新疆东准噶尔拉伊克勒克岩浆矽卡岩型富铜—铁矿的发现及其成矿特征

严加永，孟贵祥，杨岳清，邓震，赵金花，汤贺军

中国地质科学院矿产资源研究所，国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室，北京，100037

内容提要： 拉伊克勒克铜铁矿是最近在新疆东准噶尔琼河坝覆盖区发现的高品位矿床，矿体中 TFe 平均达 51%，Cu 含量在 1% 以上，并伴生 Au，具有埋藏浅、品位高的特点，经济价值较高。该矿的发现首先是通过 1∶5 万地面重力、磁力和激电资料的处理分析，优选出找矿靶区；然后开展大比例尺的综合地球物理探测，发现在第四系覆盖区下存在高磁、高密度和中高极化率复合异常体；在异常有利地段实施钻探，首钻在揭穿第四系后即发现厚大隐伏矽卡岩型铜铁富矿体；通过 7 个钻孔的控制，求得铁资源量 2.45Mt，铜资源量 44 kt。矿体主体产于泥盆系下统安山岩和凝灰岩的层间构造裂隙中，厚度 8～32m，长度大于 200m。矿体两侧围岩蚀变发育，从内到外形成透辉石化、绿帘石化和角闪石、阳起石的蚀变分带。矿石中金属矿物主要是磁铁矿和黄铜矿，脉石矿物主要为钙铁榴石、透辉石—次透辉石等。矿体产状、矿石矿物组成、蚀变分带等特征表明，矿体类型为矽卡岩型，但是与一般接触交代矽卡岩矿床不同的是矿体周边未见碳酸岩与岩体，不存在接触交代的环境。综合分析认为该矿是一个典型的岩浆矽卡岩型矿床，其成因是深部形成的矽卡岩矿浆侵入到地壳浅部的构造裂隙中，在结晶分异和自交代过程中形成的。拉伊克勒克隐伏富铜—铁矿床及相邻斑岩型铜多金属矿床的发现说明综合地球物理在覆盖区找矿中能发挥重大作用，也扩大了在东准噶尔地区寻找矽卡岩型矿床的视野，同时也丰富了矽卡岩型铜铁矿的形成机理。

关键词： 岩浆矽卡岩；富铜—铁矿床；结晶分异；交代作用；东准噶尔拉伊克勒克

岩浆成因矽卡岩是指具矽卡岩成分岩浆沿构造裂隙贯入而冷凝的产物，它不严格受控于侵入岩和灰岩或富钙地层接触带的控制，当这种矽卡岩浆中包含有成矿金属时也可构成岩浆矽卡岩型矿床（吴言昌等，1998）。岩浆矽卡岩和岩浆矽卡岩矿床概念是传统矽卡岩的成岩成矿作用在实践和理论的不断深入探讨、发展基础上提出来的，我国地质工作者在这方面做出了重要贡献，1963 年，常印佛首次提出“铜陵狮子山地区的某些矽卡岩可能是熔流体贯入生成的”，虽然对这一认识当时未做进一步研究和论证（吴言昌等，1998），但对后人在一些地区矽卡岩成岩成矿作用的深入工作开阔了思路。岩浆矽卡岩观点的提出和建立主要还是在上世纪 80 年代末，当时我国一线地质工作者和有关院校专家学者在对各地不同产状矽卡岩，特别是对远离岩浆岩和碳酸盐岩地层接触带的脉状矽卡岩开展工作时，发现用传统的渗滤交代学说很难对其成因做出合理的解释，有些人认为，在地壳一定部位可能存在矽卡岩成分的岩浆，脉状矽卡岩是这种岩浆上侵到构造裂隙中冷凝形成的，这一认识在我国长江中下游广泛分布的含矿矽卡岩的深入工作得到许多人的认可（吴言昌等，1992，1996，1998；林新多等，1989；许建国等，1990；赵斌等，1987；赵一鸣等，2002），此外，对西藏当雄县拉屋铜锌矿（张炜等，2013）、滇西核桃坪铅锌矿（薛传东等，2011）等地含矿矽卡岩的的深入工作中也获得岩浆矽卡岩成因的证据支持。岩浆成因矽卡岩及其矿床总体具有以下特征：

（1）以脉体形态为主，围岩复杂，但二者界限清楚，按其形成方式可分为贯入矽卡岩、贯入—交代矽卡岩和引爆角砾矽卡岩。

（2）岩浆矽卡岩是一种派生岩浆产物，岩浆及其流体中的熔离现象十分普遍，在石榴子石、辉石等主要组成矿物中熔融包裹体发育（黎广荣等，2013）。

注：本文为新疆维吾尔自治区地质勘查基金资助项目（编号：A11-3-XJ4），国家自然科学基金资助项目（编号：41574133）和中国地质调查局地质项目（编号：121201103000150009，1212011085024，12120113041300）的成果。

收稿日期：2016-01-29；改回日期：2017-01-11；责任编辑：章雨旭。Doi：10.16509/j.georeview.2017.02.012

作者简介：严加永，男，1977 年生。博士，副研究员，从事矿产资源勘查和深部探测研究。Email：yanjy@163.com。

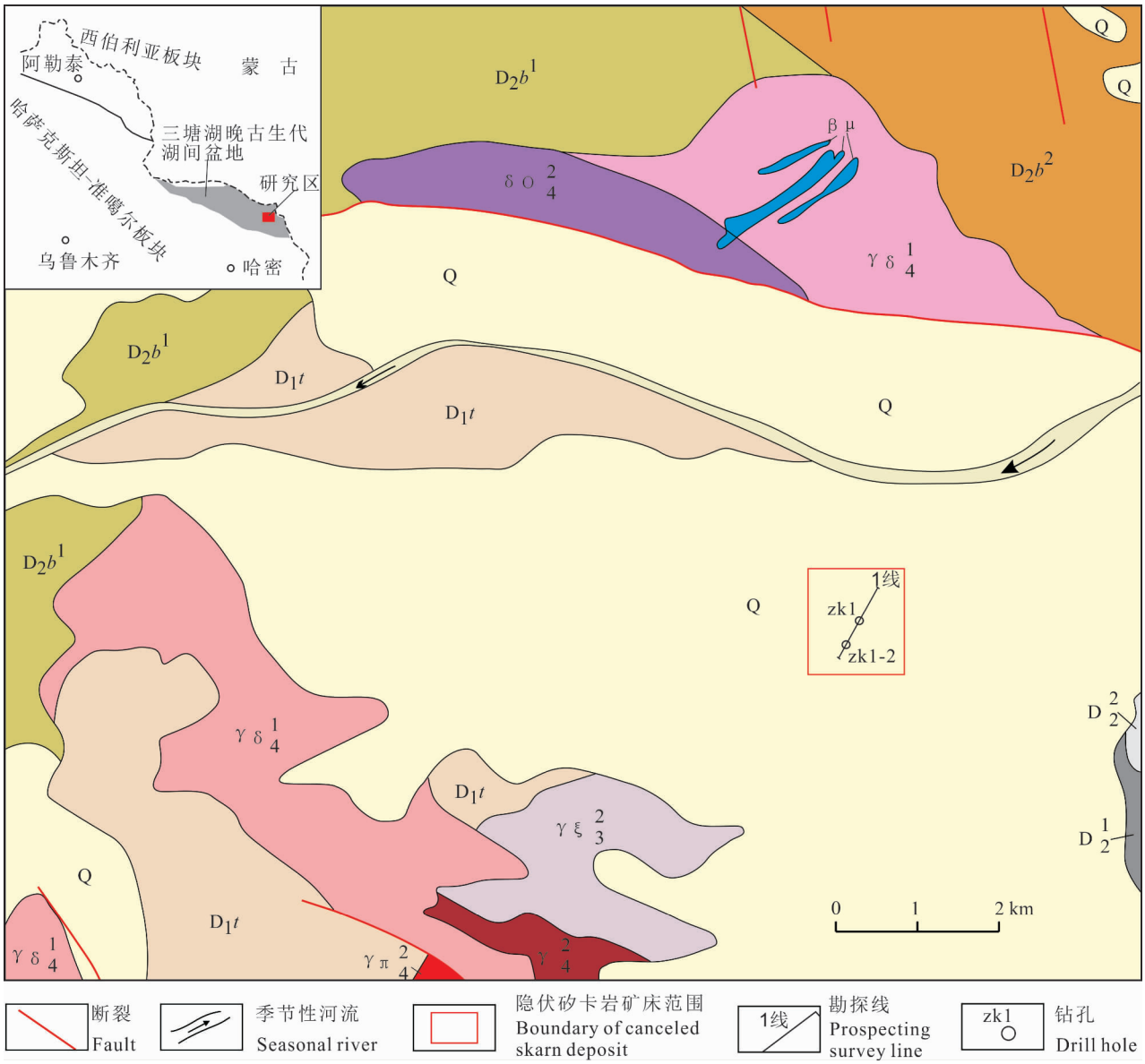


图 1 东准噶尔拉伊克勒克矿区及周边地质图

Fig. 1 Geological map of the Layikeleke ore district ,Eastern Junggar

Q—第四系；D_2b^2—中泥盆统第二岩性段；D_2b^1—中泥盆统第一岩性段；D_2^2—中泥盆统安山岩；D_2^1—中泥盆统玄武岩；D_1t—泥盆系下统托让格库都克组；γ_4^2—海西期二长花岗岩；$\gamma\pi_4^2$—海西期花岗斑岩；δo_4^2—海西期石英闪长岩；；$\gamma\delta_4^1$—海西早期花岗闪长岩；$\gamma\xi_3^2$—加里东期英云闪长岩；$\beta\mu$—辉绿岩脉

Q— Quaternary; D_2b^2—Second lithologic member of Middle Devonian ; D_2b^1—First lithologic member of Middle Devonian; D_2^2— Middle Devonian andesite; D_2^1— Middle Devonian basalt; D_1t— Tuorangeketuke formation of Lower Devonian System,; γ_4^2— Hercynian monzonitic granite; $\gamma\pi_4^2$— Hercynian granite porphyry; δo_4^2— Hercynian quartz diorite; $\gamma\delta_4^1$— early Hercynian granodiorite; $\gamma\xi_3^2$— Caledonian tonalite; ;$\beta\mu$—diabase dikes

