 作氧化剂制样, 采用国际标准为 CDT, 分析精度为 ±0.2‰; 铅同位素测试仪器为 MAT261 质谱计, 采用热电离子质谱法测试, 铅同位素比值测定的质量分馏由 SRM981 参考标准监控。

流体包裹体 H-O 同位素测试在中国地质科学院矿产资源研究所的同位素地球化学国土资源部重点实验室进行。测试仪器为 MAT251EM 质谱仪。氢同位素分析方法为爆裂法取水, 镍法制氢, 分析精度为 ±2‰; 氧同位素分析方法为 BrF<sub>5</sub> 法, 分析精度为 ±2‰。δ<sup>18</sup>O<sub>H2O</sub> 的计算公式: δ<sup>18</sup>O<sub>石英</sub> - δ<sup>18</sup>O<sub>H2O</sub> = 3.42 × 10<sup>6</sup> T<sup>2</sup> - 2.86。

流体包裹体 He-Ar 同位素测试在中国科学院兰州地质研究所地球化学测试部进行。使用的标准样为兰州市皋兰山顶的空气(AIRLZ2003); 使用的仪器是 MM5400 质谱计(英国 Micromass 公司生产)。国际公认空气中 Ra = <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He = 1.400 × 10<sup>-6</sup>。实验条件: 发射电流 I<sub>t4</sub> = 800 μA, I<sub>t40</sub> = 200 μA, 高压为 9.000 kV; 1600 °C 的热本底为(mol): <sup>4</sup>He = 1.10 × 10<sup>-14</sup>, <sup>20</sup>Ne = 1.82 × 10<sup>-14</sup>, <sup>40</sup>Ar = 6.21 × 10<sup>-13</sup>, <sup>84</sup>Kr = 1.37 × 10<sup>-16</sup>, <sup>132</sup>Xe = 5.65 × 10<sup>-18</sup>。详细的实验方法参见文献

表1 扎西康铅锌锑银矿床铅同位素组成

Table 1 Pb isotope composition of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit

样号	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\phi$	$\mu$	$\omega$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\triangle\beta$	$\triangle\gamma$
ZXKPD7-6	闪锌矿	19.637±0.005	15.774±0.003	40.010±0.007	0.530	9.70	37.78	3.77	28.72	67.77
ZXKPD7-8	闪锌矿	19.528±0.007	15.730±0.003	39.957±0.015	0.532	9.63	37.72	3.79	25.85	66.35
ZXKPD7-7	方铅矿	19.586±0.003	15.739±0.004	39.883±0.012	0.530	9.64	37.25	3.74	26.43	64.38
ZXKPD6-5	方铅矿	19.578±0.005	15.730±0.004	39.859±0.014	0.529	9.62	37.12	3.73	25.85	63.74
ZXKPD6-19	闪锌矿	19.568±0.009	15.729±0.006	39.858±0.015	0.530	9.62	37.16	3.74	25.78	63.71
ZXKPD6-11	硫锑铅矿	19.474±0.007	15.649±0.008	39.660±0.016	0.527	9.48	36.17	3.69	20.56	58.43
ZXKPD5-1	辉锑矿	19.617±0.003	15.728±0.002	39.919±0.003	0.527	9.62	37.13	3.74	25.72	65.34
ZXKPD5-6	辉锑矿	19.542±0.005	15.683±0.005	39.783±0.012	0.527	9.54	36.59	3.71	22.78	61.71

注:  $\phi = (^{235}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ ;  $\omega = (^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb})$ ;  $\mu = (^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb})$ ;  $\Delta\beta = [(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{d(t)} / (^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{m(t)} - 1] \times 1000$ ;  $\Delta\gamma = [(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{d(t)} / (^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_{m(t)} - 1] \times 1000$ ;  $d(t)$  为样品测试值;  $m(t)$  为地幔值.

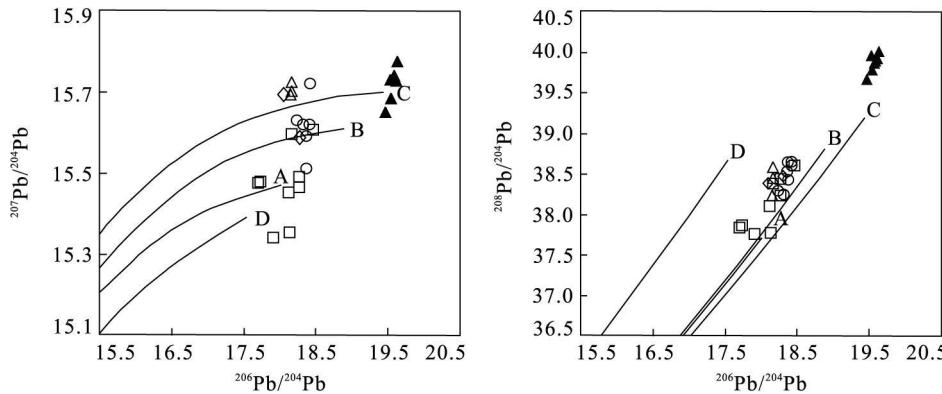


图3 扎西康铅锌锑银矿床铅构造模式图解(底图据 Zartman and Doe, 1981)

Fig. 3 Pb Isotopic composition of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit

▲. 扎西康铅锌锑银矿; ◇. 马扎拉锑金矿(郑有业, 2001, 内部报告); △. 沙拉岗锑矿(李金高, 2000); ○. 浪卡子金矿(郑明华, 1999, 内部报告); □. 藏北美多锑矿(余金杰, 2001); A. 上地幔; B. 造山带; C. 上地壳; D. 下地壳

(叶先仁等, 2001).

