

瑞典艾蒂克铜-金-银矿床地质特征及成因^{*}

王丰翔^{1,2}, 聂凤军², 张伟波^{2,3}, 曹毅², 丁成武²

(1 石家庄经济学院研究生学院, 河北 石家庄 050031; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3 中国地质大学, 北京 100083)

艾蒂克铜-金-银(钼)矿床位于瑞典北部的耶利瓦拉(Gällivare), 深入北极圈以北 60 km, 西南方向距耶利瓦拉 15 km, 西北方向距基律纳(Kiiruna)铁矿床 95 km, 中心地理坐标为 67°07'N, 20°15'E(图 1A)。钻探结果显示, 该矿床已探明和控制矿石量 7.1 亿 t, 其中铜的平均品位为 0.25%, 金品位为 0.2 g/t, 银品位为 1.8 g/t, 钼品位为 29 g/t, 是北欧地区产出规模最大的铜矿床, 也是瑞典最大的金矿床。其铜-金-银矿体与中元古代斑状石英二长闪长岩体具有密切的时空分布关系, 含矿岩体为中元古代哈帕兰达岩套(Haparanda Suite)的组成部分, 属火山岛弧环境下构造-岩浆活动的产物。截止 2011 年, 艾蒂克铜矿床已累计开采矿石约 5.44 亿 t。随着找矿勘探工作的不断深入, 矿山开采服务年限已从设计的 2016 年延长到 2030 年(Boliden 2012)。

1 产出环境

艾蒂克矿床在前寒武纪芬诺斯堪地纳地盾南部边缘瑞典(卡)累利阿(元)古宙造山带的诺尔布廷一带产出。区域断裂控矿明显, 脑塔尼剪切带是艾蒂克矿田域内最重要的导矿和控矿构造, 艾蒂克铜-金矿床与马姆贝尔蒂铜-金矿床分别位于该剪切带的西侧和东侧(Martinsson, 1997; Martinsson et al., 2004)。区域内普遍发育有太古代花岗质基底杂岩、元古代的卡累利阿岩系(2.4~1.96 Ga)以及瑞典(芬)兰(表)壳岩系(1.96~1.75 Ga)。艾蒂克铜-金矿床主要产于卡累利阿岩系的绿片杂岩与下瑞芬岩系

斑岩组的接触面上, 其上覆岩组为上瑞芬岩系的基律纳瓦拉组。岩浆岩除太古代、早古生代基底杂岩外, 与斯科尔-卡累尔造山运动同时的哈帕兰达侵入体(1.89~1.87 Ga)呈岩基状、岩枝(株)状和脉状侵入到古元古代变质-火山岩系、变质-沉积岩系中, 与艾蒂克铜-金矿床的形成有密切联系。艾蒂克矿区及外围, 铁-磷矿床和铜-金矿床星罗密布, 该区域铜和金的年产量占瑞典全国年产量的 90%(见图 1B), 是北欧地区寻找铜、金、铁矿床最有利的成矿远景区之一。需要指出的是, 艾蒂克是迄今为止在该区域发现的规模最大、最典型的铜-金-银矿床。

2 矿床地质

艾蒂克铜-金矿化多在古元古代变质岩和侵入岩脉(墙或株)内呈脉状、网脉状和细脉浸染状产出, 并且构成似层状、透镜状和囊状矿体。矿体南北延伸近 3000 m, 宽 500 m, 走向 W50°。在矿区南部, 矿体倾斜延伸近 400 m, 北部控制矿体深度已达 800 m(图 1C、D)。富铜矿化域(>2.6%)主要富集在 100~300 m 段内, 与岩体上盘及与围岩的接触带在空间上密切相关(Wanhainen et al., 2003)。矿石大多呈半自形-他形细微晶结构、交代结构、斑状结构, 稀疏浸染状、稠密浸染状, 网脉状、脉状、条带状和角砾状构造, 是叠生成矿作用的典型实例。主要矿石矿物有黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿、钛铁矿、辉钼矿、斑铜矿和辉铜矿。脉石矿物主要有石英、阳起石、绿泥石、电气石、绿帘石、黑云母和方柱石。矿区

^{*} 本文得到国家重点自然科学基金项目(编号: 41030421)和地质调查项目(编号: 1212010811029)联合资助

第一作者简介 王丰翔, 男, 1984 生, 硕士研究生, 构造地质学和构造成矿学专业。Email: wfx0316@163.com

^{**} 通信作者 聂凤军, 男, 1956 生, 研究员, 博士生导师, 主要从事金属矿床地质和地球化学研究。Email: nfjj@mx.cei.gov.cn

