

青海省祁连县山阴凹槽海相火山岩型锌铜矿床 地球化学特征及其成因意义

刘青松^{1,2}, 袁万明¹, 冯星¹, 时贞¹, 曾小平³, 王涛³, 朱小勇¹, 王小龙¹

(1. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083; 2. 山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿, 山东 莱州 261442; 3. 青海地质调查局, 青海 西宁 810001)

摘要:祁连县山阴凹槽锌铜矿是中国一个典型的铜多金属成矿区,但总体研究程度较低,目前尚未见到地球化学研究报道。笔者结合矿床地质探讨火山岩主微量元素、稀土元素特征,矿床硫-铅同位素组成与成因。成矿火山岩 SiO_2 (46.96%~53.85%)、 TiO_2 (0.90%~2.02%) 质量分数较高,岩石以轻微富集大离子亲石元素(Rb、Ba、K)、相对亏损高场强元素(Nb、Ta、Ti)和Eu轻微正异常、Ce轻微负异常为特征,具有岛弧拉斑玄武岩和N-MORB的双重地球化学特征。火山岩岩浆来源于被俯冲流体交代的亏损地幔,形成环境为弧后盆地扩张环境。锌铜矿化的诸多因素,包括物质来源、容矿围岩和矿液通道等都与火山岩有关,锌矿主要赋存于硅化大理岩中,铜矿主要赋存于大理岩与片理化玄武岩接触带。

关键词:火山岩型;锌铜矿床;地球化学;成因意义;阴凹槽;祁连山

中图分类号:P618.41;P59

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2017)04-0105-10

Geochemistry and Genetic Significance of the Yin'aocao Marine Facies Volcanic Type Zn - Cu Deposits in Qilian Mountains, Qinghai Province

LIU Qingsong^{1,2}, YUAN Wanming¹, FENG Xing¹, SHI Zhen¹, ZENG Xiaoping³,
WANG Tao³, ZHU Xiaoyong¹, WANG Xiaolong¹

(1. Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing, 00083, China;

2. Sanshanda Gold Mine, Shandong Gold Mining (Laizhou). Co., Ltd, Laizhou 261442, Shandong, China;

3. Qinghai Geological Survey, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract: The Yin'aocao Zn - Cu deposits are an important polymetallogenic area in Qilian Mountains, Qinghai Province. The previous work in this area is less. Combined with basic geological characteristics, the geochemical characteristics of the volcanic rocks and the S - Pb isotope of this deposit have been studied in this paper. The volcanic rocks from this deposit have high SiO_2 (46.96%~53.85%) and TiO_2 (0.90%~2.02%) contents, enriching large ion lithophile elements (Rb, Ba and K), with relatively loss of high field strength elements (Nb, Ta and Ti), positive Eu anomaly and negative Ce anomaly characteristics. These geochemical characteristics

收稿日期:2017-08-29;修回日期:2017-09-28

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目“吉林省夹皮沟金矿带矿床保存变化与隆升剥露”(2015CB452606),中国地质调查局地质调查工作项目“青海省铜矿主要成矿类型选区研究”(基2011-03-04-06)和青海省地质调查局项目“青海省东昆仑东段斑岩型成矿规律研究与找矿靶区优选”(青地调勘2013-103)

作者简介:刘青松(1989-),男,研究生,矿产普查与勘探专业,研究方向岩浆岩与构造成矿。E-mail:15650766898@163.com

show the characteristics of and-arc tholeiite and N-MORB. The volcanic rock magma was derived from the depleted mantle and formed in the extension setting of arc back basin. The zinc and copper mineralization was caused by many geological factors related with volcanic rock, including material source, ore-bearing wall rocks and fluid channel. The zinc ore was mainly occurred in silicified maeble, while the copper mineralization was main; y occurred in the contact zone between marble and schistositized basalt.

Keywords: volcanic rock, Zn – Cu deposit, geochemistry, genetic significance, Yin’aocao; Qilian Mountains

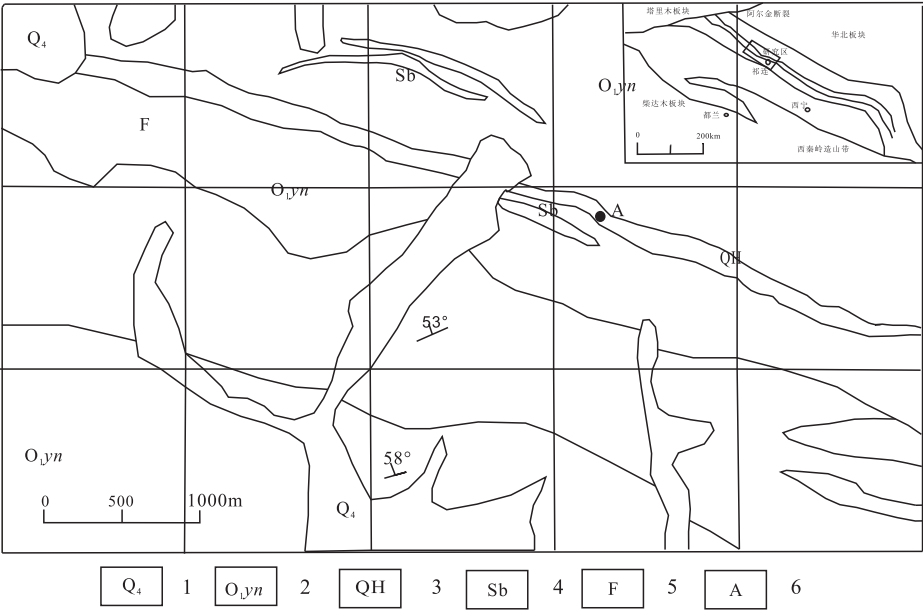
青海省阴凹槽锌铜矿床位于祁连县野牛沟乡境内北大河上游托莱山南坡,处于玉石沟-川勒沟洋壳构造岩片带内。区内地层出露较齐全。岩浆活动强烈,断裂构造发育,以北祁连南缘断裂为该区主要的断裂构造,沿托莱山分布,长度超过 50 km。前人只对该区矿床成因及成矿模型有所研究(李世金, 2011;郑振华,2012),对矿床地球化学及物质来源的研究薄弱,制约了该区域成矿规律和成矿条件的全面分析和认识。笔者探讨阴凹槽地区海相火山岩型锌铜多金属矿床地球化学特征及物质来源,为该区成矿规律和找矿预测提供新资料。

