

新疆东天山照壁山金铅锌多金属矿床地质特征 及矿床成因*

张雪琴^{1,2}, 徐登峰³, 赵云^{1,2**}, 薛春纪^{1,4}, 刘一浩¹, 李旭广¹, 陈波³, 游延祥⁵

(1 中国地质大学(北京), 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室 长安大学, 陕西 西安 710054; 3 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第二区域地质调查大队, 新疆 昌吉 831100; 4 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室, 新疆 乌鲁木齐 830000; 5 新疆天池能源有限责任公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要 照壁山金铅锌多金属矿床位于东天山博格达岛弧带中部, 是近年来新发现的矿床。矿体赋存于柳树沟组第三岩性段火山岩-火山碎屑岩中, 以脉状、浸染状矿化为主, 发育硅化、明矾石化蚀变, 其成矿过程可分为 3 个阶段: ① 石英-黄铁矿-毒砂阶段(I); ② 石英-金-黄铁矿-闪锌矿-方铅矿阶段(II); ③ 石英-黄铁矿-黄铜矿阶段(III)。赋矿围岩为双峰式火山岩组合, 玄武岩高 Mg($Mg^{\#}=36.25\% \sim 58.77\%$)、富钠贫钾($w(Na_2O+K_2O)=1.95 \sim 27.35$), 铝饱和指数(A/CNK)在 1.25~1.69 之间, 属过铝质拉斑玄武岩系列, 较高的 La/Nb(2.49~3.83)、Ba/Nb(41.00~315.38)、Ba/La(14.50~92.45)比值, 反映了玄武质岩浆受到了一定的地壳物质混染, Rb、Ba、K 等元素相对富集, Th、Nb、Ta 等元素相对亏损, 具有板内玄武岩的特征; 流纹岩具有较高的全碱含量($w(Na_2O+K_2O)=9.50 \sim 12.45$), 属钾玄岩系列, 轻微富集轻稀土, 富集 Rb、U、K 等元素, 亏损 Nb、Ta、Sr、Ti 等元素, 反映了流纹岩来源于地壳物质的部分熔融; 石英脉中的流体包裹体主要为气液两相, 均一温度为 194.2~253.5°C(II)、156.7~201.6°C(III), 盐度为 7.9%~13.2%(II)、7.3%~12.4%(III), 成矿流体表现为中温、中低盐度、低氧逸度、低 pH 值特征; δD_{v-SMOW} 变化范围为 -115.7‰~-95.4‰, δO_{v-SMOW} 变化范围为 -0.51‰~7.19‰, 表明成矿流体为岩浆热液与大气降水的混合热液。结合系统的地质、地球化学对比, 文章推测照壁山金铅锌多金属矿床为中硫型浅成低温热液矿床。

关键词 地质特征; 矿床成因; 浅成低温热液; 博格达岛弧带; 东天山

中图分类号: P618.42; P618.51

文献标志码: A

Geological characteristics and ore genesis of Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit in eastern Tianshan, Xinjiang

ZHANG XueQin^{1,2}, XU DengFeng³, ZHAO Yun^{1,2}, XUE ChunJi^{1,4}, LIU YiHao¹, LI XuGuang¹,
CHEN Bo³ and YOU YanXiang⁵

(1 School of Earth Sciences and Resources, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3 Second Regional Geological Survey Brigade of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources, Changji 831100, Xinjiang, China; 4 The National 305 Project Office of Xinjiang, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 5 Xinjiang Tianchi Energy Co. Ltd., Changji 831100, Xinjiang, China)

Abstract

The Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit is a new discovery in the middle segment of the Bogda is-

* 本文得到新疆维吾尔自治区人力资源和社会保障厅“天池英才”项目、地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题编号(编号: GPMR202307)、长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(编号: 300102263505)、企事业单位委托科技项目(编号: 3-4-2021-266)联合资助
第一作者简介 张雪琴, 1997年生, 女, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床学与矿床地球化学研究。Email: xueqin-youxiang0@163.com

** 通讯作者 赵云, 1988年生, 男, 副教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床学教学与科研工作。Email: yun.zhao@cugb.edu.cn
收稿日期 2023-05-19; 改回日期 2023-11-16。孟秋熠编辑。

land arc in Eastern Tianshan. The deposit is hosted by the volcanic-pyroclastic rocks of the third lithologic member of the Liushugou Formation, with the major type as veinlet and disseminated mineralization, silicification and alum alteration. The ore-forming process can be divided into three stages: ① quartz-pyrite-arsenopyrite stage(I); ② quartz-gold-pyrite-sphalerite-galena stage(II); ③ quartz-pyrite-chalcopyrite stage(III). The host rock is bimodal volcanic rock. The basalts have high values of Mg ($Mg^{\#}=36.25\% \sim 58.77\%$), Na_2O/K_2O (1.95~27.35), A/CNK (1.25~1.69), belonging to the peraluminous tholite series. The high La/Nb (2.49~3.83), Ba/Nb (41.00~315.38), Ba/La (14.50~92.45) ratios indicate that the basalts have experienced a certain degree of crustal contamination. These rocks are enriched in Rb, Ba, K and depleted in Th, Nb, Ta, which are comparable with the geochemical features of intraplate basalts. The rhyolites of bimodal volcanic rocks exhibit high ALK ($w(Na_2O+K_2O)=9.50 \sim 12.45$), belonging to the potassium basalt series. They are slightly enriched in rare LERR, Rb, U, K and depleted in Nb, Ta, Sr, Ti, which indicate that the rhyolites have been derived from partial melting of crustal materials. The primary fluid inclusions trapped in quartz are mainly composed of gas and liquid. Homogenization temperatures is 194.2~253.5°C (II), and 156.7~201.6°C (III). Salinity is 7.9%~13.2% (II), 7.3%~12.4% (III), respectively. The δD_{v-SMOW} values of fluid inclusion hosted by quartz vary from -115.7‰ to -95.4‰, and δO_{v-SMOW} values of ore-forming fluid using homogenization temperature method vary from -0.51‰ to 7.19‰, indicating that the ore-forming fluid is a mixture of magmatic water and meteoric water. Combined with systematic geological and geochemical comparison, it is concluded that the Zhaobihsan Au-Pb-Zn polymetallic deposit may belong to intermediate-sulfidation epithermal deposit.

Key words: geologic feature, deposit genesis, epithermal, Bogda island arc belt, Eastern Tianshan

天山是中亚造山带西南部规模巨大的增生型造山带(Xu et al., 2013; Tang et al., 2017),其地层发育齐全,岩浆活动强烈,构造复杂,发育多种矿产资源。东天山是天山造山带重要的组成部分,矿产资源丰富,已发现众多金、铅锌矿床,其中,金矿床类型多样,有浅成低温热液型、斑岩型、韧性剪切带型、岩浆热液型等类型(薛春纪等,1995;秦克章等,2003),主要集中分布于北天山岛弧带的南缘及中天山地块南缘(图1)(毛景文等,2002;杜亚龙等,2016),表明东天山具有较好的成矿条件和良好的找矿前景。但东天山博格达岛弧带仅发现少量小型矿床(如索尔巴斯陶金矿床),该带的金多金属成矿作用是地质学家关注的重要问题。

照壁山金铅锌多金属矿床是近年来东天山北部新发现的多金属矿床,位于博格达岛弧带内,其金估算资源量约1.92 t,铅+锌估算资源量约13.1万t,矿床规模达小型。以该矿床为例,分析地质特征和成因,理清矿床成因,有助于东天山博格达岛弧带找矿勘查研究。本文在系统的整理前人勘查和研究成果基础上,结合详尽的野外地质工作,开展矿物显微镜下观察、主微量元素特征、流体特征、同位素特征分析工作,试图梳理分析照壁山金铅锌多金属矿床的地质特征、流体及同位素特征,明确矿床的成矿类型。

1 区域地质特征

东天山位于中亚造山带西南部,北邻准噶尔盆地,南邻塔里木盆地,从北到南分为北天山岛弧带、中天山地块。北天山岛弧带南以阿奇克库都克断裂为界与中天山地块相邻,北与准噶尔地块相邻,主要由古生代火山-沉积岩和岩浆岩组成,带内发育的多条EW向断裂将其划分为不同的单元,从北向南依次为博格达-哈尔里克岛弧带、大南湖-头苏泉岛弧带、康古尔-黄山韧性剪切带、阿奇山-雅满苏岛弧带;中天山地块为阿奇克库都克断裂和卡瓦布拉克断裂之间的隆起带,主要由古生代火山岩-火山碎屑岩组成(Xiao et al., 2004; Charvet et al., 2011; 高荣臻等, 2021)。在中天山地块南北缘广泛产出大-中型金、铅锌矿床(图1)

东天山博格达岛弧带呈EW走向,位于准噶尔盆地和吐哈盆地之间,岛弧带内分布着大量的铜、铁、铅、锌矿点及少量金矿床(图2)。区内出露地层主要由石炭系的火山-沉积岩组成,局部发育二叠系、侏罗系、泥盆系,其中,石炭系分布面积广泛,约占总面积的37%,发育一套浅海相火山碎屑岩夹火山熔岩、陆源碎屑岩-碳酸盐岩沉积建造(靳刘圆,

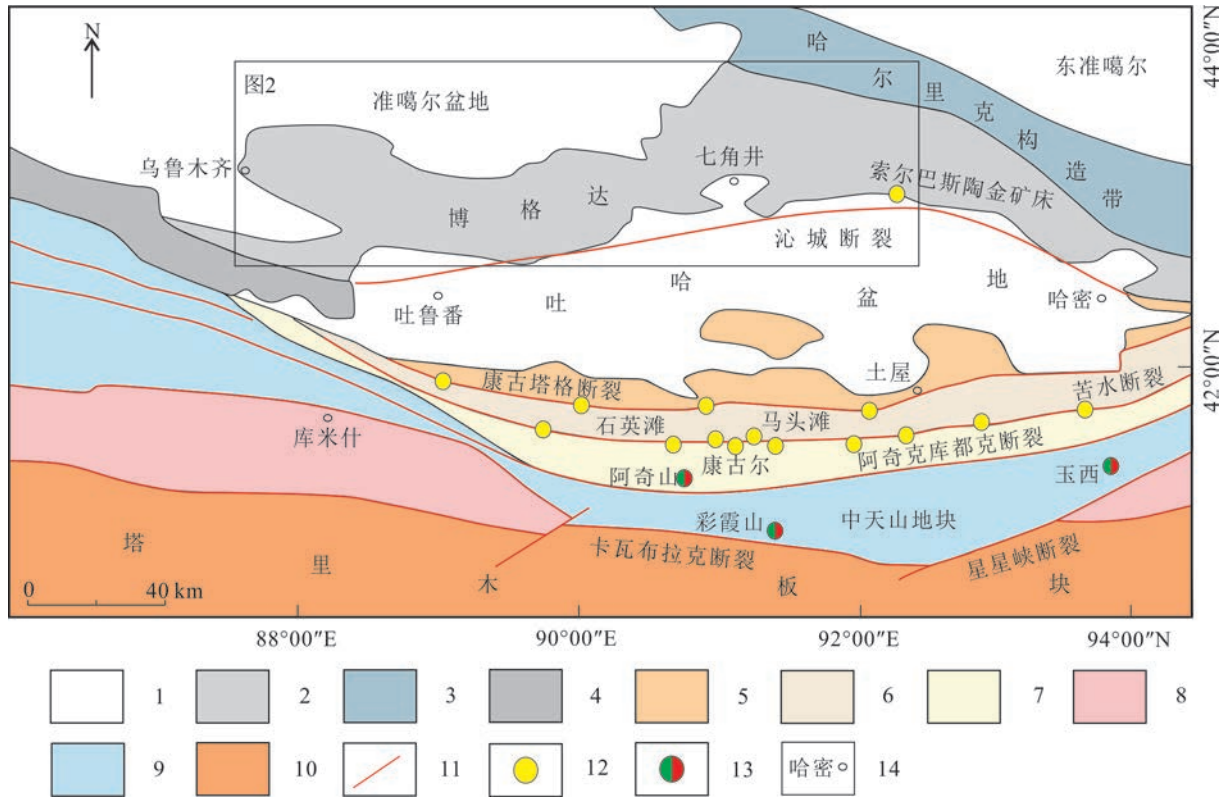


图 1 东天山地质矿产简图(底图据马星华等,2015修改)

1—中生代地体;2—博格达岛弧带;3—哈尔里克构造带;4—北天山弧增生杂岩;5—大南湖-头苏泉岛弧带;6—康古尔-黄山韧性剪切带;7—阿奇山-雅满苏岛弧带;8—库米什-红柳河增生杂岩;9—中天山地块;10—塔里木板块;11—断裂;12—金矿;13—铅锌矿;14—地名

Fig. 1 Geological map and distributions of ore deposits in the Eastern Tianshan (base map modified by Ma et al., 2015)

1—Mesozoic and Cenozoic rocks; 2—Bogda island arc; 3—Harlick tectonic belt; 4—North Tianshan accretionary complex; 5—Dananhu-Tousuquan island arc; 6—Kangur-huangshan ductile shear zone; 7—Aqishan-Yamansu island arc; 8—Kumishi-Hongliuhe accretionary complex; 9—Central Tianshan arc; 10—Tarim block; 11—Fault; 12—Gold deposit; 13—Pb-Zn deposit; 14—Place name

