

青海虎头崖—肯德可克矿区 地球化学特征及其喷流成矿作用

李欢^{1,2,3}, 奚小双^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 九州大学 工学部地球资源系, 福岡 819-0395)

摘要: 虎头崖—肯德可克矿区地处柴达木南缘东昆仑祁漫塔格成矿带中, 矿床产出的大地构造背景为晚古生代的弧后扩张盆地, 矿床类型为 Sedex 型。对虎头崖—肯德可克矿区中的虎头崖铅锌矿、肯德可克多金属矿、北沟铁矿和景仁铜矿进行现场调查, 并对具有代表性的火山岩及矿石进行岩矿鉴定、化学全分析、稀土、微量元素分析及全岩硫同位素分析。结果表明: 矿区火山岩基本属于含钾高的亚碱性系列, 总体表现为亲弧裂谷特征, 火山喷发喷流成矿作用具有多旋回的特点; 矿石稀土元素、微量元素分析说明热水喷流成矿作用的存在, 与 Sedex 型喷流成矿特征和弧后伸展盆地大地构造环境相符合。虎头崖—肯德可克矿区具有如下成矿特点: 以层控矿床为主, 主要为海西期弧后盆地成矿; 具有多个层位成矿、以多元素成矿为主、具有由深源到浅源的成岩成矿作用的演化特征。

关键词: 虎头崖铅—锌矿; 肯德可克; 祁漫塔格; Sedex 型矿床; 弧后盆地

中图分类号: P611.1

文献标志码: A

Geochemistry and sedimentary exhalative mineralization in Hutouya—Kendekeke field, Qinghai Province, China

LI Huan^{1,2,3}, XI Xiao-shuang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Department of Earth Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan)

Abstract: Hutouya—Kendekeke field is located in the southern margin of the Qaidam, Qimantage ore belt of East Kunlun. The tectonic background of this field is the arc spreading basin in Carboniferous, Late Paleozoic. The Hutouya, Kendekeke and its nearby deposits (such as Jinren and Beigou) were used as the research objects. Based on a large number of references, systematic field investigation and laboratory analysis of rock and mineral geochemistry, the regional geological setting and mineralization conditions of the deposit were focused on, the mineralization law was summed up, and the genesis type was discussed. Through the rock and mineral identification, chemical analysis, REE, trace element analysis and whole-rock sulfur isotope analysis of the representative volcanic rocks and minerals in Hutouya, Kendekeke and its peripheral mine areas, it is found that the volcanic rocks are basically sub-alkaline series with high potassium, with the overall performance of pro-arc rift characteristics; the role of volcanic exhalative mineralization has the characteristics of multi-cycle. The results of REE and trace element analysis of minerals also show that the exhalative mineralization exists, which is consistent with the metallogenic characteristics of Sedex deposit and tectonic environment of back-arc extensional basin. Furthermore, the mineralization characteristics of Hutouya, Kendekeke and its peripheral mine areas are summarized as follows: mainly stratabound deposits, mainly back-arc basin

mineralization in Hercynian, with multiple layers forming, multi-element mineralization in the main component and with deep to shallow diagenetic mineralization evolution and other features.

Key words: Hutouya Pb-Zn deposit; Kendekeke polymetallic deposit; Qimantage; Sedex deposit; back-arc basin

Sedex 型矿床是指以沉积岩容矿的喷流沉积型矿床(Sedimentary exhalative deposit),是近代矿产勘查所发现的很重要的一类矿床,在世界范围内分布广泛,是 Zn 和 Pb 等金属的重要来源,分别超过世界储量的 50%和 60%。海底沉积—喷流(Sedex)矿床也泛指成矿水热流体(不同成因)喷溢出海底,液态状通过不同方式,将所携带的成矿组分在喷口上下或附近沉积富集而形成的矿床。海底喷流沉积矿床具有明显的层控及时控特征,往往成群产出,形成整个喷流沉积成矿系统。综合研究大区域中的喷流矿床,查明喷流沉积成矿作用,研究其喷流沉积地球化学特征,探明其喷流旋回及其与火山岩之间的关系,对整个矿区的矿产勘查有着重要的现实及理论意义。例如,杨竹森等^[1]探讨了安徽铜陵矿集区海西期喷流沉积系统,查明了喷流沉积旋回,建立了流体系统时空结构。蒙义峰等^[2]划分了滇东南芦柴冲大型银多金属矿床的海底喷流成矿作用沉积旋回,探明了海底喷流成矿的含矿流体运移的通道,指出成矿作用具周期性振荡运动的特点。彭润民等^[3]研究了内蒙古狼山—渣尔泰山矿集区海底喷流成矿特征,指出这些矿床具有鲜明的层控及岩控特征,并指明了深部及外围的找矿方向。喷流沉积矿床的地球化学研究也得到许多研究者的重视,通过对 Sedex 型喷流沉积矿床矿石及与其有关的火山岩的常量、微量、稀土及同位素研究,可以探知成矿流体来源,建立喷流成矿作用沉积旋回,从而指导矿产勘查^[4-5]。

青海海西茫崖地区的虎头崖和肯德可克等矿床已有多年的开采历史,为了扩大矿床规模,近年来中南大学地球科学与信息物理学院开展了新的找矿勘探工作,并获得了新的找矿成果。为了在找矿勘探中加强矿区和外围的成矿地质的研究、提高矿区和区域地质成矿的认识程度,本文作者对祁漫塔格区带虎头崖—肯德可克矿区中的虎头崖铅锌矿、肯德可克多金属矿、景仁铜矿及北沟铁矿等矿床进行成矿地球化学特征研究,探讨其喷流成矿作用,配合矿区的找矿勘探工作进行,以求获得更好的找矿效果。

1 区域地质背景及矿床研究现状

虎头崖—肯德可克矿区众多矿床产于东昆仑祁漫塔格弧后裂隙构造带中,隶属于著名的祁漫塔格成矿

带。祁漫塔格地区成矿地质条件优越,近年来,地质找矿有重要发现,铜、铁、钨、锡、铅锌、金和铂族金属矿产有巨大找矿潜力,已成为西北地区实现地质找矿重大突破最有希望的地区之一。自 20 世纪 90 年代以来,祁漫塔格及相邻地区相继发现了 50 余处矿(床)点,特别是近年肯德可克铁—多金属矿床、迪木那里克铁矿、白干湖钨锡矿床、维宝铅锌矿及卡尔却卡铜矿等的发现,使得该区域找矿工作取得历史性突破,引起了地学界广泛关注和重视^[6-7]。

关于祁漫塔格成矿带的地质背景研究成果颇多。祁漫塔格成矿带分布在柴南缘西部的祁漫塔格山脉北坡,属于柴南缘的北部带,即东昆仑北带,成矿元素主要有铁、钴、金、银、铜、铅和锌等。柴南缘在古生代到中生代的漫长时间中基本上是处在南部特提斯大洋的北部边缘位置,直到中生代发生洋盆中岛屿地体的拼接,结束了大陆边缘的状态,洋盆向南转移^[8]。其间,南部特提斯洋是向北俯冲,形成岛弧带。岛弧带的类型以拉张型岛弧活动为主,形成弧后盆地,这是柴南缘南部隆起带与北部裂陷带的构造型式的成因,是比较公认的意见^[9]。这种构造性质是长期保持的,其中以海西期发育最为完善,边缘岛弧带的岩浆岩侵入体十分常见,内带的弧后盆地沉积地层发育,火山喷出岩也很发育。燕山期柴南缘已经与东昆仑地体拼合,面对南部的巴颜喀拉洋盆(古特提斯洋)的俯冲^[10],转变成挤压俯冲带,处于柴南缘内侧的祁漫塔格带成为内弧带,祁漫塔格沉积了三叠系地层,同时有燕山期岩体侵入^[11],说明了岛弧性质的变化。高永宝等^[12]对祁漫塔格地区成矿地质特征及潜力进行了分析,认为其成矿地质条件优越,找矿潜力巨大。尤其是野马泉口肯德可克一带经后期陆内复合造山(晚华力西—印支期、燕山期)的叠加改造,为铁及多金属矿床成矿提供了丰富的 Pb、Zn、Au、Co 和 Bi 等物质来源,成矿地质条件优越。潘彤^[13]认为,祁漫塔格地区成矿作用主要为喷流—沉积作用,该地区铁矿资源具有较大的找矿潜力,应重点寻找喷流—沉积型铁矿床。

