境外矿产

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

李建旭[1,2],方维萱[2],刘家军[1]

(1. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院,北京 100083;
2. 有色金属矿产地质调查中心北京资源勘查技术中心,北京 100012)

[摘 要]智利铁氧化物铜金矿床形成于安第斯型活动大陆边缘中生代岩浆弧及弧后盆地,区域构造特征主要为岩浆侵入构造岩相带和阿塔卡玛断裂系统(AFZ),岩浆侵入构造及岩相分带控制矿田形成,AFZ断裂系统控制了矿化带和大型矿体产出。矿田构造主要有五种类型:火山构造;岩浆侵入构造+复式背斜;NS向平行韧性断裂带+岩浆侵入构造;走滑断裂弯曲节点由于转换扩张机制形成封闭的弧环形构造和热液角砾岩筒型。岩浆、断裂系统与成矿作用有密切的关系,关键因素是深成中酸性岩浆活动。通过研究提出了选区及勘查构造标志并认为矿田内构造蚀变岩相填图是一种有效的工作方法。

[关键词]智利 IOCG 矿田构造 勘查标志
[中图分类号]P548+P613 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2011)02-0323-10

Li Jian-xu, Fang Wei-xuan, Liu Jia-jun. Types and characteristics of regional tectonics and ore-field structures of iron oxide-copper-gold deposits in Chile [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(2): 323-332.

铁氧化物－铜－金(IOCG)矿床以大量铁氧化物如磁铁矿、镜铁矿(赤铁矿)为特征,主矿产Cu、Fe,共生或伴生Au、Co、U、Mo、Zn、Ag、REE等(Hitzman *et al*,1992),通常Au、Ag和Fe具有较大工业价值。智利铁氧化物铜金型矿床形成于安第斯山型活动大陆边缘,从西到东区域成矿构造主要是在智利海岸山带中生代岩浆弧及弧后盆地(Sillitoe,2003;方维萱等,2009),与岛弧造山带平行,近南北向阿塔卡玛断裂(AFZ)系统是洋壳岩石圈俯冲碰撞形成的幔型断裂带,对于智利铁氧化物铜金型矿床的区域定位具有十分重要作用。

近年来,据笔者在智利进行铁氧化物－铜－金型矿床勘查与研究认为,白垩纪岩浆侵入活动及演化趋势可能是控制成矿物质来源和矿床形成的重要基础和成矿背景。在区域上近南北向阿塔卡玛断裂(AFZ)及次级构造可能是矿体和矿床定位的主要构造控制因素,因此,智利铁氧化物铜金型矿床区域定位构造－矿田构造类型和特征主要为岩浆侵入构造岩相带和阿塔卡玛断裂(AFZ)系统,岩浆侵入构造及岩相分带控制了矿田形成,阿塔卡玛断裂(AFZ)及次级断裂、隐爆角砾岩筒和热液角砾岩筒(带)控制了矿化带和大型矿床产出。

1 智利IOCG成矿带与区域构造

智利铁氧化物铜金成矿带沿海岸山带区域性阿塔卡玛(ATACAMA)断裂(Taylor *et al*.,1998)分布长约1000km,定位于断裂及两侧、岩浆弧及弧后盆地中(图1、图2)。从北到南形成三个矿集区:南纬12°S~14°S;16°S~22°S和23°S~33°S。大型矿床有曼托斯－布兰科斯(Mantos Blancos)、曼陀贝尔多(Mantoverde)、桑托多明哥(Santo Domingo)、坎德拉里亚(Candelaria)、埃尔索尔达多(El Soldado)等(表1)。主要储矿构造带长5~10km,矿脉带长1~5km,宽400~1000m。早白垩洋壳板片聚敛速率增

[收稿日期]2010-11-18;[修订日期]2011-01-06;[责任编辑]郝情情。
[基金项目]"十一五"国家科技支撑计划项目《危机矿山接替资源勘查技术与示范研究》东川－易门铜矿山深部及外围勘查技术及示范研究课题(2006BAB01B09)、财政部海外风险勘探基金项目和北京勘技中心联合资助。
[第一作者]李建旭(1968年-),男,高级工程师,从事境外矿产勘探开发,E-mail: lijianxu163@163.com。