2014;周建仁,2014);区内火山岩分布广泛,岩浆活动强烈,表现为东部强,以酸性侵入岩为主;西部弱,以基性侵入岩为主的特征,岩性主要为辉绿岩、闪长岩、钾长花岗岩等,主要侵位于上石炭统,其中,辉绿岩分布广泛,呈岩床状产出,中酸性侵入岩主要呈小岩株、岩枝状产出。区域断裂发育,主要由3~5条大型近EW向压扭性逆断裂构成,规模延伸较远;次级断裂发育有NE向、NEE向和NW向,其中以NE向、NEE向断裂为主,NW向断裂次之(图2)。

2 矿区地质特征

矿区出露地层为上石炭统柳树沟组(C₂l)、上石炭统祁家沟组(C₂qi)和第四系(Q),其中柳树沟组和祁家沟组呈不整合接触(图3)。柳树沟组分为3个岩性段:第一岩性段(C₂l¹):岩性以凝灰岩、角砾岩、

安山岩等为主,为一套中-基性火山碎屑岩夹火山熔岩建造;第二岩性段(C₂l²):主要为一套中-基性火山碎屑岩、火山熔岩夹砂岩等陆源碎屑岩建造,局部夹有碳酸盐岩透镜体,岩性以灰岩、凝灰岩、安山岩、砂岩等为主;第三岩性段(C₂l³):岩性以安山质凝灰岩、玄武岩、安山岩、火山角砾岩、灰岩等为主,主要为一套中-基性火山碎屑岩、火山熔岩建造,偶夹碎屑岩,矿化带主要分布于第三岩性段内。陶威等(2022)、宋倩倩等(2020)使用单矿物锆石U-Pb法测定柳树沟组地层年龄约为312.5 Ma,证明其是晚石炭世火山活动的产物。祁家沟组:下部为砂岩、泥岩,上部为中粗粒砂岩、灰岩等陆源碎屑岩。矿区内火山岩分布广泛,侵入岩出露规模小,主要呈小岩株、岩枝产出,岩性主要为辉绿岩、花岗岩等。矿床位于照壁山向斜南翼,该向斜以轴向NW向,南倾为特征,两翼产状稳定,西翼产状为40°~50°、50°~70°,东翼产状为200°~210°、

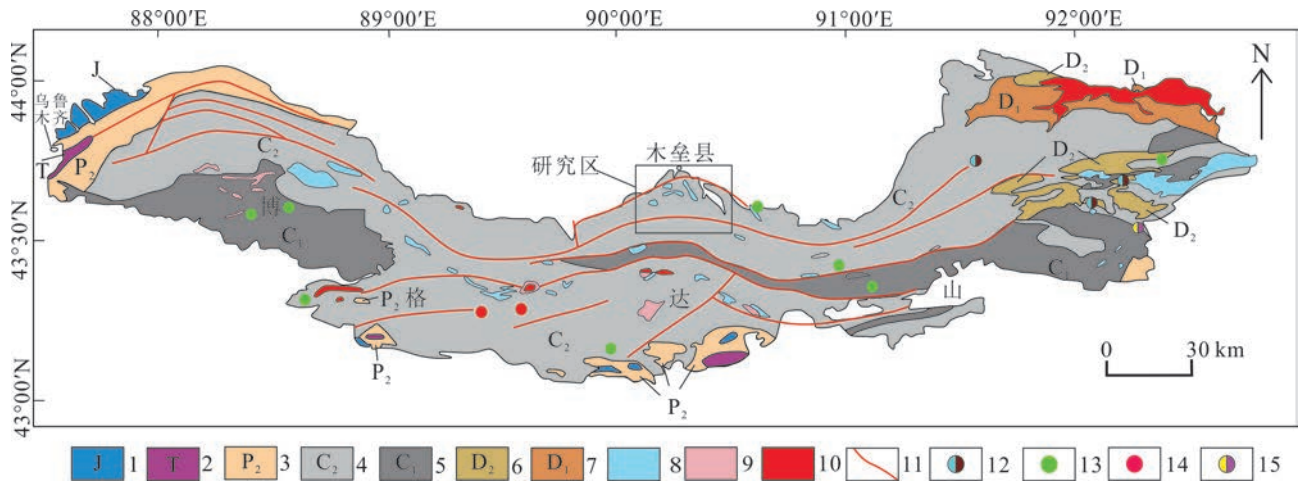


图2 博格达岛弧带地质矿产简图(底图据靳刘圆,2014修改)

1—侏罗系;2—三叠系;3—上二叠统;4—上石炭统;5—下石炭统;6—上泥盆统;7—下泥盆统;8—基性侵入岩;9—中性侵入岩;10—酸性侵入岩;11—断层;12—铅锌矿点;13—铜矿床;14—铁矿床;15—金矿床

Fig. 2 Geological map and distributions of ore deposits in the Bogda Island Arc (base map modified by Jin, 2014)

1—Jurassic; 2—Triassic; 3—Upper Permian; 4—Upper Carboniferous; 5—Lower Carboniferous; 6—Upper Devonian; 7—Lower Devonian; 8—Basic intrusive rock; 9—Neutral intrusive rock; 10—Acid intrusive rock; 11—Fault; 12—Pb-Zn deposit; 13—Copper deposit; 14—Iron deposit; 15—Gold deposit

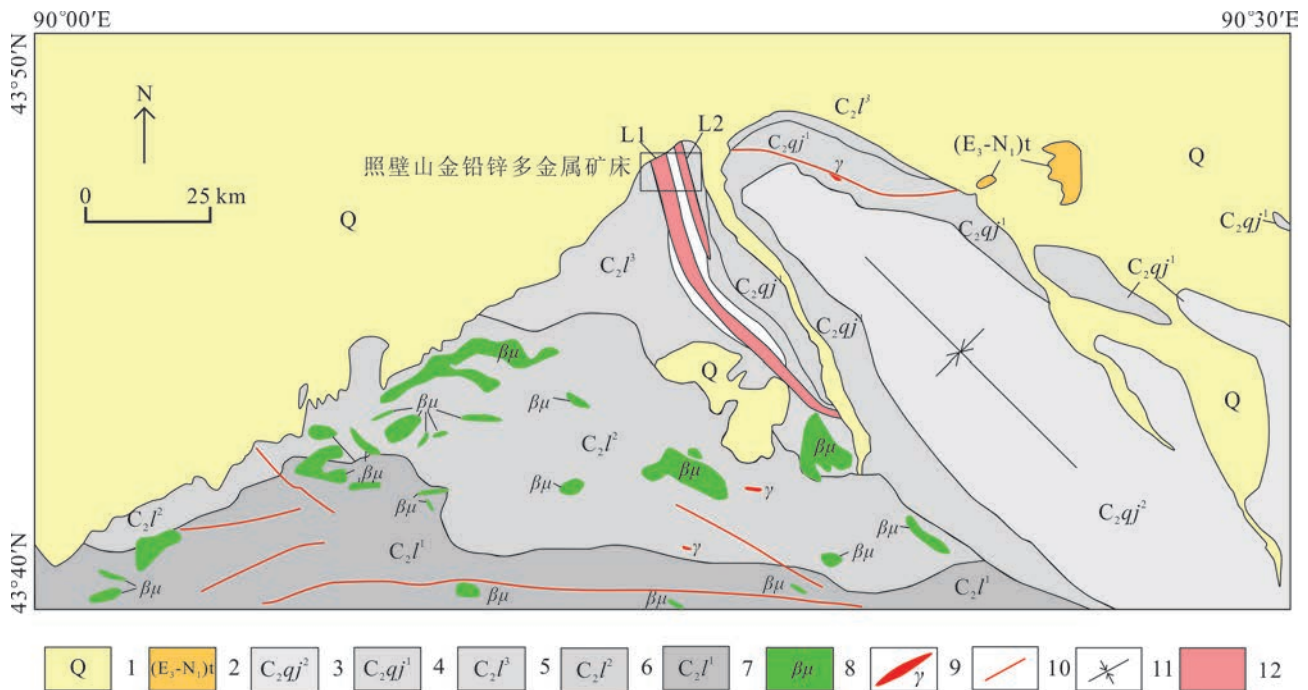


图3 新疆照壁山金铅锌多金属矿区地质图(底图据游延祥等,2021修改)

1—第四系;2—中新统桃树园组;3—祁家沟组第二段;4—祁家沟组第一段;5—柳树沟组第三段;6—柳树沟组第二段;7—柳树沟组第一段;8—辉绿岩;9—花岗岩脉;10—断层;11—向斜;12—金铅锌矿化带

Fig. 3 Geological map of the Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit, Xinjiang (base map modified by You et al., 2021)

1—Quaternary; 2—Miocene Taoshuyuanzi Formation; 3—2nd Member of Qijiagou Formation; 4—1st Member of Qijiagou Formation; 5—3rd Member of Liushugou Formation; 6—2nd Member of Liushugou Formation; 7—1st Member of Liushugou Formation; 8—Diabase; 9—Granitoids; 10—Fault; 11—Synclinal; 12—Au-Pb-Zn mineralization zone

50°~70°;发育EW向主断层和多条NW向的次级断层,且NW向次级逆断层切穿地层(图3)。

3 矿床地质特征

照壁山金铅锌多金属矿床共圈出2条矿化蚀变带(L1和L2)(图3),呈NW-SE向分布。金铅锌多金属矿体主要赋存于安山质凝灰岩地层中,受地层控制明显(图4、图5a~b、图6a~i),产出形态连续,呈透镜状、脉状。地表圈定矿体4条(图5a),深部隐伏矿体5条(图5b),其中L1-1矿体为研究区主矿体,长度为1030 m,厚0.7~23.6 m,产状为36°~49°,50°~82°,单工程铅、锌、金、银平均品位分别为1.49%、1.35%、0.68 g/t、49.4 g/t。矿床内也可见多条石英脉分布。矿床发育硅化、明矾石化、高岭石化等蚀变,其中硅化与矿化有关(图7a~f)。主要金属矿物为金、闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、黄铜矿,非金属矿物以石英、方解石为主;矿石结构主要为自形-半自形结构、他形结构、乳滴状结构等,矿石构造主要为脉状、浸染状等(图8a~i)。

根据野外观察和显微镜下显示的矿物共生、矿脉穿插关系,将照壁山金铅锌多金属矿床的成矿过

程分为3个阶段(图8a~i、图9):①石英-黄铁矿-毒砂阶段,该阶段的黄铁矿主要为自形-半自形结构,呈浸染状分布于地层中,毒砂多呈半自形结构,镜下常见毒砂与黄铁矿紧密分布;②石英-金-黄铁矿-闪锌矿-方铅矿阶段,该阶段为主成矿阶段,石英主要呈脉状,金与闪锌矿连生,黄铁矿为半自形-他形粒状结构,呈浸染状分布在石英脉中,闪锌矿、方铅矿主要为他形结构,脉状分布;局部发育方解石脉,且半自形黄铁矿紧密分布在方解石脉两侧;③石英-黄铁矿-黄铜矿阶段,黄铁矿、黄铜矿主要呈他形粒状产出。

4 测试方法

样品选取自照壁山金铅锌多金属矿钻孔ZK0001和围岩,进行了全岩主微量元素分析,流体包裹体和H-O同位素测试。

将新鲜样品粉碎至200目以下后对主量、微量元素进行测试,分析测试单位为中国科学院地球化学研究所。主量元素测定首先采用硼酸锂、偏硼酸锂复合熔剂熔融消解样品,待熔剂与样品混合均匀时滴加少量饱和碘化铵水溶液并置于熔样机上进行

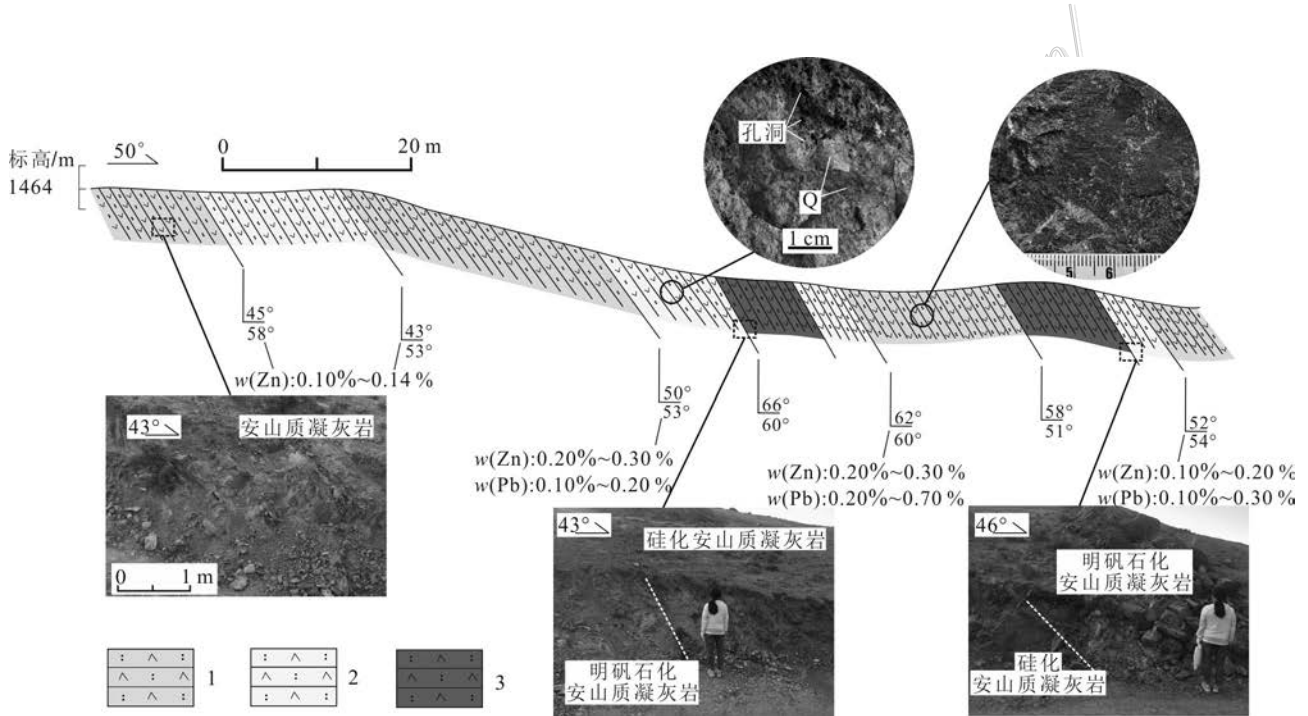


图4 照壁山多金属矿床实测剖面简图

1—安山质凝灰岩;2—明矾石化安山质凝灰岩;3—硅化安山质凝灰岩

Fig. 4 Geological section along No.1 in the Zhaobishan polymetallic deposit
1—Andesitic tuff; 2—Aluminized andesitic tuff; 3—Silicified andesitic tuff