1 成矿地质背景

祁连县阴凹槽地区出露的地层主要有下奥陶统

阴沟群中基性火山岩组和下奥陶统阴沟群碎屑岩组、第四系。成矿物质主要赋存于基性火山岩组中。下奥陶统阴沟群中基性火山岩组呈北西西—南东东向展布,为该区内的含矿地层,展布方向与区内构造线方向一致(图 1)。其北侧被加里东期侵入岩侵位,南侧与下伏阴沟群群碎屑岩组呈断层接触。其岩性主要为变玄武安山岩、变玄武安山质凝灰熔岩、变砂岩和玄武岩。

受中北祁连深大断裂及托莱山北坡深大断裂的挟持,研究区内构造发育,呈北西西—南东东向展布,使得区内的地层与岩体之间呈断层接触,并且形成了大小规模不等的构造破碎带。研究区内铜锌矿形成主要与逆断层有关,呈北西西—南东东向贯穿于研究区中部,断层位于托莱山山脊,断层倾向北东,倾角 60°~80°,地表及深部断裂两侧破碎带较为



1. 第四系冰川;2. 奥陶系阴凹槽岩群;3 矿化带;4. 构造破碎带;5 逆断层;6. 采样点

图 1 祁连县山阴凹槽铜锌矿床地质图

Fig. 1 The geological map of Yin'aocao zinc-copper deposits in Qilian Mountains

发育,宽数米至数十米不等,沿断裂带断层崖、断层角砾岩等常见,局部地段矿化蚀变带发育。研究区内该断层为变玄武岩与硅化大理岩的界线,在该断层的北侧(上盘)主要为变玄武岩,南侧(下盘)主要为硅化大理岩中。阴凹槽铜锌矿就产于该断层的南侧硅化大理岩中。

侵入岩主要有侵入研究区北侧的加里东中期辉长岩体,出露面积规模不大,呈岩墙状产出。有少量中、酸性岩脉侵入,岩脉受断裂控制,走向与区域构造线一致,呈北西—南东向。岩性有辉绿岩脉、石英脉等。辉长岩体侵入于下奥陶统阴沟群中基性火山岩组、碎屑岩组的中基性火山岩、板岩中,普遍发生碳酸盐化、绿泥石化、绢云母化;岩体内接触带见有中基性火山岩捕虏体,岩体局部片理发育。研究区内火山岩由不同粒级的火山碎屑岩组成,呈长条带状、透镜状分布。含矿物质赋存于这种火山碎屑岩中。

矿区出露地层主要为下奥陶统阴沟群下岩性段,也是矿床的主要富矿地层,由一套中基性海相火山—沉积岩系构成,其层序自上而下为基性火山岩—泥质、硅质大理岩—火山角砾岩—沉凝灰岩—基性火山岩,基本反映了2个不完整的火山喷发—沉积旋回。成矿作用主要发生在第二喷发—沉积旋回中。

2 矿床地质特征

矿化蚀变由内向外是主矿蚀变带和外围蚀变带。主矿蚀变带含矿岩石一般为硅化大理岩、泥质大理岩、硅化含砾大理岩;早期形成的黄铁矿、黄铜矿呈浸染状分布于岩石中,后期由岩浆热液叠加富集所致黄铁矿、黄铜矿多呈脉状、团块状、透镜状;外围蚀变带总体呈北西—南东向,有黄铁矿化、褐铁矿化,局部黄铜矿化、孔雀石化等。

围岩蚀变主要发育在矿体下盘。蚀变类型为硅化、黄铁矿化、黄铜矿化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化及滑石化。其中硅化和绢云岩化与矿化关系较为密切,硅化较强烈发育地段往往黄铁矿富集,黄铜矿也相对富集。硅化、硫化物矿化有面状、层纹状、条带状,也有细脉状和网脉状。由远至近矿围岩蚀变依次绿帘石化、黄铁矿化、强黄铁矿化、硅化、碳酸盐化和绿泥石化(郑振华,2012)。硅化和绢云岩化较早,黄铁矿化和绿帘石化次之,碳酸盐化最晚。硅