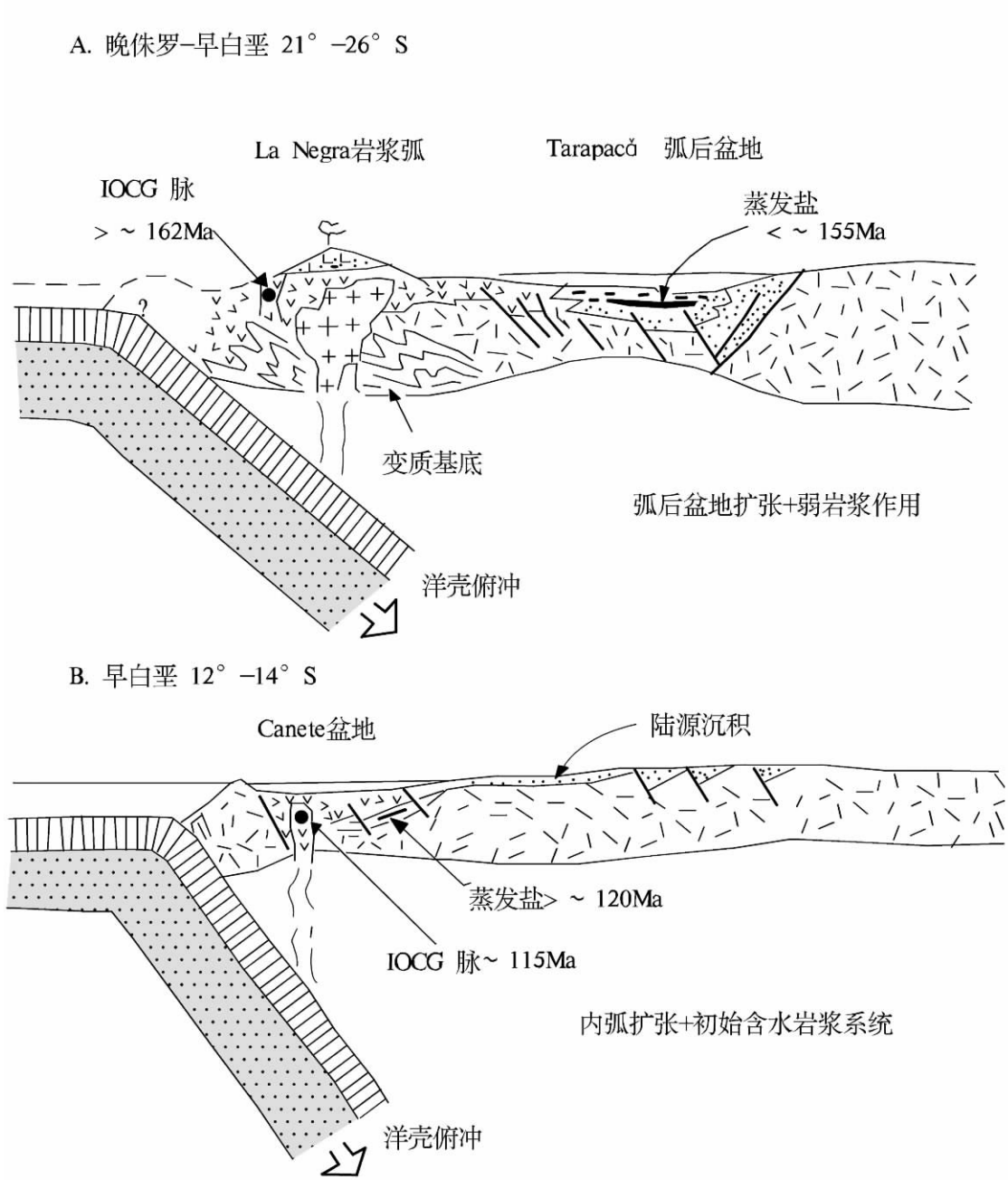

图 1 智利晚侏罗 – 早白垩安第斯边缘构造(据 Sillitoe R H,2003 修编)

Fig. 1 Schematic diagrams showing tectonics of the central Andean margin in Chile during the Late Jurassic – Early Cretaceous (modified from Sillitoe R H,2003)

大及俯冲倾角变陡,转换扩张机制使 AFZ 断裂系统经历了左旋 – 右旋走滑演化,沿构造带从西到东形成了中 – 晚侏罗和早白垩成矿带。

1.1 成矿带地质特征

在智利海岸山带 IOCG 成矿带,地层主要为侏罗 – 白垩纪钙碱性、中酸性火山岩 – 火山碎屑岩 – 沉积岩系列及大量的同期深成侵入岩体,普遍发生了绿片岩相埋藏低级变质作用,同时广泛的扩张作用引起了地层的倾斜。北部地区主要为中生代岩浆弧 – 弧后盆地沉积系列组合,以中 – 晚侏罗纪的 La Negra 地层为代表,沉积了 5000 ~ 10000m 厚的拉斑玄武岩到钙碱性火山 – 火山碎屑岩,主要是次地表到浅海相玄武岩、玄武质安山岩和安山质熔岩、凝灰岩和薄层沉积岩;而南部圣地亚哥地区表现为岩浆弧 – 弧内盆地岩石建造组合特征,以白垩纪 Los Chilcas 及 La Prodo 地层为代表,岩性为中基性玄武