虎头崖矿床是青海省地矿局区调队在 1979—1981 年开展 1:20 000 区域地质调查时发现的,但未做进一步检查评价。2000 年后,青海省地质调查院进行了普查评价,确定矿床规模达到中型。关于虎头崖矿床研究的文献较少,目前,仅有张爱奎等^[14]有少量研究成果,他们认为,虎头崖矿床属于层状矽卡岩型矿

床,是区域中发现的一种新的矿床类型。他们还对虎头崖矿床的矿体特征进行了描述,证明矿区硅质岩成分接近热水沉积岩,对矿床的找矿方向和矿床成因提出了看法,认为该矿床的发现和矿床类型的初步确定为带内古陆边缘成矿研究提供了依据^[11]。2007年至今,湖南有色217地质队开展了一系列的找矿活动,取得了一些认识,确定矿床规模达到大型。中南大学地球科学与信息物理学院的研究人员自2008年以来曾多次到矿区参加矿区找矿指导工作,并写出研究报告,取得了一些研究进展,对矿区地层的划分和矿床模型的建立有着新的认识。

肯德可克多金属矿床位于茫崖野马泉口,前人的研究成果较多,对矿床成因、矿床特征和成矿时代都进行了较为系统的工作。该矿床系喷流热水沉积改造型成因,矿体受热水沉积成因的“角岩”控制。潘彤和孙丰月^[15-16]认为矿床的形成与火山—喷流地质环境有关,与成矿有关的硅质岩具有沉积结构构造,稀土元素组成表明含金硅质岩由热水沉积作用形成。王力等^[17]确定该矿床为一多期成矿作用叠加的叠生型金—有色金属矿床。伊有昌等^[18]确定肯德可克铁钴多金属矿床属热水喷流沉积(改造)型矿床。李宏录等^[19]认为,肯德可克铁、金多金属矿为热水喷流沉积—岩浆热液叠加的叠生型矿床。黄敏^[20]研究表明,肯德可

克多金属矿床主要经历了4个成矿期,分别是:热水喷流—沉积作用期、矽卡岩化热液活动期、晚期构造热液活动期以及表生氧化作用期。赵财胜等^[21]采用高精度 ^{40}Ar — ^{39}Ar 中子活化定年法测年,确定肯德可克矿床的主成矿年龄为207.8 Ma左右^[21]。

虎头崖和肯德可克周边其他矿床(点),如北沟和景仁等前人研究成果很少。张爱奎等^[22]对四角羊—牛苦头矿床的成矿特征进行了初步研究,认为野马泉低缓磁异常区对找矿的指示意义重大。

2 典型矿床的地质特征

对虎头崖—肯德可克矿区的部分矿床矿点进行了现场调查,调查的重点为虎头崖铅锌矿、肯德可克铁多金属矿、北沟铁矿和景仁铜矿(见图1)。

虎头崖矿区出露地层主要有蓟县系狼牙山组(Jxl)、早古生界滩间山群($\in\text{OT}$)和石炭系上统缔敖苏组(也称大干沟组)(C₂d)(见图2)。与成矿关系密切的是石炭系上统缔敖苏组(C₂d)和蓟县系狼牙山组(Jxl)^[18]。虎头崖矿床产在石炭纪地层中,主要为铅锌矿化。矿体为层状和似层状,矿体走向与地层走向一致,为东西走向,矿区范围沿矿床走向分布,东西长大于4 km,

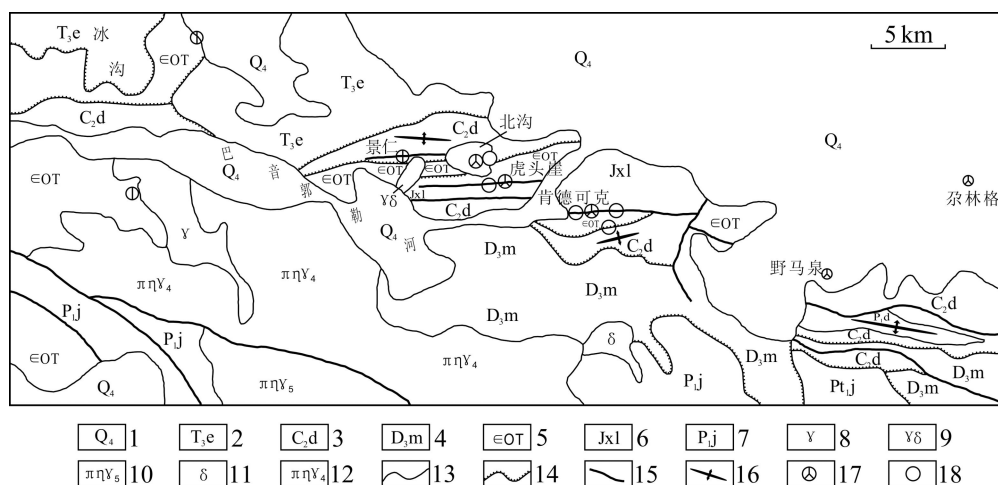


图1 虎头崖—肯德可克矿区区域地质图^[14]: 1—风积物; 2—三叠系上统鄂拉山组; 3—石炭系上统缔敖苏组; 4—泥盆系上统牦牛山组; 5—早古生界滩间山群; 6—狼牙山组; 7—元古界金水口群; 8—燕山期花岗岩; 9—印支期花岗闪长岩; 10—印支期斑状二长花岗岩; 11—印支期闪长岩; 12—华力西期斑状二长花岗岩; 13—地质界线; 14—不整合界线; 15—断层; 16—褶皱; 17—多金属矿点; 18—铅锌矿点

Fig. 1 Regional geological map of Hutouya—Kendekeke field^[14]: 1—Aeolian deposit; 2—Upper Triassic Elashan Formation; 3—Upper Carboniferous Di'aosu Formation; 4—Upper Devonian Maoniushan Formation; 5—Early Paleozoic Tanjianshan Group; 6—Langyashan Formation; 7—Proterozoic Jinshuiou Formation; 8—Yanshanian granite; 9—Indosinian granodiorite; 10—Indosinian porphyritic monzonitic granite; 11—Indosinian diorite; 12—Hercynian porphyritic monzonitic granite; 13—Geological boundary; 14—Unconformable boundary; 15—Fault; 16—Fold; 17—Polymetallic mineralized spot; 18—Lead and zinc mineralized spot

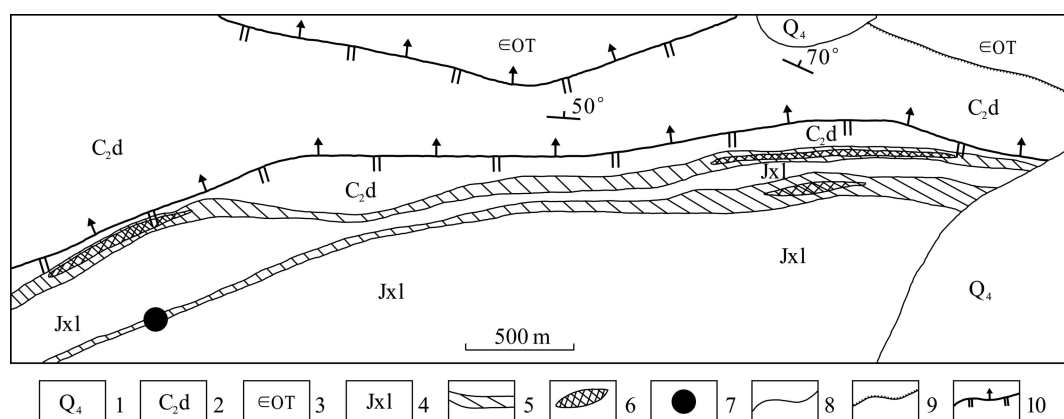


图2 虎头崖矿床地质图^[14]: 1—冲洪积物和风积物; 2—上石炭统缙散苏组: 生物碎屑灰岩、鲕状灰岩和含炭灰岩; 3—滩间山群: 硅质岩、板岩和灰岩; 4—元古界狼牙山组: 白云岩、白云质灰岩和含铁石英岩; 5—含矿带; 6—多金属矿体; 7—多金属矿化点; 8—地质界线; 9—不整合接触界线; 10—逆断层

