

# 青海德令哈蓄集银铅矿床地质与 S-Pb 同位素组成 及其成矿学意义

陈 敏<sup>1,2</sup>, 薛春纪<sup>1,2</sup>, 赵文涛<sup>2</sup>, 薛万文<sup>3</sup>, 谷 强<sup>4</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 3. 青藏高原北部地质过程与矿产资源青海省重点实验室, 青海 西宁 810000; 4. 武警黄金第六支队, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 蓄集矿床是宗务隆构造带内发现的重要银铅矿床。蓄集银铅矿床赋存于石炭-二叠系宗务隆群果可山组灰岩夹千枚岩地层中, 矿体呈脉状、透镜状、似层状, 明显受近东西走向的断裂构造控制, 矿体围岩蚀变主要为硅化和绢云母化, 矿石矿物主要为方铅矿和银黝铜矿, 脉石矿物主要为石英, 矿石具有斑杂状和网脉状构造。对该矿床开展了 S-Pb 同位素组成分析。硫同位素分析结果表明矿石中硫化物矿物  $\delta^{34}\text{S}$  值变化于 5.0‰ ~ 8.4‰ 之间, 显示硫主要为岩浆来源, 有少量地层的贡献; 铅同位素分析结果表明, 矿石  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.896 \sim 17.922$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.589 \sim 15.617$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.072 \sim 38.166$ , 与围岩铅同位素组成 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.949 \sim 18.976$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.600 \sim 15.696$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.106 \sim 40.943$ ) 较为相似, 而与蓄集峡口闪长岩铅同位素组成 ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.144 \sim 18.589$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.623 \sim 15.636$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.790 \sim 39.033$ ) 相差较大, 反映成矿物质主要来自围岩地层宗务隆群果可山组。综合分析认为, 蓄集银铅矿床与宗务隆构造带晚二叠世岩浆活动关系密切, 应属岩浆热液为主的热液充填-交代成因类型。

**关键词:** 矿床地质; S-Pb 同位素组成; 蓄集银铅矿床; 宗务隆构造带; 青海

中图分类号: P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)04-0454-15

## Geology and S-Pb isotope composition of the Xuji Ag-Pb deposit in Delingha of Qinghai Province and its implications for metallogenesis

CHEN Min<sup>1,2</sup>, XUE Chun-ji<sup>1,2</sup>, ZHAO Wen-tao<sup>2</sup>, XUE Wan-wen<sup>3</sup> and GU Qiang<sup>4</sup>

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Geological Engineering Department, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. Qinghai Key Lab. of Geological Process and Mineral Resources in Northern Tibetan Plateau, Xining 810000, China; 4. No. 6 Gold Geological Party of PAP, Xining 810000, China)

**Abstract:** The Xuji deposit is an important Ag-Pb deposit found in the Zongwulong belt. Geologically, the ore deposit is hosted in the Carboniferous-Permian Guokeshan Formation of Zongwulong Group, and consists of limestone intercalated with phyllite. The orebodies are veinlike, lenticular and stratoid in shape and are controlled by EW-trending faults. The alteration of ore-bearing wall rock is mainly manifested as silicification and sericitization. Ore minerals are mainly galena and silver tetrahedrite, gangue minerals are mainly quartz, and the ore exhibits variegated and reticulate structure. In this paper, the authors analyzed S and Pb isotopic composition characteristics in this deposit. The results of sulfur isotope analysis show that the  $\delta^{34}\text{S}$  values of sulfide minerals in the ores range from 5.0‰ to 8.4‰, indicating that the sulfur mainly came from magma with a small stratigraphic contribution.

收稿日期: 2019-12-13; 接受日期: 2020-06-04; 编辑: 尹淑萍

基金项目: 青海省科技重点研发资助项目(2018-SF-109)

作者简介: 陈 敏(1986- ), 女, 在读博士, 讲师, 主要从事矿物学与矿床学的教学与研究工作, E-mail: chenmin\_cn@163.com; 通讯

作者: 薛春纪(1962- ), 男, 教授, 博士生导师, 从事矿床学、矿产普查与勘探专业教学和研究, E-mail: chunji.xue@cugb.edu.cn。

The lead isotopic compositions,  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  are from 17.896 to 17.922, 15.589 to 15.617 and 38.072 to 38.166 for ore sulfide minerals, respectively, which are similar to the features of wall rocks ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.949 \sim 18.976$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.600 \sim 15.696$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.106 \sim 40.943$ ) and are different from the features of Xujixiakou diorite ( $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.144 \sim 18.589$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.623 \sim 15.636$ ,  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.790 \sim 39.033$ ), indicating that the metals were mainly from the Guokeshan Formation of Zongwulong Group. A comprehensive analysis shows that the Xuji deposit was related to the late Permian magmatic activity in the Zongwulong belt and the genesis of the deposit seems to be magmatic hydrothermal filling-replacement.

**Key words:** ore geology; S-Pb isotope composition; Xuji Ag-Pb deposit; Zongwulong belt; Qinghai

**Fund support:** Key Project of Research and Development of Qinghai Province(2018-SF-109)

地处青海柴达木盆地以北、呈近东西向带状分布的宗务隆构造带颇受国内外学者的关注(王毅智等, 2001; 杨经绥等, 2004; 孙延贵等, 2004; 郭安林等, 2009; 彭渊, 2015; 彭渊等, 2016, 2018; 王苏里等, 2016; Shao *et al.*, 2017; 牛漫兰等, 2018; Wu *et al.*, 2019)。它被认为是在欧龙布鲁克与南祁连联合地块之上发育起来的印支期造山带, 区域地质构造演化经历了陆内裂陷、洋盆发展、俯冲和碰撞造山等过程(杨经绥等, 2004; 郭安林等, 2009; Wu *et al.*, 2019), 成矿条件优越。带内已发现包括蓄集等在内的若干银多金属矿床(点), 找矿前景被勘查界看好, 是当前青海省重点找矿勘查区。但当前勘查方向和找矿重点不甚明确, 成矿控制要素认识模糊。

蓄集银铅矿是宗务隆构造带内的重要矿床, 目前已初步开发, 其铅储量为  $1 \times 10^4$  t, 银储量为 4 461.52 kg, 属小型银铅矿床。该矿床于 1958 年由青海省地矿局海西地质队发现, 最初被认为是中温热液交代型矿床; 1977 年青海省地矿局第六地质队普查评价结果表明, 矿床属浅成中低温热液充填成因; 德令哈鸿达矿业开发有限公司(2014)<sup>①</sup>认为, 矿床属多成矿阶段叠加改造而成, 经历了沉积、变质和热液改造过程。但至今还未对该矿床进行系统深入的成因分析。

本文在收集前人地质资料的基础上, 对蓄集银铅矿床开展了系统的矿床地质观测, 采集了蓄集银铅矿区矿石、地表围岩及蓄集峡口闪长岩样品, 开展硫、铅同位素组成分析, 通过对比研究矿石、矿区围岩和蓄集峡口闪长岩硫、铅同位素组成, 试图反映该矿床的成矿物质来源, 以期为分析该矿床成因归属提供科学依据, 为下一步宗务隆构造带银多金属勘

查找矿方向提供参考资料。

## 1 区域地质背景

蓄集银铅矿床在大地构造上位于宗务隆构造带的中南部。宗务隆构造带被青海南山断裂、宗务隆山南缘断裂、阿尔金断裂和哇洪山-温泉断裂所围限(图 1a, 辛后田等, 2006)。

区域内出露地层有下元古界达肯大坂群(陆松年等, 2002; Zhang *et al.*, 2014; 钱兵等, 2017)、上石炭-下二叠统宗务隆群和下三叠统隆务河群(图 1b), 不同地层单元之间多呈断层接触。下元古界达肯大坂群走向为北西-南东向, 主要分布在欧龙布鲁克微陆块内, 为一套以各类片麻岩为主、夹斜长角闪岩、石英片岩、大理岩及石英岩的无序高角闪岩相变质岩石组合, 出露厚度达 5 669 m, 原岩为砂质泥岩、基性火山岩、富镁碳酸盐岩组成的火山-沉积建造, 代表地壳初始增厚阶段的堆积(辛后田等, 2006; 张雪亭等, 2010; 张博文, 2010)。上石炭-下二叠统宗务隆群走向与近东西向主构造线近于平行, 为宗务隆构造带的主体地层, 自下而上由土尔根大坂组 C<sub>2</sub>P<sub>1</sub>t 和果可山组 C<sub>2</sub>P<sub>1</sub>g 构成, 两个组之间以断层接触。土尔根大坂组可划分为两个岩性段: 下段主要由灰绿色薄层状绢云绿泥千枚岩、变玄武岩夹黑色厚层白云质灰岩、条带状灰岩、变砂岩、石英片岩组成, 属半深海洋盆环境沉积和火山沉积产物(张雪亭等, 2010); 上段主要由灰绿色安山玄武岩、枕状玄武岩和绿泥片岩等组成, 应属洋底火山喷发产物。果可山组由糜棱岩化大理岩、片岩和薄层硅质岩、蛇纹石化超镁铁质岩和片理化镁铁质熔岩组成, 不同岩石单元以构造岩片形式向南逆冲推覆(郭安林等,

<sup>①</sup> 德令哈鸿达矿业开发有限公司. 2014. 青海省德令哈市蓄集山多金属银矿生产探矿设计.