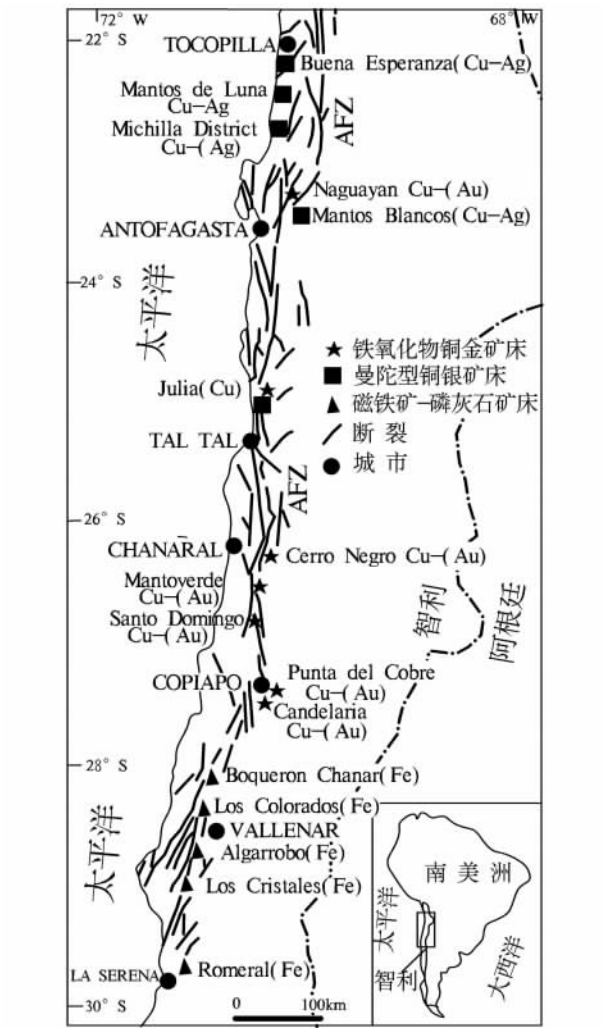

图 2　AFZ 断裂及矿床分布

(据 Benavides J *et al.*,2007 修编)

Fig. 2　Map showing the AFZ fault and distribution of IOCG deposits (modified from Benavides J *et al.*,2007)

岩到安山岩和长英质火山岩及海相碳酸盐,大多数火山岩具高钾钙碱性至橄榄粗玄质,部分序列显示成份双峰性(Levi *et al.*, 1988) 。在南纬 21°S ~ 27° S 和 31°30′S 地区的弧后盆地中局部有膏盐层存在。

1.2　阿塔卡玛断裂(AFZ) 与岩浆岩形成时代

侏罗开始到晚白垩世,强烈的岩浆及构造活动形成了中生代岩浆弧及与之平行的脆韧性走滑断裂系统 AFZ(Taylor *et al.*, 1998) ,紧邻岩浆弧东部为 Tarapacá 弧后盆地,构成了 IOCG 成矿带岩浆弧 – 盆 – 断裂构造体系,矿田位于 AFZ 断裂的旁侧的次级断裂(图 1 和图 2) 。

阿塔卡玛断裂系统(南纬 20°S ~ 30°S) 由一系列左旋走滑 NW – NNE – NS 向脆韧性次级断裂组成。侏罗 – 早白垩大约 130 Ma ~ 125 Ma (Dallrnyer *et al.*, 1996) ,Aluk 大陆向南东方向倾斜消减形成最初韧性剪切带,下白垩世基底深成岩体侵位,随后岩浆弧消亡和冷却导致脆性断裂系统形成并发生走滑变形,旋转角度一般 30°左右(Myrl E and Beck Jr,1996) 。由于走滑及旋转作用,由 AFZ 及次级断裂形成了众多小的地质体断块,并经历了从正常的滑动到侧面转换扩张构造过程(Grocott and Taylor, 2002) 。

AFZ 系统活动同期,深部幔源岩浆沿 AFZ 上侵,形成深成岩体基底构造,包括岛弧型前侏罗岩浆弧、中生代侏罗纪岩浆基底构造和新生代的第三系岩浆系统。

岛弧型前侏罗纪岩浆弧基底构造包括奥陶 – 三叠纪岩浆弧,分布在靠近海岸一带,由钙碱性、幔源花岗闪长岩及地壳部分熔融形成的花岗岩组成,有广泛的热液蚀变但仅有少量金属矿化。中生代侏罗纪岛弧型基底构造发生扩张作用,大规模钙碱性火山岩及深成岩体侵入,形成了与 IOCG 有关的中生代深成岩浆弧及东部的弧后盆地并充填了大量碳酸盐或火山碎屑岩系列(Mpodozis and Ramos, 1990) ,在晚白垩世(100 ~ 80Ma) 大西洋扩张引起南美大陆向西运动速度增加,由低压力 Mariama 型俯冲机制转换为高应力 Chile 型俯冲,引起弧后盆地封闭和塌陷,深成岩浆弧也向东部进一步迁移。此后岩浆活动暂停,直到古新世到始新世岩浆活动重新开始并向东移形成第三系岩浆系统。

通过工作对 Los Quilos 地区闪长岩采样年代测试(表 2) ,岩体形成于晚白垩世(70Ma ~ 102Ma) 。一致于 lllapel 岩体时代 88 ~ 123Ma(S. Rivano G, 1993.) 和 El Bronce 矿床岩体侵位时代 109 ± 4Ma (Camus F *et al.*,1991) ,与智利中部圣地亚哥以北地区曼陀型矿集区有密切时空关系。