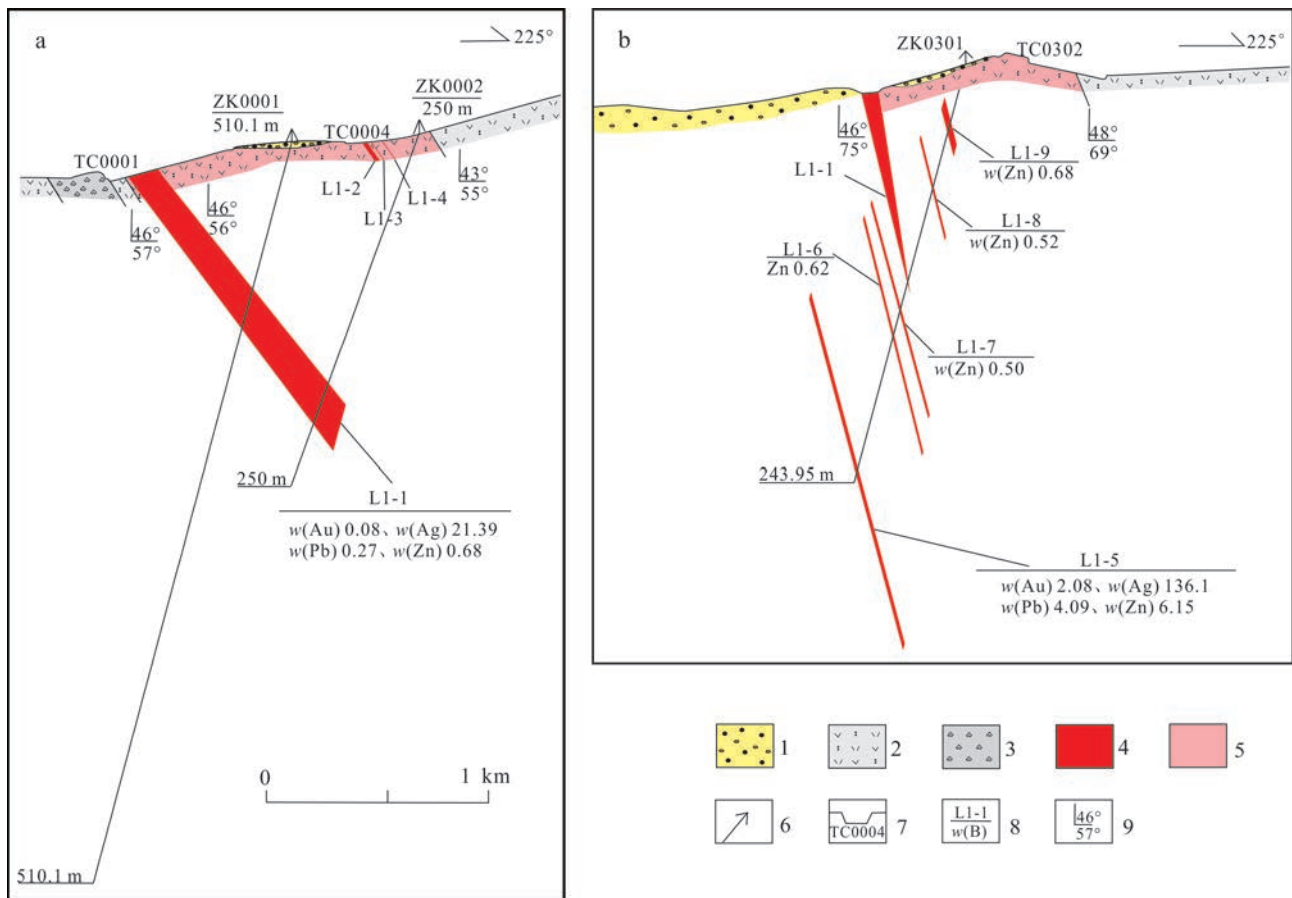


图5 照壁山多金属矿床1号勘探线(a)和3号勘探线剖面图(b)剖面图(据游延祥等, 2021修改)

1—第四系; 2—安山质凝灰岩; 3—集块岩; 4—矿体位置及编号; 5—矿化蚀变带; 6—钻孔位置; 7—探槽位置; 8—样品号/元素含量; 9—地层产状

Fig. 5 Geological section along No. 1(a) and No. 3(b) exploration line in the Zhaobishan polymetallic deposit (modified from You

et al., 2021)

1—Quaternary; 2—Andesitic tuff; 3—Agglomerate; 4—Ore body location and number; 5—Mineralized alteration zone; 6—Location of drill hole;

7—Location of trench; 8—Sample number/element data; 9—Attitude of strata

熔融,待熔片冷却,使用X荧光光谱仪(ARL Perform'X 4200)测定;烧失量测定方法为灼烧差减法,首先分别称量坩埚(m_1)和放入样品后坩埚(m_2)的质量,将称量好的样品进行灼烧直至恒重,称量灼烧后(样品+坩埚)的质量(m_3),由 $LOI = (m_2 - m_3) / (m_2 - m_1) * 100\%$ 计算得出烧失量值。微量元素测定采用加热HF、HNO₃样品的混合物,待样品消解并冷却后加入适量HNO₃,并将混合物放置于低温电热板上直至蒸干完全,再加入Rh内标溶液、HNO₃溶液、去离子水,于140℃加热约5 h,冷却后取出样品,放入质谱仪(PlasmaQuant-MS Elite)测定。

流体包裹体样品测试由中国地质大学(北京)地球科学与资源学院矿产与资源勘查流体包裹体实验室完成,采用测试仪器为Linkam MDSG600型冷热

台,冷热台测试温度范围为-190~600℃,并保证精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,测试升温或降温速率一般为1~5℃/min,在临近相变点时速率一般为0.1~0.5℃/min,流体包裹体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 根据冰点温度在盐度-冰点关系系中得出(Bodnar et al., 1993)。

H-O同位素测试由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。样品研磨粉碎至60目以下,挑选出石英单矿物。称取约0.5 g干燥过的石英单矿物样品,放置于石英反应管中,加热至550℃左右,同时用样品收集管收集释放出的气液态水,然后将水气化送入盛有玻璃碳的反应管中,水在TC/EA内置高温炉中与碳元素反应生成H₂和CO, H₂、CO在氦气流的带动下进入稳定同位素质谱仪(MAT253)测试H-O同位素组成。分

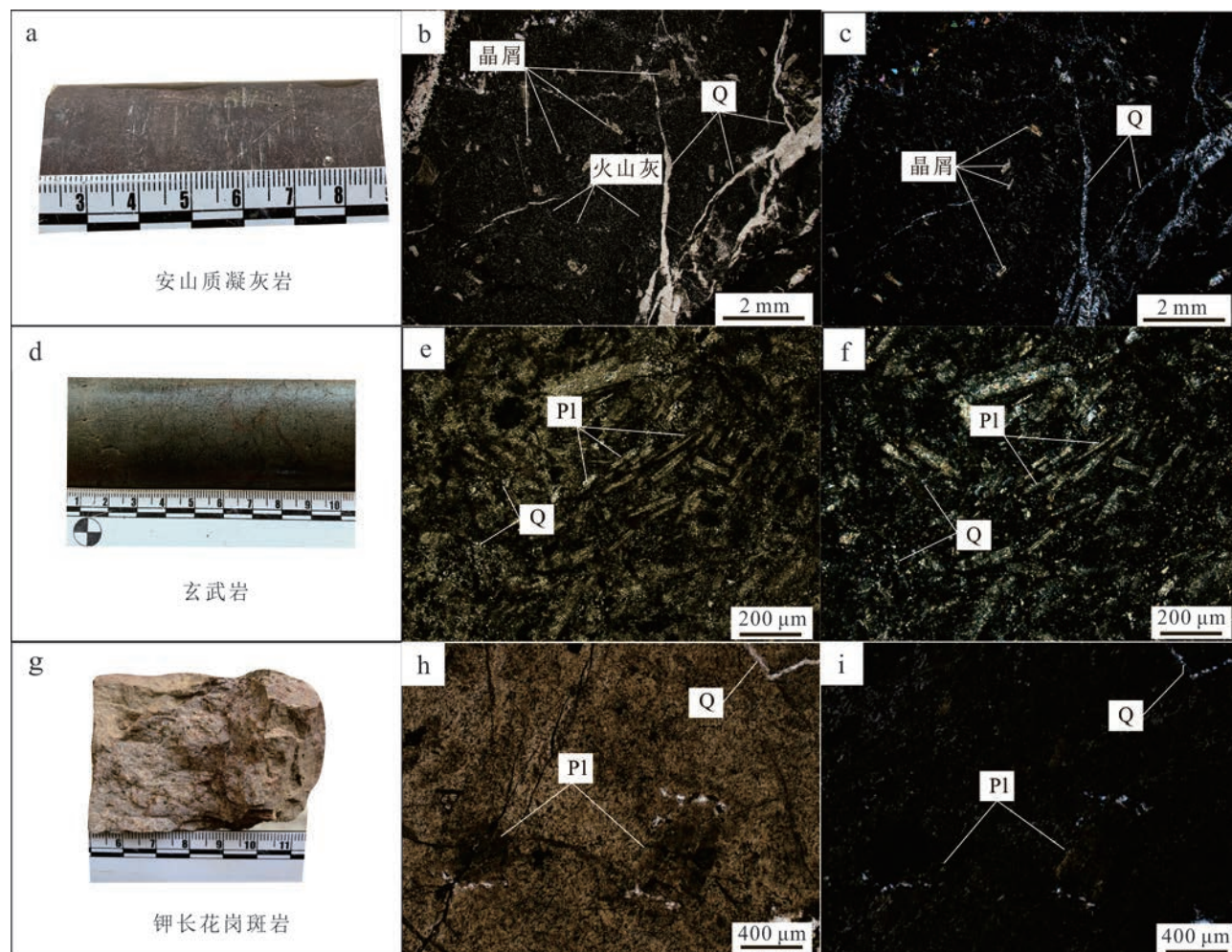


图6 照壁山多金属矿区柳树沟组火山岩地层、侵入岩
a~c. 柳树沟组安山质凝灰岩;d~f. 柳树沟组玄武岩;g~i. 柳树沟组钾长花岗斑岩;
Pl—斜长石;Q—石英

Fig. 6 Volcanic rock strata and intrusive rocks of Liushugou Formation in Zhaobihsan polymetallic deposit
a~c. Liushugou formation Andesitic tuff; d~f. Liushugou formation Basalt; g~i. Liushugou formation K-feldspar granite porphyry
Pl—Plagioclase; Q—Quartz

析结果以 V-SMOW 为标准,误差范围为 $\pm 0.1\%$ 。

5 测试结果

研究区火山岩 $w(\text{SiO}_2)$ 介于 48.85%~53.59% 和 68.56%~75.48% (表 1), 具有典型的双峰式火山岩组合特征, 岩石类型主要为玄武岩和流纹岩。在区域上, 七角井地区、色皮口地区等地也发育有双峰式火山岩, 且岩性与研究区火山岩岩性一致 (图 10a~b)。玄武岩中 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 4.62%~6.97%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为 0.25%~2.88%, 总体上具有富钠贫钾的特点 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.95\sim 27.35$), 属拉斑系列 (图 10b), $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为

15.23%~16.69%, 铝饱和指数 (A/CNK) 在 1.25~1.69 之间, 属过铝质 (图 10c), $w(\text{MgO})$ 为 2.99%~6.50%, $\text{Mg}^\#$ 较高 (36.25%~58.77%), $w(\text{TiO}_2)$ 为 1.06%~1.35%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为 0.16%~0.32%。流纹岩全碱含量 ($w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})=9.50\sim 12.45$) 较高, 属钾玄岩系列, 过碱质, 其 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ (19.04~43.07) 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{P}_2\text{O}_5$ (49.77~81.16) 远高于玄武岩比值。