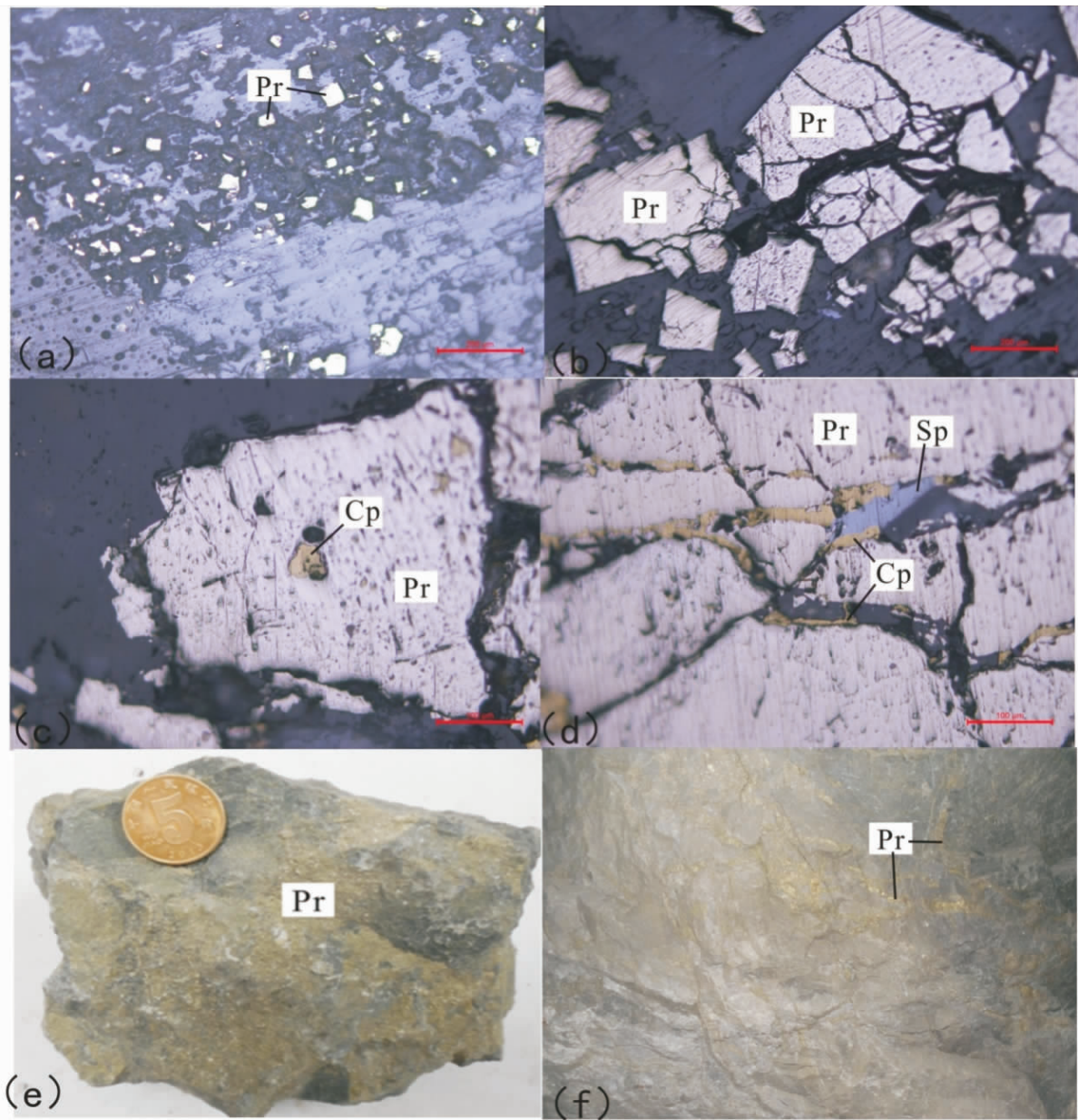
化和绢云岩化强烈发育的部位,往往有利于找到矿。碳酸盐化是区内较为普遍的围岩蚀变,普遍存在于变玄武岩、变玄武质凝灰岩、变玄武质火山角砾岩中。绢云母化、绿泥石化、闪石化均发育于玄武岩、变玄武质凝灰岩中。

矿床由东西2条北西西向铜锌矿化蚀变带组成。西矿化蚀变带长2200 m,宽20~160 m,蚀变带主要有泥质大理岩、硅化大理岩类及基性火山熔岩组成,矿化强烈蚀变,普遍可见细脉状、浸染状黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿矿化特征。东矿化蚀变带长600 m,宽10~40 m,蚀变带主要以中基性火山岩为主,夹杂有少量的石英岩、大理岩,带内黄铁矿化蚀变强烈,并见有矾类矿物组合。

祁连县阴凹槽海相火山岩型铜锌等多金属矿床赋矿地层主要为下奥陶统阴沟群中基性火山岩组、碎屑岩组的中基性火山岩、板岩中。矿体中矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、褐铁矿、孔雀石、铜蓝;脉石矿物有石英、方解石、斜长石、白云石、绢云母。绝大部分矿体均产于南北玄武岩所夹持的大理岩中,其中北侧大理岩与玄武岩为明显的逆冲断层接触;南侧大理岩与玄武岩为整合接触关系,个别矿体呈脉状赋存于变玄武岩和大理岩接触带的变玄武岩一侧。锌矿体呈脉状赋存于硅化大理岩中,铜矿体呈脉状赋存在大理岩与片理化玄武岩接触带的玄武岩和硅化大理岩中,矿体产状与围岩一致。黄铜矿呈斑点状、细脉状,铜矿体呈透镜状、似层状,矿体倾向23°,倾角68°,矿体围岩为硅化大理岩。锌矿体呈透镜状、似层状,矿体倾向20°,倾角60°,赋存在硅化大理岩中。矿石主要为黄铁矿矿石、闪锌矿矿石、黄铜矿矿石、方铅矿矿石。矿石主要以浸染状、细脉状、角砾状为主,次为团块状和网脉状构造。镜下见黄铁矿碎裂结构、包含结构、共生边结构等。矿石矿物主要有黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、褐铁矿、孔雀石,次有铜蓝;脉石矿物有石英和方解石,次有斜长石和白云石等(图2)。

3 矿床地球化学特征

研究样品主要有托莱山山脊与成矿作用有关的中奥陶统阴沟群中基性火山岩中5个样品,按照序号1~5分别为玄武岩、玄武质角砾熔岩、安山玄武岩、粗玄武岩、玄武岩。玄武岩均已不同程度蚀变,岩石



(a). 黄铁矿呈立方体,反射单偏光(10×10);(b). 碎裂结构:黄铁矿破碎,边缘呈锯齿状,具有裂隙;反射单偏光(10×10);(c). 包含结构:黄铁矿包含黄铜矿;反射单偏光(10×10);(d). 共生边结构:黄铜矿与闪锌矿相互接触,共同生长;反射单偏光(10×10);Cp. 铜矿, Pr. 铁矿, Sp. 锌矿;(e). 黄铁矿呈浸染状产出;(f). 黄铁矿呈脉状产出

图 2 阴凹槽铜锌床岩矿石显微照片

Fig. 2 Yin'aocao zinc-copper deposit rock micrograph

呈灰绿色,斑晶 1.1~2.1mm;基质 0.1~0.5 mm。具有斑状结构,枕状构造,可见孔雀石矿化脉。玄武质角砾岩呈灰绿色,颗粒大小为 2~5 cm,块状构造,可见黄铜矿、黄铁矿。玄武岩和玄武质角砾岩硅化和绢云母化比较强烈。

3.1 主量元素地球化学特征

阴凹槽矿区火山岩 SiO₂ 含量 46.96% ~

53.85%,属基性岩范围;岩石 TiO₂ 质量分数为 0.90%~2.02%。平均为 1.36%,质量分数较高;全碱(Na₂O+K₂O)含量 2.52%~4.54%;Na₂O/K₂O 值为 2.72~11.60,均为相对富钠贫钾,比值变化大;K₂O 含量为 0.72%~0.92%,它高于现代大洋拉斑玄武岩的平均值 0.24%;Na₂O 含量为 2.5%~3.52%,Al₂O₃ 质量分数为 8.77%~