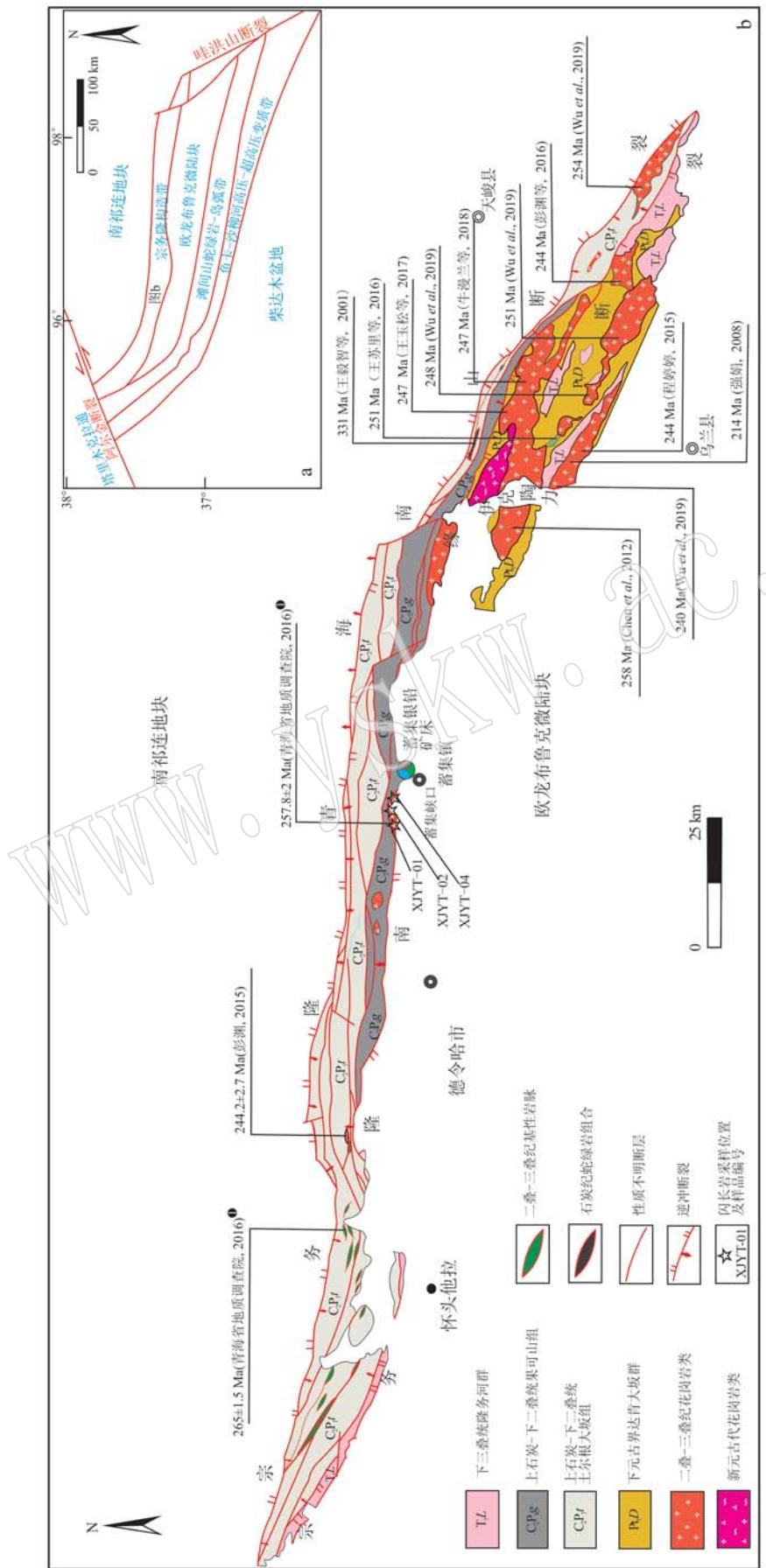


图1 柴北缘大地构造简图(a, 据辛后田等, 2006)和宗务隆构造带地质简图(b, 据彭渊等, 2016)

Fig. 1 Tectonic units of northern Qaidam (a, after Xin Houtian *et al.*, 2006) and simplified geological map of the Zongwulong belt (b, after Peng Yuan *et al.*, 2016)

① 青海省地质调查院, 2016. 青海省德令哈市宗务隆山地区六幅1:5万区域地质矿产调查报告. 内部资料.

2009; 彭渊等, 2016)。下三叠统隆务河群走向与达肯大坂群一致, 主要分布在宗务隆构造带内的怀头他拉和乌兰地区, 自下而上由数个砾岩-砂砾岩(仅限于盆地边部)-板岩-灰岩(局部缺失)基本层序相间叠置而成, 下部以粗碎屑岩为主, 灰岩夹层较少; 中部以细碎屑砂板岩为主, 灰岩夹层发育, 且厚度较大; 上部以中粒砂岩、含砾砂岩、板岩为主, 砾岩夹层增多, 灰岩夹层减少(张雪亭等, 2010)。

区域侵入岩较为发育, 新元古代侵入岩分布于乌兰地区, 侵位于达肯大坂群中, 岩石类型为花岗岩、英云闪长岩、花岗闪长岩和二长花岗岩, 岩石具有过铝质钙碱性花岗岩的特点, 侵位时代集中在 1 000~850 Ma(陆松年等, 2002; 辛后田等, 2006), 对应于扬子陆块新元古代岩浆事件(凌文黎等, 2006), 响应新元古代 Rodinia 超大陆的拼合形成期(陈能松等, 2007)。华力西-印支期岩浆活动强烈, 被认为是宗务隆构造带的演化时期, 侵入岩沿宗务隆构造带南侧呈不规则拉长状产出, 部分侵位于宗务隆群, 主体侵位于达肯大坂群, 岩石类型为辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和黑云母花岗岩等, 辉长岩具有钙碱性特点, 锆石 U-Pb 年龄为  $254.3 \pm 1.5$  Ma, 构造背景为洋壳俯冲造山阶段的岛弧环境(王苏里等, 2016), 说明宗务隆带在晚二叠世发生洋壳的俯冲; 花岗岩类具有钙碱性 I 型花岗岩特点, 锆石 U-Pb 年龄为 258~240 Ma, 具弧型花岗岩性质(强娟, 2008; 郭安林等, 2009; Chen et al., 2012; 程婷婷, 2015; 彭渊等, 2016; 王玉松等, 2017; 牛漫兰等, 2018; Wu et al., 2019), 这与花岗岩类分布在欧龙布鲁克微陆块北部边缘的地质事实相符, 说明洋壳在晚二叠世-中三叠世发生向南的俯冲碰撞; 还发现有晚三叠世 A 型花岗岩(230~214 Ma)(强娟, 2008; 彭渊, 2015), 表明在晚三叠世碰撞造山作用已结束。

宗务隆构造带主体构造线为近东西向, 造山后有北东向构造叠加(图 1b)。近东西向构造是宗务隆构造带晚石炭-早二叠世有限洋盆发生发展期伸展构造, 即正断系统经后期造山挤压作用而发生反转形成的逆冲构造系统(李平安等, 1985; 王毅智等, 2001; 孙延贵等, 2004), 其构造形迹是轴向近东西向的褶皱和主体向南的逆冲断裂带。

