

doi: 10.12029/gc20190313

柯贤忠, 王晶, 钟石玉, 高旭. 2019. 西藏则学地区热液脉型铅锌矿 S、Pb 同位素组成及其对成矿物质来源的启示[J]. 中国地质, 46(3): 629–641.  
Ke Xianzhong, Wang Jing, Zhong Shiyu, Gao Xu. 2019. Sulfur and lead isotope composition of hydrothermal vein type lead–zinc deposits in Zexue area of Tibet and its implications for the origin of ore–forming materials[J]. Geology in China, 46(3): 629–641(in Chinese with English abstract).

## 西藏则学地区热液脉型铅锌矿 S、Pb 同位素组成及其对成矿物质来源的启示

柯贤忠<sup>1,2</sup>, 王晶<sup>1</sup>, 钟石玉<sup>3</sup>, 高旭<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 湖北 武汉 430205; 2. 中国地质调查局花岗岩成岩成矿地质研究中心, 湖北 武汉 430205; 3. 湖北省地质调查院, 湖北 武汉 430034; 4. 中陕核工业集团地质调查院有限公司, 陕西 西安 710199)

**摘要:** 德新和轧轧龙铅锌矿是冈底斯西段银铅锌多金属成矿带典型的热液脉型铅锌矿床, 关于其成矿物质来源及与纳如松多铅锌矿成因联系的研究鲜有开展。本研究利用单矿物和全岩稳定同位素方法对德新和轧轧龙铅锌矿的主要金属硫化物和含矿花岗斑岩进行了 S、Pb 同位素组成分析和示踪, 结果显示德新铅锌矿硫化物  $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$  为 3.5‰~7.4‰, 平均值为 6.1‰; 含矿花岗斑岩  $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$  为 4.4‰~6.2‰, 平均值为 5.7‰; 轧轧龙铅锌矿金属硫化物  $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$  为 2.7‰~8.3‰, 平均值为 5.1‰; 德新和轧轧龙铅锌矿铅同位素比值比较稳定, 变化范围基本一致; 铅同位素  $\mu$  值为 9.48~9.82, 平均值为 9.64;  $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$  变化范围基本一致, 均值相差较小, 表明则学地区热液脉型铅锌矿金属硫化物和斑岩具有一致的 S、Pb 同位素组成, 铅同位素具正常铅特征; 暗示硫源可能主要由花岗岩类提供, 铅源则可能主要来自上地壳物质。综合前人研究认为, 德新、轧轧龙热液脉型铅锌矿和纳如松多铅锌矿具有一致的硫、铅同位素组成, 三者应存在成因上的联系, 可能属于同一成矿系统产物; 花岗斑岩为则学地区热液脉状铅锌矿化提供了成矿物质。

**关键词:** 硫同位素; 铅同位素; 铅锌矿; 则学地区; 西藏

中图分类号: P611 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019)03-0629-13

### Sulfur and lead isotope composition of hydrothermal vein type lead–zinc deposits in Zexue area, Tibet and its implications for the origin of ore–forming materials

KE Xianzhong<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, ZHONG Shiyu<sup>3</sup>, GAO Xu<sup>4</sup>

(1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Research Center of Granitic Diagenesis and Mineralization, China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 3. Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China; 4. Geological Survey Co., Ltd., of Shaanxi Nuclear Industry Group, Xi'an 710799, Shaanxi, China)

**Abstract:** The Dexin and Zhazhalong Pb–Zn deposits are the representative hydrothermal vein type lead–zinc deposits in the

收稿日期: 2017-09-15; 改回日期: 2018-01-12

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查项目(DD20160031)资助。

作者简介: 柯贤忠, 男, 1984 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事区域地质矿产调查及研究; E-mail: xzke208@163.com。

western part of the Gangdise Ag–Pb–Zn polymetallic metallogenic belt; nevertheless, the origin of ore-forming materials of the two deposits and their genetic relation with the Narusongduo Pb–Zn deposit remain unknown. A stable isotopic method for single mineral and whole rock was used to measure the S and Pb isotopic composition of the sulfide and ore-bearing granite porphyries from the two deposits and to trace their sources of ore-forming materials. It is shown that the  $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$  values of sulfide and ore-bearing granite porphyry from Dexin and sulfide from Zhazhalong range from 3.5‰ to 7.4‰, from 4.4‰ to 6.2‰, and from 2.7‰ to 8.3‰, with an average being 6.1‰, 5.7‰ and 5.1‰, respectively; the ratios of different lead isotopes in Dexin and Zhazhalong are stable, varying in similar ranges, and the  $\mu$  values of lead isotope in the two deposits vary from 9.48 to 9.82 (9.64 on average) with similar  $\Delta\beta$ ,  $\Delta\gamma$  variation ranges and average values, which suggests that the S and Pb isotopic compositions of the sulfide are consistent with those of the ore-bearing granite porphyries in the two deposits with normal lead characteristics, granitoid origin of sulfur isotope and upper crust origin of lead isotope predominately. With comprehensive analysis of geological background and previous researches, it is concluded that the Pb–Zn mineralization in Dexin, Zhazhalong and Narusongduo Pb–Zn deposits may be products of the same metallogenic system with consistent sulfur and lead isotopic characteristics, and the granite porphyries might have supplied ore-forming materials for the hydrothermal vein type lead–zinc deposits in Zexue area.

**Key words:** sulfur isotope; lead isotope; lead–zinc deposit; Zexue area; Tibet

**About the first author:** KE Xianzhong, born in 1984, doctor, assistant researcher, mainly engages in the study of regional geological and mineral resources survey; E-mail: xzhke208@163.com.

**Fund support:** Supported by China Geological Survey Project (No. DD20160031).

## 1 引 言

西藏冈底斯带是青藏高原碰撞造山带内具较大成矿潜力的大型构造–岩浆成矿带,也是中国重要的斑岩铜矿带,目前在冈底斯带南缘已有甲马、驱龙、冲江、宫厅、朱诺等大型矿床及一系列中、小型矿床和矿化点(孟祥金, 2004)。近年,在冈底斯成矿带的北缘发现了许多以银铅锌为主的多金属矿床(化)点,它们构成了一条与南缘的斑岩铜矿带平行分布的银铅锌多金属成矿带。该成矿带在空间上严格受近东西向展布的措勤–旁多逆冲断裂带控制,以北东向展布的念青唐古拉为界,矿化分为东、西两段,东段矿床类型主要为矽卡岩型,如洛巴堆、龙马拉、帮浦、新嘎果、洞中松多等;西段矿床类型主要为热液型,如则学、德新、纳如松多、斯弄多、拉宗、夏龙等。总体上,东段的研究程度较高,西段的研究程度较低。

则学地区位于冈底斯银铅锌多金属成矿带西段中东部谢通门县与南木林县交界位置,主体位于谢通门县境内,该地区金属矿产以铅锌多金属为主,代表性矿床为纳如松多铅锌多金属矿。该矿床包括东西两矿段,东矿段为隐爆角砾岩型,西矿段为矽卡岩型(纪现华等, 2012; 2014)。目前,该地区铅锌矿的研究工作主要集中于纳如松多铅锌矿含

矿围岩的成岩时代、成矿时代及成因等。杨勇等(2010b)将纳如松多铅锌矿含矿斑岩与冈底斯南缘斑岩型铜矿带含矿斑岩进行系统对比,发现二者不仅成岩年龄相差较大,地球化学和岩石源区特征也存在显著差异。杨勇等(2010a)研究了纳如松多铅锌矿金属硫化物和含矿斑岩S、Pb同位素组成特征,认为二者具有一致的Pb同位素组成,粗晶斑岩和铅锌矿中的S是同一演化体系的产物,据此推测矿区斑岩是成矿物质的主要提供者。纪现华等(2012)获得纳如松多矿区与矽卡岩型矿化有关的粗晶和细晶花岗斑岩的形成年龄((62.5±0.8) Ma和(62.5±0.9) Ma),认为纳如松多铅锌矿形成于印度–亚洲大陆主碰撞阶段。纪现华等(2014)利用绢云母Ar–Ar定年手段获得纳如松多矿区隐爆角砾岩型铅锌矿成矿年龄(坪年龄(57.8±0.7) Ma)。刘英超等(2015)通过研究认为纳如松多铅锌矿存在隐爆角砾岩型、矽卡岩型、矿层型和脉型4种矿化,据此建立了一个独立的铅锌成矿系统并推测深部存在斑岩型铅锌矿化的可能。

在纳如松多铅锌矿周边,产出许多热液脉型铅锌矿床(点),为冈底斯银铅锌多金属成矿带西段比较重要的矿床类型,关于该类型矿床的研究工作较少。柯贤忠等(2017)利用锆石U–Pb定年手段在纳如松多东部的德新矿区获得含铅锌矿花岗斑岩年