照壁山地区玄武岩和流纹岩稀土元素总量分别介于 85.79×10^{-6} ~ 148.89×10^{-6} 和 81.48×10^{-6} ~ 173.41×10^{-6} (表 1), LREE/HREE 分别为 1.39~1.57、0.78~2.86, 在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (图 11a) 上整体接近平坦型, 表现为 LREE 轻度富集, 轻

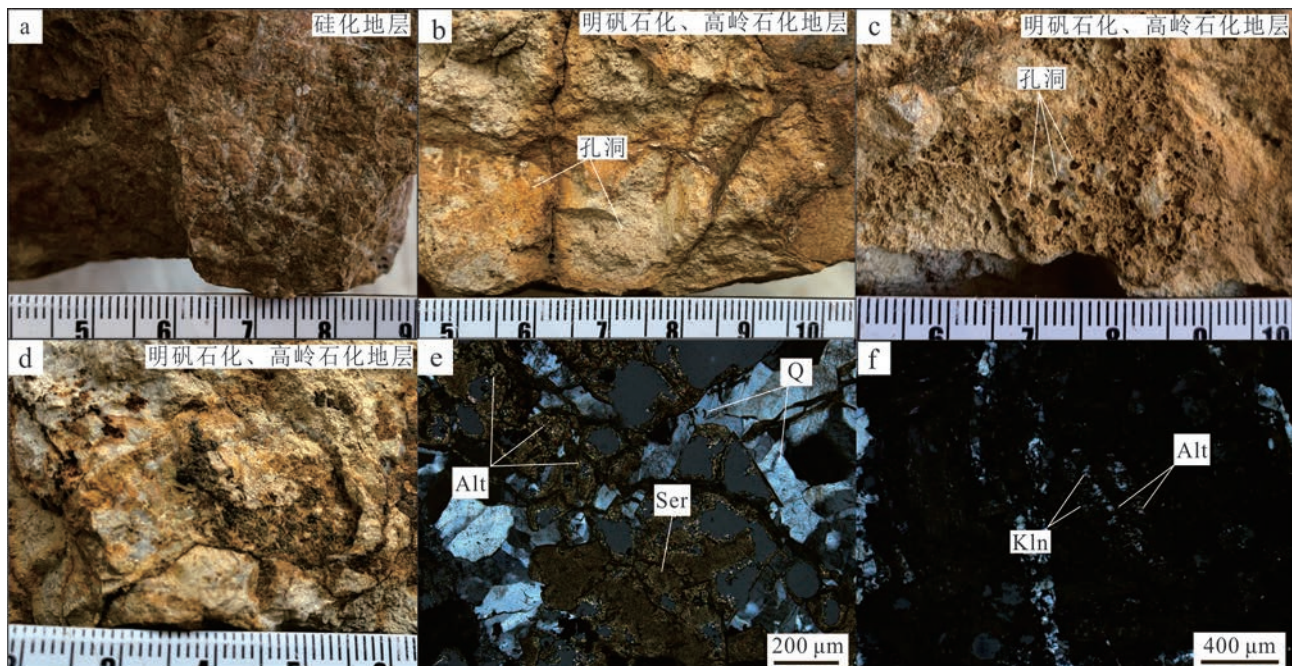


图7 照壁山多金属矿区柳树沟组蚀变

a. 硅化地层; b~f. 明矾石化、高岭石化地层

Alt—明矾石化; Ser—绢云母化; Kln—高岭石化

Fig. 7 Alteration of Liushugou Formation in Zhaobishan polymetallic deposit

a. Silicified formation; b~f. Alum and kaolinite Formation

Alt—Alunite; Ser—Sericite; Kln—Kaolinite

重稀土元素之间存在微弱的分异现象,玄武岩的La/Nb为2.49~3.83、Ba/Nb为41.00~315.38、Ba/La为14.50~92.45, δEu 为0.76~1.01,平均0.94,轻微负异常, $w(\text{Zr})$ 为 101×10^{-6} ~ 116×10^{-6} , $w(\text{Y})$ 为 19.7×10^{-6} ~ 27.4×10^{-6} 。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图11b)显示,研究区玄武岩大离子亲石元素Rb、Ba、K等相对富集,而高场强元素Th、Nb、Ta等无富集;流纹岩Nb、Ta、Sr、Ti负异常。

照壁山金铅锌多金属矿床含硫化物石英脉中的原生流体包裹体类型单一,主要为气液两相包裹体,大小多在2~8 μm ,气液比通常小于20%,多呈椭圆状、长条状等独立或成群成带分布(图12a~d)。对该气液两相包裹体进行测温,测试结果见表2。第I成矿阶段(石英-黄铁矿-毒砂阶段):该阶段石英颗粒较小,包裹体小于2 μm ,达不到可进行测温实验的最低要求,无法对该阶段的石英进行均一温度和盐度测定,且第II成矿阶段为主成矿阶段,笔者认为此阶段的测试结果可较好地表明成矿流体性质;第II成矿阶段(石英-金-黄铁矿-闪锌矿-方铅矿阶段):该阶段原生包裹体大小约为5~8 μm ,形态呈椭圆状、规

则状,主要为气液两相包裹体(图12a~c)。冰点温度在-9.3~-5 $^{\circ}\text{C}$ 之间,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为7.9%~13.2%,平均值为10.84%,完全均一温度为194.2~253.5 $^{\circ}\text{C}$,平均值为222.3 $^{\circ}\text{C}$;第III成矿阶段(石英-黄铁矿-黄铜矿阶段):原生包裹体大小多在2~5 μm 之间,形态以椭圆状为主(图12d)。冰点温度为-8.6~-4.6 $^{\circ}\text{C}$,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为7.3%~12.4%,平均值为8.76%,完全均一温度为156.7~201.6 $^{\circ}\text{C}$,平均值177.0 $^{\circ}\text{C}$ (图13)。

照壁山多金属矿床石英的H-O同位素分析结果见表3。由表可知,样品的 $\delta\text{D}_{\text{v-SMOW}}$ 变化范围为-115.7‰~-95.4‰,石英的 $\delta\text{O}_{\text{v-SMOW}}$ 变化范围为13.2‰~18‰,流体的 $\delta\text{O}_{\text{v-SMOW}}$ 变化范围为-0.51‰~7.19‰(图14)。

6 讨论

6.1 赋矿火山岩成因及成矿背景

双峰式火山岩的基性端元源自地幔部分熔融的成因模式已基本得到学术界的认可。研究区双峰式

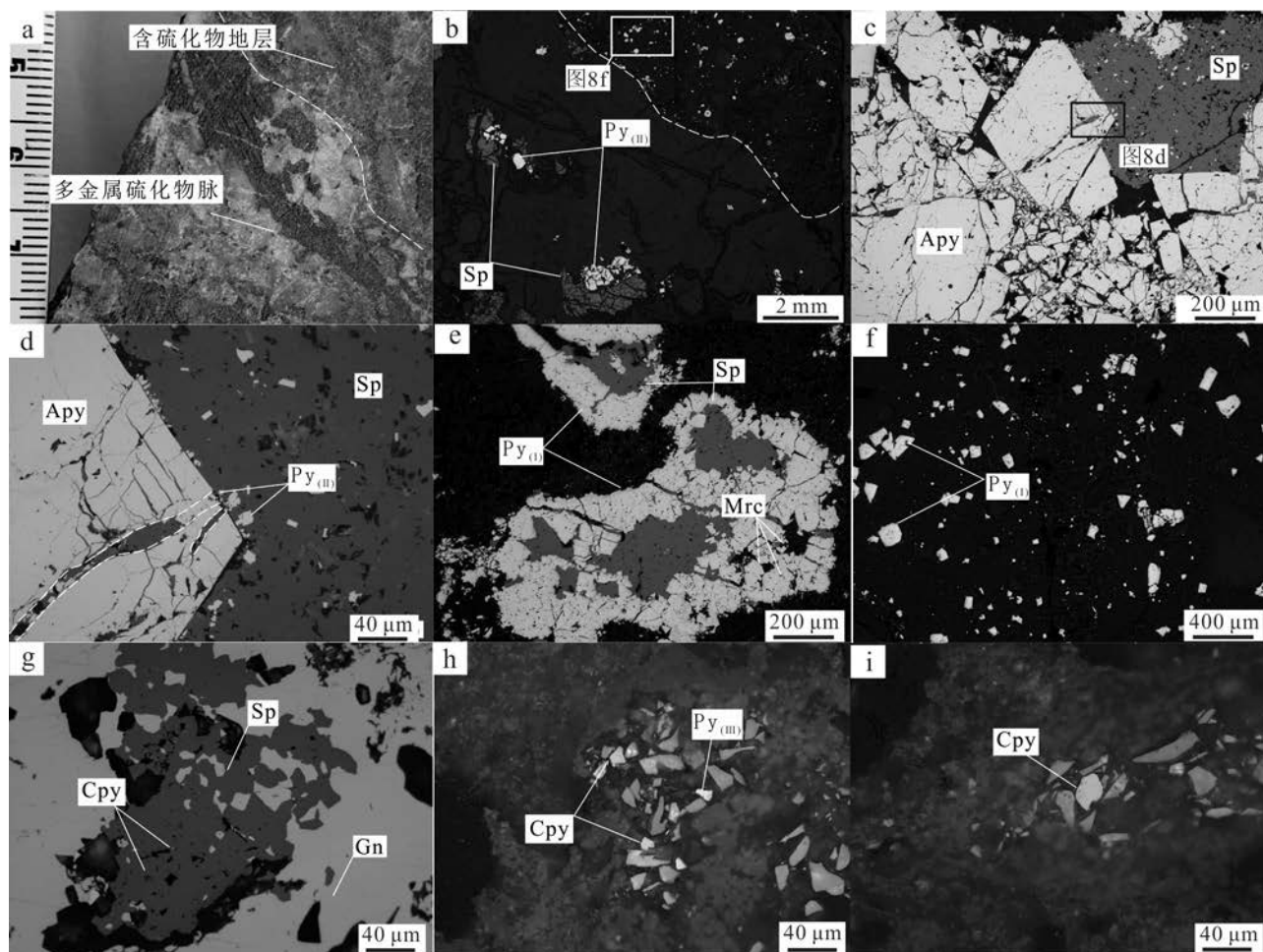


图8 照壁山金铅锌多金属矿床手标本及镜下照片

a~b. 石英-黄铁矿-闪锌矿-方铅矿脉切穿含硫化物地层;c~d. 他形闪锌矿-半自形黄铁矿(Py_{II})切穿自形-半自形毒砂;e. 他形闪锌矿切穿他形黄铁矿(Py_I);半自形白铁矿;f~i. 自形-半自形黄铁矿(Py_I), 他形方铅矿, 他形闪锌矿, 乳滴状、细粒状黄铜矿
Q—石英;Py—黄铁矿;Sp—闪锌矿;Gn—方铅矿;Apy—毒砂;Mrc—白铁矿;Cpy—黄铜矿

Fig. 8 Photographs and photomicrographs of the Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit

a~b. Quartz-pyrite-sphalerite-galena veins cut through sulfide-bearing country rocks; c~d. Anhedral sphalerite-semi-euhedral pyrite(Py_{II}) cut through euhedral-semi-euhedral arsenopyrite; e. Anhedral sphalerite cut through pyrite(Py_I); Semi-euhedral marcasite; f~i. Euhedral-semi-euhedral pyrite (Py_I), anhedral galena, anhedral sphalerite, droplet chalcopyrite, fine-grained chalcopyrite

Q—Quartz; Py—Pyrite; Sp—Sphalerite; Gn—Galena; Apy—Arsenopyrite; Cpy—Chalcopyrite

火山岩基性熔岩为拉斑玄武岩,其 K_2O/TiO_2 和 K_2O/P_2O_5 的比值变化范围较大,分别介于0.24~2.48、1.22~9.77,表明在岩浆演化的过程中受到了一定程度的地壳混染(Guo et al., 2005;王金荣等,2010;汪晓伟等,2015)。通常微量元素比值也可作为判别地壳混染作用的有效依据,如果幔源玄武质岩浆受到地壳物质的混染,岩浆中的不相容元素含量会随之改变,如La和Ba含量就会相对于Nb含量有所提高,从而具有较高的La/Nb、Ba/Nb、Ba/La比值(Weaver et al., 1984; Hofmann, 1988; Wedepohl, 1995; 夏林圻

等,2007)。研究区玄武岩La/Nb介于2.49~3.83, Ba/Nb介于41.00~315.38, Ba/La介于14.50~92.45,远大于原始地幔(Weaver, 1991)(La/Nb=0.94, Ba/Nb=9.00, Ba/La=9.60)和N-MORB(Weaver, 1991)(La/Nb=1.07, Ba/Nb=4.30, Ba/La=4.00),表明幔源玄武质岩浆在上升过程中可能受到了一定程度的地壳物质混染作用。