Fig. 2 Geological map of Hutouya deposit^[14]: 1—Sediment and aeolian deposit; 2—Upper Carboniferous Di'aosu Formation: bioclastic limestone, oolitic limestone and carbonaceous limestone; 3—Tanjianshan Group: siliceous rock, slate and limestone; 4—Proterozoic Langyashan Formation: dolomite, dolomitic limestone and ferruginous quartzite; 5—Ore-bearing zone; 6—Polymetallic orebody; 7—Polymetallic mineralized spot; 8—Geological boundary; 9—Unconformable boundary; 10—Reverse fault

南北宽 400 m。矿体的围岩以大理岩为主, 次为硅质岩层, 以薄层状硅质岩为主。矿化蚀变主要有硅化蚀变和矽卡岩化蚀变。特别指出的是, 在钻孔岩芯中观察到地层中发育的原生构造现象, 有原生流动褶皱构造、原生角砾构造及原生拉断构造。地层的原生流动构造显示, 在地层沉积时发生了同生断层的活动, 未固结的沉积物在断层活动时发生流动变形, 形成地层的揉流褶皱, 破碎角砾被沉积物胶结等现象。原生流动构造反映有同生断层的活动, 这对于矿区的成矿活动是重要的条件之一。

肯德可克铁多金属矿床处在虎头崖矿区的南部, 巴音格勒河南岸, 距虎头崖矿区约 3 km。肯德可克矿区的地质出露有: 奥陶纪铁石达斯群, 由一套基性到酸性火山岩和碳酸盐岩、硅质岩组成, 分布在矿区北部, 泥盆纪牦牛山组, 是一套火山岩, 具有酸性岩和基性岩的双峰式组合; 石炭纪大干沟组(缙散苏组), 为砂岩和碳酸盐岩, 分布在矿区南部, 矿床分布在铁石达斯群和石炭纪地层中。肯德可克矿区为钴、金、铜、铋、镍、铅、锌和铁多金属矿化, 成矿时代是海西期—印支期, 矿区含矿地层主要是一套具有喷流沉积作用的地层, 含矿地层中矽卡岩化蚀变强烈, 含矿地层下部直接围岩是中基性火山岩, 上部是砂岩和灰岩的沉积岩, 矿床具有层控矿床的特点。矿体形态以似层状和透镜体状为主, 勘探发现了 100 多个矿体, 多数为单一矿化的矿体, 有磁铁、铅、锌、铜、金和硫铁矿体, 也有复合矿体。

北沟铁矿点在虎头崖矿区的北西侧, 距虎头崖矿区约 2 km, 是一个小型铁矿点。矿点的地层比较简单, 所属年代与虎头崖矿床相同。主要有两个岩性层, 上部地层为大理岩, 下部地层为火山岩, 铁矿层分布在大理岩与火山岩之间。大理岩底部是红色铁矿层, 为赤铁矿。北沟铁矿点表现了层状矿体形态, 也是层控矿化。

景仁铜矿在虎头崖矿区西部较远处, 不过两矿区的地层层位相同, 因此成矿可以对比研究。铜矿石有块状构造、层状构造、似层状构造、浸染状构造及叠加在块状构造中的细脉构造, 其中, 块状构造是主要的。铜矿石品位很高, 主要为黄铜矿化。矿床的围岩是大理岩, 围岩有弱矽卡岩化蚀变。矿体呈似层状产出, 规模不大, 少数为透镜体状, 长 20~25 m, 厚 4~6 m。矿区中还有铅锌矿体分布, 规模较小。

对虎头崖—肯德可克矿区以上矿床(点)的地质调查, 初步查明了矿区地层与矿层的分布关系, 矿区地层为石炭系上统大干沟组(C₂d), 含有 4 个矿化层位。肯德可克矿层最下部含矿层, 其下部地层为基性—酸性火山岩、火山碎屑岩夹硅质岩, 矿层上部为大理岩化碳酸盐岩, 往上转变为中厚层火山岩和火山角砾岩, 顶部为北沟矿层, 矿层上覆大理岩化灰岩, 厚度有限, 往上为景仁矿层, 虎头崖矿层处于最上部, 与景仁矿层之间地层生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩和含炭质灰岩, 虎头崖矿层上部为硅质岩与大理岩互层。

3 矿区地球化学研究

3.1 样品的处理及测试方法

岩石及矿石样品采自虎头崖—肯德可克矿区出露的火山岩地层及部分钻孔岩芯，确保岩石及矿石样品新鲜无风化。对样品进行切片镜下观察之后，挑选出具有代表性的火山岩及矿石样品，进行送样前预处理。预处理过程为：将样品进行初碎，然后将初碎后的样品放入 TL-100 型碳化钨体碎样机中，粉碎至粒径 75 μm。每次细碎前，同样要对钵体进行清理，用自来水冲洗干净后，用蒸馏水再次冲洗，接着用干净的纸巾擦拭干，后用蘸有酒精的棉花再次擦洗一遍，最后用吹风机将其吹干，这样确保样品之间不互相污染。将细碎好的样品装入袋中编号，置于烘箱中 105 ℃ 下烘烤 2 h，之后将烘干的样品转入干燥器中，以备后期实验送样之用。主量元素、稀土元素和微量元素分析在武汉综合岩矿测试中心(湖北省地质实验研究所)

完成，主量元素测定采用 X 射线荧光(X-ray fluorescence, XRF, RIGAKU2100 型)玻璃熔片法，FeO 和 Fe₂O₃ 的含量单独用湿化学法分析。主量元素测定时，首先测定烧失量，然后加入助熔剂及脱模剂等高温加热，最后将玻璃熔片放入 XRF 自动进样系统进行测试。各元素测试数据相对标准偏差值基本小于 2%，实验数据精度高于 5%。稀土及其他微量元素采用 ICP-MS 分析方法(美国 Agileni 公司生产的 Agileni7500a 仪器)。将经化学处理、加热、蒸干、加水稀释等加工程序后的样品用 ICP-MS 溶液法测定微量元素含量，标样为 BCR-1，标准参考物测得的相对标准偏差(RSD)均低于 5%，大部分元素(Rb、Th、U、REE、Nb、Ta、Y、Zr、Hf 等)的分析精度高于 5%。稀土元素标准化采用 1982 年 Taylor 球粒陨石标准值。同位素测试工作由武汉地质矿产研究所(原宜昌同位素测试中心)完成，采用 MAT 系列固体及气体同位素质谱仪测定，分析精度为±0.2×10⁻³。硫同位素标准品为美国代阿 布洛大峡谷(Canyon Diablo)铁陨石中的陨硫铁(CDT)。所有测试数据及处理结果见表 1~5。