构造带内宗务隆-青海南山断裂和宗务隆南缘

断裂是长期活动的区域性断裂, 宗务隆南缘断裂为超岩石圈断裂, 沿宗务隆山南缘不连续延伸约 110 km(Shao et al., 2017)。

## 2 矿床地质特征

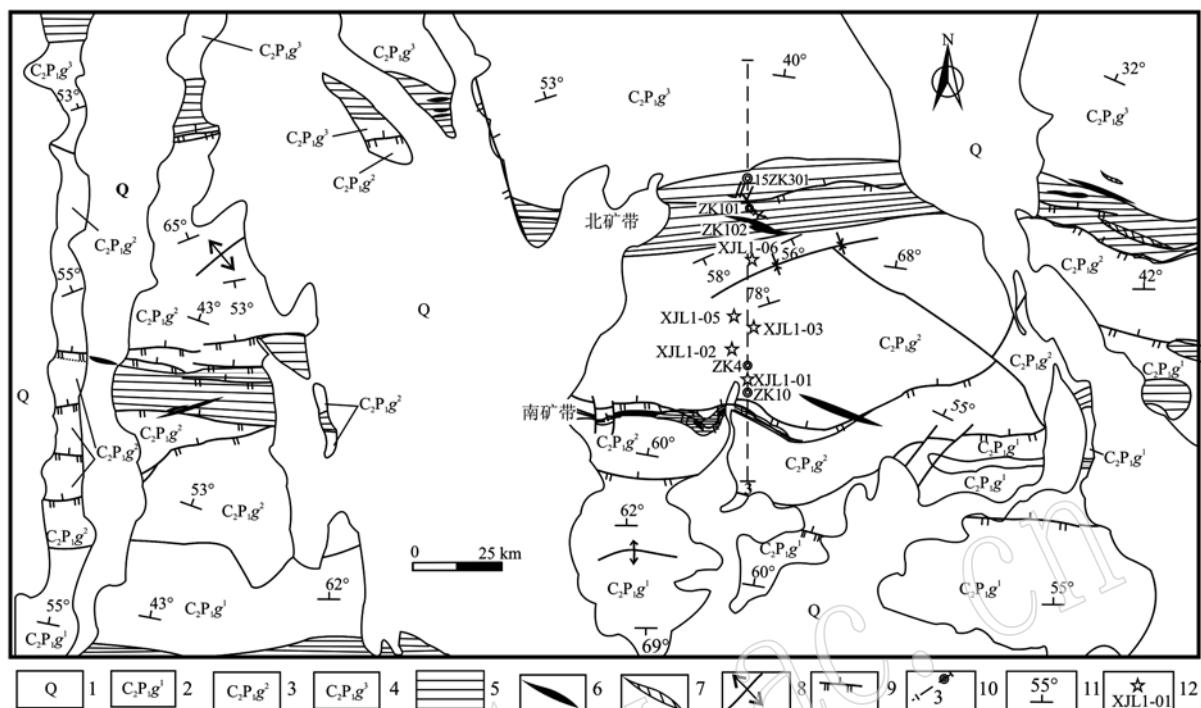
蓄集银铅矿床位于青海省德令哈市蓄集镇南部地区。矿区出露地层为上石炭-下二叠统果可山组(图 2), 自下而上划可分为 3 个岩性段: 第 1 岩性段( $C_2P_1g^1$ )为灰绿色含砂砾绢云千枚岩夹灰岩, 厚度 415 m, 具微弱银铅矿化现象; 第 2 岩性段( $C_2P_1g^2$ )为结晶灰岩夹千枚岩, 下部为灰-灰白色薄层状不纯结晶灰岩夹角砾状灰岩、绢云绿泥千枚岩, 上部为浅灰绿色石榴子石钙质绢云千枚岩夹灰岩, 厚度 2 221 m, 铅银矿化普遍发育, 是重要的含矿层; 第 3 岩性段( $C_2P_1g^3$ )为结晶灰岩, 由浅灰色中-薄层状含白云质结晶灰岩及白色厚-巨厚层状含白云质结晶灰岩组成, 厚度大于 1 146 m, 未见银铅矿化。

矿区未出露岩浆岩, 但在矿区西约 5 km 处的蓄集峡口一带, 出露晚二叠世闪长岩体和花岗闪长岩体, 规模不大, 呈岩株状侵入于上石炭-下二叠统果可山组。

矿区断裂构造发育。近东西走向的逆冲断裂构造最为重要, 倾向北, 倾角为 40°~60°(德令哈鸿达矿业开发有限公司, 2014)<sup>①</sup>, 在矿区近平行排布; 沿断裂观测到不连续金属硫化物石英脉充填或交代矿化, 常形成银铅多金属硫化物矿(化)体, 是矿区的直接控矿构造; 断裂带两侧常见规模不等的硅化和绢云母化蚀变带, 宽 15~35 m。其次为北西向和北东向断裂构造, 北西向断裂构造具张扭性特点, 与近东西向断裂构造交汇部位银铅硫化物矿体出现膨大现象, 北东向断裂对矿体具一定的破坏作用。矿区褶皱构造主要表现为轴向近东西向的小型背斜和向斜, 主要由上石炭-下二叠统果可山组不同岩性段组成。

矿体集中分布在南、北两个矿带内(图 2), 本次依据地层产状和矿体的分布特征选择横跨南北两个矿带的 3 号勘探线进行野外调研(图 3)。北矿带近东西走向, 地表出露长约 1 200 m, 宽 20~100 m, 部分地段被第四系所覆盖, 产于果可山组绢云石英千枚岩、含砾绢云千枚岩与厚层状灰岩之间岩性过渡部位(图 4a), 受近东西向层间断裂构造控制, 表现

<sup>①</sup> 德令哈鸿达矿业开发有限公司. 2014. 青海省德令哈市蓄集山多金属银矿生产探矿设计.

图2 蓄集银铅矿床地质图(底图据德令哈鸿达矿业开发有限公司, 2014<sup>①</sup>)Fig. 2 Geological map of the Xuji Ag-Pb ore deposit (after Delingha Hongda Mining Development Co. LTD, 2014<sup>①</sup>)

- 1—第四系; 2、3、4—果可山组第1岩性段、第2岩性段、第3岩性段; 5—热液矿化蚀变带; 6—银铅矿体; 7—石英脉; 8—褶皱轴; 9—逆断裂; 10—3号勘探线(图3勘探线位置); 11—地层产状; 12—围岩全岩铅同位素采样位置  
1—Quaternary; 2, 3, 4—the first lithologic section, the second lithologic section, the third lithologic section of Guokeshan Formation; 5—hydrothermal mineralization alteration zone; 6—Ag-Pb orebody; 7—quartz vein; 8—crest of fold; 9—thrust fault; 10—No. 3 exploration line; 11—attitude of stratum; 12—location of whole rock lead isotope sampling

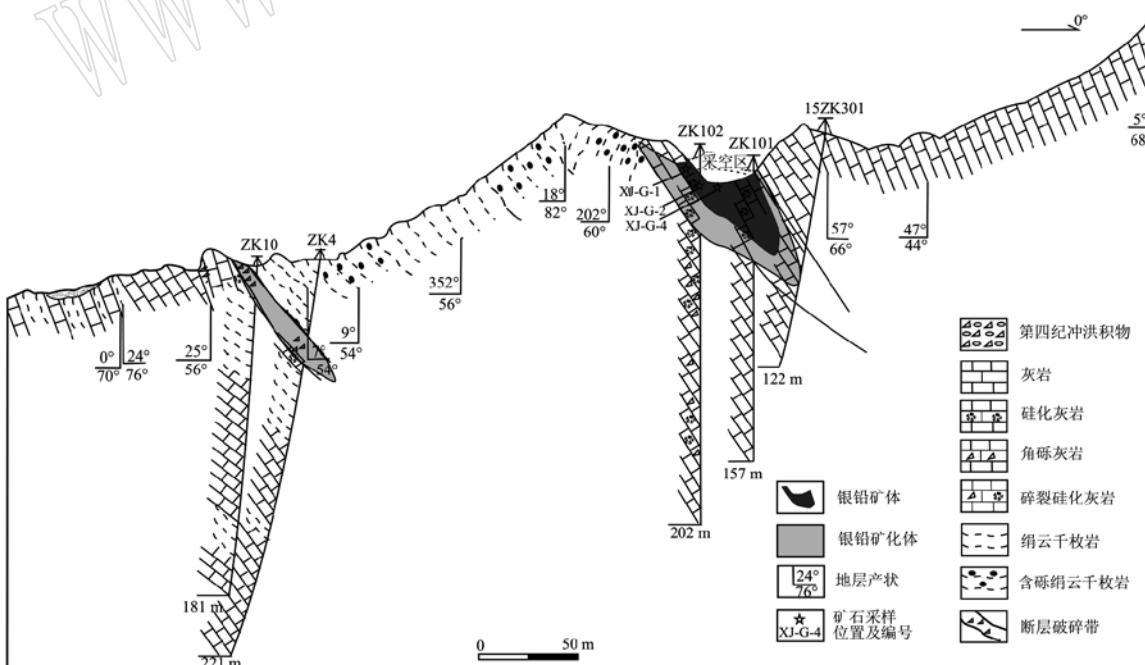


图3 蓄集银铅矿床3号勘探线剖面图

Fig. 3 Geological section along No. 3 exploration line of the Xuji Ag-Pb ore deposit

<sup>①</sup> 德令哈鸿达矿业开发有限公司. 2014. 青海省德令哈市蓄集山多金属银矿生产探矿设计.

为 Ag、Pb、Cu 硫化物矿化的硅化、绢云母化、黄铁矿化蚀变岩。矿体总体呈近东西向, 倾向北, 倾角 60°~80°, 与地层以及层间断裂产状近于一致, 沿走向矿体略具膨缩现象。矿体呈脉状、透镜状和似层状产出, 赋存于地表以下 20~113 m 之间, 单矿体厚度 1.30~5.93 m, 矿石品位为 Pb 1.03%~52.59%、Ag 36.42~867 g/t(最高 1 370 g/t)、Cu 0.21%~5.91%。

南矿带也为近东西走向, 地表出露长约 1 300 m, 宽为 10~80 m 不等, 中间地段被第四系覆盖, 产于条带状泥质灰岩夹钙质绢云千枚岩与深灰色薄层状灰岩的岩性过渡部位, 受近东西向层间断裂构造控制, 为 Pb、Ag、Cu 硫化物矿化的硅化、绢云母化蚀变岩。矿体总体呈近东西走向, 北倾, 倾角 54°~70°。矿体呈脉状和透镜状产出, 赋存于地表以下 5~150 m 之间, 单矿体厚度 2.40~6.75 m, 矿石品位为 Pb 0.51%~52.59%、Ag 78.30~179.87 g/t、Cu 0.21%~6.91%。

围岩蚀变以硅化、绢云母化为主(图 4b), 局部可见碳酸盐化, 主要沿近东西向断裂两侧分布, 宽度一般数米至数十米。矿体受蚀变带控制, 主要分布在硅化带内, 蚀变的强弱与矿化富集程度关系密切, 近矿围岩主要表现为强烈硅化, 远矿围岩主要表现为绢云母化、黄铁矿化和碳酸盐化。