双峰式火山岩中酸性端元通常认为有2种成因:一种为地壳岩石部分熔融的产物;另一种是玄武岩浆分离结晶的产物,基本没有地壳物质的加入,且

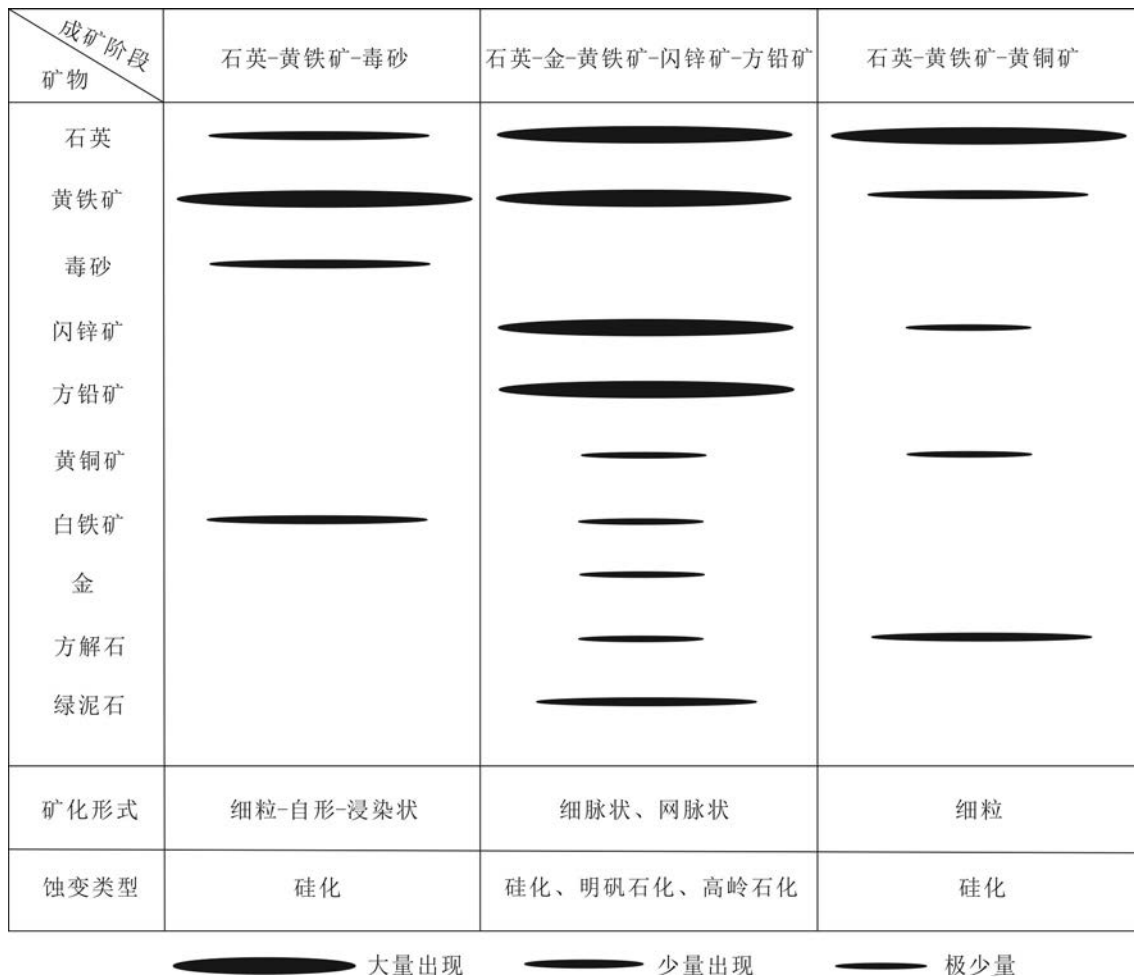


图9 照壁山多金属矿床矿物生成顺序表

Fig. 9 Schematic diagram showing paragenesis sequence of the Zhaobishan polymetallic deposit

微量元素特征与伴生的玄武岩相似(Sigurdsson, 1977; Christiansen, 1984; 王银喜, 2006)。照壁山地区流纹岩 K_2O/TiO_2 和 K_2O/P_2O_5 比值变化范围分别为 19.04~43.07、49.77~81.16, 远大于该地区玄武岩比值, 说明研究区流纹岩与玄武岩源区不同。在稀土元素球粒陨石标准化蛛网图(图 11a)上, 流纹岩稀土元素总量高于玄武岩, 右倾趋势明显, 而玄武岩曲线形态较为平坦; 在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 11b)上, 流纹岩表现为 Nb、Ta、Sr、Ti 亏损, 且 Sr、Ti 谷深, 表明流纹岩和玄武岩之间缺乏明显的成因联系, 流纹岩来源于地壳物质的部分熔融。

目前普遍认为北天山洋自早古生代向北俯冲, 至石炭纪晚期闭合, 结束了区内洋陆格局的演化, 残余的海盆继续发育在准噶尔地块(博格达山前身的海盆)(李锦轶, 2004; 李锦轶等, 2006; 舍建忠等,

2018; Han et al., 2018)。伴随俯冲消减作用, 形成了包括博格达岛弧带在内的北天山岛弧带。博格达岛弧带广泛发育双峰式火山岩, 且顾连兴等(2000; 2001)对有关早-中石炭世双峰式火山岩的研究亦证明博格达岛弧带在石炭世处于大陆裂谷环境。研究区玄武岩 $w(SiO_2)$ 较高(48.85%~53.59%), 富钠贫钾 ($Na_2O/K_2O=1.95\sim27.35$), 具高的 $w(Al_2O_3)$ (15.23%~16.69%) 和 $Mg^\#$ (36.25%~58.77%), 且 Rb、Ba、K 等元素相对富集, 表明岩浆成分具有裂谷演化特点, 类似于大陆裂谷拉斑玄武岩(王小钊等, 2018)。由上述双峰式火山岩的基性端元成因分析可知, 玄武质岩浆受到了一定程度的地壳混染, 这导致岩石可能会出现 Ta、Nb、Ti 元素的负异常, 易被误判为岛弧环境(夏林圻等, 2007), 而 Zr、Y 在玄武岩受到地壳混染时其含量基本不被影响, 可以较准确的反映玄武岩的成岩环境(夏林圻等, 2007), 因此玄武岩构造环境

表1 照壁山金铅锌多金属矿床火山岩主量元素($w(B)/\%$)数据和微量元素($w(B)/10^{-6}$)数据Table 1 Major element data($w(B)/\%$) and trace element data($w(B)/10^{-6}$) of volcanic rocks from the Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit

编号	ZK0001-30	ZK0001-54	ZK0001-55	ZK0001-59	ZK0001-62	ZK0001-63	ZK0001-66	ZBSQ-2	ZBSQ-3	ZBSQ-5	ZBSQ-7	ZBSQ-8
岩性	玄武岩							流纹岩				
SiO ₂	52.41	53.90	53.79	50.25	51.21	53.51	52.07	71.99	73.74	75.65	76.08	69.10
Al ₂ O ₃	16.33	16.04	16.03	17.17	16.05	16.96	15.87	13.36	12.51	11.74	11.17	13.95
Fe ₂ O ₃	9.47	10.65	10.80	9.94	10.18	9.44	9.55	1.47	1.34	1.09	1.20	1.77
MgO	6.75	3.57	3.07	5.82	5.42	3.35	6.42	0.02	0.01	0.02	0.04	0.03
CaO	2.15	2.36	2.81	5.94	6.49	3.00	2.90	0.36	0.38	0.30	0.30	0.33
Na ₂ O	7.14	6.96	7.17	4.75	4.91	5.76	7.11	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03
K ₂ O	0.37	1.61	1.49	1.22	1.40	2.96	0.26	11.93	10.75	10.15	9.56	12.52
MnO	0.176	0.182	0.156	0.168	0.114	0.255	0.167	0.010	0.013	0.018	0.013	0.003
P ₂ O ₅	0.163	0.330	0.333	0.308	0.295	0.303	0.213	0.147	0.216	0.175	0.152	0.166
TiO ₂	1.117	1.380	1.381	1.215	1.102	1.193	1.105	0.277	0.543	0.522	0.502	0.612
LOI	3.74	2.47	2.75	2.78	2.34	2.82	4.00	0.73	0.53	0.51	0.78	0.77
Rb	6.62	32.0	32.9	31.6	38.8	74.7	4.65	247	230	217	200	269
Sr	285	237	212	1260	661	595	337	15.8	16.2	16.6	15.5	18.0
Y	19.7	25.3	26.8	25.7	24.4	27.4	23.0	29.9	34.0	27.7	26.7	39.0
Zr	101	111	111	108	101	116	101	218	207	192	178	235
Nb	3.16	2.90	2.92	3.28	3.14	2.99	3.00	4.70	5.02	4.80	4.20	5.71
Ba	157	433	299	322	340	943	123	557	684	626	584	831
La	7.88	11.1	10.3	10.9	10.1	10.2	8.48	6.42	8.18	22.2	6.70	15.6
Ce	21.7	27.3	26.2	26.5	24.2	24.8	23.9	14.2	25.2	66.5	17.9	32.3
Pr	2.96	3.81	3.71	3.71	3.38	3.68	3.34	2.01	3.66	6.43	2.92	4.64
Nd	14.2	18.1	17.9	17.5	16.1	17.9	16.5	9.51	18.4	27.1	14.1	20.4
Sm	3.93	4.74	4.84	4.56	4.32	4.77	4.41	2.66	5.28	5.14	4.09	4.59
Eu	1.27	1.35	1.43	1.52	1.45	1.54	1.38	0.987	1.28	1.08	1.15	1.08
Gd	3.84	4.73	4.82	4.65	4.51	4.82	4.35	3.20	5.14	4.42	4.05	4.72
Tb	0.605	0.754	0.78	0.743	0.712	0.779	0.687	0.575	0.873	0.720	0.695	0.857
Dy	3.75	4.76	4.91	4.62	4.35	4.90	4.23	4.13	5.72	4.60	4.47	6.03
Ho	0.783	0.974	1.02	0.942	0.894	1.01	0.862	0.958	1.21	0.969	0.937	1.41
Er	2.20	2.70	2.82	2.54	2.43	2.80	2.34	2.84	3.38	2.80	2.60	4.20
Tm	0.344	0.401	0.413	0.376	0.356	0.411	0.344	0.460	0.513	0.430	0.401	0.656
Yb	2.28	2.55	2.65	2.43	2.28	2.64	2.26	3.14	3.41	2.88	2.68	4.44
Lu	0.345	0.385	0.397	0.372	0.344	0.408	0.329	0.488	0.525	0.438	0.411	0.691
Hf	2.61	3.03	3.02	2.69	2.57	3.08	2.60	5.39	5.19	4.88	4.42	5.75
Ta	0.188	0.191	0.189	0.195	0.189	0.189	0.189	0.332	0.330	0.321	0.292	0.357
Pb	9.74	5.17	3.76	3.13	2.49	4.15	3.57	8.30	2.26	4.72	2.44	43.5
Th	0.644	1.59	1.61	0.783	1.01	1.35	0.910	3.05	2.89	2.68	2.39	3.11
U	0.327	0.874	0.783	0.306	0.342	0.657	0.352	1.93	1.90	1.46	1.82	1.91

可用Zr-Zr/Y图解判别。研究区玄武岩 $w(Zr)$ 为 $101 \times 10^{-6} \sim 116 \times 10^{-6}$, $w(Y)$ 为 $19.7 \times 10^{-6} \sim 27.4 \times 10^{-6}$, Zr/Y为4.14~5.13, 在Zr-Zr/Y图解(图10d)上, 样品点均落入板内玄武岩区域, 表明其形成于板内环境。综上所述, 研究区在晚石炭世处于拉张裂谷环境。

6.2 矿床成因

照壁山金铅锌多金属矿床形成于陆内拉张环境, 矿体赋存于火山岩中, 发育脉状、网脉状矿化, 蚀变矿物多见明矾石、多孔状石英等。据矿床氢、氧同位素的组成特征表明成矿热液主要为岩浆水和大气