(3)岩浆矽卡岩中矿物成分复杂，长石、磷灰石、锆石等矿物发育，也存在垂直分带现象。

(4)岩浆矽卡岩中的成矿作用兼具就地熔离结晶作用和较晚期热液交代特征(梁祥济，2000；Iacono Marziano et al. ,2008，Gaeta et al. ,2009)。熔离结晶作用中以形成磁铁矿矿床为主，热液交代作用中以形成硫化物矿床为主。

总体来看，有关岩浆矽卡岩的研究虽已取得了不少新资料和新认识，但目前尚处于探索研究阶段，还有不少问题，如形成的地质环境、生成机理，与热

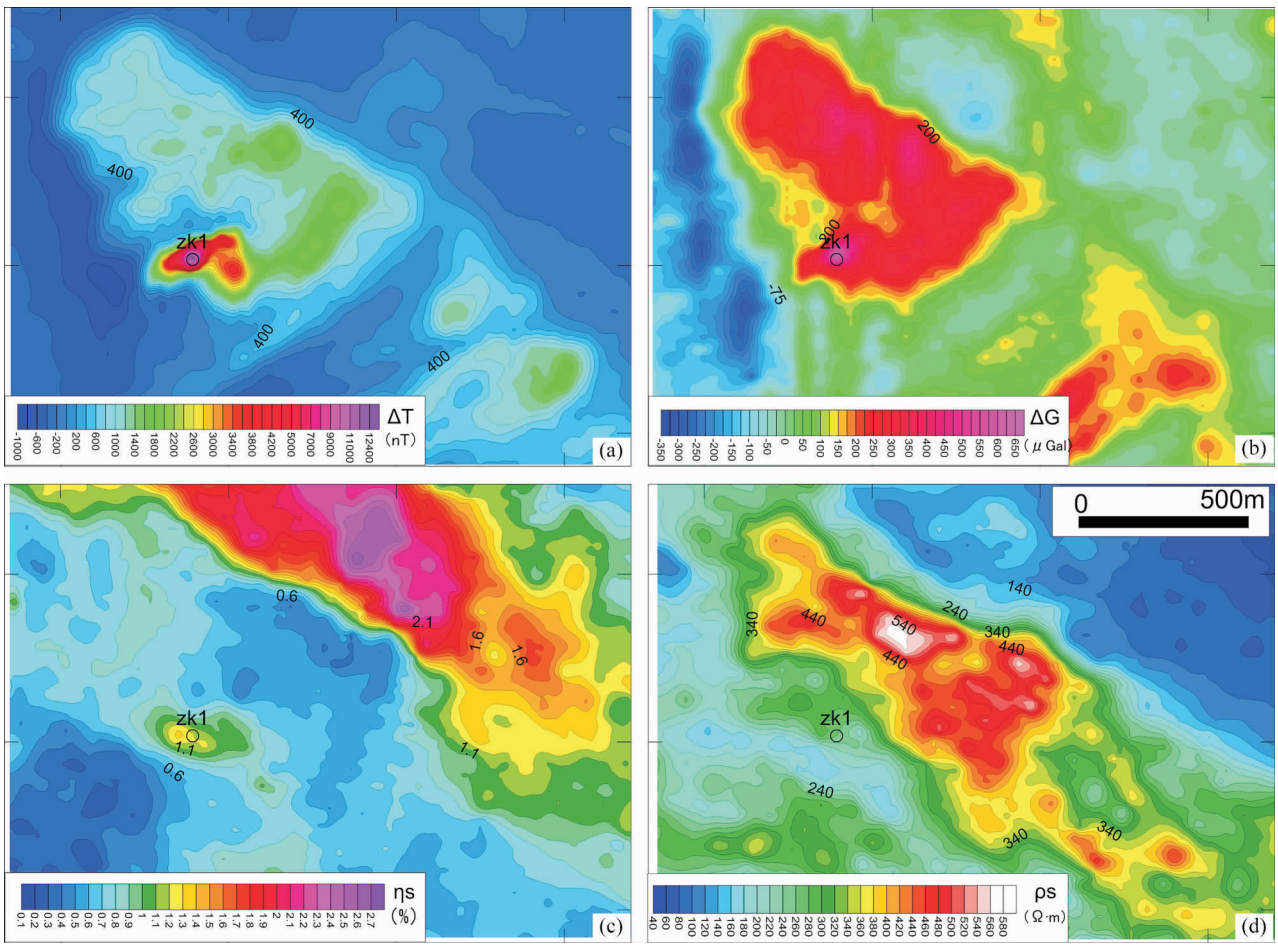


图 2 东准噶尔拉伊克勒克矿区地球物理异常图

(a)化极磁异常;(b)剩余重力异常;(c)视极化率异常;(d)视电阻率异常

Fig. 2 Geophysical anomalies of Layikeleke ores district, eastern Junggar

(a) Reduction to the pole magnetic anomaly; (b) Residual gravity anomaly; (c) Pseudo polarizability anomaly; (d) Pseudo resistivity anomaly

液交代成因矽卡岩的区别标志和相互关系等,还有待进一步深化研究(赵一鸣等,2002)。

新疆伊吾县淖毛湖至蒙古边界的琼河坝地区是广袤的戈壁滩分布区,在近几十年里,地质工作者通过艰辛工作,在矿产资源的寻找上获得了一定突破,发现了多处不同类型矿床(点)(王晓地等,2006;张锦祥等,2007;董连慧等,2009;张永等,2010)。然而随着工作程度的加深,加之该区第四系覆盖区分布广泛,地表露头矿产发现的概率越来越小,向覆盖区和深部找矿的迫切性也越来越强。2011 年以来,笔者等在对 1∶ 5 万地面重力、磁力和激电数据处理、反演的基础上,进行了综合解释,通过模式对比与异常组合分析,圈定了 7 处找矿靶区[1],对其中的拉伊克勒克靶区进行了综合地球物理探测,并实施了钻探验证,在厚覆盖下发现了具有中—大型规模的斑岩型铜多金属矿床和矽卡岩型富铜—铁矿床。根据目前的研究工作,这两个矿床和典型的同类矿床相比均有不同特色,斑岩型铜矿床成矿特征已在另文(吕博等,2014)进行了分析,本文主要对矽卡岩型富铜—铁矿床的发现及矿床特征进行研究。铜铁矿体主体产于泥盆系下统安山岩和凝灰岩的层间构造裂隙中,矿体两侧围岩蚀变发育,从内到外形成透辉石化、绿帘石化和角闪石—阳起石等矽卡岩组合的蚀变分带。矿石中金属矿物主要是磁铁矿和黄铜矿,脉石矿物主要为钙铁榴石、透辉石—次透辉石等。矿体产状、矿石矿物组成等特征表明矿体类型为矽卡岩型,但是与一般接触交代矽卡岩矿床不同的是矿体周边未见碳酸盐岩与岩体,也未见富钙的其他地质体,不存在接触交代的环境。从矿体特征、矿石组分、围岩蚀变等特征综合分析,认为该矿应为

岩浆贯入矽卡岩型矿床,是深部形成的矽卡岩矿浆沿断裂构造侵入到地壳浅部的构造裂隙中,在结晶分异和自交代过程中形成的。该矿床的发现表明综合地球物理方法是覆盖区找矿的有效手段,也说明在新疆和内蒙西部广泛分布的第四系覆盖之下仍有巨大的找矿前景。

1 区域地质背景

琼河坝地区属哈萨克斯坦—准噶尔板块(Ⅰ级),准噶尔微板块(Ⅱ级),三塘湖晚古生代湖间盆地(Ⅲ级,如图 1 所示)(董连慧等,2010),早古生代岛弧遗迹已不多见,仅在区内最老地层中—上奥陶统中保留一些活动大陆边缘岛弧的中—基性火山岩建造。晚古生代岛弧活动特征明显,下—中泥盆世—下石炭世时期的滨海—浅海相火山岩建造分布十分广泛。中生代沉积物主要为中侏罗统的陆相碎屑岩建造,不整合覆盖于古生代地层之上。区内侵入岩发育,它们几乎占到全区出露基岩总面积的 1/3,主要形成于加里东和海西期,均以中—酸性岩为主,从浅成岩株(脉)到中深成岩基均有所分布(屈迅等,2009,2010),但由于区内戈壁滩大面积分布,地层和侵入岩的出露较少。区内已发现矿产地 50