龄(57.7±0.5 Ma),综合分析认为德新矿区含铅锌矿花岗岩斑岩与纳如松多纳含矿斑岩属同一岩浆成矿系统产物。本研究选择则学地区德新、轧轧龙两个热液型铅锌矿床开展S、Pb同位素研究工作,不仅可以查明则学地区热液脉型铅锌矿成矿物质来源及其与纳如松多铅锌矿的成因联系,提高此类矿床的研究程度,也为冈底斯银铅锌成矿带内同类型矿床的勘查提供依据。

## 2 地质背景

冈底斯银铅锌多金属成矿带大地构造处于拉

萨地块中部隆格尔—工布江达断隆带中段(图1a),冈底斯火山—岩浆弧北侧,平行于南部的冈底斯斑岩铜矿带展布(臧文栓等,2007)。该带发育石炭—二叠纪冈瓦纳北缘海相碎屑岩—碳酸盐岩沉积,东部夹巨厚的火山岩组合,局部发育三叠纪碎屑岩夹火山岩,代表了晚古生代末至三叠纪的弧间裂谷盆地沉积。侏罗—白垩系受班公湖—怒江和雅鲁藏布江新特提斯洋壳向南和向北俯冲的影响,发育火山岩、碎屑岩夹碳酸盐岩沉积和大规模中酸性侵入岩。新生代伴随印度—亚洲大陆强烈的碰撞造山,主碰撞期(65~41 Ma)大规模发育林子宗群火山岩

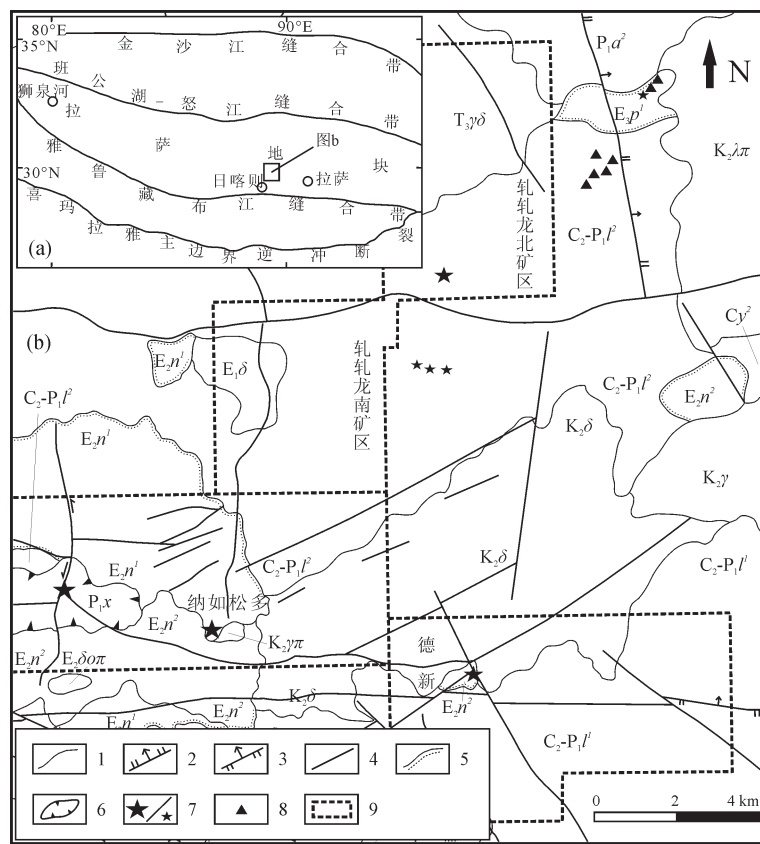


图1 西藏则学地区地质简图(据龙涛,2013)

$E_2p^1$ —帕那组下段;  $E_2n^2$ —年波组上段;  $E_2n^1$ —年波组下段;  $P_1x$ —下拉组;  $P_1a^2$ —昂杰组上段;  $C_2-P_1l^1$ —拉嘎组上段;  $C_2-P_1l^2$ —拉嘎组下段;  $C_2^2$ —永珠组上段;  $E_2\delta\sigma\pi$ —始新世石英闪长斑岩;  $K_2\lambda\pi$ —晚白垩世石英斑岩;  $K_2\gamma\pi$ —晚白垩世花岗岩;  $K_2\gamma$ —晚白垩世花岗岩;  $K_2\delta$ —晚白垩世闪长岩;  $T_3\gamma\delta$ —晚三叠世花岗闪长岩; 1—地质界线; 2—正断层; 3—逆断层; 4—性质不明断层; 5—角度不整合界线; 6—飞来峰; 7—铅锌多金属矿床/矿(化)点; 8—铜矿(化)点; 9—矿区范围

Fig. 1 Simplified geological map of Zexue area (after Long, 2013)

$E_2p^1$ —The lower section of Pana Formation;  $E_2n^2$ —The upper section of Nianbo Formation;  $E_2n^1$ —The lower section of Nianbo Formation;  $P_1x$ —Xiala Formation;  $P_1a^2$ —The upper section of Angjie Formation;  $C_2-P_1l^1$ —The upper section of Laga Formation;  $C_2-P_1l^2$ —The lower section of Laga Formation;  $C_2^2$ —The upper section of Yongzhu Formation;  $E_2\delta\sigma\pi$ —Eocene quartz diorite porphyry;  $K_2\lambda\pi$ —Late Cretaceous quartz porphyry;  $K_2\gamma\pi$ —Late Cretaceous granite;  $K_2\delta$ —Late Cretaceous diorite;  $T_3\gamma\delta$ —Late Triassic granodiorite; 1—Geological Boundary; 2—Normal fault; 3—Reversed fault; 4—Unidentified fault; 5—Angle unconformity; 6—Klippe; 7—Lead-zinc polymetallic deposit / ore spot; 8—Copper deposit / ore spot; 9—Mining area

和中酸性侵入岩,晚碰撞期(40~26 Ma)发育措勤—旁多大规模逆冲推覆构造系,后碰撞期(25~0 Ma)发育乌郁群碎屑岩和钾质火山岩。区内构造线总体呈近东西向,以线性复式褶皱、压扭性逆冲推覆构造为主;北东向及近南北向构造形成较晚,以张性构造为主(臧文栓等, 2007)。

则学地区出露地层较多,从老到新为石炭统永珠组( $C_2$ ),上石炭—下二叠统拉嘎组( $C_2-P_1$ ),下二叠统昂杰组( $P_1a$ ),下二叠统下拉组( $P_1x$ ),古新统典中组( $E_1d$ ),始新统年波组( $E_2n$ ),渐新统帕那组( $E_3p$ )(图1b)。永珠组( $C_2$ )为一套浅海相的以细粒碎屑岩为主的粒序韵律性地层,划分为上下两段。拉嘎组( $C_2-P_1$ )为一套由滨岸三角洲、滨滩、潟湖到滨外台地、台地斜坡相的各种粒级碎屑岩为主体的互层系和韵律层系地层,划分为上下两段。昂杰组( $P_1a$ )为一套厚度不甚稳定的以碎屑岩为主夹有碳酸盐岩的混合陆架相沉积地层,划分为上下两段。下拉组( $P_1x$ )为一套含丰富、多门类化石的碳酸盐岩地层。典中组( $E_1d$ )以灰色、灰绿色、紫灰色中基性—中性熔岩夹少量火山碎屑岩为主。年波组( $E_2n$ )地层主要岩性为中酸性火山熔岩、火山碎屑岩组合,划分为上下两段。帕那组( $E_3p$ )主要为一套火山熔岩、火山碎屑岩夹碎屑岩,划分为上下两段。

区内侵入岩广泛侵入古生代地层,主要为印支晚期、燕山晚期及喜山早期的中酸性侵入岩(图1b),多呈岩株或岩枝状产出。岩性主要为晚三叠世闪长岩( $T_3\delta$ )、花岗闪长岩( $T_3\gamma\delta$ )、中细粒花岗闪长岩( $T_3\gamma\delta'$ )、粗粒花岗闪长岩( $T_3\gamma\delta''$ )、二长花岗岩( $T_3\eta\gamma$ )和二云母花岗岩( $T_3\gamma$ );晚白垩世闪长岩( $K_2\delta$ )、花岗岩( $K_2\gamma$ )、花岗斑岩( $K_2\gamma\pi$ )、石英斑岩( $K_2\lambda\pi$ );始新世闪长岩( $E_1\delta$ )、始新世石英闪长斑岩( $E_2\delta\sigma\pi$ )。火山岩属林子宗群火山岩,形成于喜山期,时代为古新世、始新世、渐新世。区内火山活动具有多期多旋回的特征,岩石属钙碱性弧火山岩系列。