矿石类型有稀疏浸染方铅矿矿石、中等浸染状方铅矿矿石、中等-稠密浸染状含银黝铜矿-斑铜矿-方铅矿矿石、条带状方铅矿矿石和角砾状方铅矿矿石等, 以稀疏-中等浸染状方铅矿矿石为主。原生矿石的主要金属矿物有方铅矿、银黝铜矿、黄铁矿、毒砂和黄铜矿等。脉石矿物主要为石英和绢云母, 次为白云石和方解石。矿石矿物以方铅矿和银黝铜矿为主, 富矿段矿石中方铅矿和银黝铜矿呈粗晶紧密块状出现在银铅矿脉内(图 4d)。矿石构造主要有斑杂状(图 4d)、浸染状、网脉状(图 4c)和角砾状, 矿石结构主要有中细粒他形粒状和半自形粒状(图 4e、4f)。

根据矿体地质特征、矿物共生组合和矿石结构特点, 将热液矿化划分为 3 个阶段(图 5)。黄铁矿-石英矿化阶段, 表现为黄铁矿-石英-黄铜矿-毒砂矿物组合; 银铅硫化物矿化阶段, 表现为含铅硫化物的大量富集, 形成大量的方铅矿, 同时伴随着银黝铜矿、毒砂的形成; 碳酸盐矿化阶段, 表现为黄铁矿对方铅矿的交代作用和碳酸岩脉的形成(图 5)。

### 3 样品和分析方法与结果

用于 S 同位素组成分析的矿石样品(XJ-01、XJ-02、XJ-03、IV-G-1、XJL1-b-04)采自矿区平硐内斑杂状银铅矿体, 用于 Pb 同位素组成分析的矿石样品(III-G-2、IV-G-1、XJ-G-4)、围岩(XJL1-01、XJL1-02、XJL1-03、XJL1-05、XJL1-06)和岩体样品(XJYT-01、XJYT-02、XJYT-04)分别采自矿区平硐内斑杂状银铅矿体、矿区 3 号勘探线地表围岩和蓄集峡口闪长岩体, 矿石样品新鲜, 岩石样品未受蚀变和风化影响。矿石样品首先粉碎、蒸馏水淘洗、自然晾干、过 60~80 目筛; 在双目镜下逐粒挑选方铅矿、黄铁矿硫化物单矿物样品; 重复两次挑选, 确保纯度高于 99% (段士刚等, 2012)。岩石样品首先在金刚石切片机上切除可能的风化面避免充填交代脉体的可能影响, 蒸馏水清洗, 自然晾干。然后将单矿物和岩石样品在研钵中研磨至 0.074 mm 以下, 以备质谱分析。

S、Pb 同位素组成分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。硫同位素分析时, 样品用硫化物与 CuO 和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 混合氧化剂在高温真空条件下反应制取 SO<sub>2</sub>, 然后导入质谱仪分析。分析方法依据为 DZ/T0184.14-1997, 测试仪器为 MAT251C 同位素质谱仪, 矿石硫化物硫同位素组成分析结果用国际标准 CDT 表达, 分析精度优于 ±0.2‰, 分析结果见表 1。

蓄集银铅矿床 4 件方铅矿样品(XJ-01、XJ-02、XJ-03、XJL1-b-04)的 δ<sup>34</sup>S 值变化范围为 7.5‰~8.4‰, 1 件黄铁矿样品(IV-G-1)的 δ<sup>34</sup>S 值为 5.0‰; 矿石 δ<sup>34</sup>S 值变化范围为 5.0‰~8.4‰, 平均值为 7.4‰。

矿石铅、围岩全岩铅和蓄集闪长岩全岩铅同位素组成分析方法依据均为 GB/T17672-1999, 测试仪器均为 ISOPROBE-T 热电离质谱仪, 分析误差以 2σ 计, 分析结果见表 2。

蓄集银铅矿床 3 件矿石样品(III-G-2、IV-G-1、XJ-G-4)的 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 17.896~17.922, 平均值为 17.906; <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 15.589~15.617, 平均值为 15.603; <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 38.072~38.166, 平均值为 38.114。5 件围岩全岩的铅 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 17.949~18.976, 平均值为 18.349; <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 15.600~15.696, 平均值为 15.638; <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb = 38.106~

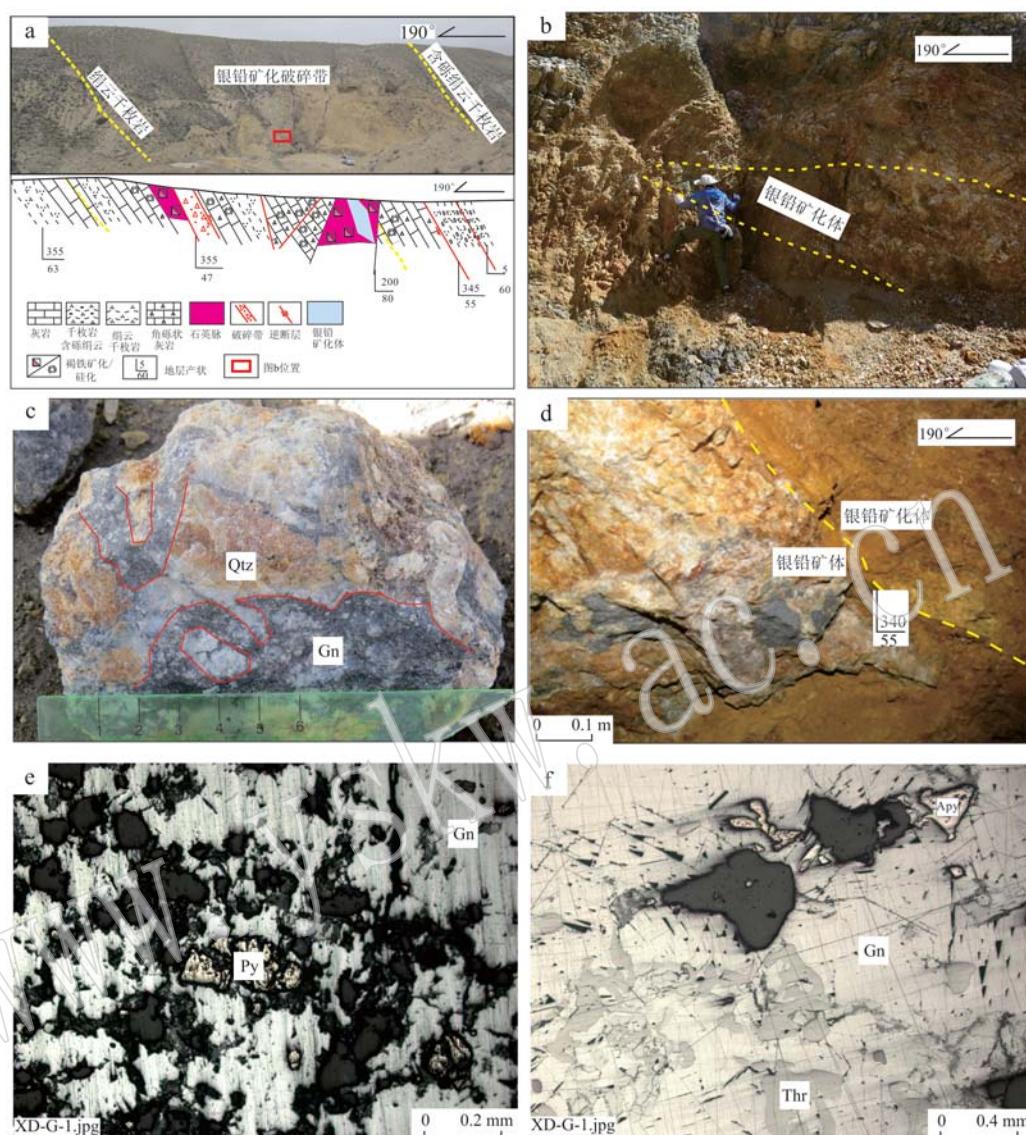


图4 蓄集银铅矿化/蚀变体露头(a、b)、矿石手标本(c、d)及显微(e、f)照片

Fig. 4 Photographs of mineralization/alteration outcrops, hand specimen and microphotographs of the ore in the Xuji Ag-Pb ore deposit

a—矿化蚀变带露头, 表现为红褐色氧化带, 矿化产在绢云母千枚岩与含砾千枚岩之间的破碎蚀变带内; b—矿化蚀变带露头, 表现为原千枚岩的硅化(退色)和(原硫化物矿化带的)红色氧化带, 千枚岩中的灰岩透镜体也显著发生了硅化; c—网脉状方铅矿矿石, 呈现出硅化岩石角砾化之后, 银铅硫化物细脉、网脉充填在角砾之间的空隙内; d—采矿平硐中见产在硅化灰岩中的银铅矿体, 呈北倾、斑杂状, 宽约0.6 m, 主要由方铅矿和银黝铜矿组成; e—矿石主要由粗粒自形晶方铅矿组成, 少量他形晶黄铁矿被方铅矿交代而呈现交代残余结构(反射光); f—矿石中除主要矿物粗粒自形晶方铅矿外, 还见银黝铜矿, 次要矿物银黝铜矿和黄铁矿呈中粒他形晶结构, 常被方铅矿交代成残晶或浑圆状(反射光); Qtz—石英; Gn—方铅矿; Apy—毒砂; Py—黄铁矿; Thr—银黝铜矿(矿物缩写符号据沈其韩, 2009)

a—outcrops of mineralized alteration zone, the oxidation zone is reddish brown and the mineralization alteration occurs between sericite phyllite and pebbly phyllite; b—outcrops of mineralized alteration zone, the silicification (fading) and red oxidation zones (original sulfide mineralization zone) of the original phyllite are observed, and the lens of limestone in the phyllite also show significant silicification; c—stockwork vein galena ore, after breccification of silicified rocks, silver-lead sulfide stringer and stockwork vein are filled in the spaces between the brecciates; d—the silver-lead orebody in silicified limestone is found in the mining adit, it is north-dipping, variously porphyry with a width of about 0.6 m, and composed of galenite and silver tetrahedrite; e—the ore is mainly composed of coarse idiomorphic crystal galena and a small amount of anhedral crystal pyrite with metasomatic relict texture (reflected light); f—silver tetrahedrite is also found in the ore in addition to the main mineral coarse-grained tetrahedrite galena, silver tetrahedrite and pyrite are medium grain anhedral crystal structure, and often exhibit metasomatism of galena into residual crystal or round shape (reflected light); Qtz—quartz; Gn—galena; Apy—arsenopyrite; Py—pyrite; Thr—silver tetrahedrite(mineral abbreviation after Shen Qihan, 2009)