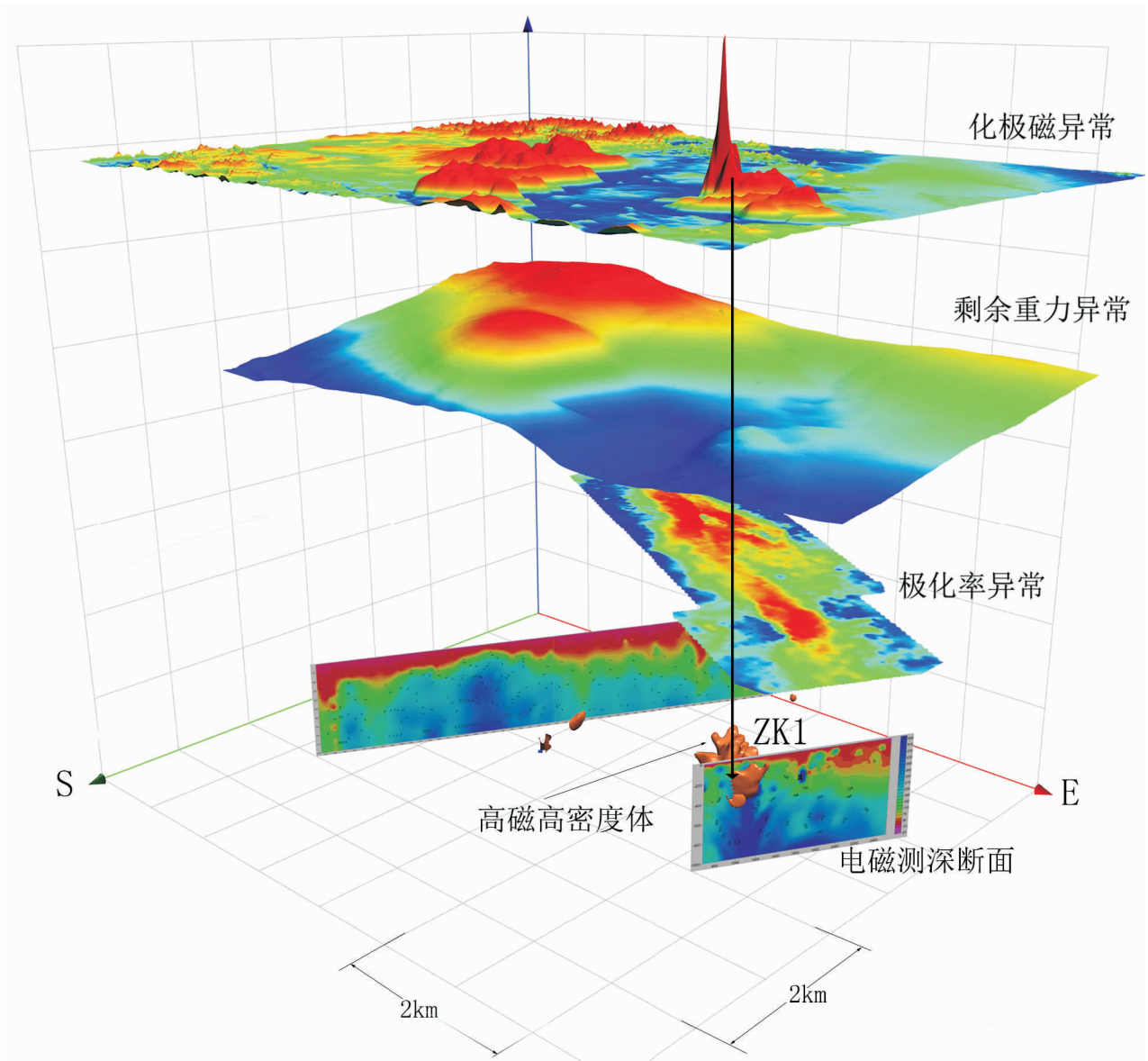


图 3 东准噶尔拉伊克勒克矿区综合地球物理三维显示图

Fig. 3 3D view of integrated-geophysics anomalies of Layikeleke ore district, Eastern Junggar

余处,金属矿产主要有 3 大类:① 构造蚀变岩型金矿,以北山金矿床为代表; ② 斑岩型铜矿,以蒙西、和尔赛—铜华岭矿床为代表; ③ 矽卡岩型铁(铜)矿,以宝山矿床为代表。

2　地球物理特征与矿床发现

根据新疆物化探大队在琼河坝地区开展的 1∶5 万地面重力和地面磁力测量结果❷,通过位场分离、三维反演等方法(严加永等,2013),对重磁数据进行了全面处理,结合区域地质和化探资料,圈定了 7 处靶区,2011 年,笔者等对位于第四系覆盖区的拉伊拉克靶区开展了查证工作,主要开展了 1∶ 5000 的重力、1∶ 2000 的磁力测量和 1∶ 10000 大功率激电中梯面积性测量,在异常组合有利地段部署了音频大地电磁测深和对称四极测深。对磁异常进行了化极处理获得了化极磁异常(图 2a),异常总体呈北西走向,局部高磁异常为北东向,磁异常最高为 12000nT。为提取浅部密度体信息,对重力数据进行了匹配滤波,获得了剩余重力异常(图 2b),重力异常形态与磁异常基本一致,说明二者为同源异常,高磁异常与高重力异常位置基本吻合。大功率中梯激电获取的视极化率异常(图 2c)发现了一处主体异常和小异常,异常为北西向,由于背景极化率很低(0.3%),0.7% 以上的极化率即可视为高异常,推测极化率异常为金属硫化物所致。中梯视电阻率(图 2d)走向也为北西向,由于地表覆盖较厚,整体电阻率较低,最高仅 400Ω · m,高电阻率反映了地层或岩体的隆起。高磁高重地段的异常组合为“三高一中”,即高重力异常、高磁异常、高极化率异常和中等电阻率异常,极高的磁异常反映地下肯定有强磁性物质的存在,加之高重力异常,高极化率异常,通过综合分析排除了基性岩体的可能,推测该异常组合可能由磁铁矿和金属硫化物矿体所引起。重磁三维反演也揭示了该组合异常下方存在高磁性高密度的地质体,其三维形态如图 3 所示,各类异常位置基本一致。根据上述物探异常特征和重磁三维反演结果,部署了 zk1 孔(位置见图 1、图 2),开孔揭穿 12m 厚的第四系覆盖层之后,即发现了矽卡岩型富铜铁矿体,矿体连续视厚度达 46m,从而为该隐伏矿床的发现打开了局面。截止目前,通过钻孔控制求取的铁矿石量(333 + 3341)为 2.45Mt,全铁平均品位为 50.4%,铜矿金属量为 44kt,平均品位 2.37%,伴生金已经达到有益组分要求,一个小型铁、铜、金多金属矿已经初具雏形。

3　矿区地质

3.1　地层

矿区范围无基岩出露,全为第四系覆盖(图 1),外围出露有泥盆系下—中统,中统为北塔山组(D_2b),主要分布在矿区北部和西部,可分成二个岩性段,第一岩性段(D_2b^1)岩石组合为一套中性—中基性火山熔岩为主夹中酸性火山碎屑岩。第二岩性(D_2b^2)段岩石组合为一套中酸性火山碎屑岩夹基性火山熔岩,地层总体沿北北西方向延展,倾向南西,倾角 20° ~ 40°。目前,笔者在第二岩性段的安山岩中锆石 U-Pb 测定年龄为 430Ma。下统称托让格库都克组(D_1t),在区内分布广泛,与中泥盆统不整合接触,可分为三个岩性段:第一段岩石组合主要

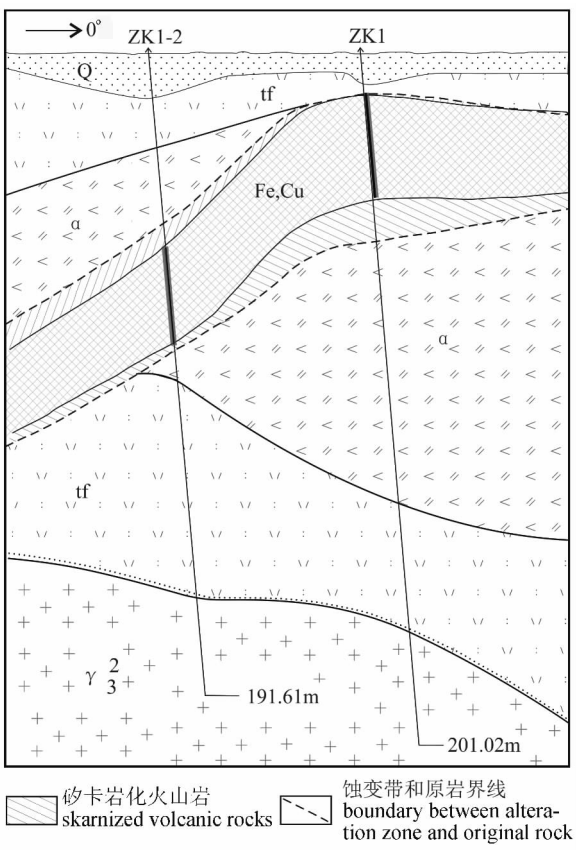


图 4 东准噶尔拉伊克勒克矿区 1 勘探线剖面

Fig. 4 Geological section along the line - 1 in Layikeleke ore district, Eastern Junggar

Q—第四系;Tf—蚀变英安—安山质凝灰岩;α—安山岩;γ_3^2—加里东期花岗岩;Fe,Cu—矽卡岩型富铜—铁矿体;

Q— Quaternary; Tf— Altered dacite — andesitic tuff ; α—andesite; γ_3^2— Caledonian granite; Fe, Cu— Rich skarn type copper — iron ore body