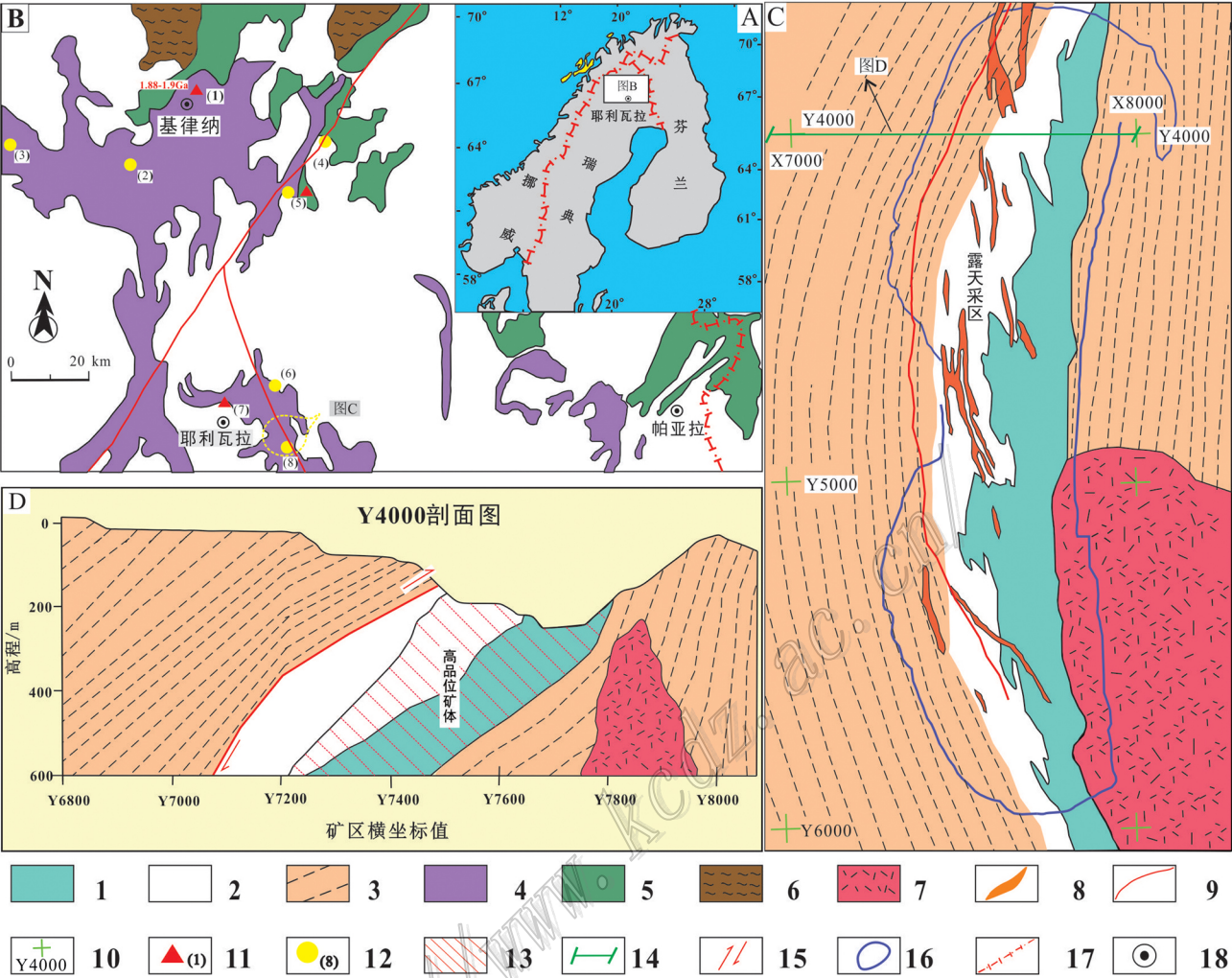


图 1 瑞典北博滕北部成矿省和艾蒂克矿床地质图(据 Wanhainen et al., 2003)

1—(石英)白云母绢云片岩; 2—黑云母片岩、片麻岩; 3—长石黑云角闪片岩; 4—变质-沉积岩系; 5—卡累利阿绿片岩;
6—太古代基底杂岩; 7—石英二长闪长岩; 8—花岗伟晶岩; 9—断层; 10—矿区基准点及编号; 11—铜-金矿床; 12—铁-磷矿床;
13—采区; 14—剖面线; 15—断裂运动方向; 16—露天采区; 17—国界线; 18—城市
矿床名称: (1)—基律纳; (2)—皮克贾瓦; (3)—贾罗雷卡; (4)—斯瓦帕瓦拉; (5)—克罗波特; (6)—脑塔尼; (7)—马姆贝尔蒂;
(8)—艾蒂克