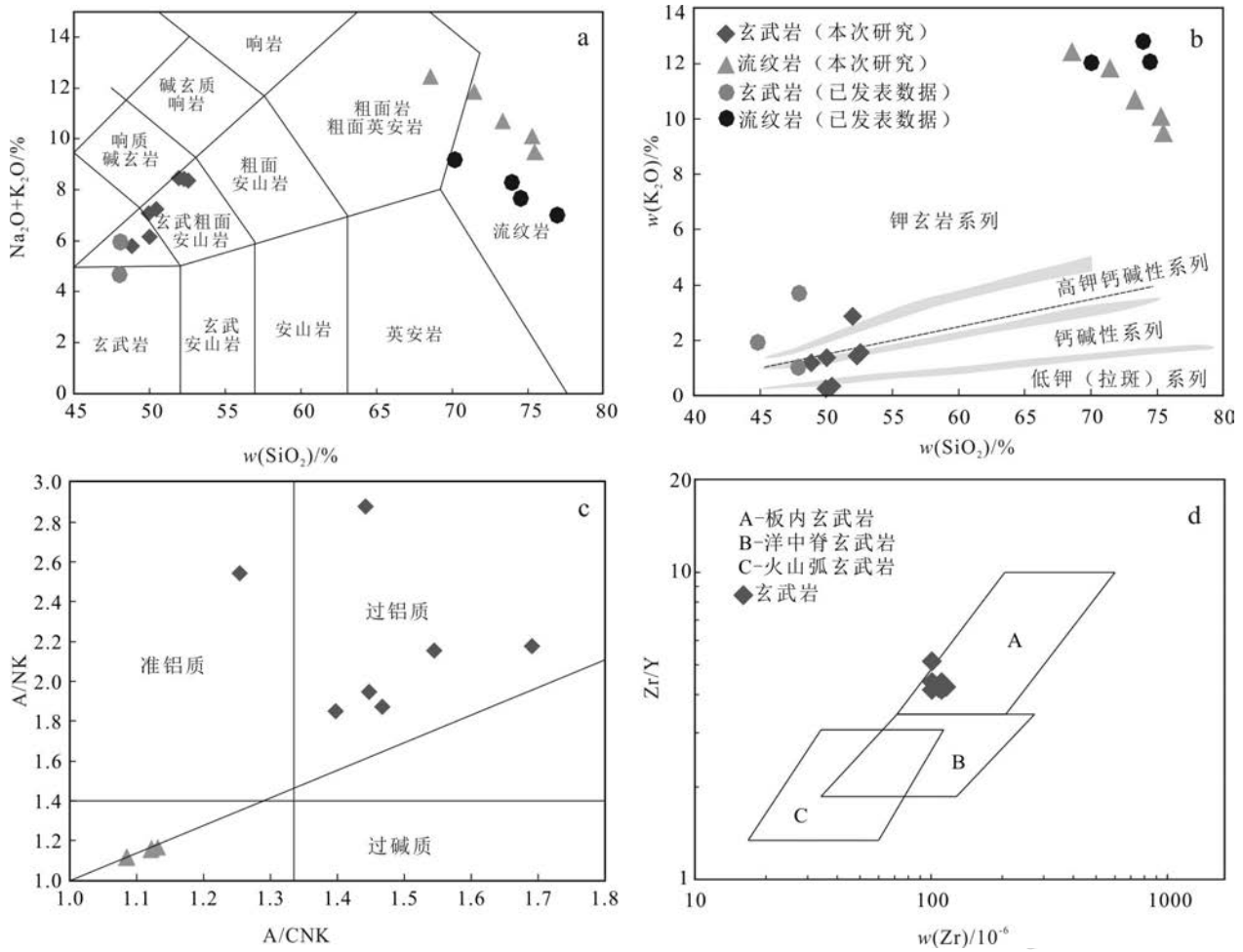


图 10 新疆照壁山金铅锌多金属矿床地层地球化学图解(数据引自高景刚等,2014)

Fig. 10 Geochemical classification and discrimination diagrams for the Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit (Data cited from Gao et al., 2014)

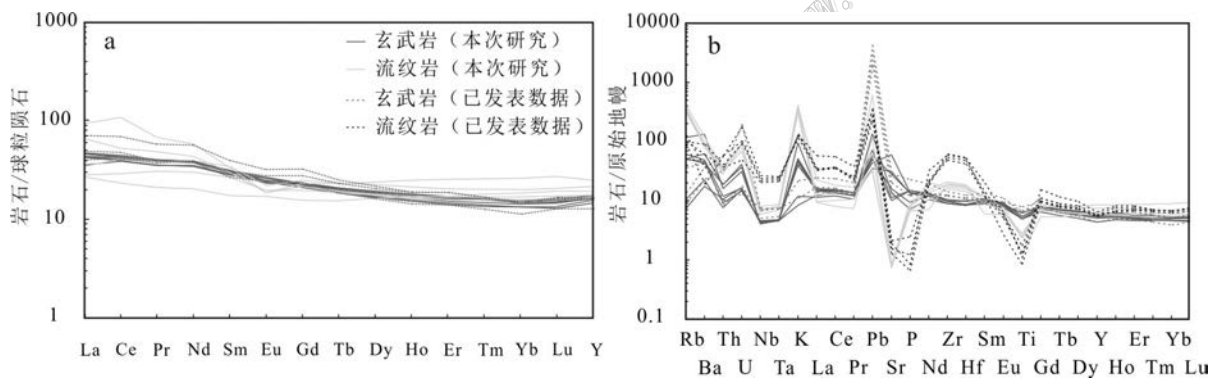


图 11 照壁山金铅锌多金属矿床稀土和微量元素分配曲线(数据引自高景刚等,2014)

Fig. 11 Pattern of the rare earth elements and trace elements for the Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit (Data cited from Gao et al., 2014)

降水,且在 $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ 图解(图 14)上表现为第 III 阶段样品点向大气降水线靠近。流体包裹体主要为气液

两相,主要成矿阶段(II)包裹体均一温度主要集中在 $194.2\sim 253.5^\circ\text{C}$ 之间,流体盐度范围主要集中在

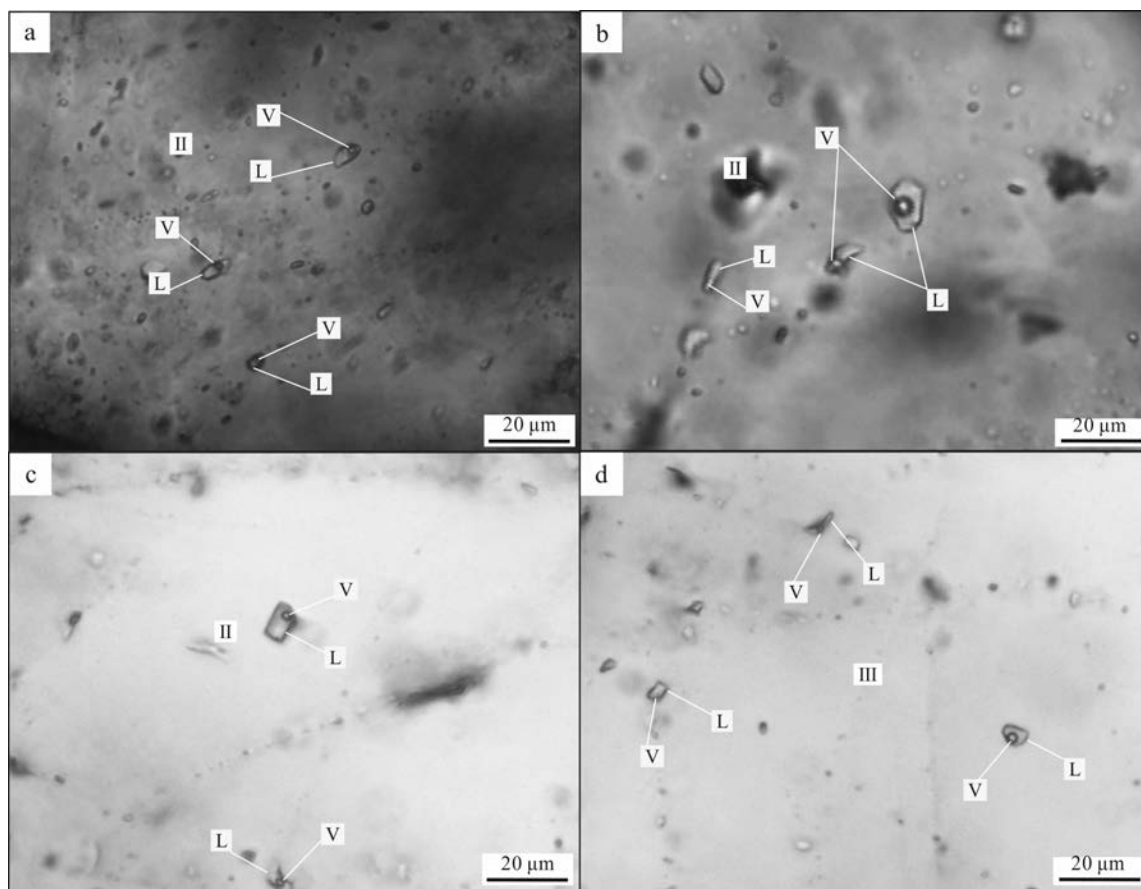


图 12 照壁山多金属矿床石英中的流体包裹体显微照片

a-c. 第 II 阶段气液两相包裹体; d. 第 III 阶段气液两相包裹体

V—气相; L—液相

Fig. 12 Microphotographs of typical fluid-inclusions in quartz from the Zhaobishan polymetallic deposit

a-c. Phase II vapor-liquid two-phase inclusion; d. Phase III vapor-liquid two-phase inclusion

V—Vapor; L—Liquid

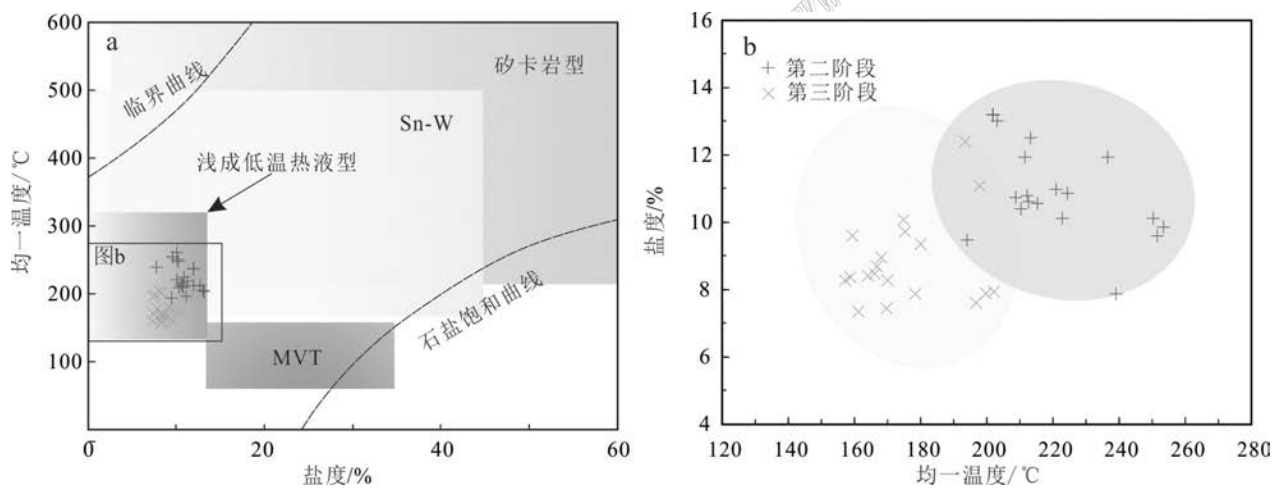


图 13 照壁山多金属矿床流体包裹体热力学特征(底图据 Wilkinson, 2001 修改)

Fig. 13 Thermomechanical characteristics of fluid inclusion in Zhaobishan polymetallic deposit (base map modified by Wilkinson, 2001)

表2 照壁山金铅锌多金属矿床流体包裹体显微测温结果
Table 2 Microthermometers data of fluid inclusions in the Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit

寄主矿物/成矿阶段	均一温度/°C	冰点温度/°C	w(NaCl _{eq})/%
	236.7	-8.2	11.9
	202.0	-9.3	13.2
	250.3	-6.7	10.1
	215.3	-7.1	10.6
	203.4	-9.2	13.1
	253.5	-6.5	9.9
	251.7	-6.3	9.6
	194.2	-6.2	9.5
	236.7	-8.2	11.9
	250.3	-6.7	10.1
石英/(II)	198.2	-7.5	11.1
	239.1	-5.0	7.9
	211.6	-8.2	11.9
	213.4	-8.7	12.5
	208.7	-7.2	10.7
	222.7	-6.7	10.1
	224.1	-7.3	10.9
	212.3	-7.2	10.7
	210.5	-6.9	10.4
	212.7	-7.1	10.6
	221.1	-7.4	11.0
	201.6	-5.0	7.9
	198.2	-7.5	11.1
	197.6	-4.8	7.6
	193.6	-8.6	12.4
	167.7	-5.6	8.7
	159.5	-6.3	9.6
	200.1	-5.0	7.9
	197.6	-4.8	7.6
	165.8	-5.4	8.4
石英/(III)	174.6	-6.7	10.1
	180.2	-6.1	9.3
	156.7	-5.3	8.3
	164.1	-5.4	8.4
	178.6	-5.0	7.9
	169.8	-4.7	7.4
	158.7	-5.4	8.4
	168.1	-5.8	8.9
	161.1	-4.6	7.3
	170.2	-5.3	8.3
	175.3	-6.4	9.7

7.9%~13.2%，由矿物组合热力学相图限定该阶段成矿流体氧逸度(log*f*(O₂))为-41.5~-36.5，pH<4(图

表3 照壁山金铅锌多金属矿床稳定同位素分析结果
Table 3 Stable isotope data of the Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit

矿物/成矿阶段	δD _{v-SMOW} /‰	矿物 δ ¹⁸ O _{v-SMOW} /‰	流体 δO _{v-SMOW} /‰	<i>t</i> /°C
	-115.5	13.6	2.79	222.3
石英/(II)	-113.0	16.8	5.99	222.3
	-115.7	18.0	7.19	222.3
	-100.2	13.4	-0.31	177.0
石英/(III)	-95.4	13.4	-0.31	177.0
	-100.0	13.2	-0.51	177.0

注: δO_{water}/‰=δ¹⁸O_{v-SMOW}/‰(石英)-3.38×10⁶/T²+2.9, *T*为绝对温度, *t*为包裹体均一温度平均值(黄志新等, 2012)