图 5 蓄集银铅矿床热液成矿阶段和矿物生成顺序

Fig. 5 Schematic representation of mineral paragenetic relationships associated with mineralization stages of the Xuji Ag-Pb ore deposit

表 1 蓄集银铅矿床硫同位素特征

Table 1 S isotopic results of sulfides from the Xuji Ag-Pb ore deposit

采样位置	样品编号	样品性质	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}/\text{\textperthousand}$
平硐内	XJ-01	方铅矿 <sup>a</sup>	8.4
平硐内	XJ-02	方铅矿 <sup>a</sup>	8.4
平硐内	XJ-03	方铅矿 <sup>a</sup>	7.9
平硐内	IV-G-1	黄铁矿 <sup>b</sup>	5.0
平硐内	XJL1-b-04	方铅矿 <sup>a</sup>	7.5

40.943, 平均值为 38.921。3 件蓄集峡口闪长岩全岩铅的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.442 \sim 18.589$ , 平均值为 18.528;  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.623 \sim 15.636$ , 平均值为 15.630;  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.790 \sim 30.033$ , 平均值为 38.942。

## 4 S、Pb 同位素组成的成矿学意义与矿床成因分析

### 4.1 S 同位素组成的成矿学意义

硫化物硫同位素可以示踪成矿热液系统中硫的来源 (Ohmoto, 1986; Hoefs, 1997; 李志丹等, 2015)。蓄集银铅矿床中金属矿物组合简单且仅为硫化物, 含硫矿物有方铅矿、银黝铜矿、黄铁矿和黄铜矿, 未发现硫酸盐类矿物, 说明矿床的形成环境属低氧逸度, 在这种环境下硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可以近似代表成矿热液中总硫同位素组成 (李永胜等, 2012)。蓄集银铅矿床硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.0‰ ~

8.4‰(表 1), 平均值为 7.4‰, 所以热液中 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 大致为 7.4‰。郑永飞等(2000)认为硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值在硫同位素分馏达到平衡的条件下,  $\delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{磁黄铁矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{闪锌矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铜矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}}$ , 蓄集银铅矿床 $\delta^{34}\text{S}_{\text{方铅矿}} > \delta^{34}\text{S}_{\text{黄铁矿}}$ , 与硫化物平衡顺序不一致, 说明成矿热液系统中硫同位素未达到分馏平衡, 这与显微镜下观察到方铅矿交代黄铁矿的现象一致 (图 4e), 说明它们或者是不同温度形成的, 或者是不同矿化阶段的产物 (何鹏等, 2018)。蓄集银铅矿石中黄铁矿形成于较早的黄铁矿-石英矿化阶段, 而方铅矿形成于较晚的银铅硫化物矿化阶段, 因此蓄集矿石硫同位素分馏不平衡可能与矿石中硫化物矿物形成于热液成矿不同阶段有关。

蓄集银铅矿床中硫化物矿物 $\delta^{34}\text{S}$ 值变化范围较狭窄, 暗示硫的来源比较单一。矿石中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.0‰, 处在中酸性岩浆硫之范围内 ( $\delta^{34}\text{S} = 0 \pm 5\text{\textperthousand}$ , Ohmoto and Rye, 1979), 反映热液矿化早阶段硫化物中的硫主要来自岩浆, 其成矿与构造岩浆活动相关的热液作用关系密切。蓄集银铅矿石中方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 7.5‰ ~ 8.4‰, 已超出中酸性岩浆硫范围 ( $0 \pm 5\text{\textperthousand}$ )。热液系统中, 硫化物矿物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值超出  $0 \pm 5\text{\textperthousand}$  的范围, 多认为是由于岩浆热液和围岩的相互作用导致 (储雪蕾等, 2002; 王长明等, 2011)。推测蓄集银铅矿床银铅硫化物矿化阶段, 岩浆热液与围岩有较为明显的相互作用, 但矿石中方铅矿的 $\delta^{34}\text{S}$ 值比中酸性岩浆的 $\delta^{34}\text{S}$ 值的偏离不算太大 (图

表2 蓄集银铅矿床矿石和岩石铅同位素组成分析结果

Table 2 The analytical results of the Pb isotopic compositions of the ore and the rock in the Xiji Ag-Pb ore deposit

采样位置	样号	岩性	测试对象	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$t = 257.8 \text{ Ma}$			
							$\mu$	$\omega$	$\Delta\alpha$	$\Delta\beta$
平峒内	III-G-2	斑杂状矿石	方铅矿	17.901	15.617	38.166	9.56	38.44	74.55	21.19
平峒内	W-G-1	斑杂状矿石	方铅矿	17.922	15.589	38.072	9.50	37.63	71.93	19.07
平峒内	XJ-G-4	斑杂状矿石	方铅矿	17.896	15.604	38.105	9.54	38.08	73.32	20.27
3号勘探线地表	XJL1-03	灰白色灰岩	全岩	18.003	15.600	38.106	9.51	37.41	56.71	18.45
3号勘探线地表	XJL1-05	千枚岩	全岩	18.182	15.602	38.182	9.49	36.73	67.22	18.59
3号勘探线地表	XJL1-06	千枚岩	全岩	17.949	15.696	38.138	9.72	38.80	53.54	24.72
3号勘探线地表	XJL1-01	千枚岩	全岩	18.633	15.613	39.237	9.47	38.62	93.69	19.30
3号勘探线地表	XJL1-02	灰白色灰岩	全岩	18.976	15.680	40.943	9.57	43.95	113.83	23.68
蓄集峡口地表	XJYT-01	闪长岩	全岩	18.553	15.631	39.005	9.51	38.32	89.00	20.48
蓄集峡口地表	XJYT-02	闪长岩	全岩	18.589	15.636	39.033	9.52	38.28	91.11	20.80
蓄集峡口地表	XJYT-04	闪长岩	全岩	18.442	15.623	38.790	9.51	38.00	82.48	19.96

注:  $\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$ ,  $\omega = {}^{232}\text{Th}/{}^{204}\text{Pb}$ ,  $\beta = {}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ ,  $\alpha = {}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ ,  $\gamma = {}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}$ ,  $\Delta\alpha = [\alpha/\alpha M(t) - 1] \times 1000$ ,  $\Delta\beta = [\beta/\beta M(t) - 1] \times 1000$ ,  $\Delta\gamma = [\gamma/\gamma M(t) - 1] \times 1000$ , 其中  $\alpha M(t)$ 、  
 $\beta M(t)$ 、 $\gamma M(t)$  为  $t$  时地幔值;  ${}^{206}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}_{(i)}$ 、 ${}^{207}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}_{(i)}$  和  ${}^{208}\text{Pb}/{}^{204}\text{Pb}_{(i)}$  为全岩铅根据岩石 U、Th、Pb 微量元素含量校正到 257.8 Ma 的值。

6),故所研究矿床矿石硫主体来自岩浆的特点明显,在岩浆热液与围岩相互作用过程中,有少量地层来源硫的加入。事实上,蓄集矿区矿石具有斑杂状和网脉状构造,且近矿体围岩硅化强烈,这些特征也说明蓄集银铅矿体的形成与构造岩浆活动相关的热液作用关系密切。蓄集矿区虽未见岩体出露,但在矿

区西约5 km处的蓄集峡口地区出露有晚二叠世闪长岩体,该闪长岩体的锆石U-Pb年龄为 $257.8 \pm 2$  Ma(青海省地质调查院,2016)<sup>①</sup>,蓄集矿床的形成应该与该岩体相关的热液作用有关,那么大致可以确定矿床最早成矿年龄为 $257.8 \pm 2$  Ma。