表 1 虎头崖—肯德可克矿区火山岩岩石的化学成分

Table 1 Chemical compositions of volcanic rocks in Hutouya—Kendekeke field

样品 编号	采样 地点	岩石 类型	w/%												
			Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	FeO	H ₂ O ⁺	CO ₂
2-5	景仁	流纹岩	3.41	0.55	13.99	69.78	0.08	3.81	2.34	0.27	0.07	1.38	0.77	1.27	2.08
2-6	景仁	流纹岩	3.86	0.48	14.21	70.71	0.08	4.46	1.92	0.27	0.06	1.82	0.85	0.97	0.13
7-37	北沟	酸性 侵入岩	1.94	0.31	12.26	75.34	0.02	4.90	1.38	0.07	0.03	0.90	0.22	1.39	1.11
7-38	北沟	酸性 侵入岩	2.22	0.34	12.31	75.82	0.02	5.07	1.03	0.10	0.02	0.27	0.42	1.60	0.65
7-32	北沟	火山 凝灰岩	3.54	1.52	10.97	65.96	0.04	1.11	7.24	0.13	0.50	2.06	5.00	1.29	0.49
7-8	肯德 可克	火山 凝灰岩	1.78	0.65	12.40	70.06	0.06	4.20	4.85	0.29	0.06	2.08	0.35	1.52	1.50
7-9	肯德 可克	安山岩	2.89	1.07	14.54	67.09	0.07	3.56	3.78	0.33	0.06	1.26	1.53	1.72	1.89
7-10	肯德 可克	安山岩	3.49	2.11	16.13	62.53	0.13	2.63	4.17	0.62	0.09	3.46	1.78	2.76	0.13
7-11	肯德 可克	安山岩	3.61	2.23	15.76	63.67	0.12	2.39	3.81	0.59	0.07	3.09	1.80	2.71	0.10
7-15	肯德 可克	安山岩	0.08	3.67	3.93	64.98	0.04	0.03	14.63	0.17	0.52	2.40	1.80	1.98	5.60
7-7	肯德 可克	火山 凝灰岩	4.32	0.87	15.99	43.37	0.06	0.52	16.63	0.29	0.23	5.25	1.63	1.83	8.85
7-5	肯德 可克	火山 凝灰岩	0.22	3.64	4.07	39.27	0.02	0.12	24.78	0.10	1.26	9.80	9.90	1.63	3.52
7-21	肯德 可克	玄武岩	0.32	5.70	9.97	29.42	0.21	0.44	22.60	0.44	1.31	3.04	5.27	4.44	16.67

表 2 虎头崖—肯德可克矿区火山岩及矿石中稀土元素含量及特征值

Table 2 REE contents and eigenvalues of volcanic rocks and minerals in Hutouya—Kendekeke field

样品 编号	采样 地点	岩石类型	w/10 ⁻⁶									
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
2-5	景仁	流纹岩	41.3	77.0	8.65	30.2	5.83	0.774	4.89	0.803	4.58	0.912
2-6	景仁	流纹岩	42.4	79.8	9.32	32.8	6.48	0.734	5.91	0.961	5.67	1.17
7-37	北沟	酸性侵入岩	25.1	47.1	5.54	18.1	3.77	0.165	3.39	0.574	3.68	0.791
7-38	北沟	酸性侵入岩	26.9	47.9	5.33	17.2	3.06	0.238	2.46	0.441	2.62	0.558
7-32	北沟	火山凝灰岩	9.67	24.6	3.64	13.8	3.26	0.164	2.77	0.506	3.17	0.692
7-8	肯德可克	火山凝灰岩	35.2	76.6	8.80	31.4	6.77	0.596	6.24	1.07	6.61	1.37
7-9	肯德可克	安山岩	31.5	55.2	6.13	21.0	3.80	0.834	3.27	0.510	2.90	0.574
7-10	肯德可克	安山岩	25.4	47.0	5.74	20.8	4.18	1.01	3.94	0.616	3.76	0.758
7-11	肯德可克	安山岩	24.7	44.7	5.35	19.4	4.06	0.883	3.70	0.599	3.45	0.713
7-15	肯德可克	安山岩	8.15	13.6	2.19	8.73	2.20	0.426	2.35	0.411	2.48	0.518
7-7	肯德可克	火山凝灰岩	33.3	65.9	8.23	30.0	6.55	0.574	5.87	1.00	6.27	1.28
7-5	肯德可克	火山凝灰岩	4.40	5.82	0.869	3.42	1.06	0.487	1.37	0.269	1.83	0.406
7-21	肯德可克	玄武岩	17.7	32.2	4.76	19.7	4.90	0.925	4.54	0.729	4.23	0.847
425-2	虎头崖	铅锌矿石	39.7	77.0	9.71	36.6	7.15	1.25	6.21	0.939	5.42	1.04
425-3	虎头崖	铅锌矿石	3.04	4.12	0.654	2.02	0.415	0.088	0.426	0.084	0.44	0.086
2-2	景仁	黄铜矿石	1.08	0.921	0.312	0.954	0.167	0.034	0.155	0.043	0.314	0.065
2-3	景仁	黄铜矿石	0.866	0.653	0.231	0.669	0.108	0.024	0.120	0.020	0.123	0.017
7-27	北沟	磁铁矿石	23.6	37.4	3.15	7.95	1.19	0.315	1.20	0.191	1.08	0.251
7-28	北沟	磁铁矿石	19.3	30.5	2.85	7.77	1.32	0.267	1.22	0.216	1.22	0.284
7-33	北沟	磁铁矿石	11.4	46.7	6.63	21.7	2.76	0.396	2.22	0.340	1.96	0.425
样品 编号	采样 地点	岩石类型	w/10 ⁻⁶						LREE/ HREE	$\delta(\text{Eu})$	$\delta(\text{Ce})$	
			Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE				
2-5	景仁	流纹岩	2.74	0.427	2.78	0.424	26.8	181.33	9.33	0.43	0.91	
2-6	景仁	流纹岩	3.41	0.568	3.77	0.549	33.7	193.58	7.80	0.36	0.91	
7-37	北沟	酸性侵入岩	2.62	0.490	3.50	0.531	26.4	115.33	6.40	0.14	0.90	
7-38	北沟	酸性侵入岩	1.84	0.333	2.41	0.389	18.5	111.64	9.11	0.26	0.89	
7-32	北沟	火山凝灰岩	2.21	0.417	3.21	0.513	22.1	68.65	4.09	0.16	0.97	
7-8	肯德可克	火山凝灰岩	4.00	0.645	4.16	0.596	38.1	184.07	6.46	0.28	1.00	
7-9	肯德可克	安山岩	1.76	0.291	1.98	0.303	16.8	130.09	10.23	0.71	0.88	
7-10	肯德可克	安山岩	2.17	0.361	2.35	0.360	21.7	118.43	7.27	0.75	0.88	
7-11	肯德可克	安山岩	2.10	0.336	2.17	0.320	20.5	112.43	7.41	0.75	0.88	
7-15	肯德可克	安山岩	1.53	0.242	1.52	0.212	16.4	44.54	3.81	0.57	0.74	
7-7	肯德可克	火山凝灰岩	3.76	0.601	3.81	0.545	38.8	167.69	6.25	0.28	0.91	
7-5	肯德可克	火山凝灰岩	1.26	0.221	1.47	0.239	15.0	23.11	2.28	1.24	0.66	
7-21	肯德可克	玄武岩	2.46	0.397	2.77	0.402	26.7	96.57	4.90	0.59	0.81	
425-2	虎头崖	铅锌矿石	3.00	0.457	3.00	0.446	30.7	191.91	8.35	0.56	0.90	
425-3	虎头崖	铅锌矿石	0.259	0.049	0.301	0.039	2.45	12.01	6.13	0.63	0.66	
2-2	景仁	黄铜矿石	0.198	0.034	0.230	0.032	1.73	4.54	3.24	0.63	0.37	
2-3	景仁	黄铜矿石	0.052	0.008	0.058	0.010	0.487	2.96	6.25	0.64	0.34	
7-27	北沟	磁铁矿石	0.819	0.141	0.855	0.126	12.0	78.27	15.76	0.80	0.89	
7-28	北沟	磁铁矿石	0.926	0.157	0.914	0.124	13.2	67.09	12.27	0.63	0.87	
7-33	北沟	磁铁矿石	1.47	0.248	1.55	0.192	20.1	97.94	10.66	0.47	1.23	