德新和轧轧龙铅锌矿床的规模较小,以热液脉型为主。德新矿区主要出露上石炭统—下二叠统拉嘎组( $C_2-P_1$ )、始新统年波组( $E_2n$ )、燕山晚期闪长岩及脉岩。铅锌矿化存在两种赋存形式,主要赋存于花岗斑岩中,其次赋存于上石炭统—下二叠统拉嘎组碎屑岩、燕山晚期侵入岩EW向断裂构造的NW次级构造部位,矿体大致呈北西—北北西走向(图2a)。轧轧龙矿区主要出露上石炭统—下二叠统拉嘎组( $C_2-P_1$ )、始新世闪长岩、凝灰岩及少量脉岩。区内有4条规模较大、品位较好的铅锌矿带,以娘热藏布为界,1条在矿区南部,3条在矿区北部(高旭, 2013)。矿体主要赋存于晚古生代地层及始

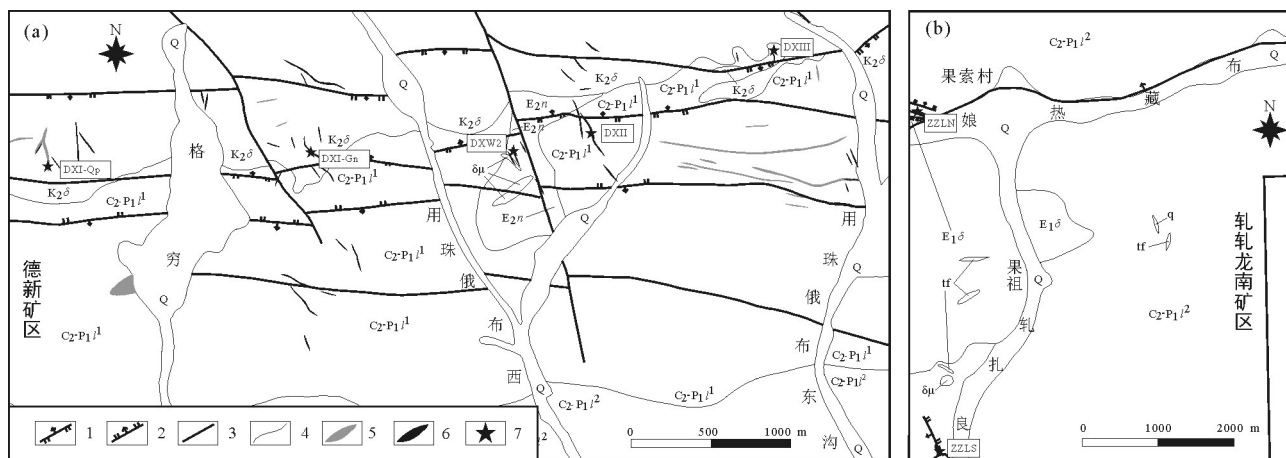


图2 德新和轧轧龙南矿区地质图(图2a据柯贤忠等, 2017; 图2b据刘海和王成松, 2011<sup>①</sup>)

Q—第四系;  $E_2n$ —年波组火山岩;  $C_2-P_1^2$ —拉嘎组上段;  $C_2-P_1^1$ —拉嘎组下段;  $K_2\delta$ —晚白垩世闪长岩;  $E_1\delta$ —始新世闪长岩;  $\delta\mu$ —闪长玢岩; tf—凝灰岩; q—石英脉; 1—正断层; 2—逆断层; 3—性质不明断层; 4—地质界线; 5—含矿花岗斑岩; 6—银铅锌多金属矿体; 7—采样位置

Fig. 2 Geological maps of Dexin and south Zhazhalong mining area (Fig. 2a after Ke Xianzhong et al., 2017; Fig. 2b after Liu Hai and Wang Chengsong, 2011<sup>①</sup>)

Q—Quaternary;  $E_2n$ —The Nianbo Formation;  $C_2-P_1^2$ —The upper section of Laga Formation;  $C_2-P_1^1$ —The lower section of Laga Formation;  $K_2\delta$ —Late Cretaceous diorite;  $E_1\delta$ —Eocene diorite;  $\delta\mu$ —Diorite porphyry; tf—Tuff; q—Quartz; 1—Normal fault; 2—Reversed fault; 3—Unidentified fault; 4—Geological boundary; 5—Ore-bearing granite porphyry; 6—Silver-lead-zinc polymetallic orebody; 7—Sampling site

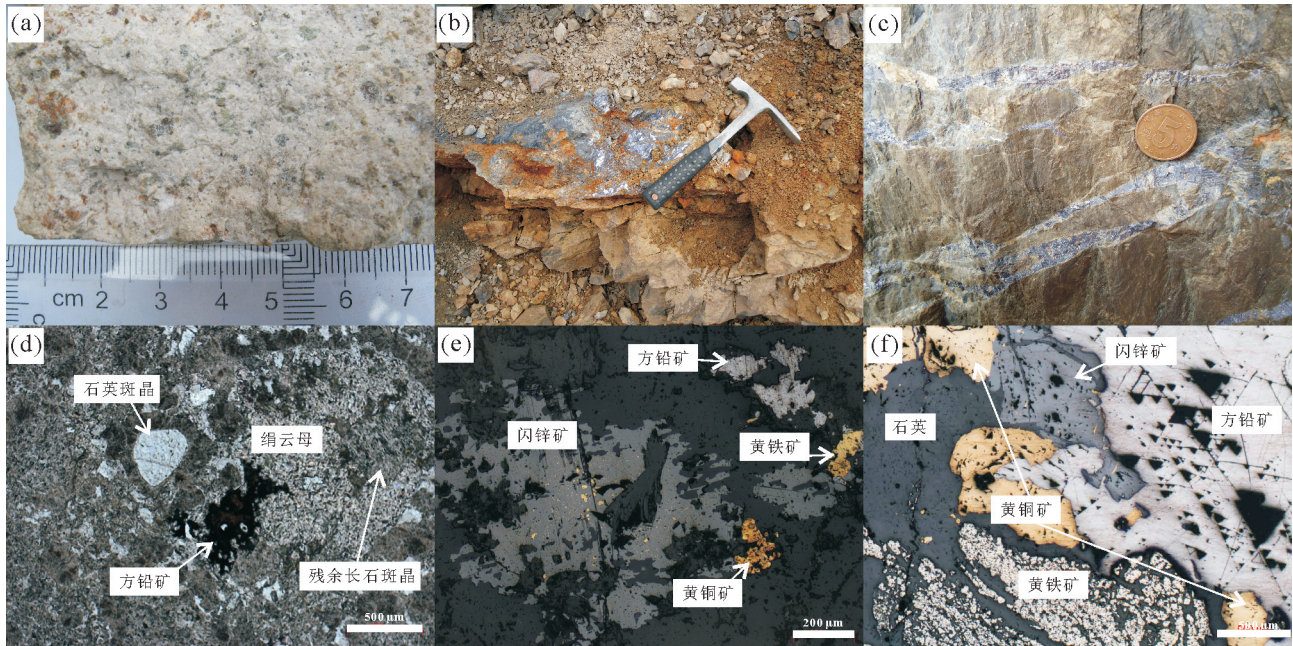


图3 德新和轧轧龙矿区岩矿石宏观和微观照片

a—德新矿区含矿花岗斑岩;b—德新矿区脉状矿石;c—轧轧龙矿区细脉状矿石;d—含矿花岗斑岩显微照片(正交偏光);  
e—德新矿区矿石显微照片(反射光);f—轧轧龙矿区矿石显微照片(反射光)

Fig.3 Macrophotographs and microphotographs of rocks and ores in Dexin and Zhazhalong

(d is macrophotographs of ore-bearing granite porphyry in Dexin; b—Macrophotographs of vein lead-zinc ores in Dexin;  
c—Macrophotographs of fine vein lead-zinc ores in Zhazhalong; d—Microphotographs of ore-bearing granite porphyry in Dexin (crossed nicols);  
e—Microphotographs of vein lead-zinc ores in Dexin (reflection); f—Microphotographs of fine vein lead-zinc ores in Zhazhalong (reflection)

新世侵入岩断裂或破碎带中,矿体大致呈北西—北北西走向(图2b)。此外,在轧轧龙矿区及外围,也存在铜矿化和铁铅矿化,规模很小(高旭, 2013)。花岗斑岩中的铅锌矿多呈星点状或稀疏浸染状(图3a, d),赋存于构造中的铅锌矿多呈块状—脉状—细脉状(图3b, c)。矿石矿物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿和毒砂等(图3d, e, f)。

### 3 样品采集及分析测试

本文用于S、Pb同位素分析测试的样品均采自德新和轧轧龙铅锌矿床不同矿体(图2, DXI-Qp、DXI-Gn、DXW2、DXII及DXIII等均为采样点号)的露天坑道或探槽或平洞中的原生矿石或含方铅矿、闪锌矿、黄铁矿花岗斑岩。德新矿区分别采集S同位素和Pb同位素样品14件,包含9件硫化物样品和5件含矿花岗斑岩样品;轧轧龙矿区分别采集S同位素和Pb同位素样品19件和15件,均为硫化物样品。分析方法及步骤如下:选取具代表性样品,经手工进行逐级破碎、过筛,在双目镜下挑选40~60目、纯度>99%的单矿物样品5g以上。将挑纯后的

