

智利 Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床 地质和成矿作用

赵宇浩¹, 毛大华², 王天刚¹, 赵晓丹¹, 朱意萍¹

ZHAO Yuhao¹, MAO Dahua², WANG Tiangang¹, ZHAO Xiaodan¹, ZHU Yiping¹

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016;

2. 江西省地矿局赣东北大队, 江西上饶 334000

1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China;*

2. *Northeast Jiangxi Brigade, Jiangxi Province Bureau of Geology and Mineral Resources, Shangrao 334000, Jiangxi, China*

摘要:智利 Copiapó 附近海岸东部边缘有一宽 5km、长 20km 的铁氧化物铜金矿床带, 包括 Candelaria 矿床和位于其北东方向 3km 处的 Punta del Cobre 矿集区的中小型矿床。初步估计, 该成矿带的铜矿石资源量可达 $7 \times 10^8 \sim 8 \times 10^8$ t (含铜量 1%)。矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿。矿石产状为脉状、角砾状、细脉状等。含矿围岩主要为 Punta del Cobre 组的火山岩及火山碎屑岩。该矿带中大部分大型矿脉位于北西—北北西向高角度脆性断层与块状火山岩和火山碎屑岩接触带交汇处。Candelaria 矿区主要发育黑云母-钾长石±钙角闪石±绿帘石蚀变矿物组合。在 Punta del Cobre 矿集区, 矿床深部的矿石围岩蚀变情况与 Candelaria 地区一致, 但是浅部的矿石赋存于黑云母-钾长石或钠长石-绿泥石±方解石蚀变带中。

关键词:地质; 成矿作用; Candelaria 矿床; Punta del Cobre 矿集区; 铁氧化物铜金矿床; 智利

中图分类号: P618.41; P618.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2017)12-2296-12

Zhao Y H, Mao D H, Wang T G, Zhao X D, Zhu Y P. Geology and mineralization of the Candelaria-Punta del Cobre Fe oxide Cu-Au deposits, Chile. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(12):2296-2307

Abstract: There is a 5km wide and 20km long belt of Fe oxide Cu-Au deposits along the eastern margin of the coastal batholith near Copiapó, Chile. It includes the Candelaria deposit and a group of middle and small sized deposits in the Punta del Cobre district, which is located about 3km northeast of the Candelaria mine. It is estimated that the amount of copper ore resources in the belt is 700-800 million tons at 1.0 percent Cu. The ore minerals are mainly chalcopyrite, pyrite, magnetite, hematite. The ores occur in veins, breccia and stringer bodies. The orebodies are hosted mainly by volcanic and volcanoclastic rocks of the Punta del Cobre Formation. Most of the larger orebodies in the belt are situated along NW to NNW trending high-angle brittle faults which intersect the contact between massive volcanic and volcanoclastic rocks. The ores occur mainly in zones with biotite-K feldspar±calcic amphibole±epidote alteration at Candelaria. In the Punta del Cobre district, alteration associated with ores in the deeper parts of the deposits is similar to that at Candelaria, whereas at their shallow levels ores occur in biotite-K-feldspar or albite-chlorite±calcite alteration zones.

Key words: geology; mineralization; Candelaria deposit; Punta del Cobre district; Fe oxide Cu-Au deposit; Chile

Candelaria - Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床成矿带位于智利 Copiapó 东南部复成分海岸岩基的东部(图 1; 表 1), 包括两部分: 一部分为 Candelaria 矿床, 其可开采矿石储量为 470Mt (0.95%

Cu、0.22g/t Au、3.1g/t Ag)^[1]; 另一部分为 Punta del Cobre 矿集区的中小型矿床, 估算总的矿石储量大于 120Mt (1.5% Cu、0.2~0.6g/t Au、2~8g/t Ag)。这些矿床本质上有相同的热液成矿系统, 但在规模、

收稿日期: 2017-03-20; 修订日期: 2017-09-19

资助项目: 中国地质调查局项目《海上丝绸之路大洋洲和南美洲矿产资源潜力评价》(编号: DD20160110)

作者简介: 赵宇浩(1989-), 男, 硕士, 工程师, 从事矿床地质研究。E-mail: zhao61060427@126.com

通讯作者: 毛大华(1964-), 男, 本科, 高级工程师, 从事地质矿产勘查与地质找矿。E-mail: maodhhua@126.com

品位、蚀变类型、围岩及所处 Copiapó 岩基变质晕接触带的位置不同。

历史上, Candelaria - Punta del Cobre 成矿带已经形成了一些矿集区^[2]。Carola 矿床、Santos 矿床和 Socavon Rampa 矿床构成 Punta del Cobre 矿集区的

一部分, 它们位于 Candelaria 北东 3km 处(图 1)。这些矿床和 Candelaria 矿床与已发现的元古宙铁氧化物铜-铀-金-稀土矿床表现出相似的矿化蚀变特征^[3]。矿床的成因解释包括以岩浆流体为主的热液成因^[4-7]或含盐的非岩浆流体的热液成因^[8-10]。众多