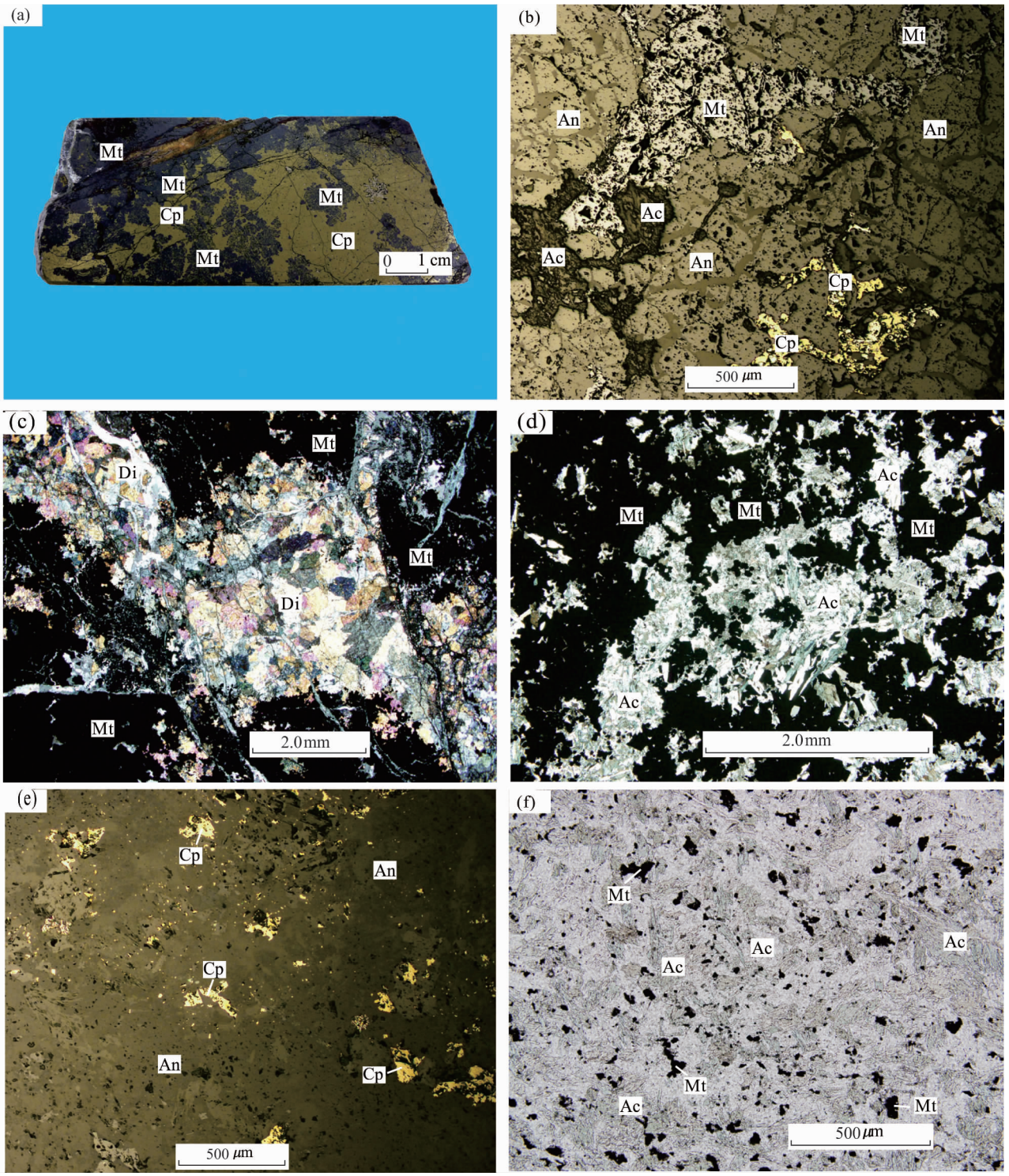


图 5 东准噶尔拉伊克勒克矿矿石和蚀变围岩镜下照片

Fig. 5 Ores and alteration wall rocks photos of the Layikeleke deposit, Eastern Junggar

(a) 矿石实物:黄铜矿(cp)交代磁铁矿(Mt);(b)磁铁矿(Mt)和黄铜矿(cp)交代钙铁榴石(An),Ac 为后期形成的阳起石;(c)磁铁矿(Mt)交代透辉石(Di);(d)阳起石(Ac)交代磁铁矿(Mt);(e)蚀变安山岩(An)中黄铜矿(cp)浸染分布;(f)强阳起石化安山岩(Ac)中磁铁矿(Mt)浸染分布

(a) ore: chalcopyrite (CP) metasomatic magnetite (Mt); (b) Ore Under the microscope: magnetite (Mt) and chalcopyrite (CP) replacement of calcium iron garnet (An), Ac is the actinolite formation later; (c) Micro-texture of Magnetite (Mt) account of diopside (Di); (d) Actinolite metasomatic magnetite (Mt); (e) Chalcopyrite (CP) disseminated distribution in altered andesite (An); (f) Magnetite (Mt) disseminated distribution in strong actinolite tremolitization andesite (Ac)

为一套中酸性火山碎屑岩,第二段岩石组合为一套酸性—基性火山碎屑岩为主体夹有同成分火山熔岩。偶见浅灰白色生物碎屑灰岩。第三段为一套酸性火山碎屑岩夹少量酸性火山熔岩。

3.2　侵入岩

矿区地表无岩体出露,在钻探过程中深部见到规模较大的两类岩体,一类为黑云母二长花岗岩,被托让格库都克组不整合覆盖,另一类为英云闪长岩,是相邻铜(钼)矿床的赋矿围岩,它侵入在泥盆系下统托让格库都克组,本次工作对岩体不同部位的锆石运用 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 方法 U-Pb 同位素定年,其数值均为 418Ma,因此前人对托让格库都克组所定的时代是值得商榷的。在钻孔中还见有黑云母钾长花岗岩,花岗闪长岩及其辉绿岩,石英脉等,但规模均不大。

3.3　构造

由于第四系发育,地表的构造行迹不易判断,结合探槽所揭露和区域重磁场数据分析,矿区以断裂构造为主,其中以北西向和近南北向两组断裂规模较大,北东向断裂规模较小,北西向、南北向及北东向断层基本为成矿后期断层,断裂性质有正断层、逆断层、平移断层、压性反扭断层、张性反扭断层、压性顺扭断层、张性顺扭断层等。

4　矿床地质特征

4.1　矿体产出围岩特征

矿床范围地表全部为第四系覆盖,根据钻孔揭露和区域对比,第四系之下为托让格库都克组火山岩系,目前已完成 7 个钻孔,其中两个钻孔打到 200m 后,见到黑云母二长花岗岩,岩体和上覆火山岩关系清楚,接触带地层未受到蚀变,故应是托让格库都克组不整合覆盖其上。钻孔所揭露的托让格库都克组岩性较简单,为基—中性火山岩,上部主要为安山质火山碎屑岩,下部则以安山岩为主,间夹有玄武岩和英安岩,未发现正常沉积岩系。另外在钻孔中还见英云闪长岩穿插于安山岩中,英云闪长岩稍有蚀变,蚀变作用主要是角闪石的黑云母化和黑云母的褪色及铁质的析出,另外见有少量沿微裂隙或浸染状分布的后期磁铁矿和黄铁矿,矽卡岩型铁铜矿体沿火山碎屑岩和安山岩之间的构造薄弱带产出。

4.2　矿体特征

拉伊克勒克铜—铁矿体目前主要在 ZK1、ZK1-2 孔、ZK1-3 孔和 ZK0-1 孔见到,其围岩均为泥盆系下统托让格库都克组中性火山岩系,矿体和围岩产状基本一致(图 4),表明成矿空间为层间构造裂隙,尽管矿体两侧围岩均发育程度不等的透辉石、绿帘石、阳起石、磁铁矿化等蚀变作用,但矿体以黑色、富硫化物和比重较大为特点,使其和围岩的界线肉眼基本可确定。矿体中也见到围岩残留夹层,但厚度通常不足 1m。矿体产状较陡,在不同钻孔中矿体离地表的深度、厚度和 Cu 、TFe 含量等均有差异(表 1),这可能和成矿前构造裂隙发育不同和成矿后区域地壳变动有较大关系。

4.3　矿石的矿物组成及分布特征

矿石的矿物组成较简单,铁矿物为磁铁矿,铜矿物为黄铜矿(图 5a)。脉石矿物主体为钙铁石榴子石和透辉石—次透辉石,在矽卡岩浆后期热液活动中新增较多的角闪石、阳起石、斜长石、石英、绿帘石、葡萄石、方解石等矿物。它们在矿体中的分布稍有分带现象,在矿体中部及接近下盘部位,以石榴子石和透辉石居多,特别是矿体核心部位石榴子石的数量更多,向两侧透辉石很快取代石榴子石占据了优势地位,然后,矿石中出现了斜长石和石英,角闪石和阳起石在矿石中也较多生成,再向外,矿石中出现了碳酸盐脉。石榴子石均呈他形块体(图 5b),正交偏光镜下显均质性,不发育异常光性。透辉石以他形粒状集合体居多(图 5c),二者伴生时,透辉石全以交代石榴子石产出。磁铁矿在矿石中含量范围为 30%~90%,形成晚于透辉石,主要呈他形块体,交代石榴子石和透辉石。斜长石以半自形晶为主,石英完全呈他形,这两种矿物虽然形成晚于石榴子石、透辉石和磁铁矿,但它们较少以交代这三种矿物产出,主要发育在早形成的矿物粒间。其

表 1 东准噶尔拉伊克勒克矿床不同钻孔中矿体特征

Table 1 Orebody characteristics in different drilling of the Layikeleke deposit, Eastern Junggar

见矿钻孔	见矿深度(m)	矿体厚度(m)		矿体品位(%)		矿体围岩
		铁矿体	铜矿体	TFe	Cu	
ZK1	10	31.35	34.06	51	3.85	凝灰岩和安山岩之间
ZK1-2	65m	26.24	36.76	56.28	1.72	安山岩和凝灰岩之间
ZK1-3	20m	12.25	14.35	39.85	0.54	凝灰岩和安山岩之间
ZK0-1	48.5m	7.95		47.9		安山岩

后,则以角闪石和阳起石的广泛发育为特征(图5d),它们以交代早形成矿物形式产出。碳酸盐矿物为方解石,主要以脉体形式穿插矿石中所有矿物。

矿石中硫化物种类较简单,主要为黄铁矿和黄铜矿,二者形成晚于磁铁矿,其中黄铁矿的形成时间早于黄铜矿,其晶体较大,也较自形,偶见五角十二面体自形晶。黄铜矿则主要为他形晶(图5a、b),其集合体以不规则的脉体、团块状或浸染状交代磁铁矿(图5a),有时也以交代石榴子石、透辉石形式产出,分布不均匀,黄铁矿和黄铜矿伴生时,后者多围绕前者分布。

磁铁矿和透辉石、石榴子石的化学成分见表2、表3和表4。磁铁矿的成分由国家地质实验测试中心完成,石榴子石和辉石的成分由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针实验室完成。在磁铁矿主成分中,Fe_2O_3和FeO占据了绝对地位,Fe_2O_3的理论含量是68.96%,FeO为31.03%,Fe_2O_3/FeO=2.22,在自然界其比值是有变化的,但通常不超过3。在本矿床中,Fe_2O_3/FeO变化范围仅在2.22~2.49,因此,它们均属较典型的磁铁矿。SiO_2含量较高,这也是矽卡岩矿床中磁铁矿的一大特点,MnO、MgO、CaO、TiO_2、V、Ni、Co、Cr等元素在磁铁矿中的存在,反映了铁质来源和原始偏基性物源有较密切的关系(王志华等, Nystrom J O et al.,1994)。