单矿物样品在玛瑙钵里研磨至200目以下,送实验室分析。S、Pb同位素样品分析测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中,硫同位素样品是将硫化物单矿物与氧化亚铜按一定比例研磨、混合均匀后,进行氧化反应,生成SO<sub>2</sub>并用冷冻法收集,然后用MAT251气体同位素质谱仪分析硫同位素组成,测量结果以V-CDT为标准,分析精度优于±0.2‰;铅同位素样品先用混合酸分解,然后用树脂交换法分离出铅,蒸干后用热表面电离质谱法进行铅同位素测量,仪器型号为ISOPROBE-T,测量精度为对1μg <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb低于0.05%, <sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb一般不大于0.005‰。

## 4 测试结果

### 4.1 S同位素

则学地区铅锌矿金属矿物与斑岩硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 组成见表1。德新矿区方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为3.5‰~5.6‰,均值为4.90‰(n=4);闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为7.0‰~7.1‰,均值为7.05‰(n=2);黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为6.8‰~7.4‰,均值为7.10‰(n=3)。硫化物硫同位

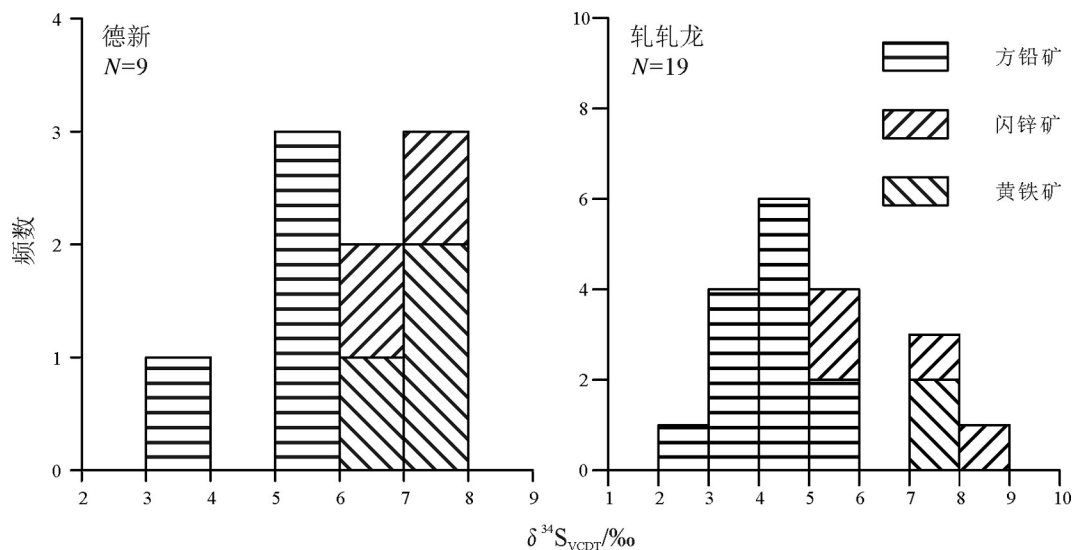


图4 西藏则学地区铅锌矿硫同位素组成频数直方图

Fig.4 Histograms of sulfur isotopic compositions of the lead-zinc deposits in Zexue area, Tibet

素组成为比较均一的正值,变化较小,总体平均值为6.1‰,由于参与统计样品数量较少,“塔式效应”不明显(图4),仍显示出硫同位素具有较均一的来源。5件含矿花岗斑岩全岩样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 变化范围为4.4‰~6.2‰,均值为5.7‰,与硫化物硫同位素总体均值(6.1‰)相差不大,德新矿区含矿花岗斑岩中的矿石矿物主要为黄铁矿、方铅矿和闪锌矿(柯贤忠等, 2017),含矿花岗斑岩全岩硫同位素组成可代表矿区硫化物平均硫同位素组成。

轧轧龙矿区方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为2.7‰~5.8‰,均值为4.1‰( $n=13$ );闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为5.7‰~8.3‰,均值为6.9‰( $n=4$ );黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为7.3‰~8.0‰,均值为7.7‰( $n=2$ )。19件金属硫化物样品硫化物硫同位素组成总体平均值为5.1‰,为比较均一的正值,变化较小,“塔式效应”明显(图4),表明硫同位素具有较均一的来源。

酒井和巴金斯基(格里年科, 1980;郑永飞等, 2000)认为热力学平衡条件下,热液矿床中硫化物的同位素组成存在如下关系: $\text{PbS}$ (方铅矿) $<$  $\text{CuFeS}_2$ (黄铜矿) $<$  $\text{ZnS}$ (闪锌矿) $<$  $\text{FeS}_{1-x}$ (磁黄铁矿) $<$  $\text{FeS}_2$ (黄铁矿) $<$  $\text{MoS}_2$ (辉钼矿)。德新和轧轧龙矿区硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 平均值基本呈黄铁矿—闪锌矿—方铅矿的顺序递减变化( $\delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}} < \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} < \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}}$ ),表明德新和轧轧龙铅锌矿中硫化物结晶时,结晶的硫化物与热液中的硫同位素已基本达到分馏平衡。

#### 4.2 Pb同位素

则学地区铅锌矿金属矿物与斑岩硫化物铅同位素组成见表2。德新铅锌矿硫化物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为18.543~18.653(平均值18.597), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为15.618~15.763(平均值15.686), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为38.846~39.351(平均值39.061);含矿花岗斑岩 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为18.485~18.657(平均值18.595), $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为15.681~15.708(平均值15.694), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为39.079~39.175(平均值39.125)。轧轧龙铅锌矿硫化物 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为18.519~18.692,平均值为18.622, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为15.625~15.798,平均值为15.714; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 变化范围为38.884~39.439,平均值为39.169。

德新铅锌矿硫化物、含矿花岗斑岩和轧轧龙铅锌矿硫化物铅同位素组成显示,所有样品同位素比值比较稳定,变化均很小。利用H-H单阶段铅演化模式(宜昌地质矿产研究所, 1979; Hoefs, 1997; Faure and Mensing, 2005),计算得到则学地区铅锌矿床矿石硫化物铅同位素的参数见表2。其中, $\mu$ 值的变化范围9.48~9.82,平均值为9.64高于正常铅范围(8.686~9.238)(地质部宜昌地质矿产研究所同位素地质研究室, 1979); $\omega$ 值的变化范围37.54~40.94,平均值为39.19。 $\mu$ 值比较稳定,变化 $<1\%$ ; $\omega$ 值介于35~41(宜昌地质矿产研究所, 1979);上述特

表1 西藏则学地区铅锌矿含矿花岗岩和硫化物硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic compositions of ore-bearing granite and sulfides from the lead-zinc deposits in Zexue area, Tibet

矿区	样品编号	样品类型	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}/\text{‰}$	矿区	样品编号	样品类型	$\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}/\text{‰}$	
德 新	DXW2-02	方铅矿	5.2	轧	ZZLS-Sph04	闪锌矿	7.7	
	DXW2-03	方铅矿	3.5	轧	ZZLS-Py01	黄铁矿	8.0	
	DXI-Gn01	方铅矿	5.5	龙	ZZLS-Py02	黄铁矿	7.3	
	DXIII-Gn03	方铅矿	5.6		ND13-1	方铅矿	3.0	
	DXII-Sph01	闪锌矿	7.0		ND13-2	方铅矿	3.4	
	DXII-Sph02	闪锌矿	7.1		ND13-3	方铅矿	3.2	
	DXIII-Py01	黄铁矿	6.8		ND13-4	方铅矿	3.6	
	DXIII-Py02	黄铁矿	7.1		ND13-7	方铅矿	4.7	
	DXIII-Py07	黄铁矿	7.4		ND13-8	方铅矿	3.1	
	DXI-Qp03	花岗斑岩	5.8		ND13-11	方铅矿	2.8	
	DXI-Qp04	花岗斑岩	5.8		ND13-12	方铅矿	3.9	
	DXI-Qp07	花岗斑岩	6.1		ND13-13	方铅矿	2.5	
	DXI-Qp08	花岗斑岩	6.2		NDC-2	方铅矿	4.2	
	DXI-Qp09	花岗斑岩	4.4		NDC-3	方铅矿	3.4	
	轧 龙	ZZLN-01-B2	方铅矿	4.1	纳 如 松 多	NDC-4	方铅矿	2.9
		ZZLN-01-B3	方铅矿	3.6		NDC-5	方铅矿	3.2
ZZLN-01-B4		方铅矿	3.2	NDC-6		方铅矿	3.0	
ZZLN-01-B6		方铅矿	3.4	NDC-7		方铅矿	4.4	
ZZLN-01-B7		方铅矿	4.3	ND13-1		闪锌矿	4.6	
ZZLN-01-B8		方铅矿	4.2	ND13-2		闪锌矿	4.9	
ZZLN-01-B9		方铅矿	3.4	ND13-4		闪锌矿	5.5	
ZZLN-01-B12		方铅矿	2.7	ND13-8		闪锌矿	5.1	
ZZLN-01-B15		方铅矿	4.2	ND13-12		闪锌矿	4.9	
ZZLN-01-B16		方铅矿	4.4	ND13-13		闪锌矿	4.5	
ZZLN-02-B5		方铅矿	4.8	E-2		细斑斑岩	14.8	
ZZLN-02-B11		方铅矿	5.4	E-3		细斑斑岩	15.5	
ZZLS-Sph01		方铅矿	5.8	E-6		细斑斑岩	18.7	
ZZLN-Qz02		闪锌矿	5.7	E-12		粗斑斑岩	7.4	
ZZLN-Sph01		闪锌矿	6.0	E-14		粗斑斑岩	7.0	
ZZLS-Sph03		闪锌矿	8.3	E-16		粗斑斑岩	7.4	