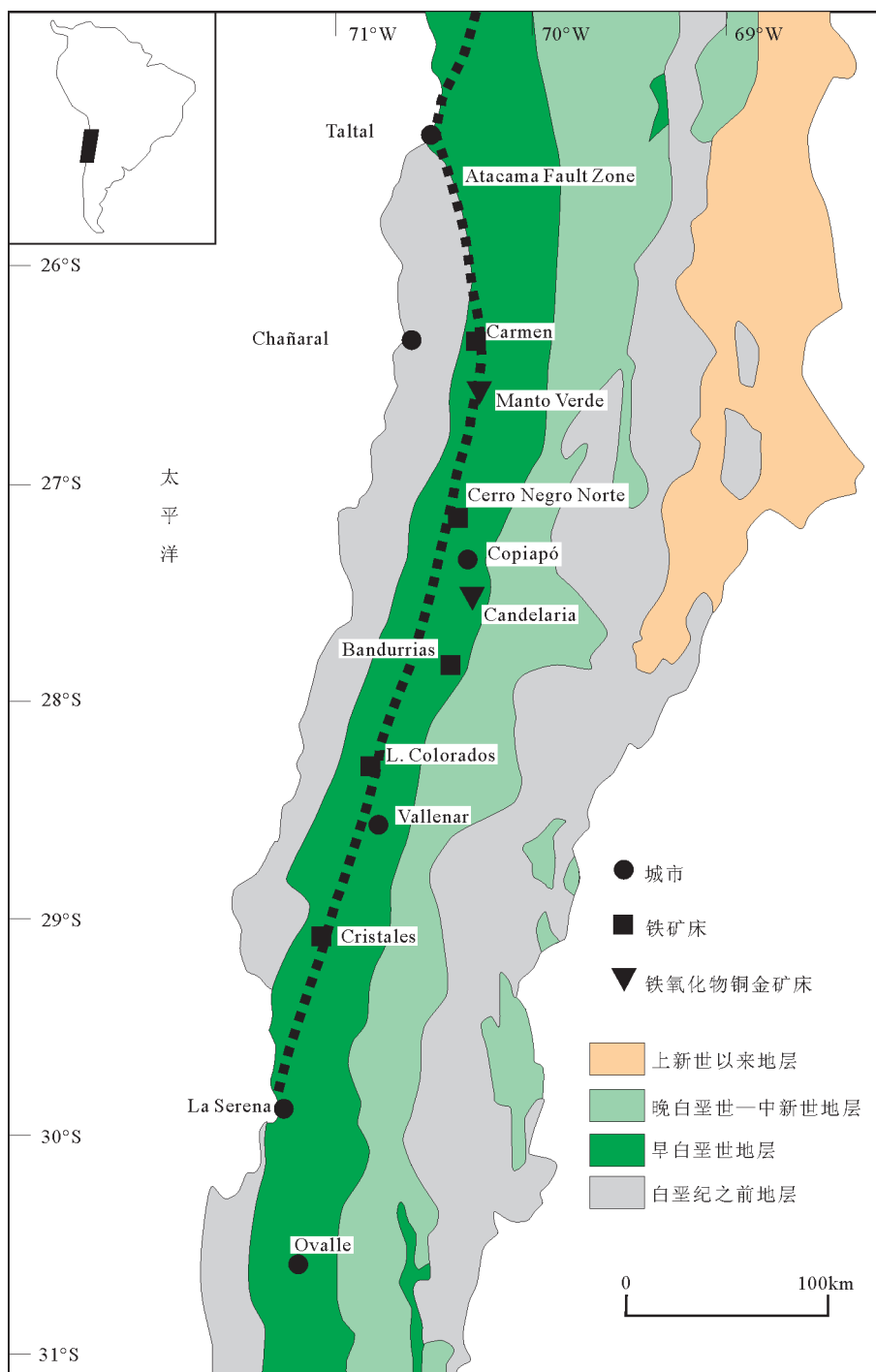


图1 区域地质图

Fig. 1 Regional geological map

表1 Candelaria-Punta del Cobre 成矿带中矿床简介

Table 1 The description of mineral deposits along the Candelaria-Punta del Cobre belt

矿床名称	矿石矿物组合	蚀变矿物	矿石储量和品位
Alcaparrosa	mt, cpy, py	kspar, bio, act, qtz	10Mt 1.4% Cu
Bronce	mt, cpy, py	scap, gt	
Candelaria	mt, cpy, py	bio, kspar, act, qtz	470Mt 0.95% Cu, 0.22g/t Au, 3.1g/t Ag
Carola	mt, hm, cpy, py	kspar, bio, chl, cte	20Mt 1.4% Cu
Las Pintadas	mt, cpy, py	gt, act, kspar	4.0Mt 1.0%~1.5% Cu
Manto Monstruo	mt, cpy, py	calc-silicate	
Mantos de Cobre	mt, cpy, py	kspar/ab-chl	1.5Mt 1.45% Cu
Resguardo	cpy, py, hm, mt	ab, chl, cte	6Mt 1.8%~2.0% Cu, 0.4~0.5g/t Au, 7.0g/t Ag
Santos	mt, cpy, py, hm	kspar, bio, chl	20Mt 1.5% Cu, 0.4~0.5g/t Au, 7.0g/t Ag
Socavon Rampa	cpy, hm, py	ab, chl, cte	25Mt 1.2%~2% Cu, 0.2~0.3g/t Au, 7.0g/t Ag
Trinidad	mt, hm, cpy, py	kspar, bio, chl	15Mt 1.5% Cu, 0.2~0.3g/t Au, 7.0g/t Ag
Marta -Venus	mt, cpy, py, hm	gt, act	

注: ab—钠长石; act—阳起石; bio—黑云母; chl—绿泥石; cpy—黄铜矿; cte—方解石; gt—石榴石; hm—赤铁矿; kspar—钾长石; mt—磁铁矿; po—磁黄铁矿; py—黄铁矿; qtz—石英; scap—方柱石; sl—闪锌矿; calc-silicate—钙硅酸盐

专家对 Candelaria-Punta del Cobre 矿集中区中矿床的成矿模型进行了讨论^[11-14]。本文通过 Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床解剖, 阐述其构造地质背景和成矿作用特征, 总结 IOCG 型矿床成矿模式, 并指出找矿方向。

1 区域地质背景

Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床形成于智利海岸山脉带。矿床赋存于 Atacama 断裂带主要分支的东部。该断裂带在智利海岸带延伸逾 1000km, 为一俯冲走滑断裂系统, 侏罗纪已开始活动^[15-16]。该断裂系统控制了大量形成于智利海岸山脉带的铁矿床^[17]。Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床和其他许多同类型铁矿床的围岩相同, 为智利海岸岩基中深成岩体附近的早白垩纪火山岩和火山碎屑岩(图 1)。

Candelaria-Punta del Cobre 地区出露的地层为西—北西向陆相火山弧(Bandurrias 群)和东—南东向海相弧后盆地(Chañarcillo 群)的接触转换带地层。弧后盆地的沉积作用开始于 Berriasian 阶(早白垩世), 同时伴随 Punta del Cobre 火山岩-火山碎屑岩组上部分的沉积。Punta del Cobre 火山岩-火山碎屑岩组下伏于晚 Valanginian—Aptian 阶(早白垩世) Chañarcillo 群碳酸盐岩(包括 Abundancia-Nantoco 组, Totoralillo

组和 Pabellón 组, 总厚度达 1700~2000m) 之下。Copiapó 岩基的花岗质深成岩体侵入到该地区西部的弧后盆地, 形成大范围的接触变质带^[18]。Copiapó 岩基由闪长岩-石英二长岩系列钙碱性侵入岩组成(SiO_2 50%~68%)。在部分地区, 蚀变细晶岩脉又侵入到深成岩体中(SiO_2 72%~76%)。含少量硫化物矿化和后期煌斑岩脉的热液蚀变英安斑岩脉在 Candelaria 矿区和 Punta del Cobre 矿集区发育。Candelaria 矿床西部的 Copiapó 岩基的部分地区发育有可能与成矿有关的硅化(碳酸盐化)蚀变。K-Ar 法测年显示, 岩基侵入体的年龄为 119~97Ma^②。

2 矿区地层

Candelaria-Punta del Cobre 地区最老的岩石属于 Tithonian 阶—晚 Valanginian 阶 Punta del Cobre 组^[19], 是铁氧化物铜金矿床的主要赋矿围岩。Punta del Cobre 组分为 Geraldo-Negro 火山岩段(厚度大于 500m)和上覆的 Algarrobos 火山碎屑岩段(厚度大于 800m)。Geraldo-Negro 火山岩段进一步分为: 下部安山岩(大于 300m), 由蚀变厚层安山质火山岩组成; Meléndez 英安岩, 包括碱性交代的熔岩穹丘和伏于下部安山岩之上的英安质熔岩, 在 Punta del Cobre 矿集区发生强烈蚀变。Algarrobos 段由一系列层状火山碎屑砾岩和角砾岩组成, 包括细粒沉积物夹

层,如粉砂岩、砂碎屑岩和粗砂岩,通常 10~40m 厚,也包括透镜体状安山质-玄武质岩类。Algarrobos 段厚度和岩相沿走向发生明显变化,与上覆钙质 Chañarcillo 群 (Abundancia 组或 Nantoco 组) 呈渐变接触关系,接触带为灰岩及变质岩。Algarrobos 段包含一些重要的含矿层位,如底部角砾岩、Trinidad 粉砂岩和上部熔岩。底部角砾岩为红色沉积角砾岩,出露于 Punta del Cobre 矿集区,覆于 Meléndez 英安岩之上,其厚度达 25m,部分呈砾岩状,与砂岩互层,

往南渐变为红色砂岩,为层状矿体的围岩,是矿化带的上部界线。Trinidad 粉砂岩覆于底部角砾岩之上,厚度达 60m,主要由粉砂岩、砂岩、燧石及凝灰质沉积岩组成,局部含粒径不一的角砾灰岩碎屑,厚度和岩相沿走向变化较大。虽然在 Punta del Cobre 矿集区出露较少,Trinidad 粉砂岩在 Candelaria 矿区却是高品位矿石的赋矿围岩。上部熔岩厚达 45m,主要为透镜体状玄武质-玄武安山质熔岩和火山角砾岩,为一不连续层位 (图 2、图 3、图 4)^[20]。