表 3 虎头崖—肯德可克矿区火山岩中微量元素含量

Table 3 Trace elements contents of volcanic rocks in Hutouya—Kendekeke field

样品 编号	采样 地点	岩石 类型	w/10 ⁻⁶										Nb/Ta	Zr/Hf	Rb/Sr	Sr/Ba
			Zr	Nb	Ba	Hf	Ta	Sr	Rb	U	Th					
2-5	景仁	流纹岩	205	31.4	411	6.76	2.34	101	202	6.58	25.2	13.42	30.33	2.00	0.25	
2-6	景仁	流纹岩	209	31.1	558	6.97	3.85	144	211	5.86	23.0	8.08	29.99	1.47	0.26	
7-37	北沟	酸性 侵入岩	94.1	22.8	95.1	4.38	4.19	43.8	349	4.30	44.7	5.44	21.48	7.97	0.46	
7-38	北沟	酸性 侵入岩	97.6	15.6	132	4.39	6.00	45.9	319	4.27	38.8	2.60	22.23	6.95	0.35	
7-32	北沟	火山 凝灰岩	110	18.7	63.2	4.52	4.54	98.7	67.5	9.25	33.6	4.12	24.34	0.68	1.56	
7-8	肯德 可克	火山 凝灰岩	218	21.5	852	7.75	2.30	98.6	222	4.54	21.9	9.35	28.13	2.25	0.12	
7-9	肯德 可克	安山岩	156	21.4	607	5.00	1.87	194	140	4.88	17.6	11.44	31.20	0.72	0.32	
7-10	肯德 可克	安山岩	145	13.5	1155	4.47	1.70	308	113	4.58	14.3	7.94	32.44	0.37	0.27	
7-11	肯德 可克	安山岩	141	10.3	643	4.32	1.73	291	115	4.31	14.4	5.95	32.64	0.40	0.45	
7-15	肯德 可克	安山岩	44.6	11.0	47.1	1.38	2.13	55.5	1.92	1.25	2.88	5.16	32.32	0.03	1.18	
7-7	肯德 可克	火山 凝灰岩	187	21.0	186	6.39	1.77	291	33.2	4.03	18.3	11.86	29.26	0.11	1.56	
7-5	肯德 可克	火山 凝灰岩	217	10.0	55.7	6.78	0.83	24.8	15.3	2.00	3.05	12.05	32.01	0.62	0.45	
7-21	肯德 可克	玄武岩	99.0	16.3	161	3.34	1.31	44.9	39.1	5.31	6.84	12.44	29.64	0.87	0.28	

表 4 虎头崖—肯德可克矿区矿石微量元素含量

Table 4 Trace elements of minerals in Hutouya—Kendekeke field

样品 编号	采样 地点	岩石 类型	w/10 ⁻⁶													
			Nb	Ba	Sr	U	As	Sb	Bi	Hg	Ge	V	Co	Ni	Mo	S
425-2	虎头崖	铅锌矿石	13.6	35.7	375	4.10	68.8	6.61	0.68	0.11	2.07	102	41.9	23.1	0.74	200
425-3	虎头崖	铅锌矿石	14.5	248	20.6	4.04	36.7	59.7	91.8	0.18	0.64	0.71	63.8	8.43	0.57	157 000
2-2	景仁	黄铜矿石	0.98	13.0	21.6	0.78	995	28.7	14.1	0.09	1.15	<0.5	272	30.8	2.83	276 000
2-3	景仁	黄铜矿石	2.75	28.8	< 0.5	0.05	3.08	3.03	4.23	0.05	1.40	<0.5	282	62.5	0.53	342 000
7-27	北沟	磁铁矿石	18.6	2105	59.0	56.9	576	166	62.3	3.06	3.24	21.8	17.0	28.7	3.79	10 400
7-28	北沟	磁铁矿石	12.9	686	40.4	32.1	509	149	80.2	1.19	3.52	27.8	27.1	36.2	3.36	8 800
7-33	北沟	磁铁矿石	14.1	56.8	0.72	27.9	52.9	3.16	2.62	0.12	2.47	13.1	32.8	23.6	3.03	200

3.2 主量元素地球化学特征

对景仁、北沟及肯德可克等矿区出露的火山岩进行硅酸岩全分析，并对数据进行化学投影，分析火山岩的地球化学特征，结果见图 3。

从以上火山岩的镜下鉴定和硅酸岩全分析数据及

化学图解可以看出：肯德可克—北沟—景仁的岩浆演化按照从中基性—酸性的规律发展。肯德可克矿区火山岩含 Fe、Mn 和 Ca 质成分较多，基本属于中基性安山岩和玄武岩类，其中也不乏酸性岩类；北沟及景仁主要是酸性凝灰岩、酸性侵入岩及喷出岩类。TAS 图

表 5 虎头崖—肯德可克矿区火山岩全岩硫同位素分析结果

Table 5 Whole-rock sulfur isotope analysis of volcanic rocks in Hutouya—Kendekeke field

样号编号	采样地点	岩石类型	$\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})/10^{-3}$
2-5	景仁	流纹岩	10.51
2-6	景仁	流纹岩	14.73
7-32	北沟	火山凝灰岩	18.52
7-36	北沟	火山凝灰岩	14.05
7-8	北沟	火山凝灰岩	15.25
7-9	肯德可克	安山岩	11.59
7-10	肯德可克	安山岩	11.25
7-11	肯德可克	安山岩	11.15
7-15	肯德可克	安山岩	12.19
7-7	肯德可克	火山凝灰岩	12.24
7-5	肯德可克	火山凝灰岩	3.07
7-21	肯德可克	玄武岩	4.96

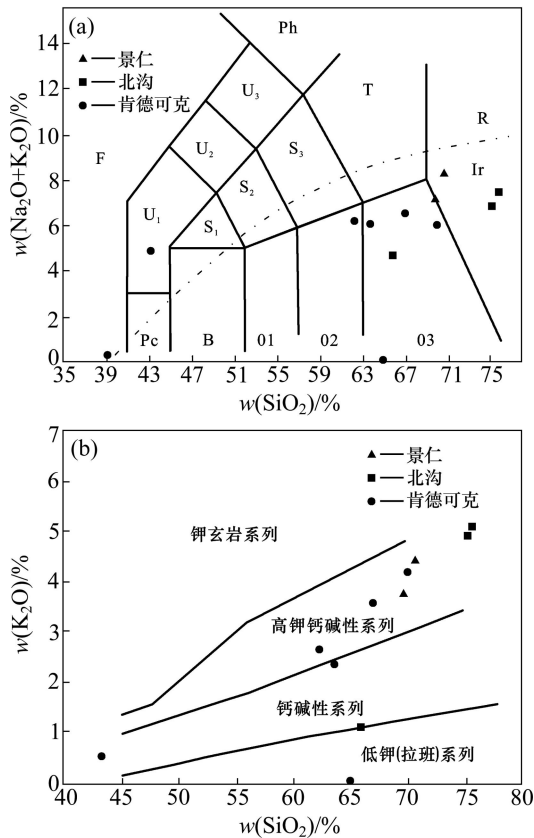


图 3 虎头崖—肯德可克矿区火山岩岩石化学图解: (a) TAS 图^[23]; (b) $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{K}_2\text{O})$ 图^[24]; R—碱性系列; Ir—亚碱性系列

Fig. 3 Petrochemical diagrams of volcanic rocks in Hutouya—Kendekeke field: (a) TAS diagram^[23]; (b) $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{K}_2\text{O})$ diagram^[24]; R—Alkaline series; Ir—Sub-alkaline series

显示这几个矿区的火山岩基本属于亚碱性系列, $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{K}_2\text{O})$ 图显示大部分火山岩属于高钾钙碱性系列。

3.3 稀土和微量元素地球化学特征

对虎头崖、景仁、北沟及肯德可克等矿区出露的火山岩及矿石进行稀土元素及其他微量元素分析(见表 2~4), 并绘制稀土元素配分曲线图和微量元素蛛网图, 结果见图 4 和 5。