注:纳如松多硫同位素原始数据引自杨勇等(2010a)。

征显示则学地区铅锌矿具有正常铅同位素的特征。

## 5 讨论

### 5.1 S同位素来源

硫是铅锌矿床中最重要的成矿元素之一,矿石中硫同位素组成能提供矿石硫来源及成因(杨斌等,2018)、硫同位素分异程度以及成矿系统封闭性等诸多信息(Basuki et al., 2008)。则学地区铅锌矿床中的硫化物主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿等,矿物组合简单且基本未见硫酸盐矿物,反映成矿热液中不同价态的硫元素间及不同成矿阶

段的硫同位素分馏作用都比较弱。此外,德新和轧龙铅锌矿中硫同位素组成指示硫化物结晶时,结晶的硫化物与热液中的硫同位素已基本达到分馏平衡。故矿床中几种简单硫化物的硫同位素组成基本代表了成矿流体的硫同位素组成(Ohmoto, 1972; Ohmoto and Rye, 1979)。

德新铅锌矿硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为3.5‰~7.4‰,平均值为6.1‰;含矿花岗斑岩全岩样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为4.4‰~6.2‰,平均值为5.7‰;轧龙铅锌矿金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为2.7‰~8.3‰,平均值为5.1‰。则学地区铅锌矿硫化物及含矿花岗斑岩 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值落在花岗

表2 西藏则学地区铅锌矿含矿花岗岩斑岩和硫化物铅同位素组成与参数

Table 2 Lead isotopic compositions and parameters of ore-bearing granite and sulfides from the lead-zinc deposits in Zexue area, Tibet

矿区	样品编号	样品类型	同位素比值			$\mu$	$\omega$	$\Delta\beta$	$\Delta\gamma$
			$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$				
德新	DXW2-02	方铅矿	18.653±0.001	15.763±0.002	39.351±0.005	9.76	40.45	28.79	58.73
	DXW2-03	方铅矿	18.556±0.002	15.618±0.001	38.846±0.005	9.48	37.54	18.86	40.31
	DXI-Gn01	方铅矿	18.61±0.002	15.67±0.002	39.028±0.004	9.58	38.47	22.36	46.34
	DXIII-Gn03	方铅矿	18.631±0.002	15.706±0.001	39.127±0.004	9.65	39.11	24.84	50.30
	DXII-Sph01	闪锌矿	18.543±0.004	15.647±0.003	38.932±0.008	9.54	38.24	20.94	44.63
	DXII-Sph02	闪锌矿	18.547±0.002	15.653±0.002	38.954±0.004	9.55	38.36	21.36	45.43
	DXIII-Py01	黄铁矿	18.628±0.002	15.708±0.002	39.124±0.005	9.65	39.13	24.99	50.43
	DXIII-Py02	黄铁矿	18.565±0.002	15.682±0.002	39.028±0.005	9.61	38.84	23.35	48.43
	DXIII-Py07	黄铁矿	18.641±0.002	15.724±0.002	39.163±0.006	9.68	39.37	26.08	51.93
	DXI-Qp03	花岗岩	18.572±0.002	15.681±0.002	39.079±0.004	9.61	39.00	23.25	49.52
	DXI-Qp04	花岗岩	18.636±0.002	15.708±0.002	39.175±0.004	9.65	39.29	24.96	51.54
	DXI-Qp07	花岗岩	18.485±0.002	15.698±0.002	39.103±0.005	9.65	39.77	24.74	53.87
	DXI-Qp08	花岗岩	18.625±0.002	15.687±0.001	39.113±0.004	9.61	38.90	23.52	49.07
DXI-Qp09	花岗岩	18.657±0.002	15.696±0.002	39.156±0.006	9.63	38.98	24.05	49.71	
轧拉龙	ZZLS-Sph01	方铅矿	18.614±0.001	15.701±0.001	39.125±0.002	9.64	39.14	24.54	50.52
	ZZLS-02-B11	方铅矿	18.607±0.002	15.695±0.001	39.106±0.003	9.63	39.05	24.13	49.90
	ZZLN-01-B3	方铅矿	18.581±0.003	15.671±0.003	39.054±0.010	9.59	38.75	22.52	48.02
	ZZLN-01-B7	方铅矿	18.692±0.001	15.798±0.002	39.439±0.003	9.82	40.94	31.14	61.75
	ZZLN-01-B11	方铅矿	18.668±0.001	15.772±0.002	39.347±0.003	9.77	40.44	29.38	58.63
	ZZLN-01-B15	方铅矿	18.633±0.003	15.706±0.002	39.150±0.006	9.65	39.19	24.83	50.86
	ZZLN-01-B16	方铅矿	18.556±0.003	15.646±0.003	38.971±0.008	9.54	38.31	20.83	45.21
	ZZLN-02-B5	方铅矿	18.519±0.004	15.625±0.003	38.884±0.007	9.50	37.97	19.47	42.90
	ZZLN-02-B16	方铅矿	18.648±0.004	15.721±0.003	39.215±0.008	9.68	39.51	25.84	52.95
	ZZLN-Sph01	闪锌矿	18.629±0.003	15.722±0.003	39.190±0.006	9.68	39.53	25.97	52.93
	ZZLN-Qz02	闪锌矿	18.657±0.002	15.742±0.002	39.259±0.005	9.72	39.85	27.30	54.99
	ZZLS-Sph03	闪锌矿	18.641±0.004	15.736±0.003	39.229±0.008	9.71	39.76	26.92	54.36
	ZZLS-Sph04	闪锌矿	18.634±0.003	15.727±0.003	39.196±0.008	9.69	39.57	26.31	53.21
	ZZLS-Py01	黄铁矿	18.626±0.001	15.714±0.001	39.168±0.003	9.67	39.38	25.42	52.00
	ZZLS-Py02	黄铁矿	18.624±0.002	15.728±0.002	39.203±0.004	9.69	39.67	26.41	53.77
纳如松多	08NDZ-5	方铅矿	18.667±0.005	15.746±0.006	39.292±0.015	9.72	39.96	27.55	55.77
	08NDZ-1	方铅矿	18.571±0.003	15.655±0.002	39.021±0.009	9.56	38.52	21.42	46.57
	08ND-4	方铅矿	18.692±0.007	15.773±0.004	39.421±0.009	9.77	40.61	29.38	59.92
	08ND-5	方铅矿	18.663±0.004	15.760±0.002	39.356±0.004	9.75	40.39	28.55	58.38
	E-2	细斑斑岩	18.602±0.002	15.672±0.002	39.053±0.007	9.59	38.64	22.53	47.37
	E-3	细斑斑岩	18.612±0.002	15.671±0.002	39.070±0.007	9.58	38.64	22.43	47.45
	E-4	细斑斑岩	18.708±0.006	15.784±0.002	39.481±0.013	9.79	40.87	30.10	61.62
	E-11	粗斑斑岩	18.807±0.004	15.715±0.005	39.608±0.010	9.65	40.12	24.96	58.07
	E-12	粗斑斑岩	18.620±0.005	15.644±0.006	39.055±0.013	9.53	38.28	20.50	45.30
	E-14	粗斑斑岩	18.727±0.006	15.654±0.005	39.300±0.013	9.54	38.75	20.90	48.98
		上地壳						>18	>45
	壳幔混合						12-40	20-45	
	地幔						-5-15	-5-20	

注:纳如松多铅同位素原始数据引自杨勇等(2010b);同位素参数为应用路远发(2004)开发的Geokit软件计算得出;上地壳、壳幔混合和地幔铅同位素参数引自李运等(2014)。