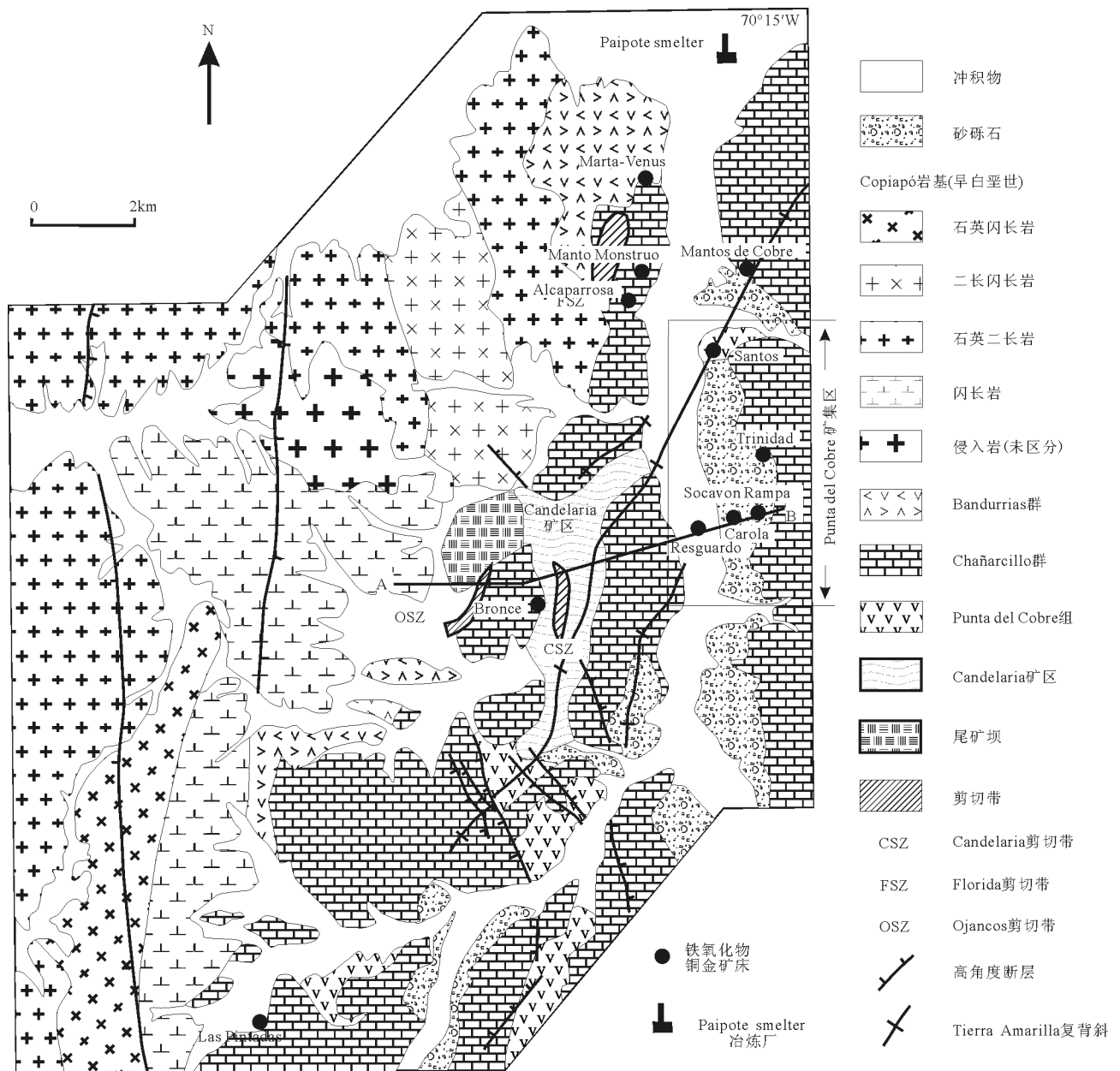


图 2 矿区地质图

Fig. 2 Geological map of the Candelaria-Punta del Cobre area

3 构造

Candelaria-Punta del Cobre 地区的主要构造单元为大型北东向的背斜构造(Tierra Amarilla 复背斜)^[21],以及一系列的北西向—北北西向高角度左旋平移断层。左旋平移断层控制了部分矿化^[12]。此外还有北东向和北东东向中高角度西倾断层和北东东向高角度左旋断层。Candelaria-Florida 韧性剪切带形成于 Copiapó 岩基侵入岩和早白垩世围岩之间的接触带上,为一发生强烈叶理化的黑云母片岩带。Candelaria-Florida 韧性剪切带形成早于铜矿化。普遍认为该韧性剪切带是 Candelaria 地区发现的最早的变形,北北西—北西向高角度左旋断层、北东东向高角度断层及广泛发育的北东向断层均切割 Candelaria-Florida 剪切带并使其错位。剪切作用发生于 Berriasian 阶(变形岩石形成时代)和 Aptian 阶(矿化时代)之间^[22-23]。

4 矿体和蚀变特征

4.1 矿体特征

在 Candelaria-Punta del Cobre 成矿带,矿体呈层状、脉状、细脉状、浸染状分布于北西向—北北西向断层与 Geraldo-Negro 段火山岩和上覆 Algarrobos 段火山碎屑岩的接触带交会处(图3)^[22-23]。

在 Punta del Cobre 矿集区,矿体主要的赋矿围岩为底部角砾岩,部分矿体交代透镜状碎屑沉积物,席状矿体形成于脉状或角砾状矿体之下,角砾状矿体在深部渐变为脉状。作为矿体的主要组成部分,近垂直的矿脉沿北北西—北西向断层侵位,长达200m,宽5~30m,垂向延伸约150m。

Candelaria 矿床中最大矿体的规模为:长2000m,宽600m,厚350m。大多数矿石发育在 Algarrobos 段与下部安山岩的接触带上,但是在上部的 Trinidad 粉砂岩中的凝灰质岩中发现了最高品位的铜金矿石^[24]。铜矿石呈不连续脉状(通常为5~20cm宽)、细脉状、浸染状分布。较大的矿脉(宽度达1~1.5m)和高品位矿石均沿北北西—北西向构造分布。这些矿脉穿切了火山岩、火山碎屑岩。部分 Candelaria 矿床矿体为整合的席状矿体。这些席状矿体由角砾状、细脉状、浸染状矿体组成。矿石富集磁铁矿,石榴子石-角闪石±钠柱石蚀变组合普遍发育。