以及外围经历了多期多阶段构造-岩浆活动及区域变质,围岩蚀变叠加现象明显,表现为早期蚀变被后期所叠合,因此,含矿热液流体对岩体的叠加改造作用致使热液蚀变带的辨别和划分都十分困难,尚待进一步研究。然而从空间分布上看,黑云母化、绢云母化、方柱石化、钠长石化与铜-金矿化关系密切,并常伴有石榴子石变斑晶;钾化和绿帘石化主要发育在断层域内,与矿体有明显的界线。

3 矿床成因

3.1 成矿(岩)时代

根据区域地质体的相互切割关系,艾蒂克岩体侵入到古元古界变质火山-沉积杂岩中,认为它们是斯科尔-卡累尔造山活动早期的产物。Wanhainen 等(2006)测得石英二长闪长岩锆石 LA-ICP-MS 铪-铅

同位素年龄为 1892~1887 Ma。根据系统的同位素年代学研究,艾蒂克铜-金-银(钼)矿床的原始矿石受到了成矿期后的岩浆热液和变质活动的影响。Wanhainen 等(2006)测得的含矿重晶石脉以及石英脉中辉钼矿 Re-Os 年龄分别是 (1876 ± 10) Ma 和 (1848 ± 8) Ma,测定的变形与未变形的伟晶岩脉辉钼矿 Re-Os 同位素年龄分别是 (1848 ± 6) Ma 和 (1728 ± 7) Ma,以及蚀变矿石组合楣石的 U-Pb 同位素年龄范围为 1750~1805 Ma,峰值为 1780 Ma。同位素测年数据显示,艾蒂克金属矿化约有 160 Ma $(1890 \sim 1730 \text{ Ma})$ 的时间跨度,同时涵盖几个世代的岩浆热事件和区域变质事件。总之,艾蒂克铜-金-银-钼多金属矿化是多期多阶段地质事件叠加的产物,至少经历了斑岩型矿化和区域 IOCG 矿化两次叠加。

3.2 流体包裹体

研究结果表明,艾蒂克铜-金-银矿床矿化石英脉中流体包裹体的基本类型主要有 3 种(Wanhainen, 2003):

(1) A 型包裹体,主要由液相、气相和含子矿物多相包裹体组成,占包裹体总数的 80% 以上,沿石英颗粒均匀分布,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 34%~37%,部分高达 44%。其中,多相包裹体中的子矿物主要有黄铜矿、石盐,系统测得 A 型流体包裹体的均一化温度为 140~373℃,峰值为 170~280℃;

(2) B 型包裹体,为次生包裹体,主要由液相和气相组成,常沿着微裂隙生长且成群切割石英颗粒,B 型包裹体与斑铜矿具有一定的成因联系,其均一温度为 100~222℃。

(3) C 型包裹体,主要分布在晶格缺陷或微裂隙之中,可携带着 A 型、B 型甚至最晚的流体。

总之,成矿流体主要以相对高盐度和富 Cl^- 为特点,黄铜矿化矿石主要由含水、高盐度(31%~37%)流体沉淀而成,之后由较低盐度(18%~27%)的流体交代,形成斑铜矿矿化,最后由含 CO_2 后期热液与富铜物质发生相互作用,其形成压力接近 $3 \times 10^8 \text{ Pa}$,对应的形成深度约为 11 km。

4 讨论与总结

4.1 对比分析

就产出环境而言,艾蒂克铜-金-银矿床产在斯堪的纳维亚地盾的西北缘,是与洋壳俯冲运动有关的

岛弧环境(Nironen, 1997; Wanhainen et al., 2012),这和典型斑岩铜-金矿床的产出环境更为接近。在全球范围内,许多前寒武纪斑岩型矿床产于古老地盾边缘,在澳大利亚、巴西、加拿大、芬兰、印度、中国和赞比亚均有发现。此外,艾蒂克矿床还具有典型斑岩矿床的特点:品位低、规模大的浸染状矿石,特征性的矿石矿物组合,与钾化作用有关的铜-金矿化,呈网脉状和脉状产出的矿化石英脉以及与中性斑岩侵入体密切的时空关系等。