岩、变质岩和沉积岩硫同位素组成范围内(图5),德新和轧轧龙铅锌矿床中矿体主要呈脉状产于不同时代地层裂隙或构造破碎带中,且沉积岩硫同位素组成变化范围极大,故排除S同位素来源于矿区及周边沉积地层的可能性;则学地区铅锌矿硫化物和含矿花岗斑岩 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 平均值相差不大,与花岗岩类 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值区间(-4‰~9‰)(魏菊英和王关玉,1988)重合,且花岗岩类硫同位素组成变化范围较小,暗示则学地区铅锌矿硫的来源可能主要由花岗岩类提供,但不排除变质岩(如变质基底)提供少量硫源的可能。

纳如松多铅锌矿硫化物、粗斑斑岩和细斑斑岩 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 分别为2.5‰~5.5‰、7.0‰~7.4‰和14.8‰~18.7‰,与德新和轧轧龙两矿区硫化物及含矿花岗斑岩类似,也落入花岗岩、变质岩和沉积岩硫同位素组成范围内(图5),结合纳如松多铅锌矿产出特征,推测硫化物和粗斑斑岩硫的来源也可能主要由花岗岩类提供,但不排除变质岩(如变质基底)提供少量硫源的可能。细斑斑岩 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值显著大于硫化物和粗斑斑岩 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值,落入变质岩、沉积岩和蒸发硫酸盐硫同位素组成范围(图4),但数值较集中,可以排除沉积岩提供硫源的可能。杨勇等(2010a)认为有两个原因可能造成纳如松多铅锌矿细斑斑岩 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值较高,分别为地壳硫的混染(如岩浆穿过膏岩层)和岩浆去气作用( $\text{H}_2\text{S}$ 相对亏损 $^{34}\text{S}$ , $\text{H}_2\text{S}$ 去气能够引起熔体富集 $^{34}\text{S}$ );纪现华等

(2012)通过LA-ICP-MS锆石U-Pb方法获得纳如松多铅锌矿粗斑和细斑斑岩年龄分别为(62.54±0.77) Ma、(62.47±0.91) Ma;二者具有相似的常量和微量元素组成(杨勇等,2010a),说明二者可能来源于相同的岩浆源区或者是同一岩浆活动不同阶段的产物;细斑斑岩较高的 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值可能由岩浆去气作用造成。

则学地区铅锌矿硫化物和含矿花岗斑岩与纳如松多铅锌矿硫化物和粗斑斑岩 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 值均落入岩浆岩硫同位素组成范围内,且均值相差不大。德新和轧轧龙铅锌矿均在纳如松多矿区10 km范围内,已有的研究显示,德新铅锌矿与纳如松多铅锌矿属同一成矿系统产物,存在成因上的联系(柯贤忠等,2017);3个矿床相似的S同位素组成特征不仅进一步证实德新与纳如松多成因上的联系,也暗示轧轧龙与纳如松多之间也可能存在成因上的联系。

## 5.2 Pb同位素来源

铅同位素组成是一种示踪成矿物质来源的有力工具,在矿床研究中,铅同位素的应用已经非常广泛。大量的研究成果表明,铅同位素不仅可以用来测定矿床成矿年龄,尤其在成矿物质来源研究方面,铅同位素组成具有非常重要的意义(Doe and Stacey, 1974; Zartman and Doe, 1981)。

矿石铅是指在各种热液环境中沉淀出来的,不含U、Th的金属矿物(矿石矿物),如方铅矿、黄铁矿等矿物中的铅(魏菊英和王关玉,1988;张理刚,1988;赵平等,2002)。矿石铅之所以可以用来示踪成矿物质来源主要有两方面的原因:一方面,矿石矿物中U、Th等放射性元素含量极低,与矿物中Pb含量相比可忽略。因此,它可以反映金属来源区初始U-Th-Pb体系及Pb同位素组成特征;另一方面,铅同位素分子质量分数大,在进入成矿热液并随之运移的过程中,即使热液物化条件发生变化,它们的同位素组成一般也不会发生变化(沈渭洲,1987;高文亮等,2006)。因此,通过矿石铅同位素组成的分析可逆推源区的U-Th-Pb体系特征,从而获得有关成矿物质来源的信息(吴开兴等,2002;陈晓峰,2010)。

通常认为铅同位素源区特征值,尤其是 $\mu$ 值的变化提供地质体经历地质作用的信息,反映铅的来源。具有高 $\mu$ 值(大于9.58)的铅或者位于零等时线右侧的放射成因铅通常被认为是来自U、Th相对

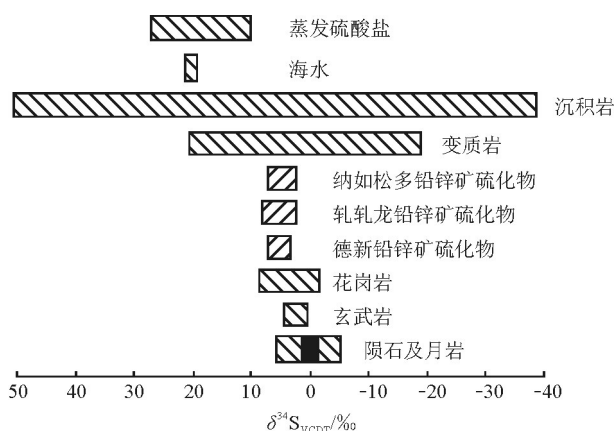


图5 则学地区铅锌矿硫化物硫同位素组成分布图  
(底图据韩吟文等,2003)

Fig.5 Sulfur isotopic composition distribution patterns of sulfides from the lead-zinc deposits in Zexue area  
(after Han et al., 2003)

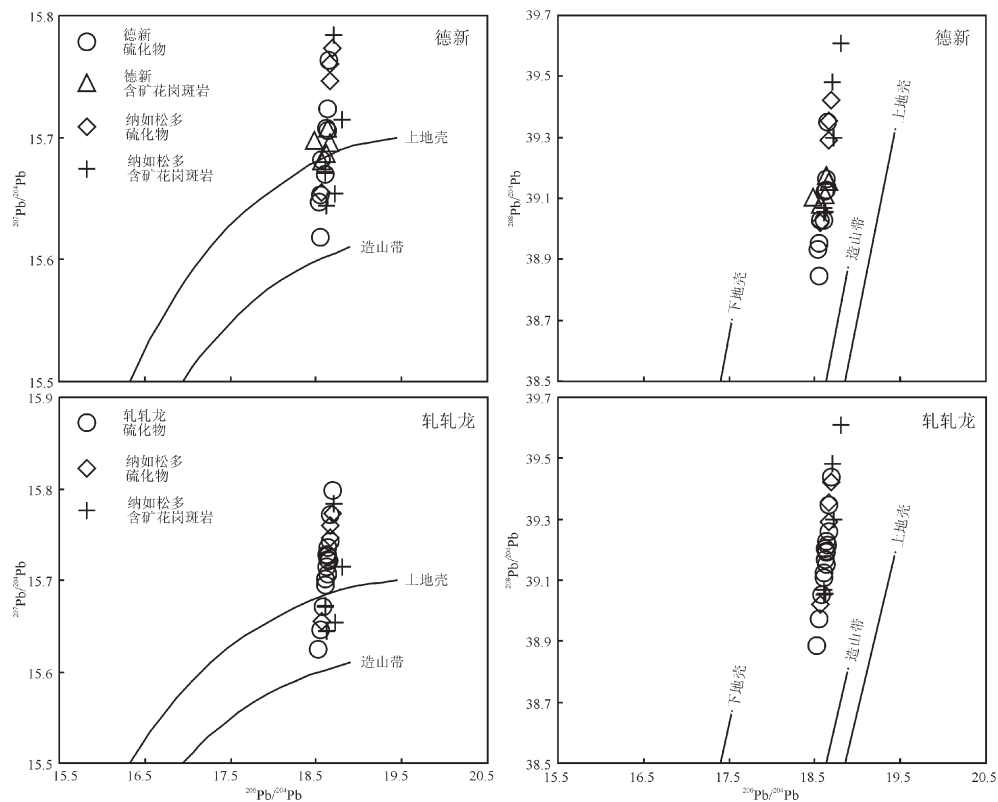


图6 则学地区含矿花岗岩和硫化物 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(底图据 Zartman and Doe, 1981)  
Fig. 6  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  versus  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  diagrams of ore-bearing granite and sulfides from the lead-zinc deposits in Zexue area (after Zartman and Doe, 1981)

富集的上部地壳物质(地质部宜昌地质矿产研究所同位素地质研究室, 1979; 吴开兴等, 2002)。则学地区铅锌矿矿床矿石铅同位素 $\mu$ 值非常集中(9.48~9.82, 平均值为9.64), 高于9.58, 显示铅源具以上地壳物质为主的特征。