4.2 蚀变特征

在 Candelaria-Punta del Cobre 成矿带,矿化主要与普遍发育的钾化蚀变及部分发育的钙质角闪石化蚀变有关。

在 Candelaria 矿区,火山岩和火山碎屑岩主要由黑云母、石英、磁铁矿组成,部分含钾长石、钠质

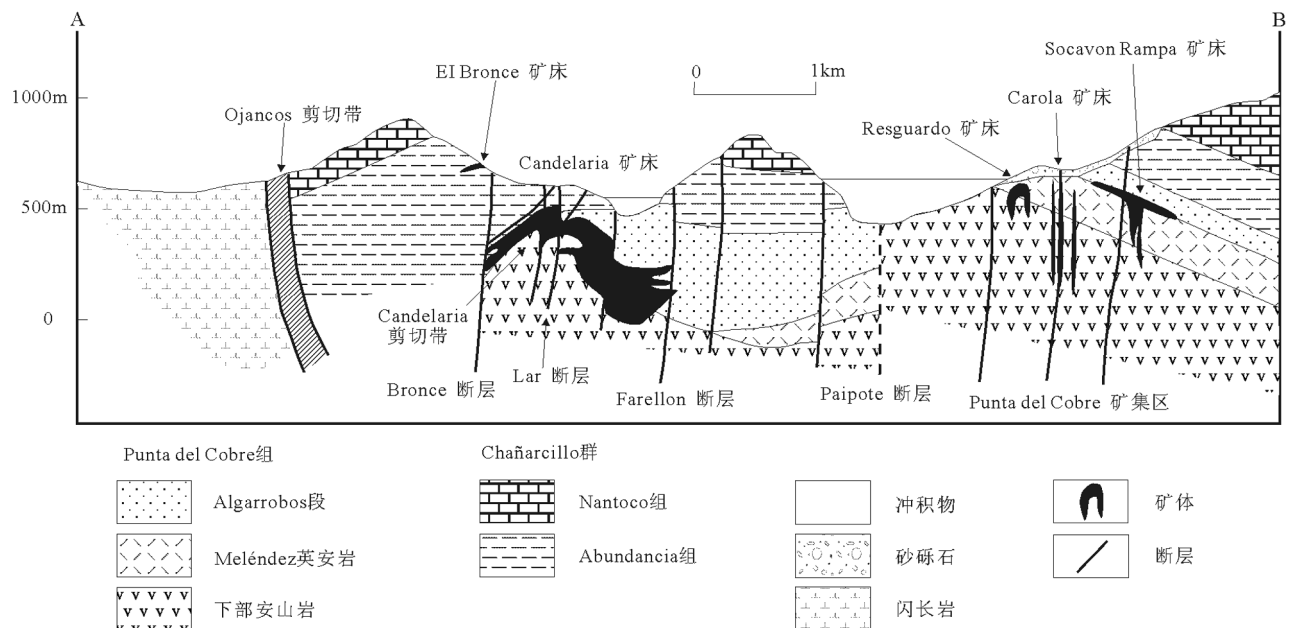


图3 矿区AB剖面

Fig. 3 A-B section through the Candelaria-Punta del Cobre area

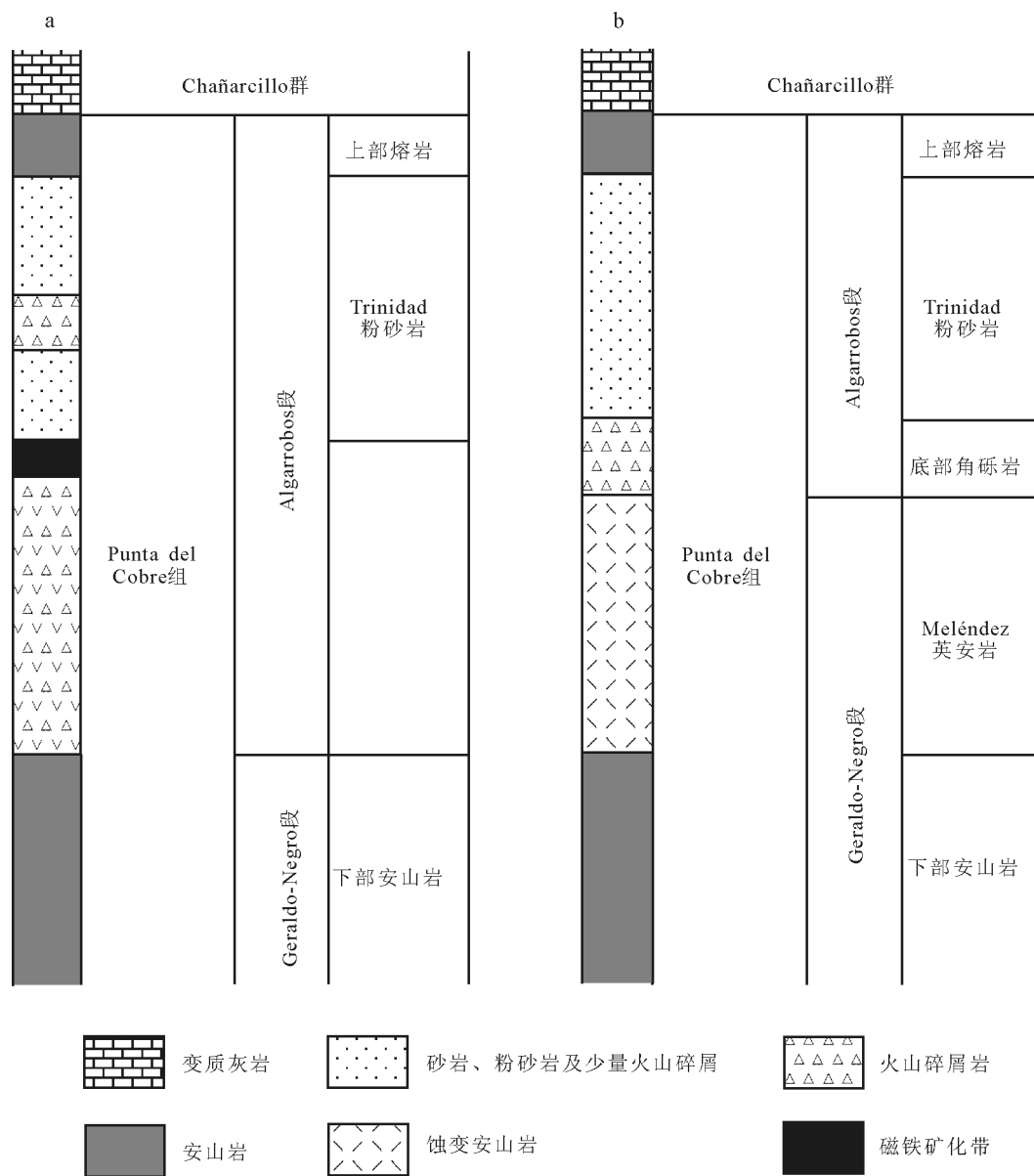


图 4 Candelaria 矿区(a)和 Punta del Cobre 矿集区地层柱状图(b)

Fig. 4 Stratigraphic column of the Candelaria deposit (a) and the Punta del Cobre district (b)

斜长石、角闪石等。下部安山岩的角闪石化蚀变和钾长石化蚀变的强度及规模随深度的增加而逐渐减弱。Candelaria 矿床矿体上部分的凝灰岩普遍发生蚀变作用,形成黑云母-石英±磁铁矿±石榴子石±堇青石±铁闪石-铁镁闪石±少量的电气石或石英-角闪石±石榴子石±辉石矿物组合。

在 Punta del Cobre 矿集区, Meléndez 英安岩中的钾质矿物组合(钾长石-绿泥石±黑云母+方解石+石英)及下部安山岩中的黑云母-石英-磁铁矿

的矿物组合与矿化密切相关,钾质矿物组合在浅部向钠质矿物组合(钠长石-绿泥石±石英±方解石,其 Na₂O 含量达 10%)逐渐过渡。钠质蚀变在 Meléndez 英安岩中发育最好,尤其是在 Quebrada Meléndez 地区南部熔岩穹窿的上部及 Manto Verde 矿床的北部地区。此外,矿区还发育碳酸盐化、绿泥石化等蚀变作用。绿泥石-方解石±赤铁矿的矿物组合在底部角砾岩、Trinidad 粉砂岩及上覆上部熔岩中经常出现(图 5)。