15.29%, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 值为 0.3~0.77,氧化钙的含量很高,为 6.59%~12.19%。 σ^{43} 为 0.76~2.27,均小于 4,指明其为钙碱性岩(表 1、表 2)。考虑到该区火山岩在蚀变过程中岩石化学成分(K 和

NaO)的变化,采用较为稳定的微量元素以及蚀变过程中变化较小的 Ti、Mn、P、Zr、Nb、Y 等元素地球化学图解可能会更好地反映岩石类型和构造环境(康鸿杰等,2012)。

表 1 阴凹槽火山岩主量元素质量分数表(%)
Tab. 1 Major elements content of Yin'aocao volcanic rocks(%)

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	LOS	总计
YAC-1	51.80	1.39	15.29	2.6	8.45	0.18	5.7	6.96	3.33	0.72	0.15	3.2	0.07	99.84
YAC-2	46.96	2.02	8.77	4.49	5.82	0.16	9.88	12.19	2.5	0.92	0.21	2.45	3.34	99.71
YAC-3	53.85	1.29	14.61	2.88	7.7	0.15	5.69	6.59	2.76	0.72	0.17	0.36	2.82	99.59
YAC-4	50.78	0.9	13.72	0.65	9.04	0.19	8.02	8.14	3.52	1.02	0.14	0.36	2.9	99.38
YAC-5	49.88	1.21	14.01	1.44	9.24	0.2	7.32	9.74	2.32	0.2	0.13	0.28	3.6	99.57

表 2 阴凹槽火山岩 CIPW 质量分数表(%)
Tab. 2 CIPW contents of Yinao'cao volcanic rocks(%)

样品	Q	An	Ab	Or	Ne	Di	Hy	Ol	Il	Mt	Ap	合计
YAC-1	3.54	25.52	29.18	4.41	0	7.57	22.79	0	2.73	3.9	0.36	100
YAC-2	0	10.65	22.2	5.79	0.19	41.73	0	9.43	4.09	5.4	0.52	100
YAC-3	10.11	26.29	24.22	4.41	0	5.29	22.39	0	2.54	4.33	0.41	100
YAC-4	0	19.37	30.99	6.27	0	17.77	8.63	13.88	1.78	0.98	0.34	100.01
YAC-5	2.23	28.45	20.52	1.24	0	17.36	25.32	0	2.4	2.18	0.31	100

样品	A	P	AR	R1	R2	F1	F2	F3	A/MF	C/MF	A/CNK	SI
YAC-1	8.71	50.4	1.45	1 826	1 375	0.53	-1.51	-2.44	0.51	0.43	0.808	27.4
YAC-2	13.61	25.03	1.39	1 811	2 096	0.34	-1.59	-2.4	0.22	0.57	0.322	42.02
YAC-3	7.89	47.03	1.39	2 198	1 321	0.55	-1.49	-2.41	0.5	0.41	0.844	28.81
YAC-4	13.85	42.78	1.52	1 667	1 600	0.48	-1.55	-2.46	0.4	0.44	0.632	36.04
YAC-5	2.1	48.11	1.24	2 223	1 756	0.47	-1.58	-2.4	0.42	0.53	0.644	35.67

在图 3c 火山岩全碱-硅(TAS)分类图 $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中样品点大部分都落入玄武岩中,只有第三组安山玄武岩落入玄武安山岩中。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 3c)中样品大部分落入钙碱性系列中,只有一个样品玄武岩落入低钾(拉斑)系列中。图 3d 玄武岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解中样品全部落入钠质区域中。总体属于富钠贫钾钙碱性玄武岩,与岛弧拉斑玄武岩和 N-MORB 岩石地球化学特征相似。总体特征为钙铝含量较高,碱含量适中,相对富钠贫钾,贫硅。从岩石的主要氧化物特征还可以看出, Fe_2O_3 与 SiO_2 都成正相关的关系, MgO 含量较低。 TiO_2 含量较高(1.39%~2.02%),接近或高于 N-

MORB。
3.2 微量元素地球化学特征
该区火山岩微量元素质量分数见表 3。火山岩含有相对较高的高场强元素(HFSE)。在玄武岩构造环境 $\text{Zr}-\text{Zr}/\text{Y}$ 判别图中(图 4b),样品落入洋中脊拉斑玄武岩和岛弧拉斑玄武岩区域环境中;玄武岩构造环境判别 TiO_2-Zr 图中(图 4c),样品全部在 MORB 区域中,说明都属于洋中脊玄武岩;玄武岩构造环境 $\text{TiO}_2-\text{P}_2\text{O}_5$ 判别图中(图 4a),样品为岛弧拉斑玄武岩类。 $\text{Zr}/\text{TiO}_2<0.008$, $\text{Nb}/\text{Y}<0.6$,均显示出拉斑系列火山岩系; Zr 含量 $95.4\times10^{-6}\sim95.5\times10^{-6}$,位于典型洋中脊玄武岩丰度范围内;