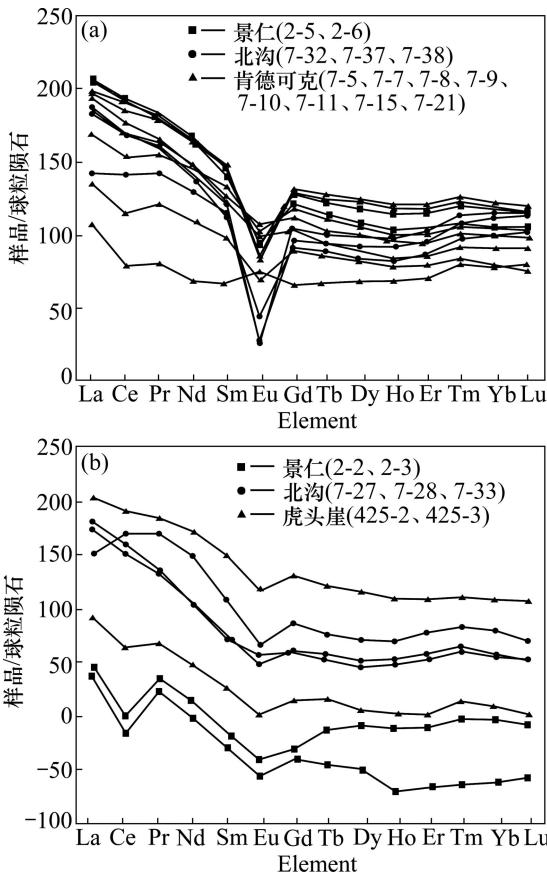


图 4 虎头崖—肯德可克矿区火山岩(a)及矿石(b)稀土元素配分图

Fig. 4 REE diagram of volcanic rocks (a) and minerals (b) in Hutouya—Kendekeke field

从矿点火山岩的稀土配分曲线来看, 除个别样品(肯德可克)具有 Eu 正异常外, 其余均为 Eu 负异常, 轻稀土富集, 曲线呈右缓倾的平滑线, 符合活动大陆边缘岩浆岩的稀土元素配分形式。火山岩的 $\sum\text{REE}$ 值为 $23.11 \times 10^{-6} \sim 193.58 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 2.28~10.23, $\delta(\text{Eu})$ 值为 0.14~0.75, $\delta(\text{Ce})$ 值为 0.66~1.00。此外, 肯德可克矿点的 $\delta(\text{Eu})$ 平均值比北沟、景仁矿点的平均值大; 各矿点的 $\delta(\text{Ce})$ 值相差不大, 表现出弱的负异常。总的来看, 各矿区火山岩稀土元素特征值相对

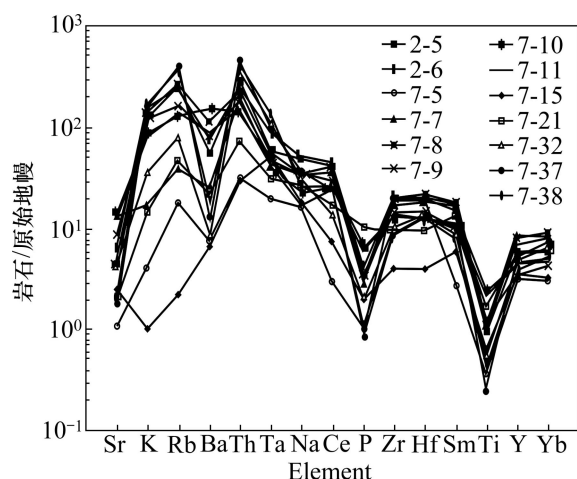


图5 虎头崖—肯德可克矿区火山岩微量元素蛛网图

Fig. 5 Trace element spider diagram of volcanic rocks in Hutouya—Kendekeke field

接近, 配分曲线相似度较高。

从各矿点矿石的稀土特征来看, 稀土总量普遍比火山岩的小, 配分曲线较为平缓, 总体表现为轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)平坦的右倾型配分曲线类型。不同矿点矿石的稀土含量相差较大, 但均具有 Eu 负异常, 配分曲线相似度亦较高。 ΣREE 值为 $2.96 \times 10^{-6} \sim 191.91 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 值为 3.24~15.76, $\delta(\text{Eu})$ 值为 0.47~0.80, $\delta(\text{Ce})$ 值为 0.34~1.23。其中, 各矿点的 $\delta(\text{Eu})$ 值相对接近; 景仁矿点的黄铜矿石明显表现为 Ce 的负异常($\delta(\text{Ce})=0.34\sim0.37$), 北沟矿点的个别磁铁矿石表现为 Ce 的正异常($\delta(\text{Ce})=1.23$)。相同矿点火山岩及矿石之间的 $\delta(\text{Eu})$ 值和 $\delta(\text{Ce})$ 值相近, 配分曲线相似度高。

从火山岩微量元素蛛网图来看, 曲线整体呈弧后盆地的配分形式。酸性火山岩具有较低的 Sr 含量, 富集 K、Rb 和 Th, 具有弱的 Nb 负异常, 明显亏损 P 和 Ti, 对应于较强的 Eu 负异常。肯德可克安山岩中 Ba 和 Sr 含量较高, 重元素模式斜率平缓, Rb-Ba-Th 具正向梯度。从分析数据来看, 火山岩 Nb/Ta 为 4.12~13.42; Zr/Hf 较大, 为 21.5~32.6; Rb/Sr 及 Sr/Ba 比值相差较大, 分别分布于 0.03~7.97、0.12~1.56 之间, U/Th 值均小于 1。此外, 从肯德可克—北沟—景仁的岩浆序列来看, Nb、Hf、Ta、Rb、U 和 Th 等不相容元素的含量有依次升高的趋势。

各矿点矿石微量元素含量有较大差别, 但普遍具有较高的 Ba(最高含量为 2105×10^{-6})、As(最高含量为 995×10^{-6})、Sb(最高含量为 149×10^{-6})、Bi(最高含量为 91.8×10^{-6})和 Co(最高含量为 282×10^{-6})等热水

沉积指示元素含量。虎头崖铅锌矿石各微量元素(Ba、Sr、Sb、Bi、V)含量相差很大, 景仁黄铜矿石的 U、As 和 Mo 的含量变化也比较大。

3.4 全岩硫同位素地球化学特征

对虎头崖、景仁、北沟及肯德可克等矿区出露的火山岩进行全岩硫稳定同位素分析(见表 5, 标准品为美国代阿布洛大峡谷(Canyon Diablo)铁陨石中的陨硫铁(CDT))得知, $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 值分布范围为 $2.96 \times 10^{-3} \sim 18.52 \times 10^{-3}$, 大多集中在 $10 \times 10^{-3} \sim 18 \times 10^{-3}$ 。按肯德可克—北沟—景仁的序列, $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 值有逐渐增大的趋势。 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 值分布范围基本为古海水硫同位素分布范围。

4 讨论

通过野外调查得知, 虎头崖—肯德可克矿区地层为一套连续的地层, 各矿床(点)分布于不同岩性的地层中, 矿床具有层控性质, 具有多个层位成矿的特点。总的地层特点如下: 下部为火山岩, 上部为沉积岩。火山岩地层的下部是火山碎屑岩, 上部变成火山熔岩, 整体上看是中性岩浆岩类型, 火山岩的变化说明本区从火山活动的边缘带转变为火山活动的中心带, 应该是岛弧活动的发展阶段。沉积岩的下部是一套大理岩, 上部是一套具有喷流成因的薄层地层, 首先表明本区开始演变成伸展盆地, 碳酸盐岩的沉积是盆地扩张的表现, 盆地扩张后期发生喷流活动, 形成硅质岩和矿化, 频繁的喷流活动的间歇性的特征形成了虎头崖矿区的薄层地层。从火山岩到沉积岩的变化是本区构造性质的转变, 从岛弧活动为主的性质转变成以弧后扩张为主的性质, 可能表示俯冲带的变化, 比如俯冲带倾角从缓倾变成陡倾的过程。以上讨论与前述的大地构造背景演化是对应的。