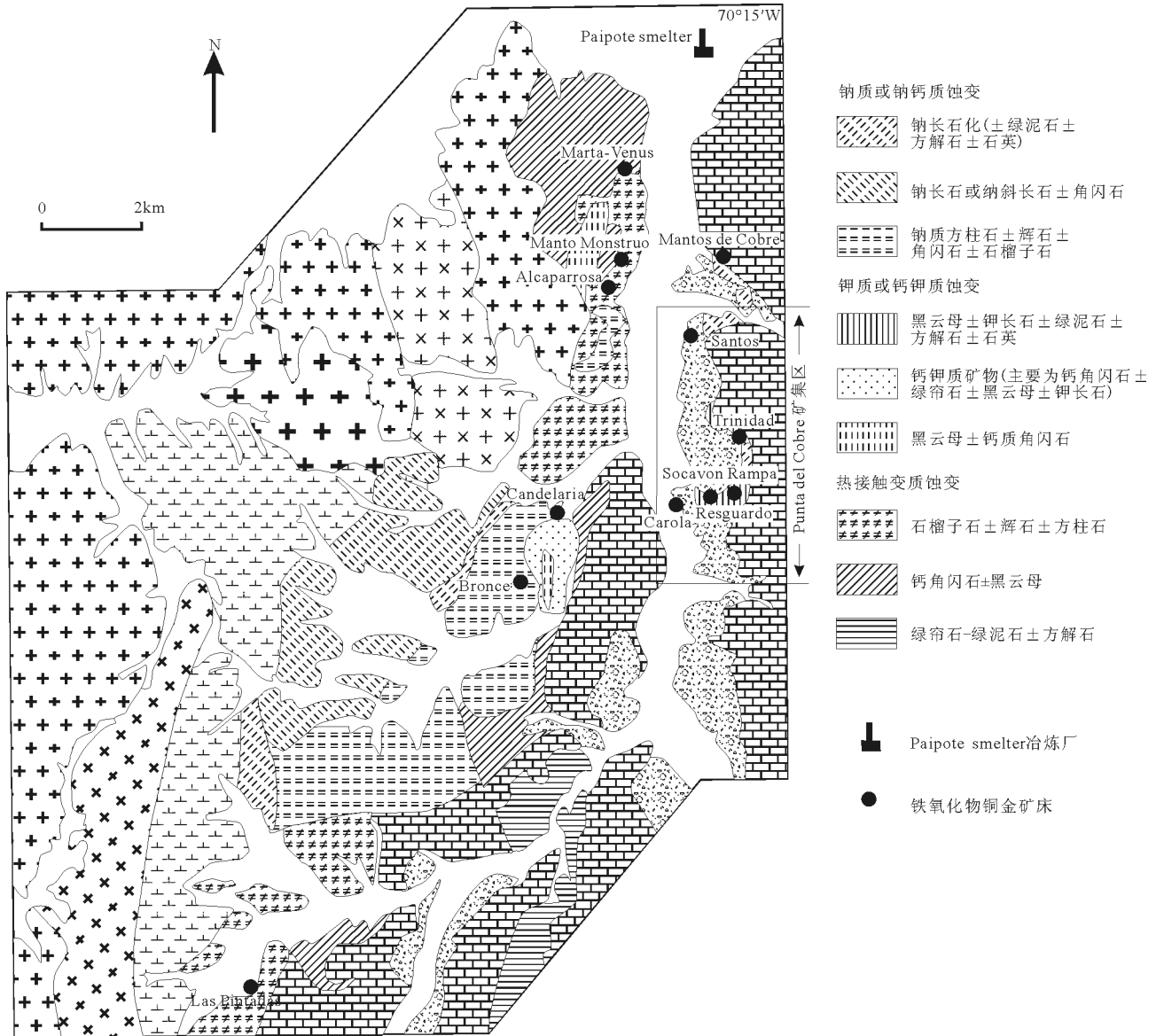


图5 Candelaria-Punta del Cobre 地区蚀变矿物组合分布
 Fig. 5 The distribution of altered mineral assemblages
 in the Candelaria-Punta del Cobre area

英安质斑岩岩脉受到多种类型热液蚀变作用的影响。在 Candelaria 矿区,这些岩脉通常在深部发育钠质(钠长石)或钾质(钾长石)蚀变作用并形成变质核,被方柱石-石榴子石-辉石±磁铁矿的矽卡岩矿物组合包裹。Chañarcillo 群中的英安岩岩脉也发育钠质-钙质蚀变作用。在 Punta del Cobre 矿集区,英安质斑岩同样发育强烈的钠质或钾质蚀变作用,如 Trinidad 矿床和 Carola 矿床。

在 Punta del Cobre 矿集区,成矿期后形成的煌斑岩岩脉与铜矿化受同一构造单元控制,发育碳酸盐化和绿泥石化蚀变作用。

在 Copiapó 岩基以东的侵入岩、次火山岩、火山岩及沉积岩中广泛发育钠质或钠质-钙质蚀变作用。强钠质蚀变使火成岩呈白色、浅灰色,在 Candelaria 矿床尾矿坝的南部及西南部尤其明显。在 Punta del Cobre 矿集区,钠质蚀变作用早于钾质蚀变作用^[2]。在 Candelaria 矿床地区,安山质围岩也普

遍发育钠质蚀变作用,其同样早于普遍发育的钾质蚀变作用及矿化作用(图 5)^[13]。

4.3 矿物学特征

矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿,局部发育磁黄铁矿、闪锌矿及微量辉钼矿和毒砂。自然金主要以微米级的包裹体形式出现在黄铜矿中。Ryan 等^[25]报道了在黄铁矿微裂隙中发育的金,而 Hopf 则发现了汞-金-银合金。在表生氧化富集带中出现孔雀石、辉铜矿和铜蓝等矿物^[25]。在 Candelaria 矿床,脉石矿物主要为石英和硬石膏,而在 Punta del Cobre 矿集区,脉石矿物主要为方解石、石英,局部地区发育电气石和微量萤石^[11]。

4.4 矿物共生序列

Candelaria 矿床和 Punta del Cobre 矿集区中发育的矿物共生序列较一致,二者之间的差异则是由它们在热液系统中所处位置的不同导致的。强烈的铁质变质作用与早期的钾质蚀变作用和硅质蚀变作用同时发生,晚于大规模的钠质蚀变作用。Candelaria 剪切带中发育的黑云母与广泛发育的磁铁矿化蚀变作用有关。

在矿化作用的早期阶段,铁质变质作用导致了赤铁矿的形成(hm I),主要发育在膨胀裂隙与开放空间中,与此同时,铁质变质作用导致了块状磁铁矿的形成。之后,赤铁矿发生假象交代作用并形成新的磁铁矿(mt II),表明当时处于压力降低或温度升高的环境中。成矿主期的铜矿化形成于早期铁氧化物矿化之后。在 Punta del Cobre 矿集区,黄铜矿±黄铁矿矿物组合穿切了早期的磁铁矿或赤铁矿。该地区发育 2 期热液成矿阶段,第一期形成的矿物组合为磁铁矿±赤铁矿,无硫化物,第二期为黄铜矿-黄铁矿,无铁氧化物。2 期矿物组合在局部地区相互接触。

在 Candelaria 矿区,黄铜矿-黄铁矿组合形成晚于钠长石和石英±钾长石岩脉。北部地区钠长石岩脉穿切了早期的黑云母-石英-磁铁矿蚀变。成矿主期铜矿化又切穿了钠长石岩脉。钙质角闪石可能与成矿主期的黄铁矿-黄铜矿同期形成,普遍切穿了早期钠长石岩脉。钙质角闪石±绿帘石矿物组合穿切钾长石±钠长石矿物组合。由于在热液系统中的位置不同,在一个成矿作用事件中发育的黄铜矿可能具有不同类型的蚀变矿物组合。Candelaria 矿床发育很多类型的细脉,包括充填黄铜矿-黄铁