### 3 同位素特征

#### 3.1 铅同位素

扎西康铅锌锑银矿床8件硫化物样品(闪锌矿、方铅矿、硫锑铅矿和辉锑矿) $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为19.474~19.637, 平均为19.566; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为15.649~15.774, 平均为15.720; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值为39.660~40.010, 平均为39.866(表1). 铅同位素比值较大, 变化范围小, 并形成一条直线, 具有放射性异常铅的特征. 硫化物中Th含量为( $14\sim81$ ) $\times 10^{-9}$ , U含量为( $4\sim37$ ) $\times 10^{-9}$ ; 围岩辉绿岩中Th含量为( $2\ 000\sim3\ 630$ ) $\times 10^{-9}$ , U含量为( $530\sim910$ ) $\times 10^{-9}$ ; 炭质板岩中Th含量为( $11\ 400\sim16\ 500$ ) $\times 10^{-9}$ , U含量为( $1\ 390\sim1\ 700$ ) $\times 10^{-9}$ . 炭质板岩中的U、Th含量具有明显的异常, 其U、Th的高含量引起了高异常铅组成.

在Zartman and Doe(1981)的构造模式图上(图3), 扎西康铅锌锑银矿床铅同位素位于上地壳铅演化线附近, 与该带的其他金(锑)矿以及藏北美多锑矿床的铅同位素分布区域明显不同. 该带的其他金(锑)矿的铅主要落在上地壳铅和造山带铅演化线附近(李金高, 2000), 藏北锑矿带中美多锑矿床的铅主要落在上地幔铅演化线附近, 少量靠近下地壳和造山带演化线(余金杰, 2001), 表明北喜马拉雅金锑多金属成矿带与藏北锑矿带铅同位素来源的明显不同, 藏北锑矿带中的铅主要来源于上地幔和下地壳, 北喜马拉雅金(锑)矿床铅除了来源于上地壳还有深源铅的混入, 而扎西康矿床铅主要来源于上地壳.

从 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 图(图4)上也可以看出, 扎西康矿床铅均落于上地壳源铅范围内, 显示了上地壳铅来源; 而金(锑)矿及藏北美多锑矿的铅靠近或落在地壳与地幔混合的俯冲带铅(岩浆作用)和造山带铅的范围内, 显示了深源铅的混合特征.

矿石铅 $\mu$ 值介于9.48~9.70之间, 高于地幔

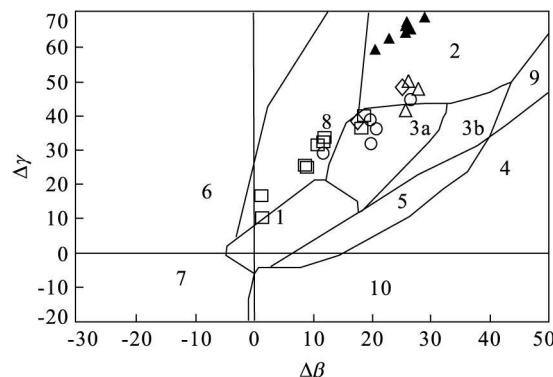


图 4 扎西康铅锌锑银矿床铅同位素  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  图解(底图据朱炳泉, 1998)

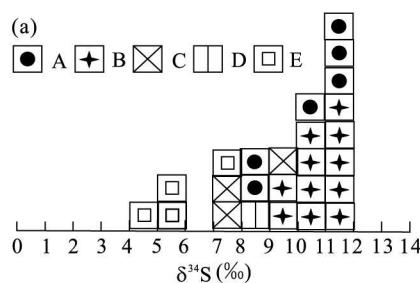
Fig. 4  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  map of Pb isotope of Zhaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit

▲. 扎西康铅锌锑银矿; ◇. 马扎拉锑金矿(郑有业, 2001, 内部报告); △. 沙拉岗锑矿(李金高, 2000); ○. 浪卡子金矿(郑明华, 1999, 内部报告); □. 藏北美多锑矿(余金杰, 2001); 1. 上地幔源铅; 2. 上地壳源铅; 3. 地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a. 岩浆作用, 3b. 沉积作用); 4. 化学沉积型铅; 5. 海底热水作用铅; 6. 中深变质作用铅; 7. 深变质下地壳铅; 8. 造山带铅; 9. 古老页岩山地壳铅; 10. 退变质铅

铅的  $\mu$  值(8~9),  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$  比值变化于 3.69~3.79 范围, 与地壳的  $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$  比值(约为 4)基本相当, 也揭示了成矿物质的壳源特征.

### 3.2 硫同位素

扎西康铅锌锑银矿床硫化物样品(黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、硫锑铅矿和辉锑矿)中,  $\delta^{34}\text{S} = 4.5\% \sim 12.0\%$ , 多数集中在 8%~11% (图 5a, 表 2), 平均为 9.0%, 富集重硫且变化范围较小, 其硫源是一致的. 早阶段粗粒块状或角砾状闪锌矿矿石样品(ZXKPD7-8、ZXKPD6-12、ZXK-26、ZXK2-3)中黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值为 11.2%~11.97%, 平均为 11.65%; 闪锌矿  $\delta^{34}\text{S}$  值为 10.83%~11.4%, 平均为 11.29%; 方铅矿  $\delta^{34}\text{S}$  值为 9.9%;  $\delta^{34}\text{S}$  黄铁矿 >  $\delta^{34}\text{S}$



闪锌矿 >  $\delta^{34}\text{S}$  方铅矿, 硫同位素达到平衡. 石英—黄铁矿脉中黄铁矿  $\delta^{34}\text{S}$  值为 8.7‰~10.6‰, 平均为 9.1‰. 晚阶段样品中闪锌矿  $\delta^{34}\text{S}$  值为 9.1‰~10.6‰, 平均为 10.1‰; 方铅矿  $\delta^{34}\text{S}$  值为 7.71‰~7.96‰, 平均为 7.84‰; 硫锑铅矿样品  $\delta^{34}\text{S}$  值为 8.79‰; 辉锑矿  $\delta^{34}\text{S}$  值为 4.5‰~7.1‰, 平均为 5.5‰;  $\delta^{34}\text{S}$  闪锌矿 >  $\delta^{34}\text{S}$  硫锑铅矿 >  $\delta^{34}\text{S}$  方铅矿 >  $\delta^{34}\text{S}$  辉锑矿, 硫同位素同样达到平衡. 在硫同位素频率直方图上(图 5a),  $\delta^{34}\text{S}$  分布呈阶梯状特征,  $\delta^{34}\text{S}$  值闪锌矿 ≥ 黄铁矿 > 硫锑铅矿 > 方铅矿 > 辉锑矿.