表2 东准噶尔拉伊克勒克矿床矽卡岩型铁—铜矿石中磁铁矿化学成分

Table 2 Chemical compositions of the Magnetite from the skarn Fe—Cu ore of the Layikeleke deposit, Eastern Junggar

样号	ZK1-21-1	ZK0-1-5	ZK0-1	ZK1-1-8	ZK1-1-9
Fe_2O_3(%)	66.68	67.95	70.10	67.97	69.00
FeO(%)	30.04	28.17	28.13	27.53	28.54
MnO(%)	0.17	0.27	0.25	0.22	0.20
MgO(%)	0.37	0.42	0.14	0.34	0.19
CaO(%)	0.18	0.73	0.18	0.37	0.19
TiO_2(%)	0.10	0.09	0.09	0.11	0.07
SiO_2(%)	1.31	2.01	0.61	2.60	1.16
Fe_2O_3/FeO	2.22	2.41	2.49	2.47	2.42
V(μg/g)	85.6	152	64.9	77.7	61.2
Ni(μg/g)	53.3	133	50.7	39.1	41.0
Co(μg/g)	54.6	90.8	97.5	62.2	62.9
Cr(μg/g)	7.57	224	14.1	22.1	12.8
La(μg/g)	0.33	0.75	0.22	0.39	0.24
Ce(μg/g)	0.58	1.47	0.36	0.70	0.53
Pr(μg/g)	0.12	0.25	0.11	0.40	0.09
Nd(μg/g)	0.43	1.24	0.38	1.54	0.35
Sm(μg/g)	0.07	0.26	<0.05	0.12	0.10
Eu(μg/g)	<0.05	<0.05	<0.05	0.10	<0.05
Gd(μg/g)	0.07	0.23	<0.05	0.20	0.12
Tb(μg/g)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Dy(μg/g)	0.11	0.10	0.05	0.27	0.08
Ho(μg/g)	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	<0.05
Er(μg/g)	0.07	0.07	<0.05	0.16	<0.05
Tm(μg/g)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Yb(μg/g)	0.12	0.09	<0.05	0.27	<0.05
Lu(μg/g)	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Y(μg/g)	0.60	0.61	0.22	1.17	0.32
∑REE	2.75	5.32	1.79	5.52	2.18
LREE	1.58	4.02	1.17	3.25	1.36
HREE	<0.57	0.69	0.4	1.1	0.5
LREE/ HREE	2.77	5.83	2.92	2.95	2.72
δEu	2.23	0.62	3.05	1.98	1.43
δCe	0.68	0.80	0.51	0.36	0.84

稀土元素在磁铁矿中均不高,反映了稀土元素和铁的地球化学不一致性(王春龙等,2012,藏梅等,2013),其总量全在6μg/g以下,其中轻稀土含量高于重稀土,在磁铁矿形成过程中,稀土元素的分异作用不强,δEu基本均为正异常,其中三个样品δEu>0.7。而Ce的亏损相对较明显可能有四价Ce的分离晶出。

在辉石的化学成分中(表3),除了SiO_2外,占优势地位的依次是CaO、MgO、FeO,当换算成独立矿物分子,投入辉石成分判别图中(图6),则全部集中在透辉石—次透辉石范畴,这与中国乃至世界矽卡岩型铁铜矿床中辉石主要属于透辉石—次透辉石系列一致(赵一鸣等,1990)。表4所列是矿石中石榴子石的化学成分,除了SiO_2外,占优势地位的主要CaO和FeO,也即基本仅为钙铁榴石系列矿物(赵斌等,1987,梁祥济等,1994),其中又以钙铁榴石占绝对优势,其次是钙铝榴石,但不同部位石榴子石的其他成分还是有一定变化,例如,在ZK3-1孔中的石榴子石以TiO_2和MnO偏高为特征,TiO_2含量普遍接近2%,MnO含量接近或高于1%,而ZK1-1孔石榴子石的TiO_2和MnO含量仅是ZK3-1孔中石榴子石的一半左右,这说明石榴子石结晶前的初始岩浆—热液成分在不同部位还是有变化的。总体看本矿床中的石榴子石和琼河坝的宝山、绿

石沟、灰西沟等矽卡岩矿石中石榴子石的成分有较大不同(孟贵祥等,2015)。

4.4　矿石中成矿元素分布

根据具有代表性的 ZK1-2 孔中矿体的 Fe 和 Cu 的分析结果(表 5),对矿石的成矿元素分布特征进行了研究。在 ZK1-2 孔中,铁矿体的圈定从孔深 65.4m(样号 H9)开始,连续取样到 89.64m(H20),共 24.24m,铜矿体的圈定从孔深 52.88m(样号 H2)开始,连续取样到 89.64m(H20),共 36.76m。从取样和化学分析结果表明,虽然在矿体上、下盘的蚀变围岩中有铜、铁矿化,但仍圈不出矿体,矿体仅由富磁铁矿和黄铜矿的矽卡岩组成,其界限清楚,特别是下盘围岩和矿体关系更明显。铜矿体和铁矿体范围基本是重叠的(图 7),铜矿体的范围稍广于铁矿体。矿体中铁含量变化不大,显然和矿石中磁铁矿数量占优,且分布较均匀有关,而铜有较大的起伏,这和铜矿物数量较少,且分布不均有明显关系。另外,矿石中的金也值得重视,金含量的高低和矿石中硫化物、特别是和黄铜矿的数量基本呈正比。

4.5　围岩蚀变

在拉伊克勒克矽卡岩铜—铁矿体上下盘范围中,由于矿体的后期侵入而产出的热液蚀变非常广泛,蚀变岩的分布范围至少是矿体厚度的数倍以上。

矿体上下盘围岩的蚀变作用从接触带向外构成一定的分带,总体可分成 3 个带:①矽卡岩化带,紧靠矿体,主要表现为透辉石化,透辉石以他形细粒集合体不均匀叠加分布在火山岩系中,强烈时可取代火山岩构成由细粒透辉石集合体构成的矽卡岩,这个带的宽度一般在 5m 以内。②绿帘石化带,处于透辉石化带外侧,二者界限不是很清楚,当远离接触带,透辉石的数量较快减少,绿帘石逐步增多,它们呈半自形晶分布在透辉石周围或直接交代透辉石形成,另外在火山岩中也常不均匀浸染状分布,绿帘石基本是热液交代原岩中的基性矿物产生的。绿帘石带的发育宽度不大,一般仅数十厘米。③角闪石—阳起石化带,广泛分布于①和②带的外侧,实际上,角闪石和阳起石在透辉石化带和绿帘石化带中就有较多产生,但以二者为主体的蚀变带其范围更广,蚀变作用强烈时,阳起石在岩石中的数量可达 50% 以上(图 5f),其范围可距矿体百余米以外。

在上述蚀变带的发育过程中,磁铁矿和黄铜矿也在蚀变岩石中产生并构成矿化,在矽卡岩化带,磁铁矿主要以他形小块体或粒状集合体不均匀交代透辉石,并和绿帘石密切伴生。在角闪石—阳起石化带则以较均匀的粒状浸染分布在角闪石—阳起石化的蚀变岩石中(图 5f),磁铁矿的数量可达 24%,岩石中的 TFe 含量有时可达 20% ~25%。围岩蚀变多数情况下在上盘发育,常使矿体和围岩的关系变得模糊起来,故也造成矿体和围岩的过渡关系,下盘围岩中蚀变作用一般较弱,因此常表现为矿体和围岩的突变关系。

表 3 东准噶尔拉依克勒克 Fe—Cu 矿石中辉石的电子探针分析结果

Table 3 Electron microprobe analyses of diopside from Fe—Cu ores of the Layikeleke deposit, Eastern Junggar

样品号	ZK3-1-2-2-1	ZK3-1-2-2-2	ZK3-1-2-2-3	ZK3-1-2-2-4	ZK3-1-2-2-5
SiO_2	52.968	53.702	52.194	53.798	52.938
TiO_2	0	0	0.006	0	0
Al_2O_3	0.424	0.285	1.033	0.468	0.371
Cr_2O_3	0	0	0.043	0.004	0.012
FeO	8.188	8.706	8.104	8.603	7.512
MnO	0.728	0.864	0.74	0.83	0.731
MgO	13.432	13.193	13.267	13.186	13.972
CaO	24.798	24.82	24.342	24.703	24.835
Na_2O	0.285	0.336	0.544	0.368	0.262
K_2O	0.002	0	0.002	0.014	0
Si	1.9737	1.9828	1.9565	1.9825	1.9711
Al(ⅳ)	0.0000	0.0000	0.0435	0.0175	0.0000
Al(ⅵ)	0.0000	0.0000	0.0021	0.0029	0.0000
Ti	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000
Cr	0.0000	0.0000	0.0013	0.0001	0.0004
Fe^{3+}	0.0814	0.0688	0.1180	0.0619	0.0894
Fe^{2+}	0.1720	0.1985	0.1335	0.2019	0.1428
Mn	0.0230	0.0270	0.0235	0.0259	0.0231
Mg	0.7461	0.7262	0.7414	0.7244	0.7756
Ca	0.9901	0.9819	0.9776	0.9754	0.9908
Na	0.0206	0.0241	0.0395	0.0263	0.0189
K	0.0001	0.0000	0.0001	0.0007	0.0000

5　讨论

5.1　矿体为岩浆矽卡岩成因的证据

从矿石组成看,该矿属于典型的矽卡岩型,但从产状看出,它和传统的以渗滤接触交代作用形成的矽卡岩矿床具有明显的差异:

(1) 矿体产在火山岩的层间构造裂隙中,矿体和围岩产状基本一致,矿体相对围岩有明显的后成性。

(2) 矿体上下盘围岩仅为中基性

火山岩,未见到碳酸盐岩,同时也不存在侵入岩和碳酸盐岩的接触带,矿体上下盘围岩中蚀变作用发育,并从接触带向外形成分带,围岩中的蚀变矿物和矿体的组成矿物有共同性,并且形成顺序也基本一致。