矿的石英-假象磁铁矿细脉、石英±钾长石±黄铜矿-黄铁矿细脉、黄铜矿-黄铁矿细脉、硬石膏-黄铜矿细脉、钙质角闪石±黄铜矿细脉、黄铜矿±黄铁矿±闪锌矿细脉。

黄铁矿与黄铜矿伴生,但黄铜矿呈骸晶状交代黄铁矿,且在碎裂状黄铁矿及其他矿物结构中以充填物形式出现,表明黄铁矿(py I)的形成早于黄铜矿。稍晚形成的少量黄铁矿(py II)细脉穿切了块状黄铜矿。穿切关系及其他的矿物构造等证据表明,磁黄铁矿与黄铜矿同期形成^[11-23]。硬石膏与黄铜矿相互切穿,局部地区共生出现。晚期形成的硬石膏-黄铜矿在局部含闪锌矿包裹体。

4.5 矿物分带性

磁铁矿-赤铁矿分布的分带性十分明显。靠近基岩接触带的矿床趋向于富集磁铁矿。实际上,在 Candelaria 矿床地区发育的所有早期形成的赤铁矿(hm I)均已转变为假象磁铁矿(mt I)。早期形成的赤铁矿(hm I)发育在 Carola 矿床和 Socavon Rampa 矿床上部,也就是在热液系统的边部。第二期形成的赤铁矿(hm II)及较早期形成的磁铁矿的假象赤铁矿化(mt I)在 Punta del Cobre 矿集区发育最多。在 Candelaria 矿床,晚期形成的赤铁矿(hm II)细脉较少,磁铁矿的假象赤铁矿化并不常见。磁铁矿化仅发育于 Candelaria 矿床北部的中上部层位^[22]及 Carola 矿床的部分地区^[11]。

在 Punta del Cobre 矿集区的矿化上部边界中,发现了氧化还原界线。这条界线以底部角砾岩中赋存的矿层为标志。该矿层的中下部均呈现出相同的绿色,这一现象与下伏碱性变质和绿泥石化火山岩一致,但是向顶部和边缘,即接近底部角砾岩中在大陆氧化环境形成的岩石区域,颜色转变为红色,这是因为赤铁矿含量增加的缘故。

一般来说,磁铁矿与钾质的矿物组合相关,而赤铁矿则通常发育在钠质的、遭受了变质作用的岩石中。这种关系可以被解释为一个成矿热液系统中的内部-高温区域与边部-低温区域的不同成矿环境。例如,在 Socavon Rampa 矿区,该矿区以钠质矿物组合为特征,无钾质矿物组合,不含磁铁矿,赤铁矿普遍发育。相对地,在 Trinidad 矿区,该矿区是 Socavon Rampa 矿区的北部延续,富含磁铁矿的矿石,包括块状磁铁矿矿体,这些矿石均与钾质矿物组合有关,表明该矿床代表了另一个矿化作用的中

心,这个中心位于北部的 Santos 矿区和南部的 Carola 矿区之间。

石英和方解石的分布特征与磁铁矿和赤铁矿相似。在 Candelaria 矿床及 Punta del Cobre 矿集区的深部,石英脉普遍发育,硅化作用十分常见,而方解石仅在细脉中发育。方解石脉在 Punta del Cobre 矿集区的上部十分发育,碳酸盐蚀变作用也十分普遍。硬石膏仅发育于 Candelaria 矿床矿体下部及 Trinidad 和 Carola 矿区局部。

在 Candelaria 矿床,品位最高的铜金矿石发育于最上层的 Trinidad 粉砂岩中,而大多数矿石则赋存于该层位之下的火山碎屑岩和火山岩接触带^[25]。矿石中 Au 含量与 Cu 含量呈明显的正相关性^[1]。Punta del Cobre 矿集区中矿石的 Au 品位略高于 Candelaria 矿床。

5 讨论

5.1 成矿模型

根据蚀变作用及成矿作用特征,笔者对 Candelaria-Punta del Cobre 型铁氧化物铜金矿床建立成矿模型。成矿带中多数较大的矿体位于北西-北北西向脆性断裂带与火山岩和火山碎屑岩接触带的交会处。北西-北北西向脆性断裂带及北北东向韧性剪切带是成矿流体运移的主要通道。

在成矿系统内部(以 Candelaria 矿床及 Punta del Cobre 矿集区的深部为代表),矿化主要与钙质-钾质的蚀变作用有关(钙质角闪石±绿帘石-黑云母-钾长石)。磁铁矿含量丰富,并且主要以块状交代矿体出现,交代矿体侧向逐渐过渡为广泛发育铁质交代作用的火山岩和火山碎屑岩。赤铁矿含量较少。石英脉十分普遍,硅化作用广泛发育。而方解石细脉及碳酸盐化作用则较少或没有。局部地区发育硬石膏。

成矿系统中部(以 Santos 矿床和 Carola 矿床的中上部为代表)具有强烈的钾质蚀变作用(黑云母和钾长石),部分地区有弱钙质角闪石蚀变作用。更浅的层位,围岩中普遍发育的黑云母化作用逐渐过渡为强烈的绿泥石化作用。磁铁矿在岩脉中发育,并分布于整个围岩之中。赤铁矿较常见。

成矿系统的边部,以 Socavon Rampa 矿床为代表,成矿作用与强烈的钠质(钠长石)蚀变作用及绿泥石化作用有关。普遍发育碳酸盐化作用及方解

石脉,而硅化作用及石英脉基本上没有。赤铁矿为主要的铁氧化物矿物,磁铁矿较少。在大量硫化物发育的地方,铁氧化物可能较少见,或没有。

Punta del Cobre 矿区的构造现象表明,成矿流体主要受北西-北北西向断裂控制,并形成近垂直状的矿体。当这些成矿流体到达具有渗透性的岩层时,横向扩散,形成近水平向的透镜状矿体,例如在角砾状熔岩层的顶部及火山碎屑岩夹层中,主要发育在底部角砾岩中,即 Algarrobos 段最下部^[12]。

赤铁矿的发育具有重要意义(这种赤铁矿被磁铁矿假象交代形成假象磁铁矿),其是第一成矿阶段的氧化特征的指示剂。早期赤铁矿或假象磁铁矿的存在是 Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床系统的典型特征,也可能是铁氧化物铜金矿床系统的一个普遍现象^{③④}。

冷却作用及流体的混合作用可能是 Candelaria-Punta del Cobre 成矿系统主要的矿物结晶沉淀机制。成矿作用通常发生在致密块状、相对不具渗透性的火山岩与多孔的火山碎屑沉积岩之间的接触带上。这些沉积岩及遭受断裂破坏的火山岩的上部最有可能容纳盆地卤水、建造水或大气降水。含有金属物质及硫化物的流体在上升过程中逐渐冷却并与外部流体发生反应,导致硫化物和金属矿物结晶沉淀。在成矿作用的早期阶段,遭受了氧化作用的含矿流体与火山岩发生还原作用,这也是导致矿物结晶沉淀的机制之一。

5.2 成矿作用时代

前人在 Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床成矿作用时代确定方面进行了大量研究。综合前人研究数据,得出其成矿时代约为 115Ma(图6)。

5.3 对构造环境及成矿作用深度的指示

有证据表明,在该地区存在中晚白垩世多期次的转换挤压构造作用^[21,28]和拉张构造作用^[29]。然而这些构造事件的确切时间无法确定。笔者对这些年龄数据进行了归纳总结,以指示该地区的构造演化历史。Punta del Cobre 矿集区的全部铜矿石及部分铁氧化物矿石赋存于北北西-北西向高角度左旋脆性断裂带中,这一断裂带活跃于 Aptian 阶(约 115Ma)。在 Candelaria 矿床中,矿化同样发生在北西-北北西向断裂带及北北东向 Candelaria 剪切带