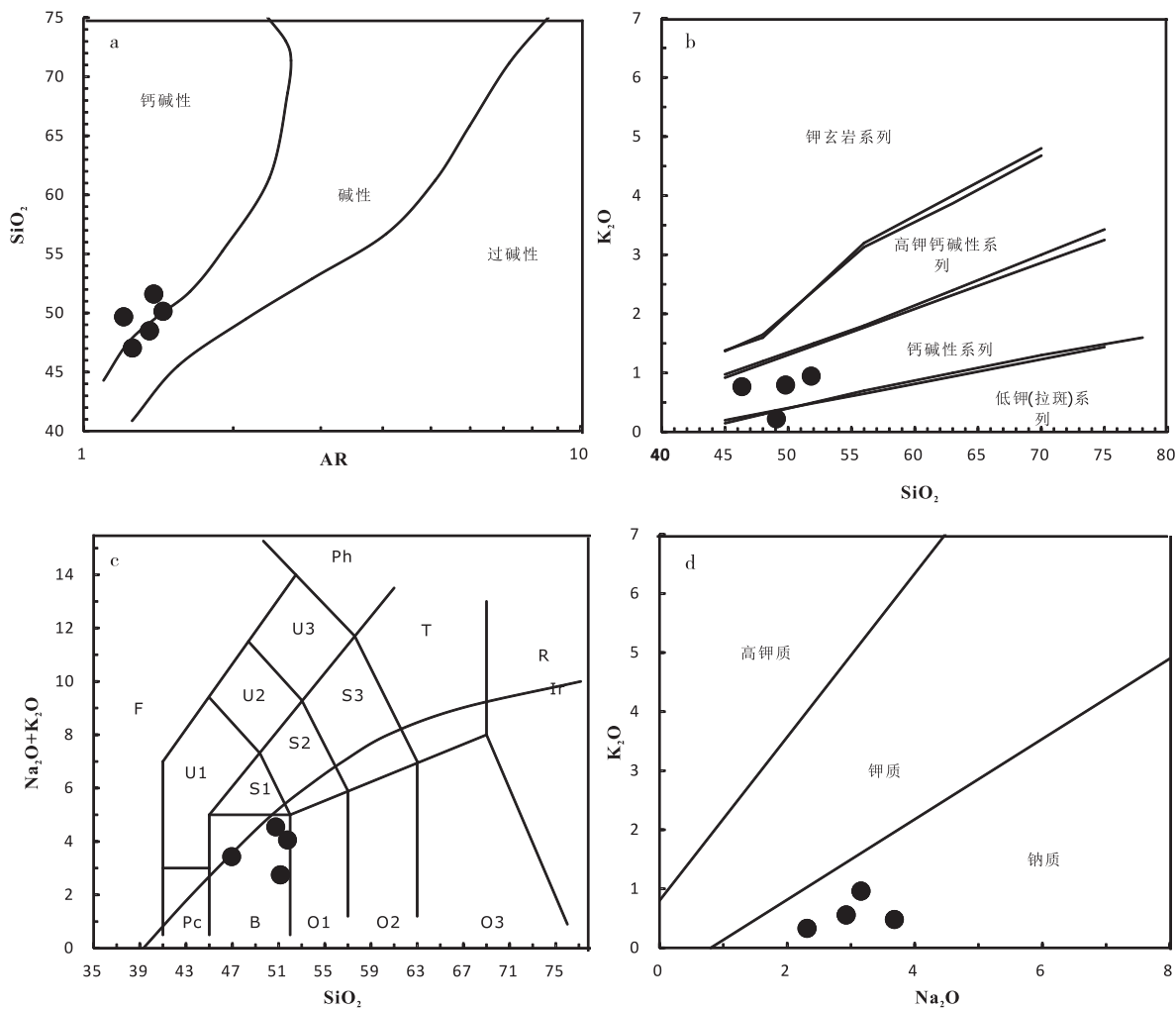
Hf 含量变化在 $2.2 \times 10^{-6} \sim 2.5 \times 10^{-6}$, 大致相当于 MORB 的 Hf 平均含量 (2.4×10^{-6}); Nb 含量变化在 $7.48 \times 10^{-6} \sim 14.4 \times 10^{-6}$, 位于洋中脊玄武岩 Nb 含量变化范围 ($Nb < 12 \times 10^{-6}$, CONDIE, 1989), Ta 含量为 0.63×10^{-6} , 类似于亏损型 MORB 和岛弧型玄武岩 ($Ta \leq 0.7 \times 10^{-6}$, CONDIE, 1989)。

在高场强元素 (HFSE) Nb 蛛网图上具有显著异常, 属较为典型的岛弧特征 (图 4e)。从 P 到 Y 比较平坦, 接近 1 的平坦型分布, 这不仅与岛弧拉斑玄武岩特征相似, 而且类似于 N-MORB。因此, 从微量元素组成特征看, 该套玄武岩具有岛弧拉斑玄武

岩和 N-MORB 双重地球化学特征。

3.3 稀土元素地球化学特征

研究区火山岩样品稀土总量在 $\Sigma REE = 60.38 \times 10^{-6} \sim 83.57 \times 10^{-6}$, 平均值为 71.98×10^{-6} ; LREE 范围 ($40.32 \times 10^{-6} \sim 73.45 \times 10^{-6}$), 平均值为 56.89×10^{-6} ; HREE 在 $10.12 \times 10^{-6} \sim 20.06 \times 10^{-6}$, 平均值为 15.09×10^{-6} ; LREE/HREE 值在 $2.01 \sim 7.26$ 。以上稀土元素特征显示轻重稀土分异明显, 相对富集 LREE, 亏损 HREE 特征 (表 3)。玄武质角砾熔岩稀土元素分布型式图中 (图 4f), La/Yb 为 13.32, (La/Yb)_n 为 8.98, 二者都大于 1, 曲线向右倾斜; 为轻稀土富集重稀土亏损型, 反映轻稀



a. AR-SiO₂图解; b. SiO₂-K₂O图解; c. SiO₂-Na₂O+K₂O图解; d. Na₂O-K₂O图解; Pc. 苦橄玄武岩; B. 玄武岩; O1. 玄武安山岩; O2. 安山岩; O3. 英安岩; R. 流纹岩; S1. 粗面玄武岩; S2. 玄武质粗面安山岩; S3. 粗面安山岩; T. 粗面岩、粗面英安岩; F. 副长石岩; U1. 碱玄岩、碧玄岩; U2. 响岩质碱玄岩; U3. 碱玄质响岩; Ph. 响岩; Ir. Irvine 分界线, 上方为碱性, 下方为亚碱性

图 3 阴凹槽火山岩岩石地球化学图解

Fig. 3 Geochemical diagrams for volcanic rocks from Yin'aocao

表 3 阴凹槽火山岩稀土元素质量分数(10⁻⁶)

Tab. 3 Rare earth element contents of Yinao'cao volcanic rocks(10⁻⁶)