扎西康铅锌锑银矿床硫同位素与该带其他金、锑矿床有着显著的区别(图 5b), 金、锑矿床的  $\delta^{34}\text{S} = -4.3\% \sim +5.54\%$ , 且大多在 -4‰~1‰ 之间(戚学祥等, 2008; 杨竹森等, 2006; 余金杰, 2001; 李金高, 2000; Yang et al., 2009; 郑有业等, 另文待发), 显示了深源岩浆硫的特征; 而扎西康矿床的  $\delta^{34}\text{S}$  与沙拉岗锑矿早白垩世围岩地层中的闪锌矿  $\delta^{34}\text{S} = 10.3\%$  以及黄铁矿  $\delta^{34}\text{S} = 9.9\%$ (李金高, 2000) 相近, 显示了硫主要来源于围岩中的海相地层还原硫.

### 3.3 氢氧同位素

氢、氧同位素分析结果(表 2)表明, 扎西康铅锌锑银矿床具有明显偏负的  $\delta\text{D}$  值, 为 -127‰~-135‰. 通过均一温度换算后,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  在 -13.7‰~12.4‰ 之间, 变化范围较宽. 在  $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  同位素图上(图 6), 扎西康铅锌锑银矿床  $\delta\text{D}$  值与沙拉岗锑矿床(-151‰~-166‰)(杨竹森等, 2006; Yang et al., 2009)、车穷卓布锑矿(-130‰~-168‰)(孟祥金等, 2008)的  $\delta\text{D}$  均相近, 靠近西藏雅鲁藏布江流域现今地热水(-140‰~-165‰)(郑淑蕙等, 1982)的范围. 扎西康矿床  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  值变化较大, 早阶段的  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = 5.5\% \sim 12.4\%$ , 与沙拉

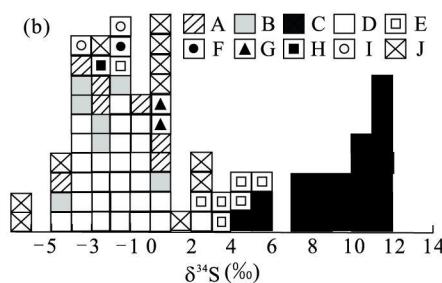


图 5 扎西康矿床(a)和北喜马拉雅成矿带矿床(b)硫同位素组成频率直方图

Fig. 5 S isotope frequency histogram of Zhaxikang deposit (a) and other deposits in North Himalayan (b)

(a) A. 黄铁矿; B. 闪锌矿; C. 方铅矿; D. 硫锑铅矿; E. 辉锑矿; (b) A. 马扎拉(戚学祥等, 2008; 杨竹森等, 2006); B. 哲古(郑有业等, 待发; 杨竹森等, 2006); C. 扎西康铅锌锑银矿(本文; 杨竹森等, 2006; Yang et al., 2009); D. 沙拉岗锑矿(戚学祥等, 2008; 杨竹森等, 2006; 余金杰, 2001; 李金高, 2000); E. 查拉普金矿(郑有业等, 待刊); F. 车穷卓布锑矿; G. 雪拉; H. 下巴; I. 拉琼(戚学祥等, 2008); J. 藏北美多锑矿(余金杰, 2001)

表2 扎西康铅锌锑银矿床硫、氢、氧同位素组成  
Table 2 S-H-O isotope composition of ore minerals of Zaxikang Pb-Zn-Sb-Ag deposit