火山岩总体表现为亲弧裂谷双峰式特征, 说明火山岩的形成与板块构造的运动密切相关, 与前述的弧后伸展盆地大地构造环境一致, 深部地质作用事件及壳—幔相互作用对本区的火山岩形成起到了至关重要的作用。肯德可克矿点的 $\delta(\text{Eu})$ 平均值比北沟及景仁矿点的平均值大, 反映了岩浆旋回过程中的分异变化。各矿点的 $\delta(\text{Ce})$ 值相差不大, 表现出弱的负异常, 说明成岩作用中的海水参与特征。总的来看, 各矿区火山岩稀土元素特征值相对接近, 配分曲线相似度较高, 说明本区各矿点火山岩虽然化学成分和类型不同, 但都具有相似的形成机制, 是火山喷发喷流成矿作用多

旋回的体现,这与前面所述的大地构造环境是一致的。矿石表现的 Ce 的正异常,与海洋中热水沉积金属物相似,可能说明了热水喷流成矿作用的存在^[25]。相同矿点火山岩及矿石之间的 $\delta(\text{Eu})$ 值和 $\delta(\text{Ce})$ 值相近,配分曲线相似度高,说明火山岩与成矿的关系非常密切。酸性火山岩具有较低的 Sr 含量,富集 K、Rb 和 Th,具有弱的 Nb 负异常,明显亏损 P 和 Ti,对应于较强的 Eu 负异常,符合弧后盆地的岩石微量元素地球化学特征。肯德可克安山岩中 Ba 和 Sr 的含量较高,重元素模式斜率平缓,Rb-Ba-Th 具正向梯度,亦符合弧后盆地安山—玄武岩微量元素特征。此外,从肯德可克—北沟—景仁的岩浆序列来看,Nb、Hf、Ta、Rb、U 和 Th 等不相容元素的含量有依次升高的趋势,说明各矿点火山岩符合同一构造背景同源岩浆演化序列的规律。各矿点矿石普遍具有较高热水沉积指示元素含量,与 Sedex 型喷流成矿作用对应。虎头崖铅锌矿石和景仁黄铜矿石的微量元素含量变化较大,反映复杂的成矿环境及多种成矿作用的叠加。北沟磁铁矿石各微量元素含量相对稳定,可能反映其成矿作用的单一。所以,从北沟—景仁—虎头崖矿床的序列来看,矿石结构趋向于复杂,微量元素含量趋向于不稳定,其中, U 和 Mo 的含量趋于减少, S 的含量趋于增加,可能反映对应岩浆演化过程及成矿环境的变化^[26]。火山岩全岩硫同位素数据,按肯德可克—北沟—景仁的序列, $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 值呈逐渐增大的趋势,符合岩浆演化按照从中基性—酸性的发展规律,同时也说明喷流成矿作用趋于复杂。 $\delta(^{34}\text{S}_{\text{CDT}})$ 值分布范围说明岩石硫来源为海水,符合海底喷流成岩成矿模式。

对以上虎头崖—肯德可克矿区的常量元素、微量元素(稀土元素)及同位素的分析表明,矿区矿床的成矿作用以海底喷流为主,矿床基本上为 Sedex 型矿床。Sedex 型矿床是指以沉积岩容矿的喷流沉积型矿床,Sedex 型矿床有着特殊的产出构造背景、地质环境、矿床地质地球化学特征、矿化流体来源及成矿模式^[27-28]。虎头崖—肯德可克成矿区是柴南缘北部的弧后盆地环境中形成的成矿带,其总体特征是多期成矿的叠加形成的成矿带^[18],成矿带中分布着各时代地层,如早古生代奥陶纪地层、晚古生代泥盆纪—石炭纪地层、中生代三叠纪地层,此外,还有海西期,印支期和燕山期的侵入岩分布。但笔者的研究说明,矿区中晚古生代发生喷流成矿作用,应该是最主要的成矿活动,认识矿区的成矿规律,应该更多的从晚古生代的喷流成矿来研究。这样的认识符合矿区中基础地质的实际情况,与柴南缘—东昆仑祁漫塔格的弧后盆地的区域背景也是一致的。从区域地质背景看,不能

只强调奥陶纪的弧后盆地活动,也应该重视泥盆纪—石炭纪的弧后盆地活动。从具体矿床的成矿特征看,晚古生代的喷流成矿特征保存清楚,有利于恢复矿床的成矿地质条件,从而建立各矿床的成矿模型。

5 结论

1) 虎头崖—肯德可克矿区地层为一套连续的地层,各矿床具有层控性质,具有多个层位成矿的特点。矿区地层的基本岩性特点是:下部为火山岩,上部为沉积岩。地层岩性的转变与区域岛弧—弧后盆地的大地构造演化序列一致。

2) 虎头崖—肯德可克矿区火山岩基本属于含钾高的亚碱性系列,总体表现为亲弧裂谷特征,火山喷发喷流成矿作用具有多旋回的特点;矿石稀土元素和微量元素分析说明了热水喷流成矿作用的存在,与 Sedex 型喷流成矿特征和弧后伸展盆地大地构造环境相符合。

3) 虎头崖—肯德可克矿区是多期成矿叠加形成的成矿带,晚古生代的喷流成矿作用最为重要。正确地认识该期的成矿作用有利于恢复矿床的成矿地质条件和建立矿床的成矿模型。

REFERENCES

- [1] 杨竹森,侯增谦,蒙义峰,曾普胜,李红阳,徐文艺,田世洪,王训诚,姚孝德,姜章平. 安徽铜陵矿集区海西期喷流沉积流体系统时空结构[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 281-297.
YANG Zhu-sen, HOU Zeng-qian, MENG Yi-feng, ZENG Pu-sheng, LI Hong-yang, XU Wen-yi, TIAN Shi-hong, WANG Xun-cheng, YAO Xiao-de, JIANG Zhang-ping. Spatial-temporal structures of hercynian exhalative-sedimentary fluid system in Tongling ore concentration area, Anhui Province [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(3): 281-297.
- [2] 蒙义峰,崔彬,杨军臣,张廉昌. 滇东南芦柴冲大型银多金属矿床的海底喷流成矿作用沉积旋回划分[J]. 地质与勘探, 1998, 34(3): 16-28.
MENG Yi-feng, CUI Bing, YANG Jun-cheng, ZHANG Lian-chang. Sedimentary cycles divided of exhalation sedimentary mineralization in Luchaichong polymetallic deposit of southeast Yunnan Province [J]. Geology and Prospecting, 1998, 34(3): 16-28.
- [3] 彭润民,翟裕生. 内蒙古狼山—渣尔泰山中元古代被动陆缘热水喷流成矿特征[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 257-268.
PENG Run-min, ZHAI Yu-sheng. The characteristics of hydrothermal exhalative mineralization of the Langshan—