样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
YAC-1	6.52	15.16	2.64	11.56	3.18	1.26	4.59	0.82	5.44	1.18	3.45
YAC-2	14.25	31.31	4.53	18.04	3.99	1.33	3.55	0.52	2.77	0.53	1.34
样品编号	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	La _N /Yb _N	δEu	δCe
YAC-1	0.56	3.50	0.52	52.50	60.38	40.32	20.06	2.01	1.34	1.01	0.90
YAC-2	0.19	1.07	0.15	22.00	83.57	73.45	10.12	7.26	9.55	1.06	0.95
样品编号	La/Yb	Gd/Yb	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	Sm/Nd	La/Sm	Rb	Ba	Th	Nb	Zr
YAC-1	1.86	1.31	1.26	1.29	0.28	2.05	11.4	83.4	1.02	7.48	95.4
YAC-2	13.32	3.32	8.98	2.25	0.22	3.57	16.5	211	2.02	14.4	95.5
样品编号	Hf	Sc	Cr	Cu	Pb	Zn	Sr	Ta			
YAC-1	2.5	39.8	52.4	45	4.4	115	87.2	0.63			
YAC-2	2.2	38.3	1 608	102	7.1	86	184	1.23			

注:广州澳实矿物实验室,袁万明。

土元素内部分异情况的 La/Sm 为 3.57, (La/Sm)_n 为 2.25,说明轻稀土元素内部分异,显示出幔源火山岩的特征;δEu=1.06,说明 Eu 轻微正异常, Eu 正异常说明当时处于高温还原环境;δCe=0.95,这与海水碎屑沉积物稀土元素组成特征极为相似。玄武岩稀土元素分布型式图中,Sm/Nd 为 0.28,反映物质来源为幔源(0.260~0.375)。La/Yb 为 1.86, (La/Yb)_n 为 1.26,二者都大于 1,曲线接近平坦型,轻重稀土分馏不明显。反映轻稀土元素内部分异情况的 La/Sm 为 2.05, (La/Sm)_n 为 1.29,说明轻稀土元素内部分异;Sm/Nd 为 0.28,说明重稀土元素分异不明显。δEu=1.01,说明无明显铈亏损或富集;δCe=0.9,Ce 略微亏损。

3.4 硫铅同位素特征

本次获得硫铅同位素测试结果 1 件,样品为黄铜矿,阴凹槽铜锌矿床的硫同位素 δ³⁴S 含量为 8.9‰,组成与陨硫硫的同位素组成相近。²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 含量为 18.09‰、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 含量为 15.58‰, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 含量为 38.02‰。笔者通过统计和计算阴凹槽铜锌矿床的铅同位素组成、源区特征值特征,并通过制作铅同位素²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 增长曲线进一步探索阴凹槽铜锌矿床的物质来源、成因、构造环境。铅同位素可以用来示踪物源,在铅构造模式示踪时,投影点落在造山带增长线上方的矿山铅必然包含上地壳成分;而投影点位于造山带增长线

下方的矿石铅则必然源于地幔或下地壳;投影点位于造山带附近,矿石铅为混合源(ZARTMAN et al., 1981;STACEY et al.,1893)。

阴凹槽锌铜矿床的铅同位素组成数据的²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb-²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 增长曲线上,样品落在造山带平均曲线之上或上地壳平均曲线之间,表明阴凹槽铜锌矿床成矿物质为上地幔与上覆盖层混合来源。

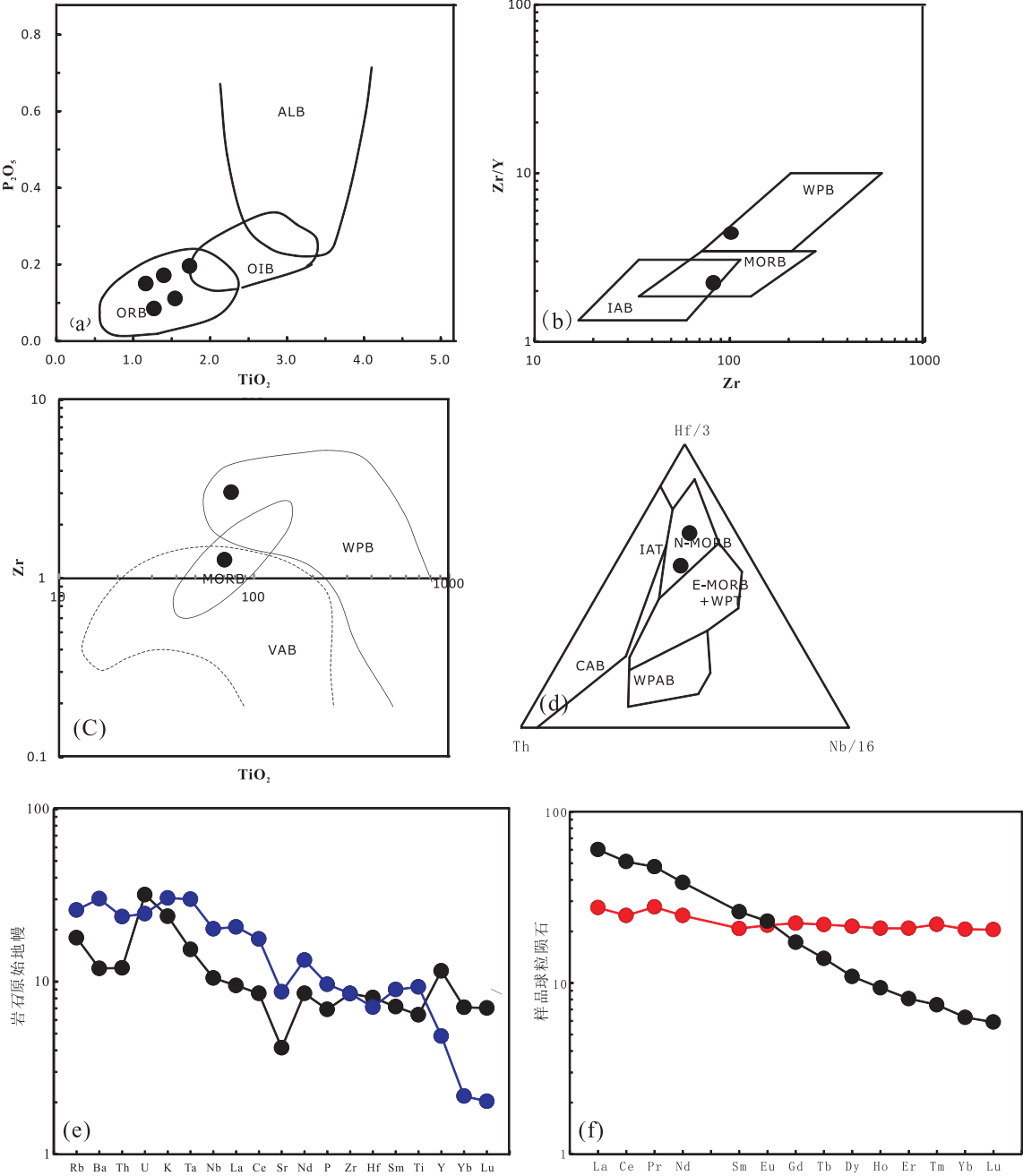
李世金(2011)对矿石中的硅化石英脉流体包裹体测温,结果显示,石英中流体包裹体都较小,多在 4~6 μm,类型均为气液两相包裹体,气液比为 20% 左右。由于包裹体较小而无法测定,所获得的 4 个冰点温度为-5.3~-2.7℃,20 个均一温度为 119.4~179.5℃,均一温度主要集中在 2 个区间,即 130~140℃,和 150~160℃;盐度为 4.48%~8.27%;密度在 0.95~0.99 g/cm³;表明成矿流体具低温、中盐度、高密度的流体性质。