Doe and Zartman(1979)根据世界不同构造环境的显生宙岩石和矿产的铅同位素组成建立了铅同位素构造模式图解。将德新及轧轧龙矿区硫化物、含矿花岗岩和临近的纳如松多铅锌矿硫化物及含矿花岗岩铅同位素组成数据投影到铅同位素构造模式图解(图6)。在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中, 3个矿床不同类型样品铅同位素均落入造山带演化线与上地壳演化线之间及上地壳演化线之上区域; 在 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解中, 3个矿床不同类型样品铅同位素均落入下地壳演化线与造山带演化线之间靠近造山带演化线一侧区域, 由于造山作用过程中可能存在地壳重熔或壳幔相互作用, 因此德新、轧轧龙铅锌矿区硫化物及含矿花岗岩的矿石铅可能

主要来自于上地壳物质, 且与纳如松多铅锌矿硫化物和含矿花岗岩的矿石铅具有相似的特征, 进一步表明3个矿床可能存在成因上的联系。

朱炳泉等(1998)认为Th、Pb的变化及Th、Pb与U、Pb同位素组成的相互关系能为揭示地质过程与物质来源提供非常丰富的信息。在广泛搜集世界各地不同时代和成因的铅同位素资料基础上, 根据构造环境与成因不同, 提出将铅的3种同位素表示成同时代地幔的相对偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ , 并通过 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解, 追踪矿石铅的源区的方法。该模式消除了时间因素的影响, 理论上比全球性的演化模式具有更好的示踪意义(郑明华等, 2001)。利用Geokit软件计算得到德新、轧轧龙和纳如松多铅锌矿矿石铅与同时代地幔的相对偏差 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 值见表2。德新矿床硫化物 $\Delta\beta$ 范围为18.86~28.79, 均值23.51,  $\Delta\gamma$ 范围为40.31~58.73, 均值48.50; 含矿花岗岩 $\Delta\beta$ 范围为23.25~24.96, 均值24.10,  $\Delta\gamma$ 范围为49.07~53.87, 均值50.74。轧轧龙矿床硫化物 $\Delta\beta$ 范围为19.47~31.14, 均值25.40,

$\Delta\gamma$ 范围为42.90~61.75,均值52.13。德新和轧轧龙铅锌矿绝大多数样品 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 值均大于上地壳对应的 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 值(表2),暗示两个矿床铅源以上地壳物质为主,由于造山作用过程中可能存在地壳重熔或壳幔相互作用,因此不能排除少量铅源由幔源物质提供的可能性。纳如松多矿床硫化物 $\Delta\beta$ 范围为21.42~29.38,均值26.73, $\Delta\gamma$ 范围为46.57~59.92,均值55.16;含矿花岗斑岩 $\Delta\beta$ 范围为20.50~30.10,均值23.57, $\Delta\gamma$ 范围为45.30~61.62,均值51.47。3个矿床样品 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 变化范围基本一致,均值相差较小,表明3个矿床铅的成矿物质来源基本一致。

将所得到的 $\Delta\beta$ 、 $\Delta\gamma$ 数据投影到铅同位素的 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解(图7)。德新、轧轧龙和纳如松多铅锌矿不同类型样品的数据点几乎全部落入上地壳来源铅范围之内,但靠近上地壳与地幔混合的俯冲带铅(岩浆作用)范围。德新和轧轧龙矿床有极少量硫化物样品数据点落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅(岩浆作用)范围内。已有研究表明,纳如松多矿石硫化物的铅同位素表现出与矿区斑岩一致的铅同位素组成,矿区斑岩提供了成矿物质。此外,德新铅锌矿含矿花岗斑岩与纳如松多铅锌矿含矿花岗斑岩成岩成矿年龄基本一致,形成于印度—亚洲大陆主碰撞阶段,二者属同一成矿系统产物。综合认为,德新和轧轧龙矿床硫化物与德新

含矿花岗斑岩、纳如松多硫化物及含矿花岗斑岩具有一致的铅同位素组成,主要来自上地壳物质。与纳如松多矿区斑岩一样,德新矿区斑岩可能起源于主碰撞时期的上地壳,在形成过程中有少量俯冲铅的加入;则学地区的花岗斑岩可能为热液脉状铅锌矿化提供了成矿物质。

## 6 结 论

(1)德新铅锌矿硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为3.5‰~7.4‰,平均值为6.1‰;含矿花岗斑岩全岩样品 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为4.4‰~6.2‰,平均值为5.7‰;轧轧龙铅锌矿金属硫化物 $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$ 为2.7‰~8.3‰,平均值为5.1‰。则学地区铅锌矿硫的来源可能主要由花岗岩类提供。

(2)则学地区铅锌矿样品同位素比值比较稳定,变化均很小,显示正常铅同位素的特征,铅源可能主要来自上地壳物质,少量来自幔源物质。

(3)德新、轧轧龙热液脉型铅锌矿和纳如松多铅锌矿存在成因上的联系,可能属于同一成矿系统产物;则学地区花岗斑岩可能为热液脉状铅锌矿化提供了成矿物质。

**致谢:**野外工作得到西藏金泰矿业公司徐仲勋总工程师、西藏地勘局第五地质大队驻德新矿区和第二地质大队驻轧轧龙矿区工作人员的热情指导和帮助;S、Pb同位素测试方面得到核工业北京地质研究院分析测试研究中心刘牧老师的帮助,成文过程中得到中国地质调查局武汉地调中心程顺波工程师、中国地质大学(武汉)徐净博士的指导和帮助,两位匿名审稿专家及编辑部老师提出了宝贵意见,在此一并表示诚挚的感谢。还要感谢“西藏则学地区矿产远景调查”项目组成员在野外工作中所给予的帮助。

## 注释

①刘海,王成松. 2011. 西藏自治区谢通门县轧轧龙矿区铅锌矿普查报告[R]. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队.

## References

- Basuki N I, Taylor B E, Spooner E T C. 2008. Sulfur isotope evidence for thermochemical reduction of dissolved sulfate in Mississippi Valley-type zinc-lead mineralization, Bongara Area, Northern Peru [J]. *Economic Geology*, 103(4):783-799.
- Chen Xiaofeng. 2010. A Study on Chronology, Petrogenesis and Region Tectonic Significance of Early Cretaceous-Early Eocene

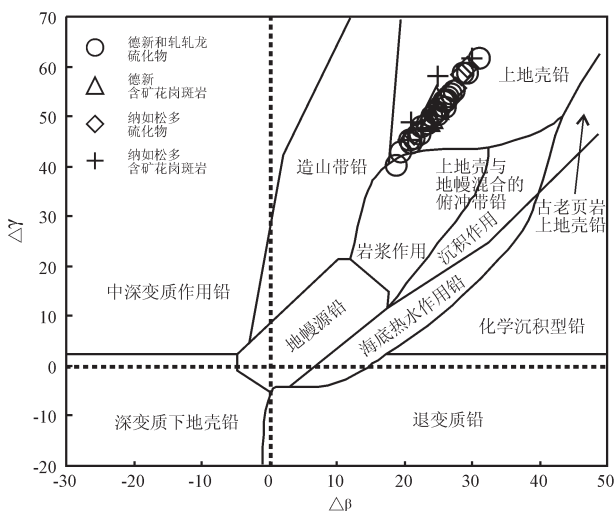


图7 则学地区铅锌矿铅同位素 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因判别图解(底图据朱炳泉等,1998)

Fig. 7  $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$  genetic discrimination diagram of lead isotope for the lead-zinc deposits in Zexue area (after Zhu et al., 1998)