编号	阶段	矿石类型	矿物	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ (‰)	来源	样号	矿石类型	矿物	$\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ (‰)	均一温度(℃)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (‰)	来源
ZXKPD7-8d	I	角砾状菱铁矿-闪锌矿矿石	黄铁矿	11.78	本文	ZXK-PD7-8a	角砾状菱铁矿-闪锌矿矿石	菱铁矿	-127				本文
ZXKPD7-8	I	角砾状菱铁矿-闪锌矿矿石	闪锌矿	10.83	本文	ZXK-PD7-17a	角砾状菱铁矿-闪锌矿矿石	菱铁矿	-135				本文
ZXKPD6-12b	I	块状黄铁矿-闪锌矿矿石	黄铁矿	11.97	本文	ZXK-PD6-1a	含矿石英脉	石英	-155	21.4	265	12.4	本文
ZXKPD6-12a	I	块状黄铁矿-闪锌矿矿石	闪锌矿	11.23	本文	ZXK-PD6-2a	含矿石英脉	石英	-165	20.1	258	10.8	本文
ZXKPD6-11	IV	纤维状硫锑铅矿矿石	硫锑铅矿	8.79	本文	ZXK-PD7-2a	石英脉	石英	-160	15.0	253	5.5	本文
ZXKPD7-7	IV	块状中细粒方铅矿矿石	方铅矿	7.96	本文	ZXK-PD5-6a	放射状石英-辉锑矿石	石英	-152	1.9	244	-8.0	本文
ZXKPD6-5	IV	块状方铅矿矿石	方铅矿	7.71	本文	ZXK-PD5-8a	放射状石英-辉锑矿石	石英	-162	2.8	250	-6.8	本文
ZXKPD5-1	IV	放射状辉锑矿矿石	辉锑矿	5.24	本文	LZ-13	块状硅质岩(顶部)	石英	-156	12.3	200	-0.1	孟祥金等,2008
ZXKPD5-6	IV	块状放射状辉锑矿矿石	辉锑矿	5.34	本文	ZXK1-13	块状硅质岩	石英	-155	3.0	200	-9.4	孟祥金等,2008
ZXK-25		粗粒闪锌矿脉(早)	闪锌矿	12.0	杨竹森等,2006	ZXK1-10	细条带状硅质岩	石英	-149	4.0	200	-8.4	孟祥金等,2008
ZXK-26		粗粒闪锌矿脉(早)	闪锌矿	11.4	杨竹森等,2006	ZXK1-8	含空(晶)洞层状硅质岩	石英	-156	5.0	200	-7.4	孟祥金等,2008
ZXK-26		粗粒闪锌矿脉(早)	黄铁矿	11.2	杨竹森等,2006	ZXK1-7	块状纹层状硅质岩	石英	-138	2.9	200	-9.5	孟祥金等,2008
ZXK2-3		粗粒闪锌矿脉(早)	闪锌矿	11.2	杨竹森等,2006	ZXK2-2	细纹层带状硅质岩	石英	-149	3.6	200	-8.8	孟祥金等,2008
ZXK2-3		粗粒闪锌矿脉(早)	方铅矿	9.9	杨竹森等,2006	LZ-04	紊乱层状块状硅质岩(底部)	石英	-154	9.8	200	-2.6	孟祥金等,2008
ZXK-6		石英-毒砂脉含闪锌矿角砾	闪锌矿	11.1	杨竹森等,2006	ZXK06-2	大脉状辉锑矿化硅质岩	石英	-142	-1.3	200	-13.7	孟祥金等,2008
ZXK-15		石英-黄铁矿脉	黄铁矿	8.9	杨竹森等,2006	ZXK-2	石英-辉锑矿-闪锌矿脉	石英	-140	1.3	184	-11.5	杨竹森等,2006
ZXK-23		石英-黄铁矿脉	黄铁矿	8.7	杨竹森等,2006	ZXK-3	石英-辉锑矿-闪锌矿脉	石英	-152	12.2	201	-0.2	杨竹森等,2006
ZXK-21		黄铁矿脉	黄铁矿	10.6	杨竹森等,2006	ZXK-5	石英-辉锑矿-闪锌矿脉	石英	12.6	200	0.2	Yang et al., 2009	
ZXK1-1		石英-辉锑矿-闪锌矿脉	闪锌矿	10.2	杨竹森等,2006	ZXK-7	石英-辉锑矿-闪锌矿脉	石英	-160	9.8	200	-2.6	Yang et al., 2009
ZXK1-3		石英-辉锑矿-闪锌矿脉	闪锌矿	10.6	Yang et al., 2009	ZXK-1	石英-辉锑矿-闪锌矿脉	石英		5.8	200	-6.6	Yang et al., 2009
ZXK1-4		石英-辉锑矿-闪锌矿脉	闪锌矿	10.4	Yang et al., 2009	ZXK-04-1	石英-辉锑矿脉	石英	-152	2.1	200	-10.3	Yang et al., 2009
ZXK1-5		石英-辉锑矿-闪锌矿脉	闪锌矿	10.4	Yang et al., 2009	ZXK-04-2	石英-辉锑矿脉	石英	-144	2.6	200	-9.8	Yang et al., 2009
ZXK1-9		石英-辉锑矿-闪锌矿脉	闪锌矿	9.7	Yang et al., 2009	ZXK-04-3	石英脉	石英	-154	4	200	-8.4	Yang et al., 2009
ZXK-5		石英-辉锑矿-闪锌矿脉	闪锌矿	9.1	Yang et al., 2009	ZXK-06-23	石英-黄铁矿脉	石英	11.9	200	-0.5	Yang et al., 2009	
ZXK-3		石英-辉锑矿-闪锌矿脉	辉锑矿	7.1	Yang et al., 2009	07Q1-96	方铅矿	石英	-140				戚学洋等,2008
ZXK04-2		石英-辉锑矿脉	辉锑矿	4.5	Yang et al., 2009	07Q1-97	闪锌矿	石英	-131				戚学洋等,2008

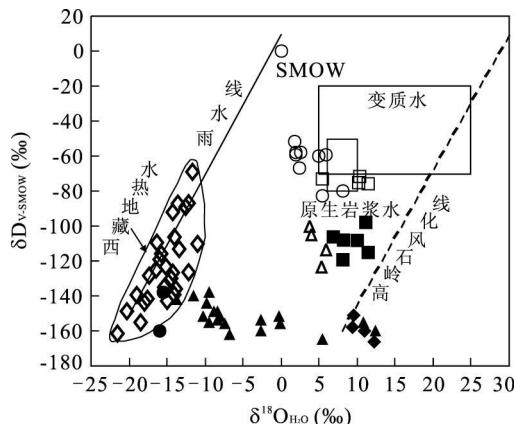


图 6 扎西康矿床及北喜马拉雅成矿带矿床  $\delta D_{V-SMOW}$ - $\delta^{18}O_{H_2O}$  同位素组成

Fig. 6  $\delta D_{V-SMOW}$ - $\delta^{18}O_{H_2O}$  isotope composition of Zhaxikang deposit and other deposits in North Himalayan

▲· 扎西康铅锌锑矿; △· 查拉普金矿(郑有业等,另文待发); ○· 浪卡子金矿(郑明华,1999,内部报告); ●· 车穷卓布锑矿(孟祥金等,2008); ◇· 西藏地热水(郑淑蕙等,1982); ■· 马扎拉锑金矿; □· 哲古金锑矿; ◆· 沙拉岗锑矿(马扎拉锑金矿、哲古金锑矿、沙拉岗锑矿(据杨竹森等,2006 和 Yang et al., 2009))