4 成因及意义

岩石 TiO₂变化范围介于岛弧火山岩(0.58%~0.85%)和典型洋中脊玄武岩(1.60%)之间(HOF-MANN A W,1991),更靠近洋中脊火山岩w(TiO₂)平均值;Na₂O/K₂O 值变化大,可能与细碧岩化作用有关。K₂O 含量高于现代大洋拉斑玄武岩的平

均值 0.24%，可能是岩石经历了绿片岩相的区域变质作用后，发生了不同程度的蚀变，导致 K_2O 成分的升高，并伴有 K、Si、Fe、Mg 等组分一定程度的变化所致。通过构造环境 $Zr - Zr/Y$ 图(图 4b)，说明当时形成矿床的构造环境属于洋壳俯冲阶段，即符

合当时加里东运动的构造环境。玄武质角砾熔岩 La/Sm 和 $(La/Sm)_n$ 显示出幔源火山岩的特征。 δEu 反映出当时处于高温还原环境， Sm/Nd 反映物质来源为幔源(0.260 ~ 0.375) (LUDWIG K R, 1998)。玄武岩 δCe 略微亏损，说明岩浆结晶时没有



a. $P_2O_5 - TiO_2$ 图解; b. $Zr/Y - Zr$ 图解; c. $TiO_2 - Zr$ 图解; d. Th - Hf - Nb图解; e. 微量元素标准化分配型式; f. 稀土元素球粒陨石标准化分配型式(标准化值据 BOYNTON, 1984); IAT. 岛弧拉斑玄武岩; CAB. 钙碱性玄武岩; WPAB. 板内拉斑玄武岩; MORB. 洋中脊玄武岩; WPB. 板内玄武岩; VAB. 火山弧玄武岩; OIB. 洋岛玄武岩; ORB. 洋脊玄武岩; IAB. 岛弧玄武岩; ALB. 弧玄武岩

图 4 阴凹槽火山岩岩石地球化学图解

Fig. 4 Geochemical diagrams for volcanic rocks from Yin'aocao

斜长石分离结晶或斜长石分离结晶较弱,也说明了地壳的成熟度不高。具典型 N - MORB 稀土元素地球化学特征,表明火山岩岩浆来自亏损的软流圈地幔。 $\delta^{34}\text{S}$ S 组成与陨石硫的同位素组成相近,表明阴凹槽铜锌矿床的 S 质主要来源于地幔或上地幔,与玄武岩的来源一致。 $\delta^{34}\text{S}$ 8.9‰ 显示较大正值。同时也与北祁连加里东期经历了强力拉张,形成裂谷,大规模的地幔岩浆底侵和壳幔混合作用的大地构造背景一致。造成这个矿床硫化物中硫同位素为较大正值的原因是成矿流体在成矿作用过程中本身产生的沸腾去气作用导致 S 同位素分馏效应所致(许庆林,2014)。一般认为 $^{208}\text{Pb}/(^{207}\text{Pb}+^{206}\text{Pb})$ 值大于 1.13 为 Th - Pb 的混染,小于 1.13 则为 U - Pb 的混染(李世金等,2008),对阴凹槽铜锌矿床来说,大部分样品的 $^{208}\text{Pb}/(^{207}\text{Pb}+^{206}\text{Pb})$ 值小于 1.13,说明阴凹槽铜锌矿床矿石中的铅源具有多来源和混合源的特征。与消减洋壳板块俯冲到楔形地幔,洋壳内的含水流体对岛弧岩浆的地幔源区交代的地质背景一致。

阴凹槽火山岩样品以 Nb、Ta、Ti 高场强元素(HSFE)相对亏损为特征,尽管 Nb、Ta、Ti 的相对亏损是岛弧岩浆的典型特征,但是具有该特征的岩浆却可以出现在多种构造环境中。

虽然微量元素对 Nb/La(0.28~0.61),Th/Ta(2.21~4.22)、Th/Nb(0.16~0.28)等值都揭示早古生代区内可能存在板块的俯冲活动,岩浆来自受俯冲流体交代的亏损地幔源区或受其影响,但是所有样品在稀土元素配分曲线图上呈近平坦型,且在微量元素 TiO_2 -Zr 图解中(图 4c),所有样品投点基本都落在 MORB 区域内,所以,区内火山岩又显示具有 N - MORB 洋脊玄武岩的部分特征。鉴于消减带之上的弧后盆地次级扩张产生的新洋壳兼有洋中脊玄武岩和岛弧玄武岩 2 种地球化学特征(GRIBBLE RF,1996;赖绍聪等,2003),阴凹槽火山岩应该形成于弧后盆地环境,系类似于洋中脊的海底扩张作用所形成(冯益民等,1992)。