然而,根据成矿年代学和岩相学研究,艾蒂克矿床的金属矿化经历了多期多阶段的叠加,其金属矿化的时间跨度近 160 Ma。其铜-金矿化不仅与 1.89 Ga 的石英二长闪长岩株的侵入有关,也与 1.8 Ga 和 1.79 Ga 的构造-岩浆活动和区域变质作用有关。从构造和流体方面讲,成矿流体的显著特征是高盐度,尤其是高 CaCl_2 含量,这与斑岩型热液不同,却与 IOCG 型流体特征相似。此外,蚀变的矿物组合含有 IOCG 型矿床典型的方柱石和钠长石,是典型的斑岩型矿床所不具有的,与典型的 IOCG 型铜-金矿床更为类似,例如基律纳 Tjärrojjäcka 铜-金矿床、哥伦比亚 Starra 铜-金矿床。

总之,艾蒂克铜-金-银矿床兼具斑岩型和铁氧化物铜-金矿床的某些特征,这里并非强调它是两者成因的混合,而是强调其成因的复杂性。

4.2 初步结论以及找矿标志

(1) 艾蒂克铜-金矿化主要在石英二长闪长岩侵入体内以及岩体上盘的火山-沉积岩内呈浸染状、网脉状、脉状产出,并且构成透镜状、似层状和囊状矿体。与北博滕成矿省的哈帕兰达岩套相比,石英二长闪长侵入岩具有相似的区域构造、岩石学和地球化学特征。此外,石英二长闪长岩的锆石 U-Pb 测年结果显示,其成岩年龄为 $(1.887 \pm 0.008) \text{ Ga}$ 。岩体本身发生了铜矿化,且与高品位铜矿带呈渐变接触,具有典型的产铜斑岩体的特点。

(2) 除铜矿化外,艾蒂克矿床还伴生有金矿化、磁铁矿矿化和辉钼矿矿化,其经历了近 160 Ma 的金属矿化阶段,与钾化、黑云母化蚀变具有密切的空间联系。此外,艾蒂克矿床还具有钠长石、方柱石蚀变,并与区域上的 IOCG 型矿床的蚀变相似。

(3) 艾蒂克矿床是与石英二长闪长侵入岩体(1.887 Ga)有关的斑岩型铜-金-银-钼矿,同时也经历了多期多阶段的变质-构造和岩浆热液活动的改造,尤其经历了区域上 IOCG 矿化的叠加。总之,艾

蒂克铜-金-银矿床兼具斑岩型和铁氧化物型铜-金矿床的某些特征,其成因类型尚待进一步研究。

(4)找矿标志:首先,古大陆边缘元古代变质岩、侵入岩和张裂构造发育区是寻找艾蒂克式铜-金-银矿床的有利地区;其次,一些兼具斑岩型和 IOCG 型铜-金矿床特点的小型矿床(点)矿化点是找矿勘查的重点对象;再次,在富碱侵入杂岩体对沉积-变质岩系多期次叠加改造的部位是布置化探扫面、圈定元素异常、进行详细地质调查的重点区域,该区域有望锁定有价值的找矿目标;此外,强烈的热液蚀变及复杂的蚀变岩石类型是寻找该类矿床重要的找矿标志。

参考文献/References

- Boliden A B. 2011. Annual report [EB/OL]. www.boliden.com/Documents/Press/Publications 2011.
- Martinsson O. 1997. Paleoproterozoic greenstones at Kiruna in northern Sweden: A product of continental rifting and associated mafic-ultramafic volcanism. Paper I in Tectonic setting and metallogeny of the Kiruna greenstones [D]. PhD Thesis, Lulea University of Technology.

- Martinsson O and Wanhainen C. 2004. Character of Cu-Au mineralization and related hydrothermal alteration along the Nautanen deformation zone, Gällivare area, Northern Sweden [J]. Society of Economic Geologists Guidebook Series 33, 149-160.
- Nironen M. 1997. The Svecofennian orogen: A tectonic model [J]. Precambrian Res. 86:21-44.
- Seedorff E, Barton M D, Stavat W J A and Maher D J. 2008. Root zones of porphyry systems: Extending the porphyry model to depth [J]. Econ. Geol., 103:939-956.
- Wanhainen C, Billström K, Martinsson O and Magnor B. 2012. Modification of a Palaeoproterozoic porphyry-like system: Integration of structural, geochemical, petrographic, and fluid inclusion data from the Aitik Cu-Au-Ag deposit, northern Sweden [J]. Ore Geology Reviews, 48:306-331.
- Wanhainen C, Broman C and Martinsson O. 2003. The Aitik Cu-Au-Ag deposit in Northern Sweden: A product of high salinity fluids [J]. Mineralium Deposita, 38:715-726.
- Witschard F. 1984. The geological and tectonic evolution of the Precambrian of northern Sweden a case for basement reactivation [J]. Precambrian Res., 23:273-315.