- intrusive Rocks in Nyainqentanglha Area [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Doe B R, Stacey J S. 1974. The application of lead isotope of the problem of ore genesis and ore prospect evolution [J]. *Economic Geology*, 69:724–789.
- Doe B R, Zartman R E. 1979. *Plumbotectonics: the Phanerozoic*[C]// Barnes H (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley & Sons, 509–567.
- Faure G, Mensing T M. 2005. *Isotopes: Principles and Applications* [M]. New York: John Wiley & Sons, 256–283.
- Gao Wenliang, Zhan Guonian. 2006. The research on fluid inclusion in Zhangshiba Lead Zinc Ore, North Jiangxi Province [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, (S1): 132–138.
- Gao Xu. 2013. Geological, Geochemical Characteristics and Genesis of the Zhazhalong Lead–zinc Deposit, Tibet [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Gerry B A. 1980. Sulfur Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 146–220 (in Chinese).
- Han Yinwen, Ma Zhendong, Zhang Hongfei, Zhang Benren, Li Fanglin, Gao Shan, Bao Zhengyu. 2003. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 254–255 (in Chinese).
- Hoefs J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Berlin: Springer–Verlag, 119–120.
- Isotope Geology Laboratory of Yichang Institute of Geology and Mineral Resources, Ministry of Geology and Mineral Resources. 1979. The Basic Problem of Lead Isotope Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 35–137 (in Chinese).
- Ji Xianhua, Meng Xiangjin, Yang Zhusen, Zhang Qian, Tian Shihong, Li Zhenqing, Liu Yingchao, Yu Yushuai. 2014. The Ar–Ar geochronology of sericite from the cryptoexplosive breccia type Pb–Zn deposit in Narusongduo, Tibet and its geological significance [J]. *Geology and Exploration*, 50(2): 281–290 (in Chinese with English abstract).
- Ji Xianhua, Yang Zhusen, Yu Yushuai, Shen Junfeng, Tian Shihong, Meng Xiangjin, Li Zhenqing, Liu Yingchao. 2012. Formation mechanism of magmatic rocks in Narusongduo lead–zinc deposit of Tibet: evidence from magmatic zircon [J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 758–774 (in Chinese with English abstract).
- Ke Xianzhong, Long Wenguo, Zhou Dai, Wang Jing Zhong Shiyu. 2017. Metallogenesis in the main collisional period in mid–western Gangdise: zircon U–Pb geochronology of the granitic porphyry in Dexin deposit, Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 36(5): 772–779 (in Chinese with English abstract).
- Li Yun, Zhao Yuanyi. 2014. Lead isotopes in the sulfide ores from the Shesuo and Lawu copper deposits, northern Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 34(3): 96–105 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yingchao, Ji Xianhua, Hou Zengqian, Tian Shihong, Li Zhenqing, Zhao Xiaoyan, Zhou Jinsheng, Ma Wang, Yang Zhusen. 2015. The establishment of an independent Pb–Zn mineralization system related to magmatism: A case study of the Narusongduo Pb–Zn deposit in Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 539–556 (in Chinese with English abstract).
- Long Tao. 2013. Geochronology and Geochemistry of Late Cretaceous Acid Intrusive Rocks in Zexue Area, Tibet [D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan) (in Chinese with English abstract).
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit: A geochemical toolkit for microsoft excel [J]. *Geochimica*, 33(5): 459–464 (in Chinese with English abstract).
- Meng Xiangjin. 2004. The Metallogeny of the Miocene Gangdise Porphyry Copper Belt in Tibetan Collisional Orogen [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H, Rye R O. 1979. *Isotopes of sulfur and carbon*[C]//Barnes H (ed.). *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. New York: John Wiley & Sons, 509–567.
- Ohmoto H. 1972. Systematics of sulfur and carbon isotope in hydrothermal ore deposits [J]. *Economic Geology*, 67: 551–579.
- Shen Weizhou, Huang Yaosheng. 1987. *Stable Isotope Geochemistry* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1–56 (in Chinese).
- Wei Juying, Wang Guanyu. 1988. *Isotope Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 153–165 (in Chinese).
- Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, Tang Qunli. 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).
- Yang Bin, Chen Zhengle, Zhang Qing, Zhou Zhenju, Han Fengbin, Zhang Wengao, Ma Ji, Zhang Tao. 2018. Geological characteristics and sulfur and lead isotopes of the Kanling lead–zinc deposit, Southern Tianshan Mountains[J].*Geology in China*,45(1):155–167 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yong, Luo Taiyi, Huang Zhilong, Yang Zhusen, Tian Shihong, Qian Zhikuan. 2010a. Sulfur and lead isotope compositions of the Narusongduo silver zinc–lead deposit in Tibet: implications for the sources of plutons and metals in the deposit [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 30(3): 311–318 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yong, Luo Taiyi, Yang Zhusen, Huang Zhilong, Tian Shihong, Qian Zhikuan. 2010b. A comparison of porphyries between Pb–Zn–Ag metallogenic system and Cu–Mo–Au metallogenic system in Gangdise orogen, Tibet [J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 195–206 (in Chinese with English abstract).
- Zang Wenshuan, Meng Xiangjin, Yang Zhusen, Ye Peisheng. 2007. Sulfur and lead isotopic compositions of lead–zinc–silver deposits in the Gangdise metallogenic belt, Tibet, China, and its geological

- significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1393–1397 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E, Doe B R. 1981. Plumbotectonics—the model [J]. *Tectonophysics*, 75: 135–162.
- Zhang Ligang. 1988. Lead isotopic compositions of feldspar and ore and their geologic significance [J]. *Mineral Deposits*, 7(2):55–64.
- Zhao Ping, Xie Ejun, Duoji, Jin Jian, Hu Xiancai, Du Shaoping, Yao Zhonghua. 2002. Geochemical characteristics of geothermal gases and their geological implications in Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 539–550 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Minghua, Zhang Shouting, Liu Jiajun, Long Xunrong, Song Xieyan. 2001. Geochemical Background and Metallogenic Mechanism of MuRunTau Type Gold Ore Deposits in Southwest Tianshan [M]. Beijing: Geological Publishing House, 84–89 (in Chinese).
- Zheng Yongfei. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 218–247 (in Chinese).
- Zhu Bingquan, Li Xianhua, Dai Tongmo, Chen Yuwei, Fan Sikun, Gui Xuntang, Wang Huifen. 1998. Isotopes System Theory and its Application in Earth Science—On the Evolution of the Continental Crust and Mantle [M]. Beijing: Science Press, 216–235 (in Chinese).
- 陈晓锋. 2010. 念青唐古拉早白垩世—早始新世侵入岩年代学、岩石成因及其构造意义[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 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, 35–137.
- 高文亮, 詹国年. 2006. 赣北张十八铅锌矿流体包裹体研究[J]. *东华理工大学学报*, (S1):132–138.
- 高旭. 2013. 西藏轧轧龙铅锌矿地质地球化学特征及成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 格里年科 B A. 1980. 硫同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 146–220.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 张本仁, 李方林, 高山, 鲍征宇. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 254–255.
- 纪现华, 孟祥金, 杨竹森, 张乾, 田世洪, 李振清, 刘英超, 于玉帅. 2014. 西藏纳如松多隐爆角砾岩型铅锌矿床绢云母 Ar–Ar 定年及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 50(2): 281–290.
- 纪现华, 杨竹森, 于玉帅, 申俊峰, 田世洪, 孟祥金, 李振清, 刘英超. 2012. 西藏纳如松多铅锌矿床成矿岩体形成机制: 岩浆锆石证据[J]. *矿床地质*, 31(4): 758–774.
- 柯贤忠, 龙文国, 周岱, 王晶, 钟石玉. 2017. 西藏冈底斯中西段主碰撞期成矿事件——德新矿区花岗斑岩锆石 U–Pb 年龄证据[J]. *地质通报*, 36(5): 772–779.
- 李运, 赵元艺. 2014. 西藏北部舍索与拉屋铜矿床硫化物铅同位素特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 34(3): 96–105.
- 刘英超, 纪现华, 侯增谦, 田世洪, 李振清, 赵晓燕, 周金胜, 马旺, 杨竹森. 2015. 一个与岩浆作用有关的独立铅锌成矿系统的建立——以西藏纳如松多铅锌矿床为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 34(4): 539–556.
- 龙涛. 2013. 西藏则学地区晚白垩世中酸性侵入岩年代学及岩石地球化学特征研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用VBA构建的地球化学工具软件包[J]. *地球化学*, 33(5): 459–464.
- 孟祥金. 2004. 西藏碰撞造山带冈底斯中新世斑岩铜矿成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 沈渭洲, 黄耀生. 1987. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 原子能出版社, 1–56.
- 魏菊英, 王关玉. 1988. 同位素地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 153–165.
- 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.
- 杨斌, 陈正乐, 张青, 周振菊, 韩凤彬, 张文高, 马骥, 张涛. 2018. 南天山坎岭铅锌矿床地质特征及S、Pb同位素特征研究[J]. *中国地质*, 45(1):155–167.
- 杨勇, 罗泰义, 黄智龙, 杨竹森, 田世洪, 钱志宽. 2010a. 西藏纳如松多银铅矿S、Pb同位素组成: 对成矿物质来源的指示 [J]. *矿物学报*, 30(3): 311–318.
- 杨勇, 罗泰义, 杨竹森, 黄智龙, 田世洪, 钱志宽. 2010b. 冈底斯造山带两套不同成矿体系的含矿斑岩对比研究 [J]. *矿床地质*, 29(2): 195–206.
- 臧文栓, 孟祥金, 杨竹森, 叶培胜. 2007. 西藏冈底斯成矿带铅锌银矿床的S、Pb同位素组成及其地质意义[J]. *地质通报*, 26(10): 1393–1397.
- 张理刚. 1988. 长石铅和矿石铅同位素组成及其地质意义[J]. *矿床地质*, 7(2):55–64.
- 赵平, 谢鄂军, 多吉, 金建, 胡先才, 杜少平, 姚中华. 2002. 西藏地热气体的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*. 18(4): 539–550.
- 郑明华, 张寿庭, 刘家军, 龙训荣, 宋谢炎. 2001. 西南天山穆龙套型金矿床产出地质背景与成矿机制[M]. 北京: 地质出版社, 84–89.
- 郑永飞. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 218–247.
- 朱炳泉, 李献华, 戴樟谟, 陈毓蔚, 范嗣昆, 桂训唐, 王慧芬. 1998. 地球科学中同位素体系理论与应用——兼论中国大陆壳幔演化[M]. 北京: 科学出版社, 216–235.

## 附中文参考文献