1.3　成矿时代

成矿时代主要集中在中 ~ 晚侏罗世和早白垩世,尤以早白垩世占多数(图 3,表 1) 。少数形成于晚白垩 – 古新世(Sillitoe,2003) ,如 Mantoverde(117 ~ 123Ma) 、Candelaria(114 ~ 116 Ma) 、El Soldado(103 ± 2Ma) 、Dulcinea(65 ~ 60Ma,Iriarte D. S *et al.*,1996) 。总的来说,成矿时代由西向东变新,可分为四个阶段: 188 ~ 172 Ma, 167 ~ 153 Ma, 141 ~ 132 Ma 和 130 ~ 98 Ma。揭示受洋壳在深部俯冲不断向纵深方向发展的影响,成矿中心和岩浆侵位中心也不断向东迁移。

表 1 智利主要 IOCG 矿床简要地质特征

Table 1 Brief geological features of some iron oxide Cu – Au deposits from Chile

矿床名称	矿床规模及时代	岩体	赋矿(层位)岩石	矿化类型	脉石矿物	金属矿物	控矿构造	伴生	资料来源
坎德拉里亚 Candelaria-Punta del Corbe	470Mt, Cu 0.95%, Au 0.22g/t, Ag 3.1g/t?, 114 – 116Ma	闪长岩、石英二长岩、英安岩墙	早白垩 Punta del Cobre 地层,火山碎屑岩、安山岩、英安岩、粉砂岩	层状(曼陀)型、角砾岩、脉状、网脉状	黑云母、钾长石、石英、阳起石、绿泥石、钠长石、绢云母	磁铁矿/赤铁矿、黄铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、辉钼矿、毒砂	NNW、NW、NE 脆性断层, Candelaria 韧性剪切带	Mo、Pb Zn、Ag Au、LREE	Marschik R *et al.*, 2001; 2006
曼托斯 – 布兰科斯 Mantos Blancos	500Mt, Cu 1.0%,? ~ 155Ma 和 141 ~ 142 Ma	闪长岩、花岗闪长岩、铁镁质岩墙(后期)	La Negra 地层,粗面岩、安山岩、英安岩、流纹岩、凝灰岩及砂岩、灰岩	角砾岩、网脉状	钠长石、方解石、绢云母、绿泥石、绿帘石、石英、钾长石、电气石、黑云母	磁铁矿、黄铁矿、赤铁矿、斑铜矿、黄铜矿、蓝辉铜矿、方铅矿	角砾岩筒 NW、NE、NS 断层	Ag	Ramírez L E, 2006; Oliveros V *et al.*, 2008
埃尔索尔达多 El Soldado	> 200Mt, Cu 1.4%, 101 ~ 106Ma		早白垩 Lo Prado 地层,流纹英安岩、玄武岩 – 安山岩	似脉状、群脉状、角砾岩	方解石、绿泥石、钠长石、微斜长石、绿帘石、榍石、金红石、石英、绢云母	黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、铜蓝、黄铁矿、赤铁矿、闪锌矿、方铅矿	NS 和 NNW 左旋走滑剪切转换拉张带	Ag	Ricardo Boric *et al.*, 2002
曼陀贝尔多 Manto Verde	400Mt, Cu 0.52%, Au 0.11g/t, (117 ~ 123 Ma)	闪长岩	La Negra 地层、安山岩和闪长岩、二长闪长岩	角砾岩、脉状、网脉状、层状角砾	绿泥石、磷灰石、方解石、石英、钾长石、绢云母、电气石、方柱石	磁铁矿、赤铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、黄铁矿、斑铜矿	NW – NE 和 NS 韧性剪切带	LREE	Vila et al., 1996; Benavides J *et al.*, 2007
桑托多明哥 Santo Domingo	234Mt, Cu 0.55%, Au 0.07 g/t	闪长岩	白垩纪安山岩和凝灰质安山岩	层状、脉状,脉网状	绿泥石、绢云母、钾长石、阳起石	镜铁矿、磁铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿	N – NW、近 EW 断层	Au	Far West Mining Limited, 2008
劳斯奎洛斯 Los Quilos	估算 333 + 334 资源量 > 115Mt, Cu 0.98%	闪长岩(70 ~ 103Ma)	晚白垩 Los Chilcas 地层,安山角砾岩	层状、脉状、透镜状	钠长石、钾长石、绿泥石、方解石、石英	赤铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿	NS、NW、NE 左旋脆性走滑断层	Au、Ag	本文

表 2 智利 Los Quilos 地区侵入岩年代测试结果

Table 2 K – Ar ages of diorite in the Los Quilos area of Chile

样品编号	矿区	K(%)	$^{40}Ar_{rad}$(克分子/克)	$^{40}Ar_{rad}$(%)	表面年龄(±1σMa)	资料来源
TC31 – B5	Los quilos	0.23	2.86E – 11	43.64	70 ± 2	本文(测试单位:中国
LD879	Los quilos	0.44	6.10E – 11	31.08	78 ± 2	地震局地质研究所)
NP00 – B2	Los quilos	2.32	3.36E – 10	87.59	81 ± 1.8	
LD801	Los quilos	1.31	2.15E – 10	78.95	92 ± 2	
LD257 – B2	Los quilos	0.57	1.05E – 10	77.28	103 ± 3	
lllapel 岩体					88 ~ 123	S. Rivanog G, 1993
El Bronce 矿床					109 ± 4	Camus F *et al.*, 1991