古祁连洋壳至少在早奥陶世初期已经进入俯冲阶段,引起了岛弧火山岩浆活动的同时,弧后扩张盆地也形成(SONG S G,2006; SONG S G,2009),构成了该时期的北祁连沟-弧-盆体系,具有洋中脊玄武岩和岛弧玄武岩特征的阴凹槽铜锌矿床的赋矿火山岩形成于此时的弧后盆地扩张环境。志留纪中晚

期,该弧后盆地向南俯冲,导致古祁连洋的最终闭合(康鸿杰等,2012)。阴凹槽铜锌矿床的成矿作用主要发生在火山活动结束后的喷气阶段,扩张及裂谷的形成和发展控制了该区的块状硫化物矿床。

5 结论

(1)阴凹槽矿区火山岩 SiO_2 含量少, TiO_2 变化范围广,介于岛弧火山岩和典型洋中脊玄武岩之间,更靠近洋中脊火山岩 $\omega(\text{TiO}_2)$ 平均值;为相对富钠贫钾,比值变化大,可能与细碧岩化作用有关。

(2)阴凹槽火山岩高场强元素(Nb、Ti)相对亏损,显示岛弧岩浆特征;稀土元素分布曲线呈平坦型,又具 N - MORB 洋脊玄武岩特征;岩石元素地球化学特征表明该地岩浆是由于富含流体的洋壳俯冲到地幔,交代地幔而形成;其形成环境为弧后盆地扩张环境。

(3)阴凹槽铜锌矿床的形成与北祁连早古生代构造岩浆旋回俯冲造山弧后盆地扩张环境的岛弧火山岩浆有关,具有洋中脊玄武岩和岛弧玄武岩双重特征。成矿物质来自于上地幔与地壳混合源,具有深部来源特征,与幔源基性岩浆低侵及其与壳源酸性岩浆的混合作用有关,属于典型的锌铜海相火山岩型矿床。

参考文献(References):

- 冯益民,吴汉泉.北祁连及其邻区古生代以来大地构造演化初探[J].西北地质科学,1992,13(2):62-73.
- FENG Yimin, WU Hanquan. Tectonic evolution of north Qilian mountains and its neighbourhood since Paleozoic [J]. Northwest Geoscience, 1992, 13(2): 62-73.
- 康鸿杰,孙柏年,白友良,等.北祁连山西段索铜沟火山岩地球化学特征及成因意义[J].吉林大学学报(地球科学版),2012,42(3):146-153.
- KANG Hongjie, SUN Bainian, BAI Youliang, et al. Geochemical Characteristic and Petrogenesis of Suotonggou Volcanic Rocks the Western Sector of the Northern Qilian Mountains [J]. Journal of Jilin University, 2012, 42 (3): 146-153.
- 李世金,孙丰月,王力,等.青海东昆仑卡而却卡多金属矿区斑岩型铜矿的流体包裹体研究[J].矿床地质,2008,27 (3):399-406.

- LI Shijin, SUN Fengyue, WANG Li, et al. Fluid inclusion studies of porphyry copper mineralization in Kaerqueka polymetallic ore district, East Kunlun Mountains, Qinghai Province[J]. *Deposit Geology*, 2008, 27(3): 399-406.
- 李世金. 祁连造山带地球动力学演化与内生金属矿产成矿作用研究[D]. 吉林大学, 2011.
- LI Shijin. Geodynamic Evolution of Qilian Orogenic Belt and Metallogenesis of Endogenous Metacals[D]. Jilin University, 2011.
- 赖绍聪, 刘池阳. 青藏高原安多岛弧型蛇绿岩地球化学及成因[J]. *岩石学报*, 2003, 19(4): 675-682.
- LAI Shaocong, LIU Chiyang. Geochemistry and Genesis of The Island-Arc Ophiolite in Anduo Area, Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(4): 675-682.
- 许庆林, 孙丰月, 李碧乐, 等. 东昆仑莫河下拉银多金属矿床花岗斑岩年代学、地球化学特征及构造背景[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(2): 421-433.
- XU Qinglin, SUN Fengyue, LI Bile, et al. Geochronological-Dating, Geochemical characteristics and tectonic Setting of the Granite-Porphyry in the Mohexiala Silver polymetallic Deposit, Eastern Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(2): 421-433.
- 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. *大地构造与成矿学*, 2007, 31(1): 92-103.
- ZHAO Zhenhua. How to Use the Trace Element Diagrams To Discriminate Tectonic Settings[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(1): 92-103.
- 郑振华, 谢海林, 吴鸿梅, 等. 海省祁连县阴凹槽锌铜矿床成因[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2012, 30(3): 64-68.
- ZHENG Zhenhua, XIE Hailin, WU Hongmei, et al. The Yin Aocao Zinc-copper deposit genesis in Qilian county of Qinghai Province[J]. *Journal of Qinghai University (Natural Science Edition)*, 2012, 30(3): 64-68.
- CONDIE K C. Geochemical changes in basalts and sites across the Archaean-Proterozoic boundary: identification and significance[J]. *Lithos*, 1989, 23: 1-18.
- GRIBBLE R F, STERN R J, BLOOMER S H, et al. MORB Mantle and Subduction Components Interact to Generate Basalts in the Southern Mariana Trough Back-arc Basin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60: 2153-2166.
- HOFMANN A W. Mantle Geochemistry: The Message from Oceanic Volcanism[J]. *Nature*, 1997, 385: 219-228.
- LUDWIG K R. Using Isoplot/Ex: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. *Berkeley Geochronological Center Special Publication*, 1998, 1: 1-4.
- STACEY J and HEDLUND D C. Lead-isotope compositions of diverse igneous rocks and ore deposits from southwestern New Mexico and their implication for early Proterozoic crustal evolution in the western United States[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1983, 94: 43-57.
- SONG S G, ZHANG L, NIU Y L, et al. Evolution from Oceanic Subduction to Continental Collision: A Case Study of the Northern Tibetan Plateau Based on Geochemical and Geochronological date[J]. *Journal of Petrology*, 2006, 47: 435-455.
- SONG S G, NIU Y, ZHANG L, et al. Tectonic Evolution of Early Paleozoic HP Metamorphic Rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New Perspectives[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2009, 35(3): 334-353.
- ZARTMAN R E and DOE B R. Plumbo tectonics-the model[J]. *Tectonophysics*, 1981, 75: 35-162.