- Zhaertai belt, Inner Mongolia, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 257–268.
- [4] ANDREW J, DAVID R, DAVID P, MARIBEL Z D. The nature of magmatism at Palinpinon geothermal field, Negros Island, Philippines: Implications for geothermal activity and regional tectonics [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 129(4): 321–342.
- [5] DAMPARE S B, SHIBATA T, ASIEDU D K, OSAE S B. Geochemistry of Paleoproterozoic metavolcanic rocks from the southern Ashanti volcanic belt, Ghana: Petrogenetic and tectonic setting implications [J]. *Precambrian Research*, 2008, 162(3/4): 403–423.
- [6] 何书跃, 祁兰英, 舒树兰, 尹和珍, 何寿福, 景向阳. 青海祁漫塔格地区斑岩铜矿的成矿条件和远景[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(2): 14–22.
- HE Shu-yue, QI Lan-ying, SHU Shu-lan, YIN He-zheng, HE Shou-fu, JING Xiang-yang. Metallogenic environment and potential in the Qimantage porphyry copper deposit, Qinghai [J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(2): 14–22.
- [7] 薛培林, 肖静, 薛福林, 董琳. 青海祁漫塔格—都兰成矿带铜矿找矿前景初探[J]. *矿产与地质*, 2006, 20(3): 247–250.
- XUE Pei-lin, XIAO Jing, XUE Fu-lin, DONG Lin. Outlook on copper deposit exploration in Qimantage—Dulan ore belt [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2006, 20(3): 247–250.
- [8] 王秉璋, 罗照华, 李怀毅, 谌宏伟, 胡旭莉. 东昆仑祁漫塔格走廊域晚古生代—早中生代侵入岩岩石组合及时空格架[J]. *中国地质*, 2009, 36(4): 769–782.
- WANG Bing-zhang, LUO Zhao-hua, LI Huai-yi, ZHAN Hong-wei, HU Xu-li. Petrotectonic assemblages and temporal-spatial framework of the Late Paleozoic-Early Mesozoic intrusions in the Qimantage Corridor of the East Kunlun belt [J]. *Geology in China*, 2009, 36(4): 769–782.
- [9] 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 俞良军. 新疆东昆仑阿克库勒湖西缘地区蛇绿岩的确定[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(3): 6–10.
- WU Jun, LAN Chao-li, LI Ji-liang, YU Liang-jun. Determination of ophiolite at the western margin of Aqikekule lake, East Kunlun of Xinjiang [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(3): 6–10.
- [10] 骆满生, 张克信, 殷鸿福, 王国灿, 王永标, 陈能松, 侯光久. 东昆仑造山带龙什更公玛混杂岩岩石地球化学特征及其古环境重塑[J]. *地质科技情报*, 2006, 25(2): 19–24.
- LUO Man-sheng, ZHANG Ke-xin, YIN Hong-fu, WANG Guo-can, WANG Yong-biao, CHEN Neng-song, HOU Guang-jiu. Petro-geochemistry characteristics of Longshigengongma Mélanges of Eastern Kunlun orogenic belt and paleoenvironment reconstruction [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(2): 19–24.
- [11] 王松, 丰成友, 李世金, 江军华, 李东生, 苏生顺. 青海祁漫塔格卡尔却卡铜多金属矿区花岗岩闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其地质意义[J]. *中国地质*, 2009, 36(1): 74–84.
- WANG Song, FENG Cheng-you, LI Shi-jin, JIANG Jun-hua, LI Dong-sheng, SU Sheng-shun. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granodiorite in the Kaerqueka polymetallic ore deposit, Qimantage Mountain, Qinghai Province, and its geological implications [J]. *Geology in China*, 2009, 36(1): 74–84.
- [12] 高永宝, 李文渊, 张照伟. 祁漫塔格地区成矿地质特征及潜力分析[J]. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 393–394.
- GAO Yong-bao, LI Wen-yuan, ZHANG Zhao-wei. Analysis of geological features and the potential of Qimantage area [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2009, 29(S1): 393–394.
- [13] 潘彤. 青海祁漫塔格地区铁多金属成矿特征及找矿潜力[J]. *矿产与地质*, 2008, 22(3): 232–235.
- PAN Tong. Metallogenic characteristics and prospecting potential of the Fe-polymetallic deposits in Qimantage area, Qinghai Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2008, 22(3): 232–235.
- [14] 张爱奎, 李云平, 刘光莲, 侯梦卫. 虎头崖铜铅锌矿床类型新认识及其意义[J]. *青海国土经略*, 2008, 27(4): 25–27.
- ZHANG Ai-kui, LI Yun-ping, LIU Guang-lian, HOU Meng-wei. New understanding of deposit types and its significance of Hutouya copper lead-zinc deposit [J]. *Qinghai Economic Strategy for Land*, 2008, 27(4): 25–27.
- [15] 潘彤, 孙丰月. 青海东昆仑肯德可克钴钼金矿床成矿特征及找矿方向[J]. *地质与勘探*, 2003, 39(1): 18–22.
- PAN Tong, SUN Feng-yue. The mineralization characteristic and prospecting of Kendekeke Co-Bi-Au deposit in Eastern Kunlun, Qinhai Province [J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(1): 18–22.
- [16] 潘彤. 青海东昆仑肯德可克钴金矿床硅质岩特征及成因[J]. *地质与勘探*, 2008, 44(2): 51–54.
- PAN Tong. Geochemical features and origin of siliceous rocks of Kendekeke Co-Au deposit in the Eastern Kunlun metallogenic belt, Qinhai [J]. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(2): 51–54.
- [17] 王力, 孙丰月, 陈国华, 李碧乐, 迟效国. 青海东昆仑肯德可克金—有色金属矿床矿物特征研究[J]. *世界地质*, 2003, 44(2): 50–56.
- WANG Li, SUN Feng-yue, CHEN Guo-hua, LI Bi-le, CHI Xiao-guo. Mineralogical features of Kendekeke gold-nonferrous metal deposit in East Kunlun Mountain, Qinghai Province [J]. *World Geology*, 2003, 44(2): 50–56.
- [18] 伊有昌, 焦革军, 张芬英. 青海东昆仑肯德可克铁钴多金属矿床特征[J]. *地质与勘探*, 2006, 42(3): 30–35.
- YI You-chang, JIAO Ge-jun, ZHANG Fen-ying. Characteristics of Kendekeke Fe-Co multi-metal deposit in East Kunlun, Qinghai Province [J]. *Geology and Prospecting*, 2006, 42(3): 30–35.
- [19] 李宏录, 刘养杰, 卫岗, 曾宪刚, 杨小斌, 范丽琨. 青海肯德可克铁、金多金属矿床地球化学特征及成因[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(4): 378–383.
- LI Hong-lu, LIU Yang-jie, WEI Gang, ZENG Xian-gang, YANG

- Xiao-bin, FAN Li-kun. Geochemistry and genesis of the Kendekeke iron-gold polymetallic deposit in Qinghai Province [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2008, 27(4): 378–383.
- [20] 黄 敏. 青海省肯德可克多金属矿床特征及成因分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 10–32.
- HUANG Min. Characteristics and genesis of the Kendekeke Polymetallic deposit, Qinhai Province [D]. Changsha: Central South University, 2010: 10–32.
- [21] 赵财胜, 杨富全, 代军治. 青海东昆仑肯德可克钴铋金矿床成矿年龄及意义[C]//第八届全国矿床会议论文集. 北京: 地质出版社, 2006: 427–430.
- ZHAO Cai-sheng, YANG Fu-quan, DAI Jun-zhi. Mineralization age and its significance of Kendekeke cobalt-bismuth gold deposit in East Kunlun, Qinhai Province [C]// *Proceedings of the Eighth National Conference on Deposit*. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 427–430.
- [22] 张爱奎, 莫宣学, 李云平, 吕 军, 曹永亮, 舒晓峰, 李 华. 青海西部祁漫塔格成矿带找矿新进展及其意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(7): 1062–1074.
- ZHANG Ai-kui, MO Xuan-xue, LI Yun-ping, LÜ Jun, CAO Yong-liang, SHU Xiao-feng, LI Hua. New progress and significance in the Qimantage metallogenic belt prospecting, western Qinghai, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(7): 1062–1074.
- [23] IRVINE T N, BARAGAR W R A. A guide to the chemical classification of the common rocks [J]. *Journal of Earth Science*, 1971, 8(5): 523–548.
- [24] BAS M J, MAITER R W, STRECKEISEN A. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram [J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27(3): 745–750.
- [25] LARGE R R. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: Features, styles, and genetic models [J]. *Economic Geology*, 1992, 87(3): 471–510.
- [26] XI Xiao-shuang, TANG Jing-ru, KONG Hua, HE Shao-xun. Control of relay structure on mineralization of sedimentary-exhalative ore deposit in growth faults of graben systems [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2005, 12(3): 340–345.
- [27] KAREN L. Geometry of the neoproterozoic and paleozoic rift margin of western Laurentia: Implications for mineral deposit settings [J]. *Geosphere*, 2008, 4(2): 429–444.
- [28] HOLLAND D H. Sedimentary mineral deposits and the evolution of earths' near surface environments [J]. *Economic Geology*, 2005, 100(8): 1489–1509.
- (编辑 陈卫萍)