岗锑矿床  $\delta^{18}O_{H_2O} = 4.69\text{‰} \sim 15.29\text{‰}$ (李金高, 2000) 相近; 而晚阶段的  $\delta^{18}O_{H_2O} = -13.7\text{‰} \sim 0.2\text{‰}$ , 与车穷卓布锑矿床  $\delta^{18}O_{H_2O} = -15.5\text{‰} \sim -15.9\text{‰}$ (孟祥金等, 2008) 较为相近。究其原因, 一方面扎西康矿床地处桑日一错那地热强烈活动地带, 成矿晚阶段比早阶段更富地热水, 增大了水/岩比值, 且地热水的循环速度较快, 降低了氧同位素的水岩交换, 使得成矿流体保留了较多的地热水氧同位素的特征, 而沙拉岗锑矿形成稍早可能有变质核杂岩流体的加入, 且位于谷露—亚东裂谷的西侧, 离地热强烈活动地带有一定的距离, 限制了地热水循环的速度和流量, 使水/岩比值减小, 氧同位素的水岩交换明显, 成矿流体的  $\delta^{18}O$  值增大(杨竹森等, 2006); 另一方面包裹体成分分析结果表明(另文待发), 扎西康早阶段成矿流体中可能有部分沉积建造流体。

扎西康铅锌锑矿床与该带的查拉普金矿、哲古金锑矿床、马扎拉锑金矿床以及浪卡子金矿床的  $\delta D$ - $\delta^{18}O_{H_2O}$  组成差别较大, 前者显示成矿与地下热水密切相关, 成矿流体主要为大气降水下渗循环构成的地热水; 而后者显示成矿与岩浆流体密切相关, 成矿流体可能为岩浆水与大气降水的混合水。

### 3.4 氢氩同位素

由表 3 可知, 扎西康矿床流体包裹体

的  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  比值为  $0.045 \sim 1.305 \text{ Ra}$ 。Hoke *et al.* (2000) 以  $R/\text{Ra} = 0.10$  为限, 将西藏热泉 He 同位素分为壳源 He 域和幔源 He 域, 且估算认为,  $R/\text{Ra} < 0.05$  的热泉 He 气主要源自地壳,  $R/\text{Ra} > 0.11$  的热泉 He 气有  $1\% \sim 5\%$  的幔源气混入。侯增谦和李振清(2004)以及李振清等(2005)也将西藏热水分成 2 个 He 域, 壳源 He 域  $R/\text{Ra}$  值变化于  $0.017 \sim 0.080$  之间, 幔源 He 域的  $R/\text{Ra}$  值变化于  $0.11 \sim 5.38$  之间。扎西康矿区位于藏南桑日一错那热水活动带地区, 其附近热泉样品的低  $R/\text{Ra}$  值域为  $0.07 \sim 0.08$ , 高  $R/\text{Ra}$  值域为  $0.15 \sim 0.69$ , 扎西康矿床成矿流体的  ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  值与该活动带热泉水相比, 显示成矿流体主要为地壳流体, 个别样品可能有少量幔源气体的混入。 ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$  比值变化范围为  $463.5 \sim 10047$ , 稍高于饱和大气水 ( ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar} = 295.5$ ) 以及年轻的地壳流体, 但明显小于地幔流体 ( $> 40000$ );  ${}^{38}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$  比值变化范围为  $0.156 \sim 0.248$ , 平均为  $0.196$ , 与饱和大气水成分 ( ${}^{38}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar} = 0.188$ ) 基本相同。

在  ${}^{40}\text{Ar}/{}^{36}\text{Ar}$ - ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$  图解(图 7)上, 主要落在地壳端元和饱和大气水之间, 与地幔端元相距较远, 表明扎西康铅锌锑矿床的成矿流体主要为地壳流体和饱和大气水的混合, 没有明显的地幔流体的混入。

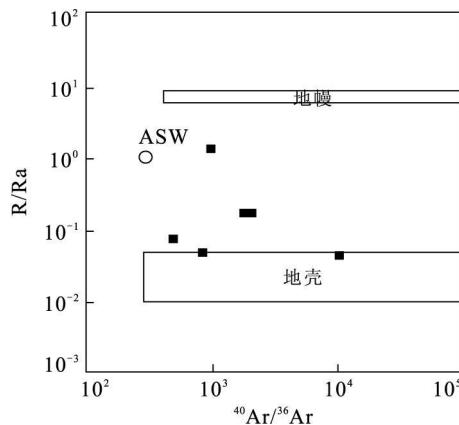
## 4 矿床成因探讨

碰撞造山过程或者陆内俯冲(A型俯冲)过程的成岩成矿作用主要发生在碰撞造山过程的挤压—伸展转变期(即构造转折)(陈衍景等, 1998, 1999)。中新世, 随着印度与欧亚板块进入后碰撞挤压向伸展转换环境, 其早期阶段主要发生下地壳物质自北而南的反方向流动与上地壳缩短( $> 18 \text{ Ma}$ ), 在藏南地区形成 EW 向延伸的藏南拆离系(STDS)(Beumont *et al.*, 2001, 2004; Shen *et al.*, 2001), 地壳部分熔融产生的岩浆沿藏南拆离系和层间破碎带侵入(Searle and Godin, 2003), 在区域上构成了呈 EW 向分布的变质核杂岩带; 晚期阶段( $< 18 \text{ Ma}$ )主要发生 EW 向伸展, 形成一系列 SN 向正断层系统及裂谷系。与中新世构造运动同时, 在北喜马拉雅地区发育较大规模的金锑、铅锌银等成矿作用, 且由于构造属性的不同导致或决定了控矿构造及成矿作用之间的差异性。如查拉普金矿、哲古金锑矿、马扎拉锑金矿、沙拉岗锑矿等主要受与藏南拆离系相关的