(3)在矿石中,矿物组成除了透辉石、石榴子石等典型矽卡岩矿物组合外,还发育长石、石英等岩浆岩的特征矿物,它们的产出有一定的垂直分带现象(于森等,2013),这反映了矿浆进入火山岩的构造裂隙后,在相对封闭的环境中产生了结晶分异作用,这在接触交代矽卡岩中极为少见,说明矿体来源于岩浆矽卡岩。

(4)矽卡岩矿体的围岩蚀变在上下盘存在不对称性,通常下盘围岩的蚀变作用较弱,因而,矿体和围岩的界线普遍较清楚,而上盘围岩由于受矽卡岩浆及其热液更强的影响,其蚀变作用强烈,特别是透辉石化的发育,使围岩和矿体的界限变的较模糊,这在典型的接触交代矽卡岩矿体两侧是不存在的,只可能存在于岩浆矽卡岩矿床中。

根据上述特点,我们认为拉伊克勒克的矽卡岩富铜铁矿体具有岩浆成因矽卡岩矿床较典型的特征

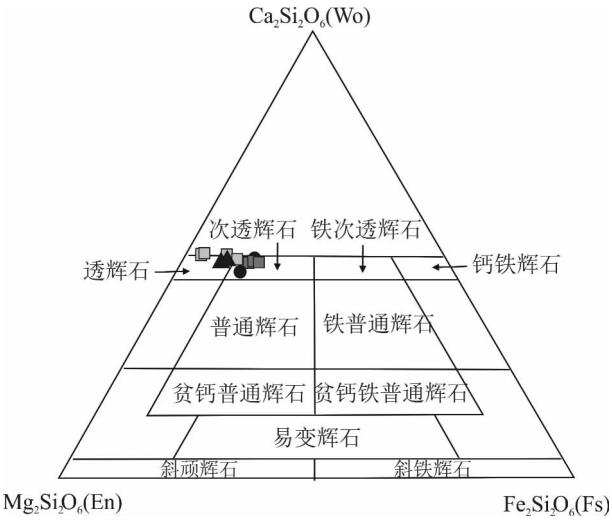


图 6 东准噶尔拉伊克勒克矿床矿体中辉石分类图解
(据 Morimoto N,1988,刘显凡等,2015)

Fig. 6 Classification of the pyroxene from the ore body of the Layikeleke deposit, Eastern Junggar
(after Morimoto N,1988, Liu Xianfan et al. ,2015&)

(林新多等,1989,1998)。对比其它岩浆矽卡岩矿

表 4 东准噶尔拉依克勒克 Fe—Cu 矿石中石榴子石化学成分电子探针测试结果

Table 4 Electron microprobe analyses of garnet from Fe—Cu ores of the Layikeleke deposit, Eastern Junggar

样品号	ZK3-1-2-1-1	ZK3-1-2-1-2	ZK3-1-2-1-3	ZK3-1-2-1-4	ZK3-1-2-1-5	ZK1-1-11-1-1	ZK1-1-11-1-2	ZK1-1-11-1-3	ZK1-1-11-1-4	ZK1-1-11-1-5
SiO_2	36.748	37.404	36.481	37.171	36.956	37.951	36.975	37.091	37.337	37.07
TiO_2	2.025	1.771	2.055	1.815	1.969	0.055	0.012	0	0.33	0.057
Al_2O_3	3.557	4.092	3.994	4.461	3.979	4.988	4.172	4.551	5.249	5.262
Cr_2O_3	0	0.025	0.033	0.026	0.024	0.016	0	0.014	0.055	0.024
FeO	23.059	22.424	22.549	22.146	22.549	22.968	23.922	22.881	21.235	22.151
MnO	0.945	1.089	0.997	1.244	1.037	0.69	0.577	0.503	0.63	0.705
MgO	0.055	0.08	0.052	0.103	0.07	0.097	0.055	0.103	0.139	0.091
CaO	33.543	33.158	32.94	32.933	33.288	33.724	34.085	33.786	34.466	34.218
Si	2.9679	3.0036	2.9648	2.9883	2.9789	3.0292	2.9902	3.0129	3.0106	2.9907
Ti	0.1230	0.1070	0.1256	0.1098	0.1194	0.0033	0.0007	0.0000	0.0200	0.0035
Al	0.3386	0.3873	0.3826	0.4227	0.3780	0.4692	0.3976	0.4357	0.4988	0.5003
Cr	0.0000	0.0016	0.0021	0.0017	0.0015	0.0010	0.0000	0.0009	0.0035	0.0015
Fe^{3+}	1.5575	1.5059	1.5326	1.4890	1.5201	1.5081	1.6084	1.5544	1.4320	1.4946
Fe^{2+}	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0251	0.0095	0.0000	0.0000	0.0000
Mn	0.0647	0.0741	0.0686	0.0847	0.0708	0.0467	0.0395	0.0346	0.0430	0.0482
Mg	0.0066	0.0096	0.0063	0.0123	0.0084	0.0115	0.0066	0.0125	0.0167	0.0109
Ca	2.9027	2.8529	2.8683	2.8368	2.8749	2.8842	2.9534	2.9406	2.9777	2.9579
Ura	0.00	0.08	0.11	0.08	0.08	0.05	0.00	0.05	0.17	0.08
And	78.56	76.92	78.11	76.13	77.18	76.23	80.18	78.04	70.72	74.31
Pyr	0.22	0.33	0.21	0.42	0.28	0.39	0.22	0.42	0.55	0.36
Spe	2.17	2.52	2.33	2.89	2.40	1.57	1.31	1.16	1.42	1.60
Gro	19.05	20.15	19.24	20.48	20.06	20.91	17.97	20.34	27.14	23.66
Alm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.85	0.32	0.00	0.00	0.00

注:Ura-钙铬榴石, And-钙铁榴石, Pyr-镁铝榴石, Spe-锰铝榴石, Gro-钙铝榴石, Alm-铁铝榴石。FeO 中也包括了 Fe_2O_3

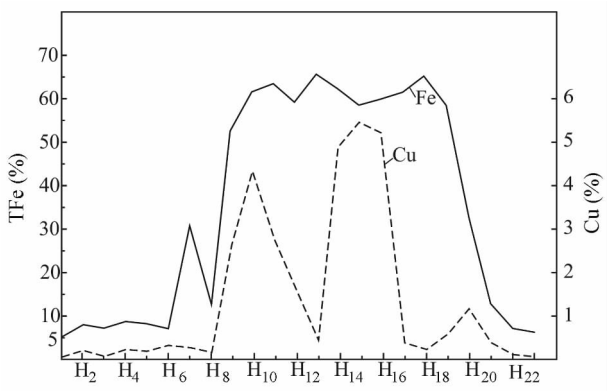


图 7 东准噶尔拉伊克勒克矿床 ZK1-2 孔矿体中 Fe、Cu 分布图

Fig. 7 The Fe, Cu distribution in the ore body in the ZK1-2 drill hole of the Layikeleke deposit, Eastern Junggar

床,如西藏当雄县拉屋铜锌矿矿体周边有大理岩(张炜等,2013),长江中下游地区岩矽卡岩周边基本都有灰岩或砂岩等钙质沉积地层(吴言昌等,1996, 1998),拉伊克勒克铜铁矿 2km 范围内未发现钙质地层、大理岩等与接触交代矽卡岩有关的地质要素,也未见角砾状矿石,因此,该矿床是更具代表性的岩浆贯入矽卡岩型矿床。

5.2　成矿机制探讨

拉伊克勒克铜铁矿成矿机制程可以归纳为:地壳深部的中酸性硅酸盐岩浆在其上侵过程中,除了汲取途经围岩的 Fe 、Cu 等成矿物质外(陈艳等,2012),还同化了部分钙质地层,使原始岩浆中增加了大量的 Ca、Mg 等组分,形成了类矽卡岩成分的含矿岩浆(常印佛等,1983,吴言昌,1992),当这部分岩浆伴随火山岩层间的构造扩容作用(刘亮明等,2008),侵入其中,在相对稳定和封闭的环境中先后结晶出石榴子石、透辉石,在温度下降过程中,富铁、铜及硫的热液在交代石榴子石、透辉石作用中产生黄铁矿,黄铜矿等成矿矿物(赵一鸣等,1990;吴言昌等,1996)稍晚石英、长石等矿物晶出,它们主要赋存在早先产生的矿物晶隙中,少量也交代石榴子石、透辉石、磁铁矿和黄铜矿等硫化物,这时矽卡岩岩浆的结晶分异和交代作用的主体基本完成,随后在岩浆热液温度下降和水分的进一步集中过程中,

表 5 东准噶尔拉伊克勒克矿床 ZK1-2 孔中矿体的 Fe、Cu 含量

Table 5 Fe, Cu contents in the ore body in ZK1-2 drill hole of the Layikeleke deposit, Eastern Junggar