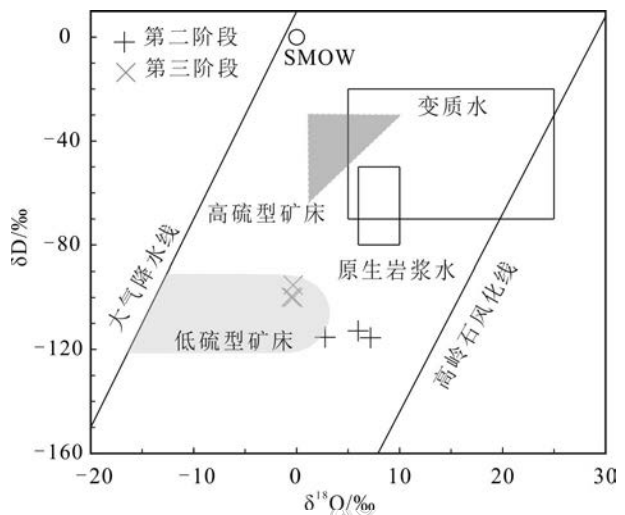


图14 照壁山多金属矿床成矿流体δ¹⁸O-δD图解(底图据Hedenquist et al.,1994修改)

Fig. 14 Plot of δD versus δ¹⁸O for ore-forming fluids from the Zhaobishan polymetallic deposit (base map modified from Hedenquist.,1994)

15a);第III成矿阶段包裹体均一温度介于156.7~201.6°C,流体盐度范围主要集中在7.3%~12.4%,流体氧逸度(log*f*(O₂))为-48~-43,pH约为4.5~7(图15b)。综上所述,认为照壁山金铅锌多金属矿床是由中低温、中低盐度、低氧逸度、低pH值的岩浆水和大气降水的混合热液在拉张环境中形成的低温热液矿床。

与浅成低温热液型矿床、SEDEX型、VMS型矿床特征进行对比(表4),照壁山金铅锌多金属矿床的围岩蚀变、矿物组合等特征与SEDEX型、VMS型矿床相似。然而,也有如下显著的差异:①成矿环境:SEDEX型和VMS型矿床均产在海底深水还原环境

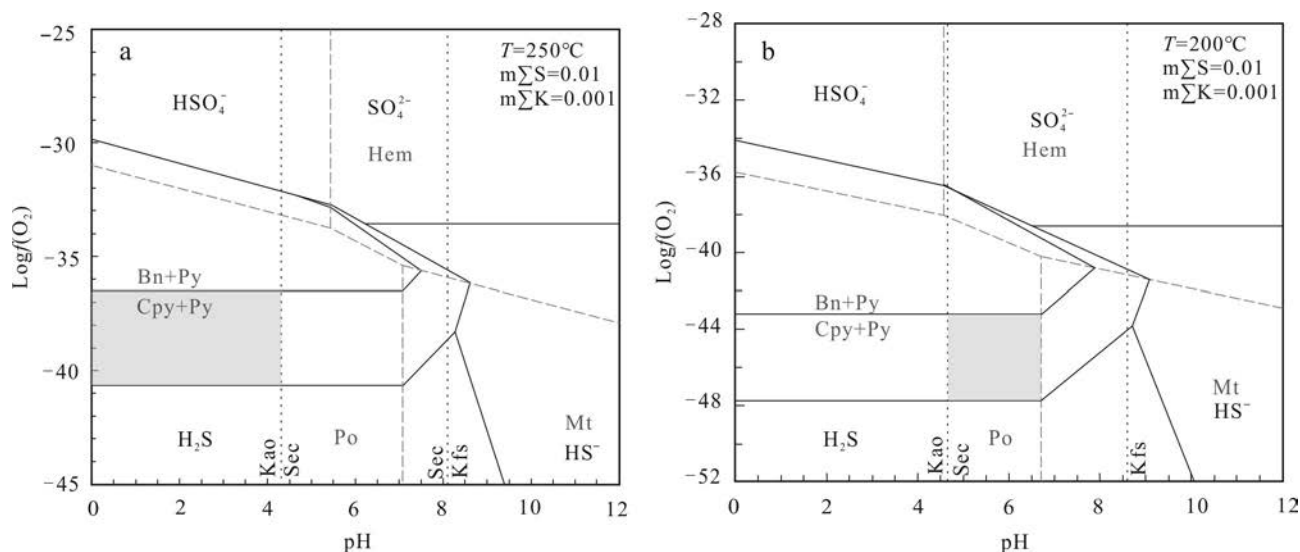


图 15 照壁山多金属矿床 $\log(f(O_2))$ -pH 相图

黑色实线为矿物平衡线,灰色虚线为硫的赋存状态平衡线,黑色虚线为蚀变矿物稳定区域

Bn—斑铜矿,Py—黄铁矿,Cpy—黄铜矿,Hem—赤铁矿,Po—磁黄铁矿,Mt—磁铁矿,Kao—高岭石化,Sec—绢云母化,Kfs—钾化

Fig. 15 $\log(f(O_2))$ -pH phase diagram of the Zhaobishan polymetallic deposit

Black solid line is the mineral balance line, gray dotted line is the sulfur occurrence state balance line, black dotted line is the altered mineral stability zone

Bn—Bornite; Py—Pyrite; Cpy—Chalcopyrite; Hem—Hematite; Po—Pyrrhotite; Mt—Magnetite; Kao—Kaolinite; Sec—Sericite; Kfs—K-feldspa

表 4 照壁山金铅锌多金属矿床与浅成低温热液型、SEDEX 型、VMS 型特征对比

Table 4 Comparison of characteristics of Zhaobishan Au-Pb-Zn polymetallic deposit with epithermal hydrothermal, SEDEX and VMS types

类别	高硫型	中硫型	低硫型	照壁山多金属矿床	SEDEX 型	VMS 型
构造背景	挤压岛弧、陆内伸展	挤压岛弧、陆内伸展	岛弧环境、伸展大陆	拉张环境	拉张断裂带、地堑	大洋中脊、弧前盆地
赋矿围岩	流纹质-英安质 火山岩	钙碱性安山岩、流纹质 英安岩、流纹岩	安山岩、流纹质英安岩、 双峰式火山岩	安山质凝灰岩、火山角砾 岩、玄武岩、流纹岩	细碎屑岩 碳酸盐岩	凝灰岩、火山碎屑 岩、火山熔岩
蚀变矿物	石英、明矾石、 叶腊石、地开石	绢云母、伊利石、绿帘石、 明矾石、冰长石	伊利石、蒙脱石、 冰长石	明矾石、多孔状石英、 黄钾铁矾	碳酸盐岩	石膏
矿石结构 构造	浸染状、块状、 脉状	脉状、网脉状	网脉状 浸染状	脉状、网脉状	条带状、纹层状、 粒级层理	块状、浸染状、 纹层状
蚀变类型	硅化、明矾石化、 高岭石化	绢云母化、绿泥石化、 明矾石化	碳酸盐化 粘土化	硅化、明矾石化、 高岭石化	硅化、碳酸盐化、 电气石化	硅化、绢云母化、 绿泥石化、泥化
金属矿物	黄铁矿、硫砷铜矿、 铜蓝	黄铁矿、闪锌矿(低铁)、 黄铜矿、方铅矿	黄铁矿、磁黄铁矿、 毒砂	金、黄铁矿、方铅矿、闪 锌矿(低铁)、黄铜矿	黄铁矿、磁黄铁矿、 闪锌矿、方铅矿	黄铁矿、方铅矿、 闪锌矿、黄铜矿
金属元素组合	Au-Ag、Cu、As-Sb	Ag-Au、Zn、Pb、Cu	Au-Ag	Au-Ag-Pb-Zn	Pb-Zn-Cu-Fe	Au-Ag-Pb-Zn-Cu
流体特征	酸性中高温(300°C)、 中低盐度(4%~15%) pH<2	中温(200~320°C), 中低盐度、pH为2~3	低温(<200°C)、低盐度 (<3.5%),pH接近中性	中低温(156.7~253.5°C), 中低盐度(7.3%~13.2%)、 pH<4(Ⅱ),pH为 4.5~7(Ⅲ)	中高温(140~ 300°C)、中高盐度 (7%~22%),pH为 中-弱酸性	中高温(100~ 350°C)、中低盐度 (3.5%~15%)、 pH<7
流体来源	岩浆热液	岩浆热液与大气 降水	大气降水为主,岩浆水 参与	岩浆热液与大气降水	海底热液与海水	海底火山热液
文献	Hedenquist et al.,1994; 2000;陈衍景等,2007; 宋国学等,2018	Hedenquist et al., 1994;2000; 宋国学等,2018	Hedenquist et al., 1994;2000; 陈衍景等,2007	本次研究	池三川,1994; 王玉奇,2009;	安伟等,2003; 陈衍景等,2007; 王玉奇,2009

中,而照壁山多金属矿床形成于陆相火山环境;②赋矿围岩:SEDEX型矿床容矿岩石主要为细碎屑岩、碳酸盐岩,而照壁山矿床赋存于安山质凝灰岩为主的火山岩中;③矿石结构构造:SEDEX型矿床发育条带状、纹层状构造、粒级层理等;VMS型矿床发育块状、条带状等构造,而照壁山矿床多发育浸染状、脉状构造;④成矿流体:SEDEX型矿床成矿流体一般为中高温(140~300°C)、中高盐度(7%~22%)的海底热液和海水,pH值为中性-弱酸性;VMS型矿床成矿流体为中高温(100~350°C)、中低盐度(3.5%~15%)的海底火山热液,pH<7,而照壁山矿床流体为中低温(156.7~253.5°C)、中低盐度(7.3%~13.2%)的岩浆水和大气降水的混合热液,pH<4(Ⅱ),pH约为4.5~7(Ⅲ)(池三川,1994;安伟等,2003;陈衍景等,2007;王玉奇,2009)。浅成低温热液矿床与隐伏的中酸性侵入岩有关,成矿流体为岩浆水和大气降水的混合,分为低硫型(低温,低盐度,pH值接近中性)、中硫型(中低温、中低盐度,pH为2~3)、高硫型(中高温,中盐度,pH<2)(Hedenquist et al., 1994; Hedenquist et al., 2000; 陈衍景等, 2007; 宋国学等, 2018),根据上述成矿地质背景、矿床地质特征、成矿流体地球化学特征与高硫型、中硫型、低硫型浅成低温热液矿床对比,认为照壁山金铅锌多金属矿床为中硫型浅成低温热液矿床。

7 结 论

照壁山金铅锌多金属矿床位于柳树沟组第三岩性段内,发育硅化、明矾石化、高岭石化;根据矿物共生、穿插关系,其成矿过程可分为3个阶段:石英-黄铁矿-毒砂阶段(Ⅰ)、石英-金-黄铁矿-闪锌矿-方铅矿阶段(Ⅱ)、石英-黄铁矿-黄铜矿阶段(Ⅲ)。

照壁山矿床火山岩为典型双峰式火山岩组合,玄武岩端元富钠贫钾,其 K_2O/TiO_2 (0.24~2.48)和 K_2O/P_2O_5 (1.22~9.77)比值变化范围较大,且具有较高的La/Nb(2.49~3.83)、Ba/Nb(41.00~315.38)、Ba/La(14.50~92.45)比值,来源于地幔物质的部分熔融,且受到了地壳物质的混染,而流纹岩端元 K_2O/TiO_2 (19.04~43.07)和 K_2O/P_2O_5 (49.77~81.16)远大于玄武岩的比值,来源于地壳物质的部分熔融。

照壁山矿床石英脉中流体包裹体类型主要为气液两相,其均一温度为194.2~253.5°C(Ⅱ)、156.7~201.6°C(Ⅲ),盐度为7.9%~13.2%(Ⅱ)、7.3%~12.4%

(Ⅲ),具中低温、中低盐度、低氧逸度、低pH值特征,成矿流体 δD_{v-SMOW} 变化范围为-115.7‰~-95.4‰, δO_{v-SMOW} 变化范围为-0.51‰~7.19‰,表明成矿流体为岩浆水与大气降水的混合热液。结合矿床特征和地球化学对比,认为照壁山金铅锌多金属矿床为中硫型浅成低温热液矿床。

References

- An W, Cao Z M, Zheng J B, Liu J and Chen M. 2003. The developments of study on ancient and modern volcanogenic massive sulfide deposit[J]. *Advances in Earth Sciences*, 18(5): 773-782(in Chinese).
- Bodnar R J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of $H_2O-NaCl$ solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica acta*, 57(3): 683-684.
- Charvet J, Laurent-Charvet S, Fauer M, Cluzel D and Jong K D. 2011. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 54(2): 166-184.
- Chen Y J, Ni P, Fan H R, Pirajon F, Lai Y, Su W C and Zhang H. 2007. Diagnostic fluid inclusions of different types hydrothermal gold deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(9): 2085-2108(in Chinese with English abstract).
- Chi S C. 1994. Non-volcanic environment submarine sedimentary-exhalation ("SEDEX") deposit[J]. *Earth Science Frontiers*, 1(4): 183 (in Chinese).
- Christiansen R L. 1984. Yellowstone magmatic evolution: Its bearing on understanding large-volume explosive volcanism[J]. *Explosive Volcanism: Inception, Evolution, and Hazards*, 84-95.
- Du Y L, Li Z M, Jiang H B, Wang L S, Zhan X D and Zhang Z Y. 2016. Analysis on the distribution and ore potentials of gold deposits in Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 49(1): 121-134(in Chinese with English abstract).
- Gao J G, Li W Y, Liu J C, Gao Y X, Guo Y X, Guo X C, Zhou Y and Fan T B. 2014. Geochemistry, zircon U-Pb age and Hf isotopes of Late Carboniferous rift volcanic in the Sepikou region, eastern Bogda, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12): 3539-3552 (in Chinese with English abstract).
- Gao R Z, Xue C J, Man R H, Dai J F, Zhao X B, Zhao Y, Yaxia er Y L K, Bakhtiar N, Nikolay P and Mo X X. 2021. Zn-Pb metallogeny and prospecting orientation of Tianshan in China and abroad[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(1): 36-79(in Chinese with English abstract).
- Gu L X, Hu S X, Yu C S, Li H Y, Xiao X J and Yan Z F. 2000. Carboniferous volcanites in the Bogda orogenic belt of eastern Tianshan: Their tectonic implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 305-316(in Chinese with English abstract).
- Gu L X, Hu S X, Yu C S, Wu C Z and Yan Z F. 2001. Initiation and evolution of the Bogda subduction-torn-type rift[J]. *Acta Petrolog-*