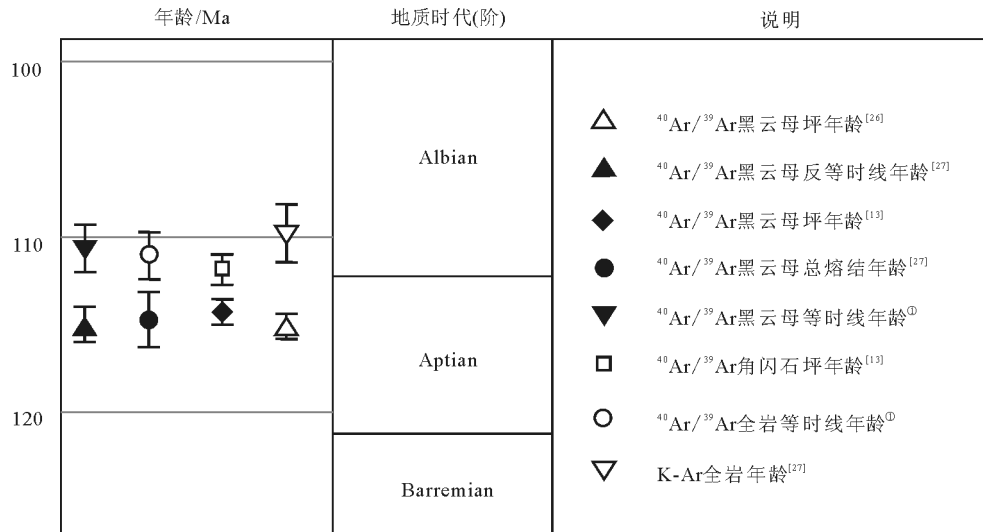


图6 Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床成矿作用时代统计
Fig. 6 Summary of mineralization ages of the Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au deposits

中。Candelaria 剪切带对早期的铁矿化有一定影响,但对成矿主期的铜矿化阶段则基本没有影响,此时对矿化起主导作用的是脆性构造。

北西向高角度断裂对于 Atacama 地区的中晚白垩世转换挤压构造作用的研究具有重要意义。野外地质现象表明,在晚 Aptian 阶,该地区位于弧后盆地,整体抬升,海相沉积作用停止^[30]。

约 115Ma (Aptian 阶), Chañarcillo 群(晚 Valanginian—Aptian 阶)达到了最大沉积厚度,为 1700~2000m。由于矿体发育于 Punta del Cobre 组上部,可以估算出成矿作用发生在 2000~3000m 深度。在成矿作用过程中,整个区域处于隆升阶段,构造作用由脆韧性向脆性转变。

5.4 相关的铁氧化物矿床

在 Andean Cordillera 地区发育的其他白垩纪的矿床与 Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床的成矿系统十分相似。这些矿床包括智利境内的 Manto Verde (K-Ar 绢云母年龄值为 $117 \pm 3\text{Ma}$ 和 $121 \pm 3\text{Ma}$)^[31]、Manto Ruso^[32] 和 Teresa de Colmo 铁氧化物铜金矿床^[33]; 秘鲁境内的 Raúl-Condestable 铁氧化物铜金矿床 和 Eliana 铁氧化物铜金矿床 (K-Ar 法角闪石年龄值为 $127 \pm 3.1\text{Ma}$ 或 $113 \pm 3.0\text{Ma}$)^{[34]④}。此外,早白垩世,智利境内铁矿带中的磁铁矿(磷灰石)矿床^[17,35] 与 Candelaria-Punta

del Cobre 铁氧化物铜金矿床也具有相似的构造环境、成矿年龄、蚀变作用及围岩。这些铁矿床通常含少量黄铜矿等硫化物。

6 结 论

(1) Candelaria-Punta del Cobre 矿床具有铁氧化物铜金矿床的普遍特征,即成矿系统内部磁铁矿发育,边部赤铁矿发育,矿床发育于与构造带交会的岩层边界;脆韧性构造形成裂隙,为成矿流体的运移提供了通道;在成矿系统内部,矿化与钙质-钾质的蚀变作用有关,在中部与钾质蚀变作用有关,而在成矿系统边部,矿化与钠质蚀变作用和碳酸盐化作用有关。

(2) 通过对前人资料的统计,认为 Candelaria-Punta del Cobre 矿区的主要铜矿-金矿成矿作用事件发生在约 115Ma。矿石的形成与早白垩世花岗岩侵入作用有时空上的相关性。Candelaria-Punta del Cobre 铁氧化物铜金矿床的成矿系统形成于相对较浅的地壳层位上(小于 3km),其发育在岛弧或弧后盆地的构造环境中。

(3) 冷却作用及流体的混合作用可能是 Candelaria-Punta del Cobre 成矿系统主要的矿物结晶沉淀机制。在成矿作用的早期阶段,遭受了氧化流体的还原作用也可能会引发矿物的结晶沉淀。