样号	采样位置		样长(m)	样品岩性	分析结果			
	自(m)	至(m)			Au($\times10^{-6}$)	Cu(%)	TFe(%)	MFe(%)
H1	50.88	52.88	2.0	蚀变凝灰岩	0.03	0.08	5.40	2.30
H2	52.88	54.88	2.0	蚀变凝灰岩	0.04	0.23	8.10	2.20
H3	54.88	56.88	2.0	蚀变凝灰岩	0.04	0.07	7.50	2.20
H4	56.88	58.38	1.50	强蚀变凝灰岩	0.04	0.24	8.90	3.50
H5	58.38	59.55	1.17	强蚀变凝灰岩	0.04	0.20	8.45	3.90
H6	59.55	61.55	2.0	矽卡岩化凝灰岩	0.05	0.34	7.10	1.90
H7	61.55	63.55	2.0	强矽卡岩化凝灰岩	0.06	0.29	30.9	26.4
H8	63.55	65.40	1.85	强矽卡岩化凝灰岩	0.05	0.17	12.9	4.60
H9	65.40	67.40	2.0	石英阳起石透辉石富铜铁矿石	0.38	2.65	53.10	46.10
H10	67.40	69.40	2.0	石英阳起石透辉石富铜铁矿石	0.57	4.36	61.80	54.40
H11	69.40	71.40	2.0	石英阳起石透辉石富铜铁矿石	0.25	2.75	63.60	58.20
H12	71.40	73.40	2.0	石英阳起石透辉石富铜铁矿石	0.10	1.60	59.40	53.40
H13	73.40	75.40	2.0	石英阳起石透辉石富铜铁矿石	0.06	0.47	65.70	61.30
H14	75.40	77.40	2.0	石英阳起石透辉石富铜铁矿石	0.49	4.90	62.60	54.30
H15	77.40	79.40	2.0	石英阳起石透辉石富铜铁矿石	0.52	5.46	58.90	49.40
H16	79.40	81.40	2.0	石英阳起石透辉石富铜铁矿石	0.47	5.21	60.10	50.30
H17	81.40	83.40	2.0	透辉石石榴子石富磁铁矿石	0.06	0.37	61.80	60.10
H18	83.40	85.40	2.0	透辉石石榴子石富磁铁矿石	0.05	0.23	65.20	64.0
H19	85.40	87.40	2.0	透辉石石榴子石富磁铁矿石	0.06	0.59	58.80	56.30
H20	87.40	89.64	2.24	透辉石磁铁矿石	0.14	1.18	32.60	32.30
H21	89.64	91.44	2.0	矽卡岩化凝灰岩	0.06	0.38	12.90	6.05
H22	91.44	93.64	2.0	蚀变凝灰岩	0.04	0.11	7.07	2.70
H23	93.64	95.64	2.0	蚀变凝灰岩	0.04	0.08	6.30	1.40

发育了角闪石—阳起石等富水矿物,最后产生更低温度的碳酸盐矿物,标志着岩浆型矽卡岩作用的完成。

6 结论

(1) 拉伊克勒克隐伏富铜—铁矿床及斑岩型铜多金属矿床的发现,主要取决于对地球物理资料的综合处理、反演和解释,说明综合地球物理在覆盖区找矿中能发挥重大作用。

(2) 拉伊克勒克矽卡岩矿床中铜、铁高度富集,矿石矿物组成简单,埋藏较浅,方便开发利用,具有较高的经济价值。

(3) 拉伊克勒克矽卡岩型富铜—铁矿床从矿体产状、矿物组成及蚀变作用表明,矿体非由侵入岩和富钙质的岩石接触交代形成,而是深部形成的含矿矽卡岩岩浆,侵入到火山岩地层的构造裂隙中通过冷凝分异结晶和交代作用形成岩浆矽卡岩型铁铜矿,是一个典型岩浆矽卡岩矿床。这一认识不仅深化了对新疆东准噶尔地区矽卡岩及其矿床形成机理的认识,也扩大了寻找矽卡岩型矿床的视野。

注 释 / Notes

❶ 中国地质科学院矿产资源研究所. 2014. 新疆东准琼河坝矿集区铁铜多金属靶区优选与隐伏矿床(体)快速定位示范研究成果报告. 北京:中国地质科学院矿产资源研究所.

❷ 新疆地矿局物化探大队. 2012. 新疆伊吾县琼河坝地区 1∶5 万综合物探普查成果报告. 新疆昌吉:新疆地矿局物化探大队.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

常印佛,刘学圭. 1983. 关于层控式矽卡岩型矿床——以安徽省内下扬子坳陷中一些矿床为例. 矿床地质, 2(1):11 ~20.

陈艳,张招崇. 2012. 矽卡岩铁矿的铁质来源与迁移富集机理探讨. 岩矿测试,31(5):89 ~897.

董连慧,徐兴旺,屈迅,李光明. 2009. 初论环准噶尔斑岩铜矿带的地质构造背景与形成机制. 岩石学报,25(4):713 ~737.

董连慧,屈迅,朱志新,张良臣. 2010. 新疆大地构造演化与成矿. 新疆地质,28(40):351 ~357.

梁祥济. 1994. 钙铝—钙铁系列石榴石的特征及其形成机理. 岩石矿物学杂志, 13(4):342 ~353.

梁祥济. 2000. 中国夕卡岩和夕卡岩矿床形成机理的实验研究. 北京:学苑出版社. 1 ~ 365.

林新多,许国建. 1989. 岩浆成因矽卡岩的某些特征及形成机制探讨. 现代地质,3(3):351 ~358.

林新多. 1998. 岩浆—热液过渡型矿床的若干特征. 现代地质,12(4):485 ~492.

刘亮明,疏志明,赵崇斌,万昌林,蔡爱良,赵义来. 2008. 矽卡岩矿床的汇流扩容空间控矿机制及其对深部找矿的意义:以铜陵—安庆地区为例. 岩石学报,24(8):1848 ~1856.

刘显凡,汪灵,李慧,刘菁,赵甫峰,卢秋霞,胡琳. 2015. 角闪石族和辉石族矿物的系统矿物学分类命名. 矿物学报,(1):19 ~28.

吕博,孟贵祥,杨岳清,严加永,赵金花,邓震,李超. 2014. 新疆拉伊克勒克隐伏斑岩矿床的发现、Re-Os 同位素定年及地质意义. 岩石学报, 30(4):1168 ~1178.

屈迅,徐兴旺,梁广林,屈文俊,杜世俊,姜能,吴惠平,张永,肖鸿,董连慧. 2009. 蒙西斑岩型铜钼矿地质地球化学特征及其对东准噶尔琼河坝岩浆岛弧构造属性的制约. 岩石学报,25(4):765 ~776.

屈迅,徐兴旺,董连慧,梁广林,邓刚,周刚,陈松林. 2010. 新疆东准噶尔斑岩铜矿主要构造类型. 新疆地质, 28(1):32 ~37.

孟贵祥,严加永,杨岳清,赵金花,邓震,吴建,李高峰. 2015. 新疆琼河坝地区铁矿床类型及其成矿特征. 矿床地质,34(2):361 ~378

王春龙,王义天,董连慧,张兵,任毅. 2012. 新疆西天山松湖铁矿床稀土和微量元素地球化学特征及其意义. 矿床地质,31(5):1038 ~1050.

王晓地,刘德权,唐延龄,周汝洪. 2006. 伊吾县琼河坝地区斑岩铜矿成矿地质特征及远景评价. 新疆地质, 24(4):398 ~404.

王志华,张作衡,蒋宗胜,洪为,田敬全. 2012. 西天山智博铁矿床磁铁矿成分特征及其矿床成因. 矿床地质,31(5):983 ~998.

吴言昌. 1992. 论岩浆矽卡岩——种新类型矽卡岩. 安徽地质, 2(1):12 ~26.

吴言昌,邵桂清,吴炼. 1996 . 岩浆矽卡岩及其矿床. 安徽地质, 6(2):30 ~39.

吴言昌,常印佛. 1998. 关于岩浆矽卡岩问题. 地学前缘, 5(4):291 ~301.

许建国,林新多. 1990. 安徽长龙山矽卡岩浆型铁矿床成因探讨. 地球科学, 15(6):649 ~656.

严加永,孟贵祥,邓震,张昆,陈向斌,刘彦. 2013. 新疆拉伊克勒克铜铁矿综合地球物理探测与隐伏矿定位. 地质论评, 59(z1):981 ~982.

于淼,丰成友,保广英,刘洪川,赵一鸣,李大新,肖晔,刘建南. 2013. 青海尕林格铁矿床矽卡岩矿物学及蚀变分带,矿床地质,32(1):55 ~76.

藏梅,董连慧,柴凤梅,杨富全,刘锋,李强,欧阳刘进. 2013. 新疆阿尔泰南缘巴利尔斯铁矿床稀土元素地球化学研究. 地球科学,34(2):203 ~212.

张锦祥,聂卫东,赵献丽,张明君,朱靖,徐兴旺. 2007. 新疆伊吾县宝山铁矿地质特征、成矿模式与找矿方向,新疆地质,25(4):368 ~372.

张炜,刘宏伟. 2013. 岩浆矽卡岩铜锌矿床地质特征与成矿机制探讨——以西藏当雄县拉屋铜锌矿床Ⅴ号矿体为例. 地质学刊,37(2):212 ~218.

张永,梁广林,吴倩怡,吴琪,张征峰,吴慧平,屈迅,徐兴旺. 2010. 东准噶尔蒙西斑岩铜钼矿床脉体特征及其形成机制. 岩石学报,26(10):2997 ~3006.

赵 斌, Barton M D. 1987. 接触交代矽卡岩中石榴石和辉石成分特点及其与矿化的关系. 矿物学报, 7(1):1 ~8.

赵一鸣,林文蔚,毕承思. 1990. 中国矽卡岩矿床. 北京:地质出版社. 1 ~354.

Chang Yingfo, Liu Xuegui. 1993&. On strate-bound skarn deposits. Mineral Deposits, 2(1):11 ~20.

Chen Yan, Zhang Zhaochong. 2012&. Study on source, transport and the enrichment mechanism of iron in iron skarn deposits. Rock and Mineral Analysis,31(5):89 ~897.

Dong Lianhui, Xu Xinwang, Qu Xun, Li Guangming. 2009&. Tectonic setting and formation mechanism of the circum-Junggar porphyritic

copper deposit belts. Acta Petrologica Sinica,25 (4), 713 ~ 737.

Dong Lianhui, Qu Xun, Zhu, Zhixing, Zhang, Liangcheng&. 2010. Tectonic evolution and mineralization in Xinjiang. Xinjiang Geology, 28 (4), 351 ~ 357.

Gaeta M, Di Rocco T , Freda C. 2009. Carbonate Assimilation in Open Magmatic Systems: the Role of Melt-bearing Skarns and Cumulate ~ forming Processes . Journal of Petrology, 50: 361 ~ 385.

Iacono Marziano G, Gaillard F , Pichavant M. 2008. Limestone assimilation by basaltic magmas: an experimental reassessment and application to Italian volcanoes. Contributions to Mineralogy and Petrology, 155: 719 ~ 738.