- ica Sinica, 17(4): 585-597(in Chinese).
- Guo F, Fan W M, Wang Y J and Li C W. 2005. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous high-K calc-alkaline volcanic rocks in the Laiyang Basin of the Sulu Belt, eastern China[J]. *Island Arc*, 14(2): 69-90.
- Han Y and Zhao G. 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. *Earth-Science Reviews*, 186(1): 129-152.
- Hedenquist J W and Lowenstern J B. 1994. The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits[J]. *Nature*, 370(6490): 519-527.
- Hedenquist J W, Arribas R A and Gonzalez-Urien E. 2000. Exploration for epithermal gold deposits[M]. *Gold in 2000. Society of Economic Geologists: Hagemann S G, Brown P E.* 13: 245-277.
- Hofmann A W. 1988. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297-314.
- Huang Z X, He Z B, Qin M K, Zhang J J, Liu Z Y and Xu Q. 2012. Discussion on the application of $\delta D - \delta^{18}O$ diagram in hydrogen and oxygen isotope tracer system: Also on the source of ore-forming in Jiabigou gold deposit[J]. *Mineral Deposits*, 31(Supp.): 555-556(in Chinese).
- Jin L Y. 2014. Geological characteristics and its tectonic significance of the Paleozoic volcanic rocks in Bogda-Harlik[D]. Supervisor: Zhu Z X. Urumqi: Xinjiang University. 1-120(in Chinese with English abstract).
- Li J Y. 2004. Late Neoproterozoic and Paleozoic tectonic framework and evolution of eastern Xinjiang, NW China[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 50(3): 304-322(in Chinese).
- Li J Y, Wang K Z, Li Y P, Sun G H, Chu C H, Li L Q and Zhu Z X. 2006. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(8): 895-909(in Chinese with English abstract).
- Ma X H, Chen B, Wang C and Yan X L. 2015. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Zircon U-Pb geochronological, geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from the Harlik pluton, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 89-104(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Yang J M, Han C M and Wang Z L. 2002. Metallogenic systems of polymetallic copper and gold deposits and related metallogenic geodynamic model in eastern Tianshan, Xinjiang[J]. *Journal of Earth Science*, 27(4): 413-424(in Chinese with English abstract).
- Qin K Z, Peng X M, San J Z, Xu X W, Fang T H, Wang S L and Yu H F. 2003. Types of major ore deposits, division of metallogenic belts in eastern Tianshan, and discrimination of potential prospects of Cu, Au, Ni mineralization[J]. *Xinjiang Geology*, 21(2): 143-150(in Chinese with English abstract).
- She J Z, Feng C L, Jia J, Di X C and Duan X J. 2018. The division of the tectonic units of the orogenic belt in the middle East Tianshan Mountain and its evolution characteristics[J]. *Xinjiang Geology*, 36(2): 135-141(in Chinese).
- Sigurdsson H. 1977. Generation of Icelandic rhyolites by melting of plagiogranites in the oceanic layer[J]. *Nature*, 269(5623): 25-28.
- Song G X, Qin K Z, Li G M and Wang L. 2018. Basic characteristics and research progresses of intermediate sulfidation type epithermal gold poly-metallic deposits, and prospects[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 748-762(in Chinese).
- Song Q Q, Feng J P, Pan Z C and Sun X F. 2020. SHRIMP U-Pb zircon dating and dating of the late Carboniferous Liushugou Formation basalts in the Bogda area, Xinjiang[J]. *Xinjiang Youse Jinshu*, 43(4): 90-91(in Chinese with English abstract).
- Tang G J, Chung S L, Hawkesworth C J, Cawood P A, Wang Q, Wyman D A, Xu Y G and Zhao Z H. 2017. Short episodes of crust generation during protracted accretionary processes: Evidence from Central Asian Orogenic Belt, NW China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 464: 142-154.
- Tao W, Lu R K, Guo L, Li Y, Huang G and Yu F. 2022. Zircon U-Pb dating, geochemistry and tectonic significance of the volcanic rocks in Liushugou Formation, East Junggar[J]. *Chinese Journal of Geology*, 57(3): 782-808(in Chinese with English abstract).
- Wang J R, Li T D, Tian L P, Yu M, Wang H T, Zhao Z X and Tang Z L. 2010. Late Paleozoic tectonic-magmatic evolution in Bogda orogenic belt, Xinjiang: Evidence from geochemistry of volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1103-1115(in Chinese with English abstract).
- Wang X W, Xu X Y, Ma Z P, Chen J L, Zhu X H, Sun J M and Cui F L. 2015. Geochemical characteristics of the Late Carboniferous bimodal volcanic rocks in Jijitai area, eastern Bogda orogenic belt, and their geological significance[J]. *Geology in China*, 42(3): 553-569(in Chinese with English abstract).
- Wang X Z, Yang L C and Yi J. 2018. Comparison of geochemical characteristics between oceanic and continental tholeiite[J]. *Natural Sciences*, (7): 40-41(in Chinese).
- Wang Y Q. 2009. Comparative study on Sedex deposits and VMS deposits[J]. *Resources Environment & Engineering*, 23(3): 259-262(in Chinese).
- Wang Y X, Gu L X, Zhang Z Z, Wu C Z, Zhang K J, Li H M and Yang J D. 2006. Geochemistry and Nd-Sr-Pb isotopes of the bimodal volcanic rocks of the Bogda rift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1215-1224(in Chinese with English abstract).
- Weaver B L and Tarney J. 1984. Empirical approach to estimating the composition of the continental crust[J]. *Nature*, 310(5978): 575-577.
- Weaver B L. 1991. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(2-4): 381-397.
- Wedepohl K H. 1995. The composition of the continental crust[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217-1232.
- Wilkinson J J. 2001. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits[J]. *Lithos*, 55: 229-272.

- Xia L Q, Xia Z C, Xu X Y, Li X M and Ma Z P. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 77-89(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Zhang L C, Qin K Z, Sun S and Li J L. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): Implications for the continental growth of central Asia[J]. *American Journal of Science*, 304(304): 370-395.
- Xu Q Q, Ji J Q, Zhao L, Gong J F, Zhou J, He G Q, Zhong D L, Wang J D and Griffiths L. 2013. Tectonic evolution and continental crust growth of northern Xinjiang in northwestern China: Remnant ocean model[J]. *Earth-Science Reviews*, 126: 178-205.
- Xue C J, Ji J S, Zeng Z R and Yang J G. 1995. Basic types and forming law of the gold ore deposits on gold belt in eastern Tianshan Kanggur[J]. *Northwestern Geology*, 16(4): 30-36(in Chinese with English abstract).
- You Y X, Wang D M, Ma J and Wei J. 2021. Suvery design of Zhaobishan gold, lead zinc polymetallic ore in Mulei Country, Xinjiang[R]. Xinjiang: The second regional Geological Survey Brigade of Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resources Expioration and Development. 25-73(in Chinese).
- Zhou J R. 2014. Evolution characteristics of the eastern part of the basin in Bogda during the Late Paleozoic[D]. Supervisor: Li Y. Changsha: Chang'an University. 57-77(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 安伟, 曹志敏, 郑建斌, 刘激, 陈敏. 2003. 古代与现代火山成因块状硫化物矿床研究进展[J]. *地球科学进展*, 18(5): 773-782.
- 陈衍景, 倪培, 范宏瑞, Pirajno F, 赖勇, 苏文超, 张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征[J]. *岩石学报*, 23(9): 2085-2108.
- 池三川. 1994. 非火山环境海底沉积-喷流("SEDEX")矿床[J]. *地学前缘*, 1(4): 183.
- 杜亚龙, 李智明, 姜寒冰, 王立社, 詹小弟, 张洲远. 2016. 新疆地区金矿分布特征及找矿潜力分析[J]. *西北地质*, 49(1): 121-134.
- 高景刚, 李文渊, 刘建朝, 高云霞, 郭新成, 周义, 范庭宾. 2014. 新疆博格达东缘色皮口地区晚石炭世裂谷火山岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素研究[J]. *岩石学报*, 30(12): 3539-3552.
- 高荣臻, 薛春纪, 满荣浩, 代俊峰, 赵晓波, 赵云, 亚夏尔·亚力坤, Bakhtiar N, Nikolay P, 莫宣学. 2021. 中国及境外天山铅锌成矿作用与找矿方向[J]. *地球科学与环境学报*, 43(1): 36-79.
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 李宏宇, 肖新建, 严正富. 2000. 东天山博格达造山带石炭纪火山岩及其形成地质环境[J]. *岩石学报*, 16(3): 305-316.
- 顾连兴, 胡受奚, 于春水, 吴昌志, 严正富. 2001. 论博格达俯冲撕裂型裂谷的形成与演化[J]. *岩石学报*, 17(4): 585-597.
- 黄志新, 何中波, 秦明宽, 张建军, 刘章月, 许强. 2012. 氢氧同位素示踪体系中 δD - $\delta^{18}O$ 图解应用的探讨-兼论夹皮沟金矿成矿流体来源[J]. *矿床地质*, 31(增刊): 555-556.
- 靳刘圆. 2014. 博格达-哈尔里克古生代火山岩地质特征及构造意义[D]. 导师: 朱志新. 乌鲁木齐: 新疆大学. 1-120.
- 李锦轶. 2004. 新疆东部新元古代晚期和古生代构造格局及其演变[J]. *地质论评*, 50(3): 304-322.
- 李锦轶, 王克卓, 李亚萍, 孙桂华, 褚春华, 李丽群, 朱志新. 2006. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化[J]. *地质通报*, 25(8): 895-909.
- 马星华, 陈斌, 王超, 鄢雪龙. 2015. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自新疆哈尔里克侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素证据[J]. *岩石学报*, 31(1): 89-104.
- 毛景文, 杨建民, 韩春明, 王志良. 2002. 东天山铜金多金属矿床成矿系统和成矿地球动力学模型[J]. *地球科学*, 27(4): 413-424.
- 秦克章, 彭晓明, 三金柱, 徐兴旺, 方同辉, 王书来, 于海峰. 2003. 东天山主要矿床类型、成矿区带划分与成矿远景区优选[J]. *新疆地质*, 21(2): 143-150.
- 舍建忠, 冯长丽, 贾健, 邸晓辰, 段旭杰. 2018. 东天山中段造山带构造单元划分及演化特征[J]. *新疆地质*, 36(2): 135-141.
- 宋国学, 秦克章, 李光明, 王乐. 2018. 中硫型浅成低温热液金多金属矿床基本特征、研究进展与展望[J]. *岩石学报*, 34(3): 748-762.
- 宋倩倩, 冯江鹏, 潘占超, 孙秀凤. 2020. 新疆博格达地区晚石炭世柳树沟组玄武岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及时代讨论[J]. *新疆有色金属*, 43(4): 90-91.
- 陶威, 鲁如魁, 郭岭, 李阳, 黄岗, 宇峰. 2022. 东准噶尔柳树沟组火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质科学*, 57(3): 782-808.
- 王金荣, 李泰德, 田黎萍, 于漫, 王怀涛, 赵志雄, 汤中立. 2010. 新疆博格达造山带晚古生代构造-岩浆演化过程: 火山岩组合及地球化学证据[J]. *岩石学报*, 26(4): 1103-1115.
- 汪晓伟, 徐学义, 马中平, 陈隽璐, 朱小辉, 孙吉明, 崔方磊. 2015. 博格达造山带东段芨芨台子地区晚石炭世双峰式火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. *中国地质*, 42(3): 553-569.
- 王小钊, 杨柳晨, 伊洁. 2018. 大洋拉斑玄武岩与大陆拉斑玄武岩的地球化学特征差异对比[J]. *自然科学*, (7): 40-41.
- 王玉奇. 2009. Sedex 型矿床与 VMS 型矿床对比研究[J]. *资源环境与工程*, 23(3): 259-262.
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 张开均, 李惠民, 杨杰东. 2006. 博格达裂谷双峰式火山岩地质年代学与 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学特征[J]. *岩石学报*, 22(5): 1215-1224.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 77-89.
- 薛春纪, 姬金生, 曾章仁, 杨建国. 1995. 东天山康古尔金矿带金矿床基本类型及成矿规律[J]. *西北地质*, 16(4): 30-36.
- 游延祥, 王德明, 马剑, 魏军. 2021. 新疆木垒县照壁山金、铅锌多金属矿普查设计[R]. 新疆: 新疆地质矿产勘查开发局第二区域地质调查大队. 25-73.
- 周建仁. 2014. 博格达晚古生代盆地东段演化特征[D]. 导师: 李勇. 长沙: 长安大学. 57-77.