表3 扎西康矿床流体包裹体 He-Ar 同位素分析

Table 3 He-Ar isotope composition of fluid inclusion of Zhaxikang deposit

编号	矿物	质量(g)	$^4\text{He}$ ( $10^{-7}$ ) (cm $^3$ STP/g)	$^{40}\text{Ar}$ ( $10^{-7}$ ) (cm $^3$ STP/g)	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (Ra)	$^{38}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$
ZXKPD7-8e	闪锌矿	0.292	39.0±2.60	2.46±0.17	0.045±0.007	0.156±0.069	10 047±549.6
ZXKPD7-8f	菱铁矿	0.293	55.8±3.70	15.0±1.0	0.079±0.010	0.221±0.019	463.5±12.1
ZXKPD6-1c	石英	0.393	1.49±0.10	29.7±2.0	0.172±0.006	0.174±0.053	1 463.6±37.6
ZXKPD6-2c	石英	0.392	1.89±0.13	27.7±1.9	0.169±0.013	0.248±0.029	1 483.4±38.1
ZXKPD5-6d	辉锑矿	0.293	15.2±1.0	3.49±0.24	0.041±0.003	—	—
ZXKPD5-6e	石英	0.389	0.20±0.02	32.6±2.2	0.048±0.007	0.194±0.019	831.5±51.1
ZXKPD5-8c	石英	0.390	0.09±0.01	18.0±1.2	1.305±0.023	0.183±0.004	959.2±21.1

图7 扎西康铅锌锑银矿床流体包裹体  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -R/Ra 图解(参照王旭东等, 2009)Fig. 7  $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ -R/Ra isotope of fluid inclusion of Zhaxikang deposit

EW 向层间破碎带控制;而扎西康铅锌锑银矿、车穷卓布锑矿、壤拉锑矿等则赋存于 SN 向高角度张扭性断裂中。控矿构造由北往南从以 EW 向层间破碎带为主转变为以近 SN 向高角度断裂为主。北喜马拉雅近 EW 向藏南拆离系(STDS)的形成时代为 21~12 Ma (Schäfer et al., 1986; Murphy and Harrison, 1999);近 SN 向高角度正断层系的形成时代始于 18 Ma 左右(Williams et al., 2001), 大多数落在 14~13 Ma 和 8~4 Ma 两个阶段中(Zhang and Guo, 2007; Blisniuk et al., 2001; Yin et al., 1999; Coleman and Hodges, 1995), 这也说明 SN 向构造的成矿作用可能要晚于 EW 向构造的成矿作用;据此推测扎西康矿床的 SN 向高角度张扭性伸展断裂发育于中新世(18~4 Ma), 并且 SN 向断裂的发育是多阶段的(侯增谦等, 2006), 矿体严格受断裂带控制, 应为多阶段构造充填交代成矿作用的产物。

地球物理探测资料表明, 沿亚东—谷露裂谷深度约为 15~18 km 处发现一组地震亮点, 近垂直地

震反射剖面上显示出异常高发射振幅的反射体 (Zhao et al., 1996)。这组地震亮点北起当雄和宁中, 向南延伸进入羊卓雍错地区, 实测的高热流异常值高达 146 mW/m<sup>2</sup>, 认为其是地壳加厚产生的热能导致了地壳物质熔融, 形成中上地壳内的部分熔融层顶部的岩浆体(Brown et al., 1996; Nelson et al., 1996)或是深处存在熔融的花岗岩浆(沈显杰等, 1990), 其空间位置与地表的热泉相对应, 热水的分布受 SN 向正断层系统控制, 证明顶面位置处于 15 km 深度的成片出现的岩浆房或部分熔融层驱动了热水流体的对流循环(李振清等, 2005)。这种机制可能为扎西康铅锌锑银矿床成矿提供了持续的热源。

在北喜马拉雅地区晚三叠世—早侏罗世沉积了一套陆源浊积岩、中基性火山岩及浊流间隙期的碳硅泥质岩石, 并伴有明显的火山岩浆活动及热水沉积作用, 形成了一套含 Au、Sb、Pb、Zn、As、W 和 Bi 等元素的含矿建造(郑有业等, 2004, 2007)。扎西康铅锌锑银矿床位于藏南桑日一错那热水活动带地区, 容矿围岩为一套浅变质的浊流或喷流沉积作用形成的灰黑色碳硅泥岩系地层。前面已述, 扎西康铅锌锑银矿床 S、Pb、H 和 O 同位素组成与北喜马拉雅带内的已知金(锑)矿床有着较为明显的区别, 扎西康铅锌锑银矿床成矿流体主要为地下热水, 成矿物质主要源于上地壳地层, 而带内已知金(锑)矿床更多地显示其成矿作用有岩浆流体及物质的参与。因此, 扎西康铅锌锑银矿床成矿作用为中新世北喜马拉雅挤压向伸展转换作用下形成一系列的伸展构造, 并促使地壳部分熔融形成地壳熔融层或岩浆房, 引起局部热流值剧增, 地温异常梯度增大, 驱动了地下热水流体的对流循环, 萃取晚三叠世—早侏罗世浊流或喷流沉积的灰黑色碳硅泥岩系中的成矿物质沿着 SN 向高角度断裂带充填交代成矿, 属于(浊流或喷流)沉积—构造—热泉水改造的多阶段充填交

代热液脉状矿床。

## 5 结论

(1) 扎西康铅锌锑银矿床的容矿围岩为浅变质炭质板岩和变钙质砂岩; 矿体赋存于 SN 向高角度张(扭)性正断层中, 矿体产状与断层产状基本一致, 与地层近乎正交, 矿体与围岩界线较为明显; 矿石类型及组构多样, 矿物成分复杂, 为多阶段构造充填交代作用的产物。