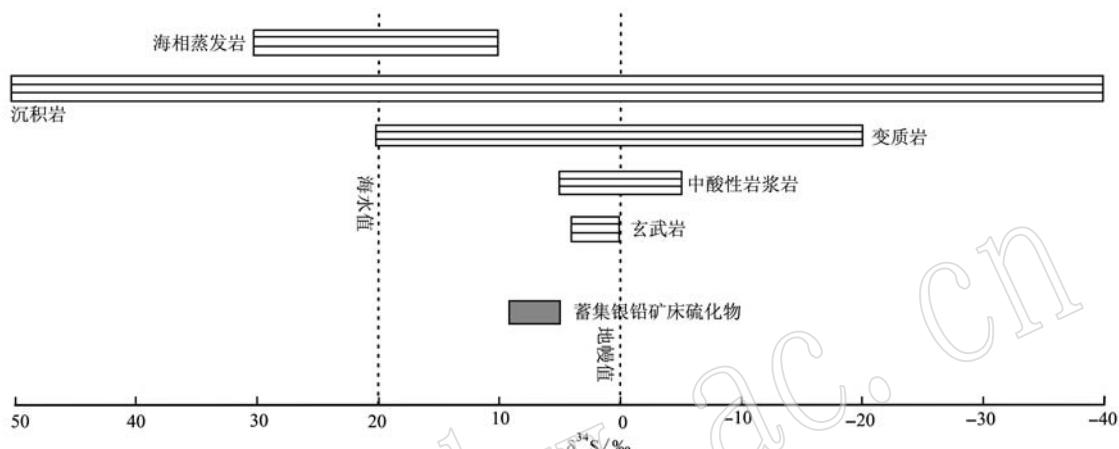


图6 蓄集银铅矿床S同位素组成和全球重要的S同位素储库(底图据Hoefs, 2009修编)

Fig. 6 Sulfur isotopic compositions of sulfides in the Xuji Ag-Pb ore deposit and some important sulfur isotope reservoirs  
(modified after Hoefs, 2009)

#### 4.2 Pb同位素组成的成矿学意义

硫化物矿石中不含U、Th,或U、Th含量极低,与矿物中的铅含量相比可忽略不计,矿物形成后不再有放射性成因铅的明显加入,故矿石铅不需要进行校正(吴开兴等,2002)。全岩中U、Th含量较高,会不断有新的放射成因铅生成,必须扣除后期积累的放射性铅,本次根据蓄集矿床与蓄集峡口闪长岩体的关系,确定了最早的成矿年龄为257.8 Ma,故依据岩石的U、Th、Pb含量对全岩铅同位素组成校正到257.8 Ma。根据围岩全岩铅所含放射成因铅的不同,可将其分为2组:第1组有2件样品(XJL1-01和XJL1-02),具有富放射成因铅的特征, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 18.629 \sim 18.972$ ,平均值为18.800, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 15.613 \sim 15.680$ ,平均值为15.647, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 39.236 \sim 40.942$ ,平均值为40.089;第2组有3件样品(XJL1-03、XJL1-05和XJL1-06),具有低放射成因铅的特征, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 17.945 \sim 18.178$ ,平均值为18.040, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 15.600 \sim 15.696$ ,平均值为15.633, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 38.106 \sim 38.182$ ,平均

值为38.142。蓄集峡口闪长岩校正后的全岩铅 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 18.225 \sim 18.370$ ,平均值为18.310, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 15.612 \sim 15.625$ ,平均值为15.619, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}_{(i)} = 37.972 \sim 38.211$ ,平均值为38.122,也具有富放射成因铅特征。

全方位对比示踪法是使用铅同位素示踪物源的首选方法,也是国际上认同的办法(张乾等,2000;吴开兴等,2002),就是利用矿石、岩浆岩、地层和基底铅同位素全方位对比判别矿石铅同位素的来源。蓄集矿床矿石铅与第2组围岩铅同位素组成较为相似,但围岩铅同位素组成分布范围较矿石铅大,表明矿石铅与围岩铅的来源具同源性,但是围岩铅的来源比矿石铅复杂。矿石铅与蓄集峡口闪长岩铅同位素组成相差较大,表明矿石铅源与蓄集峡口闪长岩体关系不大。运用Zartman等(1981)发表的铅构造模式图(图7),可以推断成矿物质来源。蓄集矿床矿石铅与第2组围岩铅的范围基本重合,几乎都落在造山带演化线附近,仅1件围岩铅样品落入上地壳铅演化线附近(图7),投影点位于造山带增长线附

<sup>①</sup>青海省地质调查院. 2016. 青海省德令哈市宗务隆山地区六幅1:5万区域地质矿产调查报告.

近,表明各储库混合源。蓄集银铅矿区围岩为上石炭-下二叠统宗务隆群果可山组,由碎屑岩、灰岩和少量基性火山岩组成,碎屑物质主要来自构造带以南的柴北缘古老地层(袁亚娟等,2012;彭渊等,2018),基性火山岩代表幔源物质,表明围岩由壳源物质和少量幔源物质组成,故围岩铅主要源于地壳,同时也有部分铅源于地幔。蓄集矿床矿石铅 $\mu=9.50\sim9.56$ ,平均值为9.53;  $\omega=37.63\sim38.44$ ,

平均值为38.05,矿石铅 $\mu$ 值均低于平均地壳铅的 $\mu$ 值(9.74,Doe and Zartman,1979), $\omega$ 值均高于平均地壳铅的 $\omega$ 值(36.84,Doe and Zartman,1979),反映了矿石铅具有下地壳来源特征(Kamona et al.,1999;吴开兴等,2002),可能有地幔物质加入。蓄集矿床矿石铅与围岩铅同位素组成的相似性,显示了蓄集矿床成矿物质来自围岩。

朱炳泉等(1998)根据不同类型岩石铅资料和已

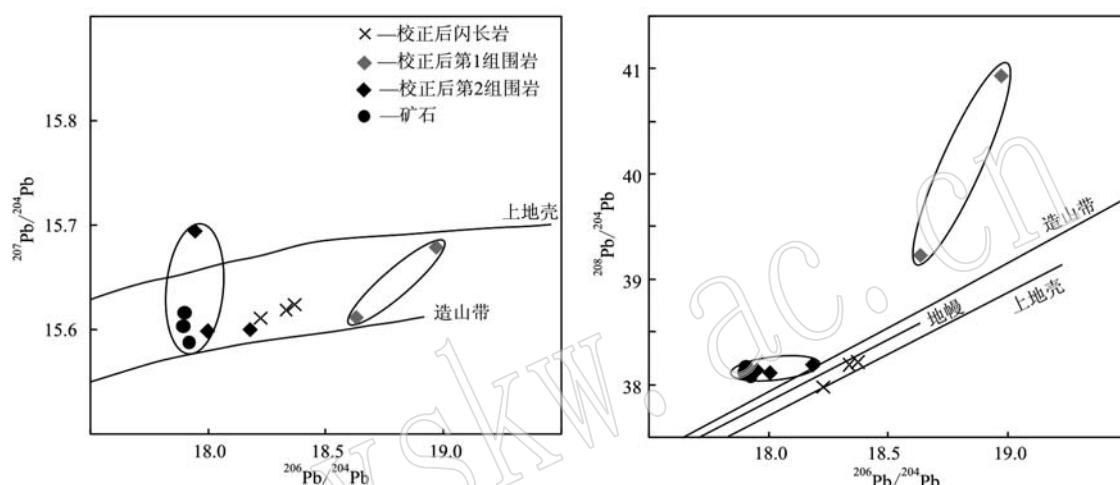


图7 蓄集银铅矿床矿石、围岩和蓄集峡口闪长岩铅同位素构造图解(底图据Zartman and Doe, 1981)

Fig. 7 Pb isotope diagrams of the Xuji Ag-Pb deposit, host rock and diorite in Xujixiakou (after Zartman and Doe, 1981)

知成因的矿石铅资料,提出了铅同位素的 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图解,该方法可以消除时间因素的影响。据此本文计算出蓄集矿床矿石铅、围岩铅和蓄集闪长岩体铅与同时代地幔相对偏差 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 和 $\Delta\gamma$ (表2),并投影到矿石铅同位素的 $\Delta\gamma-\Delta\beta$ 成因分类图解上(图8)。矿石和第2组围岩均落入上地壳与地幔混合的俯冲带铅区域,再次说明了它们具有相同的演化历史或起源,且与俯冲碰撞带环境的岩浆作用有关,与前文硫同位素讨论的结果一致。第1组围岩和蓄集闪长岩落入了上地壳铅源范围内,暗示在第1组围岩和蓄集闪长岩中混染了放射性成因铅。

#### 4.3 矿床成因分析

蓄集银铅矿床产于宗务隆构造带内上石炭-下二叠统宗务隆群果可山组内的绢云母千枚岩与灰岩过渡层位,矿体受近东西向逆断裂控制,矿体呈脉状,矿体围岩蚀变主要表现为硅化和绢云母化,矿石主要金属矿物为方铅矿和银黝铜矿,构造为斑杂状和网脉状,热液矿化经历了黄铁矿-石英-银铅硫

化物和碳酸盐3个阶段,热液交代-充填成矿特征明显。硫同位素研究表明矿石硫主要来自岩浆,且成矿与晚二叠世蓄集峡口闪长岩体有成因联系,铅同位素研究表明蓄集矿床成矿物质主要来自围岩。

结合宗务隆构造带地质构造演化,早泥盆世(393.5 Ma, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄,孙延贵等,2004)该带发生初始裂陷,晚石炭世出现宗务隆有限洋盆(318 Ma,Rb-Sr年龄,王毅智等,2001),沉积了富含金属物质的碎屑岩、灰岩和基性火山岩组成的宗务隆群(张雪亭等,2010);晚二叠世洋壳向南俯冲,形成弧型花岗岩类(240~258 Ma,U-Pb年龄,强娟,2008;郭安林等,2009;Chen et al., 2012;程婷婷,2015;彭渊等,2016;王玉松,2017;牛漫兰等,2018;Wu et al., 2019),该期花岗岩类在演化过程中与宗务隆群发生相互作用,使宗务隆群中的金属物质进一步富集,受近东西向层间断裂控制沉淀成矿。