2 AFZ 断裂矿田构造类型与特征

矿田构造是在矿田范围内,控制矿床的形成、改造和空间分布的地质构造因素的总和(翟裕生,1993)。重要的有色金属矿床在空间上产于地质(构造)体的转化(过渡)部位,在时间上形成于成矿地质过程的转化时期,定位于有利的转化界面附近(梅友松,2005),矿田构造研究是进行隐伏矿床预测的重要手段(韩润生,2003),通过对湖南黄沙坪铅锌矿矿田构造研究,NNW 构造显示了新的找矿方向(祝新友等,2010)。所以矿田构造研究对找矿实践有重要指导意义。

智利中生代 AFZ 断裂系统在演化过程中与岩浆活动共同作用,在岩浆弧到弧后盆地构造背景下

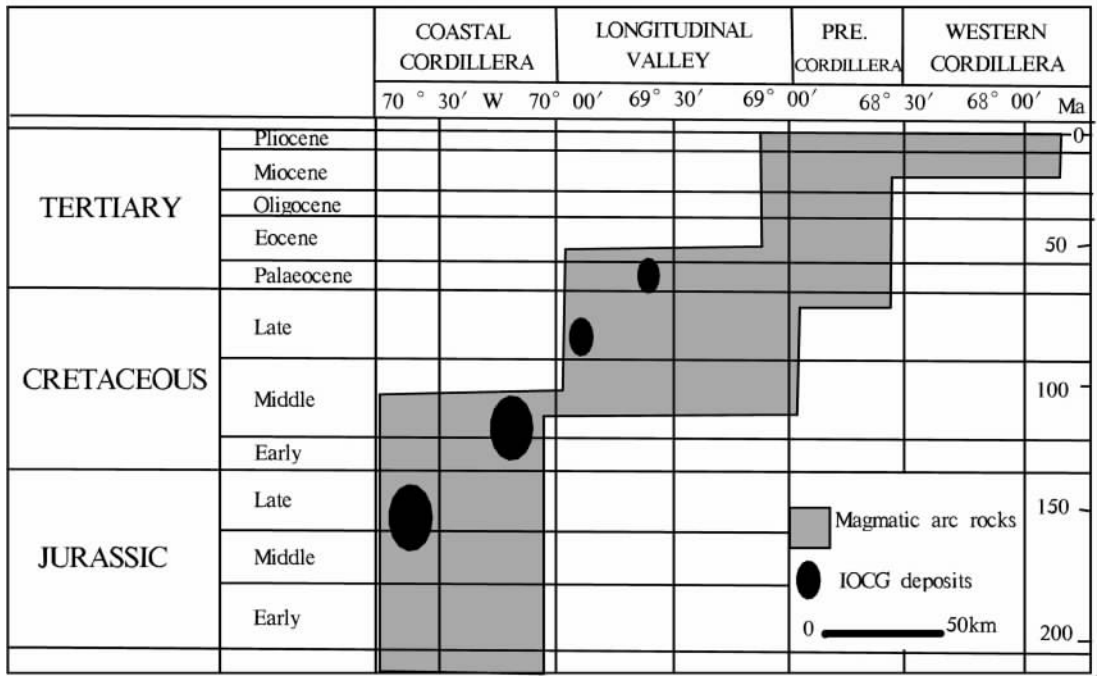

图 3　北部智利矿田空间及时代分布(据 Sillitoe,2003)

Fig. 3　Spatial and temporal distributions of iron oxide – Cu – Au deposits in northern Chile (after Sillitoe,2003)

形成了复杂的矿田构造及矿化型式,控制了矿床空间分布及规模。在岩浆弧形成断裂 ± 火山构造 ± 侵入构造的矿田构造型式,而在弧后盆地及其边缘形成断裂 ± 侵入构造 ± 背斜的矿田构造型式。通过对典型矿床及区域成矿构造研究认为主要有以下五种类型。

2.1　火山构造

火山活动构造表现为火山穹窿构造、线状火山构造及次火山构造,与早期或同期断裂一起构成复杂的矿田构造格架,形成于浅表并与含铜铁氧化物矿床形成有关。如 Los Quilos 铜矿(图 4) 产于白垩纪闪长岩侵入体及火山岩带,通过本次野外地质调查,火山活动沿主断裂呈 NS 向线状展布,沿 5km 长的火山活动带,发育近南北向等距平行的三条主断裂,其间较多平行的 NW 和 NE 向次级断裂构成协调断层,沿断裂大量的次火山岩脉侵入。火山活动与断裂共同形成了本区的矿田构造格架,矿床限定于线状的火山构造带,单个矿床沿主断裂等距分布,形成四个矿化中心,矿化产于热液角砾岩中,在断裂的交汇部位膨大变厚变富并呈现多期次矿化特征,矿化类型主要是含铜赤铁矿并伴生金、银。