Li Guangrong, Wu Changzhi. 2013&. Recent advances in skarn forming models and the yamansu skarn related deposits. Geological Journal of China Universities,19(3):425 ~ 436.

Liang Xiangji. 1994&. Carnets of grossular—andradite series: their characteristics and metasomatic mechanism. ACTA Petrologica ET Mineralogica, , 13(4):342 ~ 353. 3(3):351 ~ 358.

Liang Xiangji. 2000 #. Experimental studies on the mechanism of the formation of skarns and skarn ore deposits in china. Beijing: Academy Press,1 ~ 365.

Lin Xingduo, Xu Guojiang. 1989. A preliminary investigation on some characteristics and forming mechaism of the magma -genetic skarn. Geoscience,3(3):351 ~ 358.

Lin Xingduo. 1998&. Geological characteristics of magma—hydrothermal transitional ore deposits. Geoscience,12(4):485 ~ 492.

Liu Liangming,Shu Zhiming,Zhao Chongbin,Wan Changlin,Cai Ailiang, Zhao Yilai. 2008&. The contorlling mechanism of ore formation due to flow-focusing dilaiton spaces in skarn ore deposits and its significance for deep-ore exploration:Examples from the Tongling—Anqing district. Acta Petrologica Sinica ,24(8):1848 ~ 1856.

Liu Xianfan, Wang Lin, Li Hui, Liu Jing, Zhao Pufeng, Lu Qiuxia, Hu Lin. Systematic mineralogical classifications and nomenclatures of amphibole and pyroxene group minerals. Acta Mineralogical Sinica, (1): 19 ~ 28.

Lü Bo, Meng Guixiang, Yang Yueqing, Yan Jiayong, Zhao Jinhua, Deng Zheng, Li Chao. 2014&. Discover of Layikeleke insidious porphyry deposit in Xinjiang, Re-Os isotope dating and its geological implications. Acta Petrologica Sinica ,30 (4), 1168 ~ 1178.

Meng Guixiang, Yan Jiayong, Yang Yueqing, Zhao Jinhua, Deng Zheng, Li Gaofeng, Wu Jiang. 2015&. Iron deposit types and metallogenic characteristics in Qiongheba area, Xinjiang. Mineral Deposits, 34 (2):361 ~ 378

Morimoto N, Fabries J, Ferguson AK. 1988. Nomenclature of pyroxenes. Subcommittee on Pyroxenes. American Mineralogist, 73: 1123 ~ 1133.

Nystrom J O and Hoenriquez F. 1994. Magmatic features of iron ores of the Kiruna type in Chile and Sweden: Ore textures and magnetite geochemistry. Econ Geol 89:820 ~ 839.

Qu Xun, Xu Xingwang, Liang Guangling, Qu Wenjun, Du Shijun, Jiang Neng, Wu Huiping, Zhang Yong, Xiao Hong, Dong Lianhui. 2009&. Geological and geochemical characteristics of the Mengxi Cu—Mo deposit and its constraint to tectonic setting of the Qiongheba magmatic arc in eastern Junggar. Xinjing. ActaPetrologicaSinica, 25 (4), 765 ~ 776.

Qu Xun, Xu Xingwang, Dong Lianhui, Liang Guangling, Deng Gang, Zhou Gang, Chen Songling. 2010&. Tectonic types of porphyry copper deposit in eastern Junggar, Xinjiang. Xinjiang geology ,28(1):32 ~ 37.

Wang Chunlong, Wang Yitian, Dong Lianhui, Zhang Bing, Ren Yi. 2010&. Geochemical characteristics of rare earth and trace elements compositions of Songhu iron deposit in western Tianshan of Xinjiang and their significance. Mineral Deposits,31(5):1038 ~ 1050.

Wang Xiaodi, Liu Dequan, Tang Yanling, Zhou Ruhong. 2006&. Metallogenic characteristics and perspective of the porphyry copper in Qiongheba,yiwu county. Xinjiang Geology, 24 (4), 398 ~ 404.

Wang Zhihua, Zhang Zuoheng, Jiang Zongsheng, Hong Wei, Tian Jingquan. 2012&. Magnetite composition of Zhibo iron deposit in Western Tianshan Mountains and its genetic significance. Mineral Deposits,31(5):983 ~ 998.

Wu Yanchang. 1992&. On magmatic skarn——a new type of Skarn. Geology of Anhui,2(1):12 ~ 26.

Wu Yanchang, Shao Guiqing, Wu Lian. 1996&. Magmatic Skarn and its ore deposits. Geology of Anhui,6(2):30 ~ 39.

Wu Yanchang, Chang Yingfo. 1998&. On the magmatic skarn. Earth Science Frontiers, 5(4):291 ~ 301.

Xu Jianguo, Lin Xinduo. 1990&. An investigation into the genesis of the Changlongshang skarn—magma type of iron deposit , Anhui province. Earth science ,15(6):649 ~ 656.

Xue Chuandong, Han Yanwei, Huang Qinghui, Dong Xuguang, Wang Jianrong, Jin Jijuan, Huang Heyuan, Liu Xing. 2011 #. Western yunnan baoshan Hetaoping Pb—Zn deposit genesis and metallogenic epoch: Remote class skarn — hydrothermal deposit. Acta Mineralogica Sinica,S1:415 ~ 418.

Yan Jiayong, Meng Guixiang, Deng Zheng, Zhang Kun, Chen Xiangbing, Liu Yan. 2013#. Comprehensive geophysical detection and concealed ore localization of Layikelake copper ore , Xinjiang . Geological Review,59(z1):981 ~ 982.

Yu Miao, Feng Chengyou, Bao Guangying, Liu Hongchuan Zhao Yimng, Li Daxing, Xiao Ye, Liu Jiannan. 2013&. Characteristics and zonation of skarn minerals in Galinge iron deposit, Qinghai Province. Mineral Deposits,32(1):55 ~ 76.

Zang Mei, Dong Lianhui, Chai Fengmei, Yang Fuquan, Liu Feng, Li Qiang, Ouyang Liujing. 2013&. Research on REE Geochemistry of the Baliersi iron deposit in Altay, Xinjiang.

Acta Geoscientica Sinica,34(2):203 ~ 212.

Zhang Jingxiang, Nie Weidong, Zhao Xianli, Zhang Mingjun, Zhu Jing, Xu Xingwang. 2007&. Geological characteristics and metallogenic model of the Baoshan iron deposit and some prospecting indicators in the Yiwu county, Xinjiang. Xinjiang geology ,25(4):368 ~ 372.

Zhang Wei, Liu Hongwei. 2013&. Discussions on geological properties and metallogenic mechanism of magmatic skarn copper—zinc deposit:a case study of ore body V of Lawu copper—zinc deposit in Damxung County of Tibet. Journal of Geology,37(2):212 ~ 218.

Zhang Yong, Liang Guangling, Wu Yiqianyi, Wu Qi, Zhang Zhengfeng, Wu Huiping, Qu Xun, Xu Xingwang. 2010&. Characteristics and formation mechanism of the veins in Mengxi porphyry Cu—Mo deposit, eastern Junggar, Xingjiang, China. Acta Petrologica Sinica , 26(10):2997 ~ 3006.

Zhao bin, M. D. Barton . 1987&. Compositional characteristics of garnets and pyroxenes in contact—metasomatic skarn deposits and their relationship to metallization. Acta Mineralogica Sinica,7(1):1 ~ 8.

Zhao Yiming. 2002&. Some New Important Advances in Study of Skarn Deposits. Mineral Deposits, 21(2): 113 ~ 136.

Zhao Yiming, Lin Wenwei, Bi Chengsi. 1990#. Skarn deposit in China. Beijing, Geological Publishing House,1 ~ 354.

Discovery and Metallogenic Characteristics of Layikeleke Magmatic Skarn Type of Rich Copper—Iron Deposit, Eastern Junggar, Xinjiang

YAN Jiayong, MENG Guixiang, YANG Yueqing, DENG Zhen, ZHAO Jinhua, TANG Hejun

MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037

Abstract: Layikeleke iron — copper deposit is a high grade deposit which is recently discovered in coverage area of Qiongheba area in east Junggar, Xinjiang autonomous region. The content of TFe in the ore body is in an average of 51%, Cu over 1%, and associated with gold. The deposit characteristics are shallow, high grade and high economic value. Through the analysis of 1: 50000 ground gravity, magnetic and IP data, the large scale integrated geophysical exploration has carried out in this area. A high magnetic, high density and middle— high chargeability body was confirmed under the Quaternary cover. Then a concealed skarn ore body under the Quaternary was discovered by drilling in the geophysical anomaly zone. The ore body which has a thickness of 8 to 32m and length more than 200m is located in the fracture of the lower Devonian volcanic rocks. the wall rock alteration developed, from inner (ore body) to outer-side (wall rock) are Skarn lithification, epidotization and actinolite alteration zoning. The metallic mineral are magnetite and chalcopyrite, and the gangue minerals are mainly hedenbergite, diopside—salite, etc. The characteristics of the occurrence of ore body and the ore mineral composition show that the ore body is Skarn type. But unlike the normal skarn deposits, there are no carbonate rock and pluton around the ore body and no contact metasomatic environment. Base these information, we believed that the deposit was formed in the processing of crystal fractionation and replacement, when the skarn magma from deep intrudes into the tectonic fractures in shallow crust.

Keywords: magmatic skarn; Rich Cu—Fe deposit; crystallization differentiation; metasomaticalteration; Layikeleke, Eastern Junggar

Acknowledgements: This work is jointly supported by Xinjiang Geological Exploration Fund Project (No. A11-3-XJ4), the National Natural Science Foundation (No. 41574133) and China Geological Survey Bureau under the geological survey Project (No. 121201103000160901, 1212011085024 & 12120113041300).

First author: YAN Jiayong, male, born in 1977, associate research fellow. Mainly engaged in deep exploration and mineral exploration. Address: No. 26, Baiwanzhuang Street, Xicheng District, Beijing, 100037. Email: yanjy@163.com

Manuscript received on: 2016-01-29; Accepted on: 2017-01-11; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.012