(2) S 同位素研究表明其主要来源于围岩中的海相地层还原硫, Pb 同位素指示其成矿物质来源于上地壳; H-O 同位素指示成矿流体主要为大气降水渗入地壳而形成的地热水; He-Ar 同位素组成表明稀有气体主要来源于地壳。

(3) 扎西康铅锌锑银矿床的成矿作用与中新世北喜马拉雅挤压向伸展转换构造活动密切相关, 深部的地壳熔融层驱动地下热水对流循环, 萃取浊流或喷流沉积的灰黑色碳硅泥岩系含矿建造中的成矿物质, 携带至地壳浅部的近 SN 向高角度张扭性断裂构造中充填交代成矿。

(4) 扎西康铅锌锑银大型—特大型矿床的发现与研究, 将为在北喜马拉雅成矿带寻找大型矿床提供理论认识与依据。笔者相信北喜马拉雅成矿带的明天在寻找中新世与地下热水活动有关的矿床方面将会取得较大突破。

**致谢:** 本文在撰写过程中得到了赵永鑫教授的建议, 西藏华钰矿业公司杨宗武、李仁清、焦峰等工程师在野外给予了指导, 中国地质大学刘文浩参与了部分样品的挑选工作, 在此表示衷心感谢!

## References

- Baumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H., et al., 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 414: 738—742. doi: 10.1038/414738a
- Baumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H., et al., 2004. Crustal channel flows: 1. Numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. *J. Geophys. Res.*, 109, B06406. doi: 10.1029/2003JB002809
- Blisniuk, P. M., Hacker, B. R., Glodny, J., et al., 2001. Normal faulting in Central Tibet since at least 13.5 Myr ago. *Nature*, 412: 628—632. doi: 10.1038/35088045
- Brown, L. D., Zhao, W. J., Nelson, K. D., et al., 1996. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH seismic reflection profiling. *Science*, 274: 1688—1690.
- Chen, Y. J., Chen, H. Y., Liu, Y. L., et al., 1999. Progress and records in the study of endogenous mineralization during collisional orogenesis. *Chinese Science Bulletin*, 45(1): 1—10. doi: 10.1007/BF02884893
- Chen, Y. J., Guo, G. J., Li, X., et al., 1998. Metallogenic geodynamic background of Mesozoic gold deposits in granite-greenstone terrains of North China craton. *Science in China (Series D)*, 41(2): 113—120. doi: 10.1007/BF02932429
- Coleman, M., Hodges, K., 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 374: 49—52.
- Fu, W., Zhou, Y. Z., Yang, Z. J., et al., 2005. Characteristics of multi-horizon ore-bearing formations in southern Tibet Au-Sb metallogenic belt and its controlling factors. *Geotectonica et Metallogenesis*, 29(3): 321—327 (in Chinese with English abstract).
- Hoke, L., Lamb, S., Hilton, D., et al., 2000. Southern limit of mantle-derived geothermal helium emissions in Tibet: implications for lithospheric structure. *Earth Planets Sci. Lett.*, 180(3—4): 297—308. doi: 10.1016/S0012-821X(00)00174-6
- Hou, Z. Q., Li, Z. Q., 2004. Possible location for underthrusting front of the Indus continent: constraints from helium isotope of the geothermal gas in southern Tibet and eastern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 78(4): 482—493 (in Chinese with English abstract).
- Hou, Z. Q., Qu, X. M., Yang, Z. S., et al., 2006. Tibetan collisional Orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting. *Mineral Deposits*, 25(6): 629—651 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. G., 2000. Study on Mesozoic compound Sedex type of antimony and copper deposits of continental margin in central and southern of Tibet (Dissertation). Chengdu Institute of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Hou, Z. Q., Nie, F. J., et al., 2005. Characteristic and distribution of the partial melting layers in the upper crust: evidence from active hydrothermal fluid in the South Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 79(1): 68—77 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. J., Yang, Z. S., Qi, X. X., et al., 2008. Silicon-oxygen-hydrogen isotopic compositions of Zaxikang antimony polymetallic deposit in southern Tibet and its re-