2.2　岩浆侵入构造 + 复式背斜

岩浆沿弧后盆地边缘基底断裂侵入形成大型接触构造,与弧后盆地中的火山岩 – 火山碎屑岩 – 沉

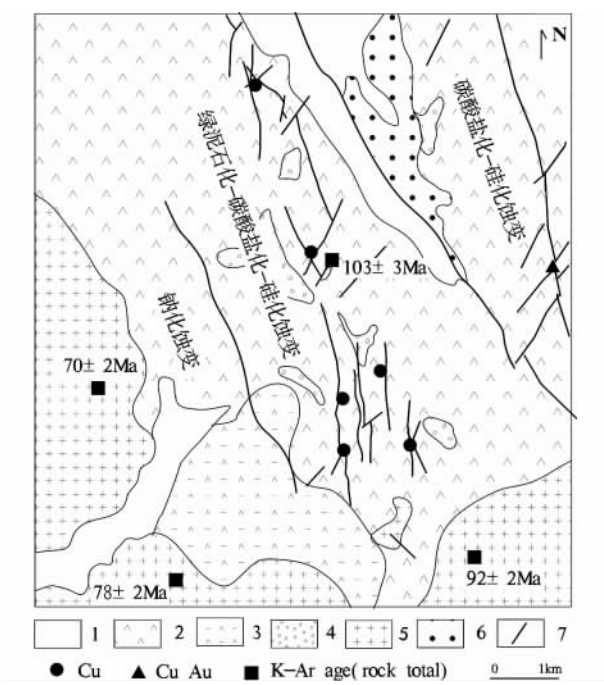

图 4　Los Quilos 铜金矿床火山矿田构造

Fig. 4　Volcanic ore – field structure of the Los Quilos Cu – Au deposit

1 – 河流; 2 – Las Chilcas 单元安山岩、安山角砾岩; 3 – 安山质角砾凝灰岩; 4 – 集块岩; 5 – 花岗闪长岩 – 闪长岩; 6 – 酸性热液蚀变带; 7 – 断裂

1 – alluvium; 2 – Las Chilcas Formation andesite breccia; 3 – toba; 4 – conglomerate; 5 – granodiorite – diorite; 6 – acid hydrothemal alteration; 7 – fault

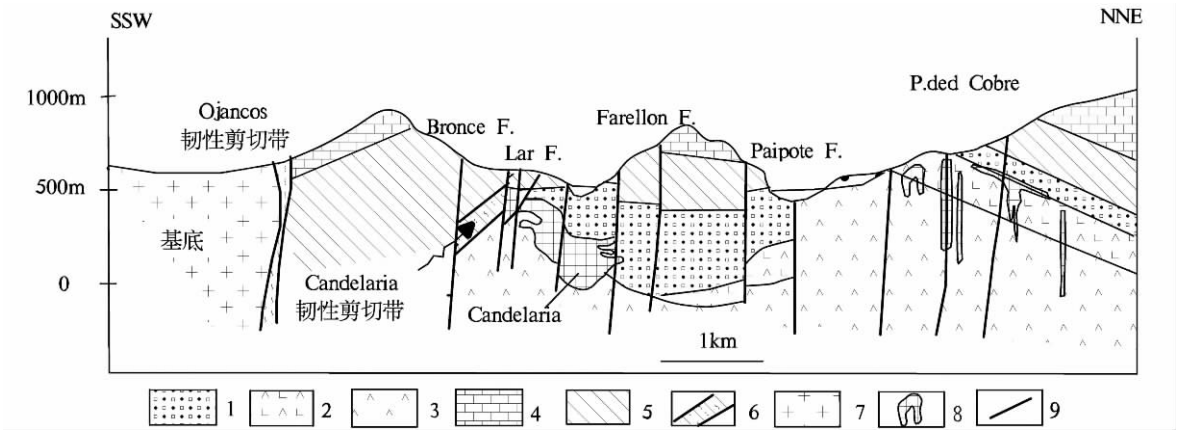

图 5 坎德拉里亚矿床矿田构造模式(据 Marschik R *et al.*,1998 修编)

Fig. 5 Model of ore – field structure in the Candelaria – Punta del Cobre deposits (modified from Marschik R *et al.*,1998)

Punta del cobre 单元:1 – Algarrobos 单元;2 – Geraldo – Negro 单元英安岩;3 – 下部安山岩;Chanarcillo 单元:4 – Nantoco 单元灰岩;5 – Abundancia 单元;6 – 韧性剪切带;7 – Copiapó 岩基;8 – 矿体;9 – 断裂

Punta del cobre formation: 1 – Algarrobos Member; 2 – Geraldo – Negro Member dacite; 3 – Low andesits; Chanarcillo group: 4 – Nantoco Formation carbonate; 5 – Abundancia Formation; 6 – shear zone; 7 – Copíapó Bothdith; 8 – 0rebody; 9 – fault

积岩由于深成岩体的侵入或水平构造应力形成的复式背斜,共同组成岩浆侵入构造 + 复式背斜复合矿田构造。这种构造配以有利的围岩是大型矿田形成的有利构造组合。

如 Candelaria – Punta del Cobre 矿山(Marschik R *et al.*,2001),其西部中生代科皮亚波深成闪长杂岩体沿盆地边缘、AFZ 断裂分支韧性断裂侵入,与 NE 向大型复背斜(Tierra Amarilla 复背斜) 和 NNW 到 NW 向的高角度左行断裂带共同组成岩浆侵入构造 + 复式背斜构造系统(图 5),接触带发生糜棱岩化和强烈的钠钙蚀变,由深源岩浆带来的热液进入碳酸盐岩下部的火山岩中,形成块状、层状、脉状、透镜状磁铁矿、赤铁矿和铜的矿化。N – NE 向不对称直立褶皱,影响了所有地层岩石、Candelaria 韧性剪切带及低角度断裂(Unicornio fault) 和矿体,说明挤压变形发生在扩张变形和矿化之后。