综合分析,蓄集银铅矿床应属岩浆热液为主的热液充填-交代成因类型。

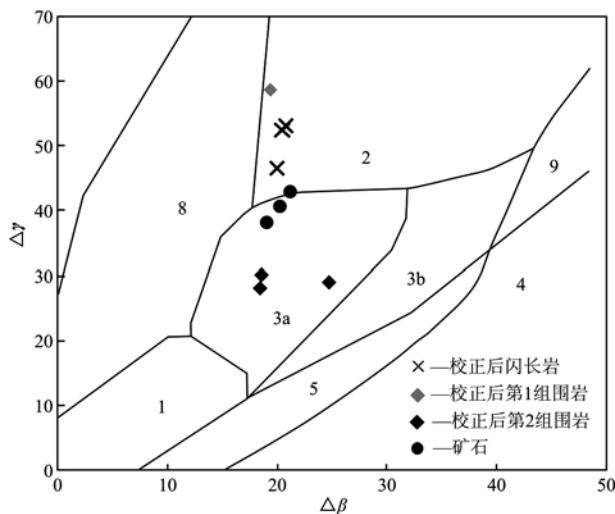


图 8 蓄集铅银矿床铅同位素  $\Delta\gamma - \Delta\beta$  图解(底图据  
朱炳泉等, 1998)

Fig. 8 Pb isotope  $\Delta\gamma - \Delta\beta$  diagram of the Xuji Ag-Pb deposit  
(after Zhu Bingquan et al., 1998)

1—地幔源铅; 2—上地壳源铅; 3—上地壳与地幔混合的俯冲铅;  
3a—岩浆作用铅; 3b—沉积作用铅; 4—化学沉积型铅; 5—海底  
热水作用铅; 8—造山带铅; 9—古老页岩上地壳铅  
1—mantle-derived lead; 2—upper crust lead; 3—mixed lead of upper  
crust and mantle subduction; 3a—magmatism lead; 3b—sedimenta-  
tion; 4—chemical sedimentary lead; 5—submarine hydrothermal lead;  
8—orogenic belt lead; 9—upper crust lead of ancient shale

## 5 结论

(1) 蓄集银铅矿床成矿热液  $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}} = 7.4\%$ , 与中酸性岩浆硫  $\delta^{34}\text{S}(0 \pm 5\%)$  的偏离不算太大, 反映了成矿热液的硫主要来自岩浆, 有少量地层来源硫的加入, 蓄集峡口晚二叠世闪长岩体的发现, 表明蓄集矿床的形成与晚二叠世构造岩浆活动的热液作用密切相关。

(2) 铅同位素组成特征分析表明, 蓄集矿床矿石铅同位素组成与围岩铅同位素组成具有相似性, 而与蓄集峡口闪长岩体铅同位素相差甚远, 说明成矿物质主要来自围岩。

(3) 蓄集银铅矿床的形成与宗务隆构造带晚二叠世洋壳俯冲阶段的构造岩浆活动关系密切, 岩浆热液为成矿提供主要硫, 流体沿着断裂上升过程中萃取上石炭-下二叠世宗务隆群中的金属成矿物质, 在其有利构造部位富集成矿, 应属岩浆热液为主的热液充填-交代成因类型。

## References

- Chen X H, Gehrels G, Yin A, et al. 2012. Paleozoic and Mesozoic base-  
ment magmatisms of eastern Qaidam Basin, northern Qinghai-  
Tibetan Plateau: LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and its geo-  
logical significance[J]. Acta Geologica Sinica, 86(2): 350 ~ 369.
- Chen Nengsong, Wang Xinyu, Zhang Hongfei, et al. 2007. Geochemistry  
and Nd-Sr-Pb isotopic compositions of granitoids from Qaidam and  
Oulongbuluke micro-blocks, NW China: Constraints on basement  
nature and tectonic affinity[J]. Earth Sciences (Journal of China  
University of Geosciences), 32(1): 7 ~ 21(in Chinese with English  
abstract).
- Cheng Tingting. 2015. Zircon U-Pb Dating and Tectonic Setting of Intrusive  
Rocks in Wulan along the North Magion of Qaidam Terrane  
[D]. Master Degree Thesis. Hefei: Hefei University of Technology  
(in Chinese with English abstract).
- Chu Xuelei, Huo Weiguo and Zhang Xun. 2002. S, C, and Pb isotopes  
and sources of metallogenetic elements of the Dajing Cu-polymetallic  
deposit in Linxi County, Inner Mongolia, China[J]. Acta Petrologica  
Sinica, 18(4): 566 ~ 574(in Chinese with English abstract).
- Doe B R and Zartman R E. 1979. Plumbotectonics, the Phanerozoic  
[A]. Barnes H L. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits(2nd  
Edition)[C]. New York: Wiley, 22 ~ 70.
- Duan Shigang, Xue Chunji, Li Ye, et al. 2012. Geology, fluid inclu-  
sions and isotopic geochemistry of Kuergasheng lead-zinc deposit in  
western Tianshan, Xinjiang[J]. Mineral Deposits, 31(5): 1 014  
~ 1 024(in Chinese with English abstract).
- Guo Anlin, Zhang Guowei, Qiang Juan, et al. 2009. Indosinian Zongwu-  
long orogenic belt on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet  
Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(1): 1 ~ 12(in Chinese  
with English abstract).
- He Peng, Guo Shuo, Zhang Tianfu, et al. 2018. The sources of ore-forming  
materials and genesis of the Zhamuqin Pb-ZnAg polymetallic de-  
posit in the middle-southern segment of Da Hinggan Mountains:  
Constraints from S, Pb isotope geochemistry[J]. Acta Petrologica  
Sinica, 34(12): 3 597 ~ 3 610(in Chinese with English abstract).
- Hoefs J. 1997. Stable Isotope Geochemistry (4th Edition)[M]. Berlin:  
Springer, 199 ~ 201.
- Hoefs J. 2009. Stable Isotope Geochemistry[M]. Berlin: Springer, 285.

- Kamona A F, Lévéque J, Friedrich G, et al. 1999. Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe, Tsumeb, and Kipushi Pb-Zn-Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damaran-Lufilian fold belt of Central Africa[J]. *Mineralium Deposita*, 34(3): 273~283.
- Li Ping'an and Nie Shuren. 1982. Structural characteristics of Zongwulong rift[J]. *Geology of Qinghai*, 7(2): 65~76(in Chinese with English abstract).
- Li Yongsheng, Lü Zhicheng, Yan Guangsheng, et al. 2012. Isotopic characteristics of S, Pb, H and O of Jiamu copper-polymetallic ore deposit, Tibet and their significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 72~81(in Chinese with English abstract).
- Li Zhidan, Yu Reng'an, Wang Jiaying, et al. 2015. Geological characteristics and sulfur and lead isotopic geochemistry of the Changfulong-gou gold deposit in Inner Mongolia[J]. *Geology and Exploration*, 51(3): 414~421(in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Gao Shan, Cheng Jianping, et al. 2006. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: Constraint from the ELA-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Huangling and Hannan complexes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 387~396(in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Wang Huichu, Li Huikun, et al. 2002. Redefinition of the "Dakendaban Group" on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(1): 19~23(in Chinese with English abstract).
- Niu Manlan, Zhao Qiqi, Wu Qi, et al. 2018. Magma mixing identified in the Guokeshan pluton, northern margin of the Qaidam basin: Evidences from petrography, mineral chemistry, and whole-rock geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 1991~2016(in Chinese with English abstract).
- Ohmoto H. 1986. Stable isotope geochemistry of ore deposits[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 16(1): 491~559.
- Ohmoto H and Rye R O. 1979. Isotopes of sulfur and carbon[A]. Barnes H L. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits (2nd Edition)* [C]. New York: Wiley, 509~567.
- Peng Yuan. 2015. The Late Hercynian-Indosinian Structural Characteristics of the Zongwulong Tectonic Belt in North Qaidam Basin[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences(in Chinese).
- Peng Yuan, Ma Yinsheng, Liu Chenglin, et al. 2016. Geological characteristics and tectonic significance of the Indosinian granodiorites from the Zongwulong tectonic belt in North Qaidam[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 206~221(in Chinese with English abstract).
- Peng Yuan, Zhang Yongsheng, Sun Jiaopeng, et al. 2018. Provenance and tectonic setting of the Zhongwunongshan Group from the Zhongwunongshan structural belt and its adjacent areas in North Qaidam, China: Evidence from geochemistry and detrital zircon geochronology[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 42(1): 126~149(in Chinese with English abstract).
- Qian Bing, Zhang Zhaowei, Wang Yalei, et al. 2017. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and metallogensis of the Hudesheng mafic-ultramafic intrusion in the Eastern Section of Northern Qaidam Basin[J]. *Geology and Exploration*, 53(5): 838~854(in Chinese with English abstract).
- Qiang Juan. 2008. The Granitoids in Zongwulong Tectonic Zone on the Northeastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau and Its Tectonic Significance[D]. Xi'an: Northwest University, 26~43(in Chinese with English abstract).
- Shao Y X, Li Z M, Zhang B, et al. 2017. Paleoseismological study of the southern Zongwulong Shan fault, Qilian Mountains, western China[J]. *Geomorphology*, 12(36): 1~9.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 495~500(in Chinese with English abstract).
- Sun Yangui, Zhang Guowei, Wang Jin, et al. 2004.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age of the basic sill swarms of two periods in the junction area of Qinling and Kunlun and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 65~71(in Chinese with English abstract).
- Wang Changming, Xu Yigan, Wu Ganguo, et al. 2011. C, O, S and Pb isotopes characteristics and sources of the ore metals of the Lengshuikeng Ag-Pb-Zn ore field, Jiangxi[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 179~193(in Chinese with English abstract).
- Wang Suli and Zhou Lifan. 2016. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, geochemistry and tectonic implication of the bojite in the Zongwulong Mountain[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 46(5): 716~724(in Chinese with English abstract).
- Wang Yizhi, Bai Yongshan and Lu Hailian. 2001. Geological characteristics of Tianjunnanshan ophiolite in Qinghai and its forming environment[J]. *Qinghai Geology*, 21(1): 29~35(in Chinese with English abstract).
- Wang Yusong, Niu Manlan, Li Xiucui, et al. 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and pertogenetic of the quartz-diorites from the Guokeshan area in the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 94~110(in Chinese with English abstract).
- Wu C L, Wu D, Mattinson C, et al. 2019. Petrogenesis of granitoids in the Wulan area: Magmatic activity and tectonic evolution in the