致谢:论文完成过程中得到中国地质调查局南京地质调查中心芮行健研究员、中国地质科学院矿产资源研究所宋学信研究员的指导,在此致以衷心感谢。

参考文献

- [1] Marschik R, Leveille R A, Martin W. La Candelaria and the Punta del Cobre district, Chile: Early Cretaceous iron oxide Cu-Au (-Zn-Ag) mineralization[J]. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits, 2000, 1: 163-175.
- [2] Segerstrom K, Ruiz C. Geología del Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama[J]. Carta Geológica de Chile, 1962, 3(1): 115
- [3] Hitzman M W, Oreskes N, Einaudi M T. Geological characteristics and tectonic setting of proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits[J]. Precambrian Research, 1992, 58(1/4): 241-287.
- [4] Gow P A, Wall V J, Oliver N H S, et al. Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits: Further evidence of hydrothermal origins[J]. Geology, 1994, 22(7): 633-636.
- [5] Rotherham J F, Blake K L, Cartwright I, et al. Stable isotope evidence for the origin of the Mesoproterozoic Starra Au-Cu deposit, Cloncurry district, northwest Queensland[J]. Economic Geology, 1998, 93(8): 1435-1449.
- [6] Williams P J. Metalliferous economic geology of the Mt Isa eastern succession, Queensland[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1998, 45(3): 329-341.
- [7] Williams P J, Dong G, Pollard P J, et al. Fluid inclusion geochemistry of Cloncurry (Fe)-Cu-Au deposits[J]. Mineral deposits: Processes to processing: Rotterdam, Balkema, 1999, 1: 111-114.
- [8] Battles D A, Barton M D. Arc-related sodic hydrothermal alteration in the western United States[J]. Geology, 1995, 23(10): 913-916.
- [9] Haynes D W, Cross K C, Bills R T, et al. Olympic Dam ore genesis: a fluid-mixing model[J]. Economic Geology, 1995, 90(2): 281-307.
- [10] Barton M D, Johnson D A. Evaporitic-source model for igneous-related Fe oxide-(REE-Cu-Au-U) mineralization[J]. Geology, 1996, 24(3): 259-262.
- [11] Hopf S. The Agustina mine, a volcanic-hosted copper deposit in northern Chile[C]//Stratabound Ore Deposits in the Andes. Springer Berlin Heidelberg, 1990: 421-434.
- [12] Marschik R, Fontboté L. Copper (-iron) mineralization and superposition of alteration events at the Punta del Cobre belt, northern Chile[J]. Special Publication of the Society of Economic Geologists, 1996, 5: 171-189.
- [13] Ullrich T D, Clark A H. The Candelaria copper-gold deposit, Region III, Chile: Paragenesis, geochronology and fluid composition[C]//Mineral deposits: Processes to processing: Rotterdam, Balkema, 1999: 201-204.
- [14] Mathur R, Marschik R, Ruiz J, et al. Age of mineralization of the Candelaria Fe oxide Cu-Au deposit and the origin of the Chilean iron belt, based on Re-Os isotopes[J]. Economic Geology, 2002, 97(1): 59-71.
- [15] Scheuber E, Hammerschmidt K, Friedrichsen H. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and Rb-Sr analyses from ductile shear zones from the Atacama Fault Zone, northern Chile: the age of deformation[J]. Tectonophysics, 1995, 250(1): 61-87.
- [16] Dallmeyer R D, Brown M, Grocott J, et al. Mesozoic Magmatic and Tectonic Events within the Andean Plate Boundary Zone, 26° - $27^{\circ}30'S$, North Chile: Constraints from Mineral Ages[J]. The Journal of Geology, 1996, 104(1): 19-40.
- [17] Menard J J. Relationship between altered pyroxene diorite and the magnetite mineralization in the Chilean Iron Belt, with emphasis on the El Algarrobo iron deposits (Atacama region, Chile)[J]. Mineralium Deposita, 1995, 30(3): 268-274.
- [18] Tilling R. El Batolito Andino cerca de Copiapó, Provincia de Atacama. Geología y Petrología[J]. Revista Geológica de Chile, 1976, 3: 1-24.
- [19] Marschik R, Fontboté L. The Punta del Cobre Formation, Punta del Cobre-Candelaria area, northern Chile[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2001, 14(4): 401-433.
- [20] Arévalo C, Grocott J, Martin W, et al. Structural Setting of the Candelaria Fe Oxide Cu-Au Deposit, Chilean Andes ($27^{\circ}30'S$)[J]. Economic Geology, 2006, 101(4): 819-841.
- [21] Arévalo C, Grocott J. The tectonic setting of the Chañarcillo Group and the Bandurrias Formation: An Early-Late Cretaceous sinistral transpressive belt between the Coastal Cordillera and the Precordillera, Atacama region, Chile[J]. Congreso Geológico Chileno, 8th, Antofagasta, 1997, 3: 1604-1607.
- [22] 方维萱, 李建旭. 智利铁氧化物铜金型矿床成矿规律、控制因素与成矿演化[J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 1011-1024.
- [23] 李建旭, 方维萱, 刘家军. 智利铁氧化物-铜-金矿床区域定位构造-矿田构造类型与特征[J]. 地质与勘探, 2011, 47(2): 323-332.
- [24] Ryan P J, Lawrence A L, Jenkins R A, et al. The Candelaria copper-gold deposit, Chile[J]. Arizona Geological Society Digest, 1995, 20: 625-645.
- [25] Sillitoe R H, Clark A H. Copper and copper iron sulphides as the initial products of supergene oxidation, Copiapó mining district, northern Chile[J]. American Mineralogist, 1969, 54(11-1): 1684-1710.
- [26] Marschik R, Fontboté L. The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) deposits, Chile[J]. Economic Geology, 2001, 96(8): 1799-1826.
- [27] Marschik R, Singer B S, Munizaga F, et al. Age of Cu (-Fe)-Au mineralization and thermal evolution of the Punta del Cobre district, Chile[J]. Mineralium Deposita, 1997, 32(6): 531-546.
- [28] Taylor G K, Grocott J, Pope A, et al. Mesozoic fault systems, deformation and fault block rotation in the Andean forearc: a crustal scale strike-slip duplex in the Coastal Cordillera of northern Chile[J]. Tectonophysics, 1998, 299(1): 93-109.
- [29] Mpodozis C, Allmendinger R W. Extensional tectonics, Creta-

ceous Andes, northern Chile (27°S)[J]. Geological Society of America Bulletin, 1993, 105(11): 1462-1477.

[30]Perez E, Cooper M R, Covacevich V. Aptian ammonite-based age for the Pabellón Formation, Atacama Region, northern Chile[J]. Andean Geology, 1990, 17(2): 181-185.

[31]Vila T. Geology of the Manto Verde copper deposit, northern Chile: a speculariterich, hydrothermal-tectonic breccia related to the Atacama fault zone[C]//Andean Copper Deposits: New Discoveries, Mineralization Styles and Metallogeny. Soc. Econ. Geol. Spec. Publ. 1996, 5: 157-169.

[32]Orrego M, Zamora R. Manto Ruso: Un yacimiento de cobre ligado a la Falla de Atacama, Norte de Chile[J]. Actas 6th Congr. Geol. Chileno. 1991, 1: 174-178.

[33]Hopper D, Correa A. The Panulcillo and Teresa de Colmo copper deposits: Two contrasting examples of Fe-ox Cu-Au mineralization from the coastal Cordillera of Chile[C]//Porter T M. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective. Australian Mineral Foundation, Adelaide, 2000: 177-189.

[34]Cesar E, Vidal C, Injoque-Espinoza J, et al. Amphibolitic Cu-Fe skarn deposits in the central coast of Peru[J]. Economic Geology, 1990, 85(7): 1447-1461.

[35]Vivallo W, Espinoza S, Henriquez F. Metasomatismo y alteración hidrotermal en el distrito ferrífero Cerro Negro Norte, Copiapó, Chile[J]. Andean Geology, 1995, 22(1): 75-88.

① Arévalo C. The Coastal Cordillera-Precordillera boundary in the Copiapó area, northern Chile and the structural setting of the Candelaria Cu-Au ore deposit. Kingston University, 1999.

② Arévalo C. Mapa Geológico de la Hoja Copiapó, Región de Atacama: Santiago, Chile, SERNAGEOMIN, Documentos de Trabajo 8, scale 1:100000, 1995.

③ Rotherham J F. Origin and Fluid Chemistry of the Starra Ironstones and High Grade Au-cu Mineralisation, Cloncurry District, Mount Isa Inlier, Australia. James Cook University of North Queensland, 1997.

④ Haller A. The Raul-Condestable iron oxides-Cu-Au deposit, Lima department, Peru: preliminary results. Abstract volume & Field trip guidebook, 2000.



《地质通报》第 37 卷第 1 期要目预告

中亚陆间区南带上古生界构造和油气远景讨论	张抗
中国北方石炭—二叠系油气地质调查与勘探进展	卢进才等
银额盆地西部蒙额地 1 井二叠纪叶肢介的发现及其意义	卢进才等
新疆准噶尔古生代洋盆闭合时限	
——来自卡拉麦里地区石炭纪碎屑锆石年代学约束	白建科等
西天山伊犁地区上、下石炭统接触关系的重新厘定及其构造意义	
——来自沉积学和岩相学的证据	宋博等
内蒙古阿拉善北部好比如地区下石炭统好比如组时代修订及地质意义	张宇轩等
新疆伊宁盆地石炭系阿克沙克组烃源岩特征	许光等
准噶尔盆地车排子地区新村油田石炭系构造特征与成藏条件研究	刘洛夫等
三塘湖盆地上石炭统近源凝灰岩致密油藏形成条件	陈常超等
银额盆地哈日凹陷 Y 井天然气产层时代厘定及其意义	卢进才等
银额盆地哈日凹陷 Y 井油气地球化学特征与油气源对比	卢进才等
内蒙古银额盆地及邻区石炭纪小独山期—二叠纪紫松期岩相古地理研究	史冀忠等
银额盆地及邻区二叠系硅质岩岩石学、地球化学特征及沉积环境	史冀忠等
银额盆地及周缘石炭系和二叠系沉积之后构造改造初探	许伟等
二连盆地马尼特坳陷伊和勘查区二叠系油气信息及其意义	卢进才等
位场数据小子域滤波法处理效果对比与优选	许海红等