2.3 走滑断裂弯曲节点弧环形构造

在走滑断裂系统中,在弯曲部位常形成扩张构造,而成为断裂控矿构造有利部位。AFZ 走滑断裂系统演化过程中,在断裂弯曲部位或与平行于主断裂的次级断裂一起,由于走滑变形及转换扩张构造动力学机制,形成封闭的弧环形构造,膨大部位次级断裂及裂隙发育,岩石破碎,为热液循环与沉积提供通道和空间,在智利中生代断裂系统中是一种常见的断裂型矿田构造。

El Soldado 曼陀型铜矿(Boric R *et al.*,2002) 是这种矿田构造的典型实例(图 6)。矿床形成于弧内盆地,断裂有 NS 向韧性断裂、NNW 和 NE 向脆性断裂,NS 和 NNW 向断层的交汇部位具有共轭断裂区域,形成如花伞穹窿状的圈闭构造,内部网状裂隙形成高渗透性区域,成为成矿的良好流通和沉淀聚矿构造,中性和铁镁质岩脉通常以 WNW 向侵位被认为是联通深部的导管,热液沿岩层界面顺层或断裂流动,形成层状、透镜状、脉状或角砾岩筒矿化。这种构造模式被认为是在早白垩世晚期脆性压力条件下的挤压作用造成。

2.4 NS 向平行韧性断裂带 + 侵入构造

在岩浆弧构造带中断裂及岩浆十分发育,断裂带常由平行的 NS 向韧性走滑断裂和 NW 和 NE 向次级断裂构造断裂系统组成,多期次深成岩浆沿深层韧性断裂侵入形成杂岩体。在这里断裂既是导矿构造又是储矿构造,为热液循环和矿物质的沉淀提供了良好的条件。矿床或矿体定位于断裂或其交汇部位,这种平行断裂 + 侵入岩的矿田构造型式是强烈岩浆构造活动其间的一种重要类型,与深层铁氧化物及浅部铁氧化物铜金的矿化有密切关系。

如位于侏罗岩浆弧的 Mantoverde 矿山(图 7),两条平行的 NS 向韧性断裂系统与次级 NW 向断裂与花岗质侵入杂岩体共同控制了矿床(矿体) 分布。矿床沿 NS 和 NW 向断裂带呈等距排列。在 NS 向韧性断裂形成了磁铁矿为主的矿化,在 NW 向断裂则形成了镜铁矿的矿化。在断裂下部(下盘) 形成

磁铁矿,上部为镜铁矿及角砾为主的铜矿(Benavides J *et al.* ,2007) 。

2.5　热流角砾岩筒(矿体)

热液角砾岩筒作为一种火山构造往往与其它矿田构造样式共存,也可单独出现,常形成于火山穹窿、断裂交汇部位,其高渗透性有利于热液循环和沉淀而成为富矿构造。如位于侏罗 – 早白垩流纹岩穹窿的岩浆热液角砾岩 Mantos Blancos 铜矿(Ramírez L E *et al.* ,2006) ,矿化带东西长 3km、宽 1km、深 600m,三组构造 NE(左旋) 、NW(右旋) 、NS(50° ~ 80°W) 和 NS(50° ~80°E) 断裂共同控制了角砾岩筒的形态及产状(图 8) 。次火山闪长岩杂岩体侵入到流纹岩穹窿中成为热液流通导管,两次岩浆活动或热液事件在角砾岩筒形成金属的富集,后期岩浆侵入形成了高品位的赤铁矿 + 铜硫化物角砾岩富矿石。

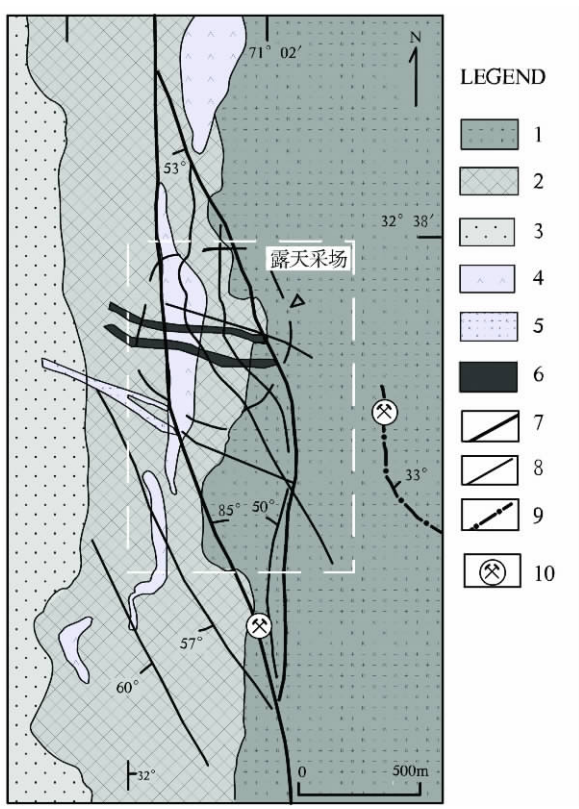

图 6　埃尔索尔达矿床弧环形构造

Fig. 6　Map showing ring – shaped structure of the El Soldado deposit (after Boric R *et al.* ,2002)