- North Qaidam, NW China[J]. *Gondwana Research*, 67: 147 ~ 171.
- Wu Kaixing, Hu Ruizhong, Bi Xianwu, et al. 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).
- Xin Houtian, Wang Huichu and Zhou Shijun. 2006. Geological events and tectonic evolution of the North Margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 29(4): 311 ~ 320 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Wang Xibin, Shi Rendeng, et al. 2004. The Dur'ngoi ophiolite in East Kunlun, northern Qinghai-Tibet Plateau: A fragment of paleo-Tethyan oceanic crust[J]. *Geology in China*, 31(3): 225 ~ 239 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Yajuan, Xia Bin, Lü Baofeng, et al. 2012. Sedimentary characteristics of the Carboniferous strata and reconstruction of the prototype basin in the eastern part of northern Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(1): 12 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Doe B R. 1981. Plumbotectonics: the model[J]. *Tectonophysics*, 75(1): 135 ~ 162.
- Zhang Bowen. 2010. Study on Metalliferous Deposits Mineralization in Southern Qilian Orogenic Belt, Qinghai Province[D]. Changchun: Jinlin University, 15 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L, Wang Q Y, Chen N S, et al. 2014. Geochemistry and detrital zircon U-Pb and Hf isotopes of the paragneiss suite from the Quanji massif, SE Tarim Craton: Implications for Paleoproterozoic tectonics in NW China[J]. *Asian Earth Science*, 95(95): 33 ~ 50.
- Zhang Qian, Pan Jiayong and Shao Shuxun. 2000. An interpretation of ore lead sources from lead isotopic compositions of some ore deposits in China[J]. *Geochimica*, 29(3): 231 ~ 238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xueting, Yang Shengde and Yang Zhanjun. 2010. The Regional Geology of Qinghai Province—A Guide to the Geological Map of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 7 ~ 162 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Yongfei and Chen Jiangfeng. 2000. Stable Isotope Geochemistry [M]. Beijing: Science Press, 1 ~ 316 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Bingquan, Li Xianhua and Dai Tongmo. 1998. Theory and Application of the Isotopic Systematics in the Earth Sciences—Crust-Mantle Evolution in the Continent of China[M]. Beijing: Science Press, 216 ~ 230 (in Chinese with English abstract).
- 陈能松, 王新宇, 张宏飞, 等. 2007. 柴-欧微地块花岗岩地球化学和 Nd-Sr-Pb 同位素组成: 基地性质和构造属性启示[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 32(1): 7 ~ 21.
- 程婷婷. 2015. 柴北缘乌兰地区三叠纪侵入岩锆石 U-Pb 定年及其形成环境探讨[D]. 合肥: 合肥工业大学.
- 储雪蕾, 霍卫国, 张 巍. 2002. 内蒙古林西县大井铜多金属矿床的硫、碳和铅同位素及成矿物质来源[J]. *岩石学报*, 18(4): 566 ~ 574.
- 段士刚, 薛春纪, 李 野, 等. 2012. 新疆库尔尕生铅锌矿床地质、流体包裹体和同位素地球化学[J]. *矿床地质*, 31(5): 1 014 ~ 1 024.
- 郭安林, 张国伟, 强 娟, 等. 2009. 青藏高原东北缘印支期宗务隆造山带[J]. *岩石学报*, 25(1): 1 ~ 12.
- 何 鹏, 郭 硕, 张天福, 等. 2018. 大兴安岭中南段扎木钦铅锌银多金属矿床成矿物质来源及矿床成因: 来自 S、Pb 同位素的制约[J]. *岩石学报*, 34(12): 3 597 ~ 3 610.
- 李平安, 聂树人. 1985. 宗务隆裂陷槽的构造特征[J]. *青海地质*, 7(2): 65 ~ 76.
- 李永胜, 吕志成, 严光生, 等. 2012. 西藏甲玛铜多金属矿床 S-Pb-H-O 同位素特征及其指示意义[J]. *地学前缘*, 19(4): 72 ~ 81.
- 李志丹, 俞邵安, 王佳营, 等. 2015. 内蒙古常福龙沟金矿床地质特征和硫、铅同位素地球化学[J]. *地质与勘探*, 51(3): 414 ~ 421.
- 凌文黎, 高 山, 程建萍, 等. 2006. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICP MS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束[J]. *岩石学报*, 22(2): 387 ~ 396.
- 陆松年, 王惠初, 李怀坤, 等. 2002. 柴达木盆地北缘“达肯大坂群”的再厘定[J]. *地质通报*, 21(1): 19 ~ 23.
- 牛漫兰, 赵齐齐, 吴 齐, 等. 2018. 柴北缘果可山岩体的岩浆混合作用: 来自岩相学、矿物学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 34(7): 1 991 ~ 2 016.
- 彭 渊. 2015. 柴北缘宗务隆构造带海西晚期印支期构造特征研究[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 彭 渊, 马寅生, 刘成林, 等. 2016. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗闪长岩地质特征及其构造意义[J]. *地学前缘*, 23(2): 206 ~ 221.
- 彭 渊, 张永生, 孙娇鹏, 等. 2018. 柴北缘北部中吾农山构造带及

## 附中文参考文献

- 邻区中吾农山群物源和构造环境:来自地球化学与锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 大地构造与成矿, 42(1): 126~149.
- 钱兵, 张照伟, 王亚磊, 等. 2017. 柴达木北缘东段呼德生镁铁-超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成岩成矿分析[J]. 地质与勘探, 53(5): 838~854.
- 强娟. 2008. 青藏高原东北缘宗务隆构造带花岗岩及其构造意义[D]. 西安: 西北大学, 26~43.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 495~500.
- 孙延贵, 张国伟, 王瑾, 等. 2004. 秦昆结合区两期基性岩墙群  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年及其构造意义[J]. 地质学报, 78(1): 65~71.
- 王长明, 徐贻赣, 吴淦国, 等. 2011. 江西冷水坑 Ag-Pb-Zn 矿田碳、氧、硫、铅同位素特征及成矿物质来源[J]. 地学前缘, 18(1): 179~193.
- 王苏里, 周立发. 2016. 宗务隆山角闪辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北大学学报(自然科学版), 46(5): 716~724.
- 王毅智, 拜永山, 陆海莲. 2001. 青海天峻南山蛇绿岩的地质特征及其形成环境[J]. 青海地质, 21(1): 29~35.
- 王玉松, 牛漫兰, 李秀财, 等. 2017. 柴达木盆地北缘果可山石英闪光岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其成因[J]. 地质学报, 91(1): 94~110.
- 吴开兴, 胡瑞忠, 毕献武, 等. 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.
- 辛后田, 王惠初, 周世军. 2006. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群[J]. 地质调查与研究, 29(4): 311~320.
- 杨经绥, 王希斌, 史仁灯, 等. 2004. 青藏高原北部东昆仑南缘德尔尼蛇绿岩:一个被肢解了的古特提斯洋壳[J]. 中国地质, 31(3): 225~239.
- 袁亚娟, 夏斌, 吕宝凤, 等. 2012. 柴北缘东段石炭纪沉积特征及原型盆地恢复[J]. 沉积与特提斯地质, 32(1): 12~17.
- 张博文. 2010. 青海南祁连造山带内生金属矿床成矿作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 15.
- 张乾, 潘家永, 邵树勋. 2000. 中国某些金属矿床矿石铅来源的铅同位素诠释[J]. 地球化学, 29(3): 231~238.
- 张雪亭, 杨生德, 杨站军. 2010. 青海省区域地质概论——1:100 万青海省地质图说明书[M]. 北京: 地质出版社, 7~162.
- 郑永飞, 陈江峰. 2000. 稳定同位素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 153~270.
- 朱炳泉, 李献华, 戴樟漠. 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, 216~230.