- sponses to the ore-controlling structure. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1649—1655 (in Chinese with English abstract).
- Murphy, M. A., Harrison, T. M., 1999. Relationship between leucogranites and the Qomolangma detachment in the Rongbuk valley, South Tibet. *Geology*, 27: 831—834.
- Nelson, K. D., Zhao, W. J., Brown, L. D., et al., 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: synthesis of Project INDEPTH results. *Science*, 274 (5293): 1684—1688. doi: 10.1126/science.274.5293.1684
- Qi, X. X., Li, T. F., Meng, X. J., et al., 2008. Cenozoic tectonic evolution of the Tethyan Himalayan foreland fault-fold belt in southern Tibet and its constraint on antimony-gold polymetallic mineralogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (7): 1638—1648 (in Chinese with English abstract).
- Schärer, U., Xu, R. H., Allègre, C. J., 1986. U-(Th)-Pb systematics and ages of Himalayan leucogranites, South Tibet. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 77 (1): 35—48. doi: 10.1016/0012-821X(86)90130-5
- Searle, M. P., Godin, L., 2003. The South Tibetan detachment and the Manaslu leucogranite: a structural reinterpretation and restoration of the Annapurna-Manaslu Himalaya, Nepal. *Journal of Geology*, 111: 505—523.
- Shen, F., Royden, L. H., Burchfiel, B. C., 2001. Large-scale crustal deformation of the Tibetan plateau. *J. Geophys. Res.*, 106: 6793—6816.
- Shen, X. J., Zhang, W. R., Yang, S. Z., et al., 1990. Heat flow and heat evolution of terrain tectonic in Qinghai-Xizang plateau. Geological Publishing House, Beijing, 1—90 (in Chinese).
- Wang, X. D., Ni, P., Jiang, S. Y., et al., 2009. Origin of ore-forming fluid in the Piaotang tungsten deposit in Jiangxi Province: evidence from helium and argon isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 54 (21): 3338—3344 (in Chinese).
- Williams, H., Turner, S., Kelley, S., et al., 2001. Age and composition of dikes in southern Tibet: new constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism. *Geology*, 29(4): 339—342. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0339: AACODI>2.0.CO;2
- Yang, Z. S., Hou, Z. Q., Gao, W., et al., 2006. Metallogenetic characteristics and genetic model of antimony and gold deposits in South Tibetan detachment system. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1377—1391 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. S., Hou, Z. Q., Meng, X. J., et al., 2009. Post-collisional Sb and Au mineralization related to the South Tibetan detachment system, Himalayan orogen. *Ore Geology Reviews*, 36 (1—3): 194—212. doi: 10.1016/j.oregeorev.2009.03.005
- Ye, X. R., Wu, M. B., Sun, M. L., 2001. Determination of the noble gas isotopic composition in rocks and minerals by mass spectrometry. *Rock and Mineral Analysis*, 20(3): 174—178 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., 2001. The geological evolution of the Himalayan-Tibetan orogen—the growth of Asian continent during the Phanerozoic. *Acta Geoscientia Sinica*, 22(3): 193—230 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Kapp, P. A., Murphy, M. A., et al., 1999. Evidence for significant Late Cenozoic E-W extension in North Tibet. *Geology*, 27: 787—790.
- Yu, J. J., 2001. Mineralization of antimony metallogenetic zone in northern Tibet and a simple comparison of antimony metallogenetic zones in northern Tibet and southern Tibet (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zartman, R. E., Doe, B. R., 1981. Plumbotectonics—the model. *Tectonophysics*, 75 (1—2): 135—162. doi: 10.1016/0040-1951(81)90213-4
- Zhang, J. J., Guo, L., 2007. Structure and geochronology of the southern Xainza-Dinggye rift and its relationship to the South Tibetan detachment system. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(5—6): 722—736. doi: 10.1016/j.jseaes.2006.05.003
- Zhao, W. J., Nelson, K. D., Project INDEPTH Team, 1996. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath southern Tibet. *Nature*, 366: 557—559.
- 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 Pekinensis*, (1): 99—106 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Duo, J., Ma, G. T., et al., 2007. Mineralization characteristics, discovery and age restriction of Chalapu Hardrock gold deposit, southern Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32 (2): 185—193 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, Y. Y., Zhao, Y. X., Wang, P., et al., 2004. The research of metallogenetic regularity and the great progress of ore finding in metallogenetic belt in southern Tibet, China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32 (2): 185—193 (in Chinese with English abstract).

- Geosciences*, 29(1), 44, 68 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B·Q., 1998. Theory and application of isotopic system in the earth science. Science Press, Beijing, 224—226 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈衍景, 陈华勇, 刘玉琳, 等, 1999. 碰撞造山过程内生矿床成矿作用的研究历史和进展. 科学通报, 44 (16): 1681—1689.
- 陈衍景, 郭光军, 李欣, 1998. 华北克拉通花岗绿岩地体中中生代金矿床的成矿地球动力学背景. 中国科学(D 辑), 28(1): 35—40.
- 付伟, 周永章, 杨志军, 等, 2005. 藏南多层位金锑含矿建造特征及其控矿因素制约. 大地构造与成矿学, 29 (3): 321—327.
- 侯增谦, 李振清, 2004. 印度大陆俯冲前缘的可能位置: 来自藏南和藏东活动热泉气体 He 同位素约束. 地质学报, 78(4): 482—493.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等, 2006. 青藏高原碰撞造山带: III. 后碰撞伸展成矿作用. 矿床地质, 25(6): 629—651.
- 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(博士论文). 成都: 成都理工学院.
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 等, 2005. 藏南上地壳低速高导层的性质与分布: 来自热水流体活动的证据. 地质学报, 79 (1): 68—77.
- 孟祥金, 杨竹森, 戚学祥, 等, 2008. 藏南扎西康锑多金属矿硅—氧—氢同位素组成及其对成矿构造控制的响应.

- 岩石学报, 24(7): 1649—1655.
- 戚学祥, 李天福, 孟祥金, 等, 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. 岩石学报, 24(7): 1638—1648.
- 沈显杰, 张文仁, 杨淑贞, 等, 1990. 青藏热流与地体构造热演化. 北京: 地质出版社, 1—90.
- 王旭东, 倪培, 蒋少涌, 等, 2009. 江西溧阳钨矿成矿流体来源的 He 和 Ar 同位素证据. 科学通报, 54 (21): 3338—3344.
- 杨竹森, 侯增谦, 高伟, 等, 2006. 藏南拆离系锑金成矿特征与成因模式. 地质学报, 80(9): 1377—1391.
- 叶先仁, 吴茂炳, 孙明良, 2001. 岩矿样品中稀有气体同位素组成的质谱分析. 岩矿测试, 20(3): 174—178.
- 尹安, 2001. 喜马拉雅—青藏高原造山带地质演化——显生宙亚洲大陆生长. 地球学报, 22(3): 193—230.
- 余金杰, 2001. 藏北锑矿带矿床地质特征及与藏南锑矿带粗略对比(博士论文). 北京: 中国地质科学院.
- 郑淑蕙, 张知非, 倪葆龄, 等, 1982. 西藏地热水的氢氧稳定同位素研究. 北京大学学报, (1): 99—106.
- 郑有业, 多吉, 马国桃, 等, 2007. 藏南查拉普岩金矿床特征、发现及时代约束. 地球科学——中国地质大学学报, 32 (2): 185—193.
- 郑有业, 赵永鑫, 王萍, 等, 2004. 藏南金锑成矿带成矿规律研究及找矿取得重大进展. 地球科学——中国地质大学学报, 29(1): 44, 68.
- 朱炳泉, 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用. 北京: 科学出版社, 224—226.