1 – Lower Lo Prado 单元; 2 – Upper Lo Prado 单元; 3 – 流纹英安岩熔岩和穹隆; 4 – Veta Negra 单元; 5 – 流纹英安岩岩墙; 6 – Veta Negra 单元安山岩岩墙; 7 – 主要断裂; 8 – 次级断裂 9 – Veta Negra 单元矿化(铜) 湖相页岩; 10 – 矿山

1 – Lower Lo Prado Formation; 2 – Upper Lo Prado Formation; 3 – rhyodacite flows and domes; 4 – Veta Negra Formation; 5 – rhyodacite feeder dykes; 6 – andesite feeder dykes for Veta Negra Formation; 7 – major fault; 8 – lesser fault; 9 – mineralized lacustrine shale; 10 – mine

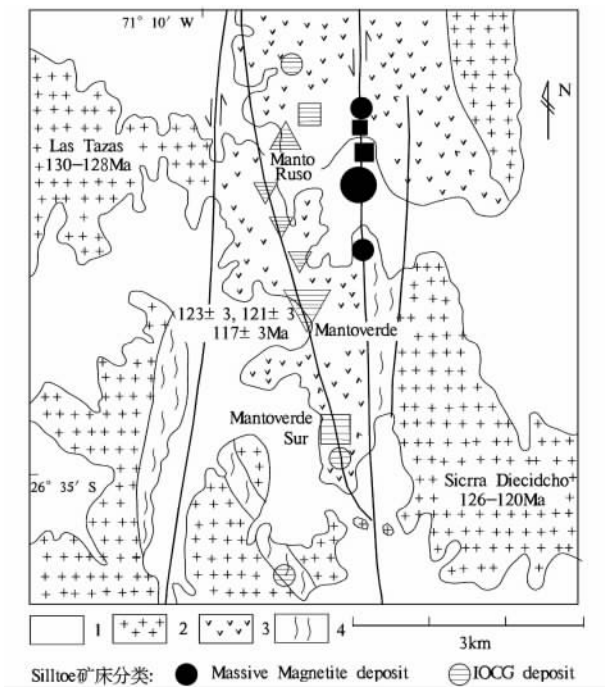

图 7　Mnatoverde 矿床地质简图(据 Sillitoe,2003 修编)

Fig. 7　Geologic map of the Mnatoverde deposit (modified from Sillitoe,2003)

1 – 河流; 2 – 早白垩深成杂岩体; 3 – 侏罗纪火山岩; 4 – 韧性剪切带

1 – alluvium; 2 – Early Cretaceous plutonic complex; 3 – Jurassic volcanic rock; 4 – ductile shear zone

3　矿田构造的岩浆 – 构造成矿体系

3.1　岩浆活动与断裂系统的成矿作用

中生代形成了构造岩浆系统和成矿作用的转折点,矿化集中在大约 128 ~100Ma。从金属成矿作用看,最重要的岩浆活动是来源于幔源中性深成闪长岩浆系统,具有岩浆弧早期演化特征,较小的演化程度及地壳混染,且含有较高的挥发份形成高氧逸度特性是形成铁氧化物的重要原因。早白垩的晚期,由于超级地幔柱事件导致压力剧增,俯冲作用加强,沿 AFZ 断裂形成岩浆侵入通道。在挤压机制下,浮力和转换压力动力学使岩浆产生超压力,深成岩浆沿垂直的韧性带(主要通道) 快速上升。在高渗透性的断裂环境中沿 AFZ 形成铁氧化物矿床(Kiruna 型) ,在次级断裂构造系统产生铁氧化物铜金(IOCG) 型矿化。晚白垩世岩浆弧快速上升同时盆地被抬升,大规模 IOCG 成矿作用停止(Oyarzun R *et al.* ,2003) 。

断裂、岩浆与成矿时代有明显的时空特征,纵向

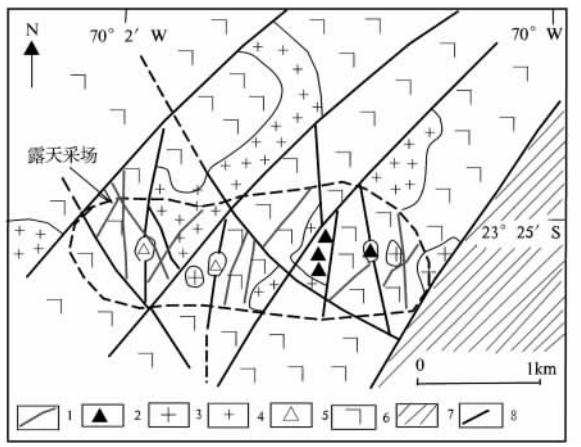

图 8 Manto Blancos 矿床热液角砾岩筒矿田构造
(据 Ramírez L E *et al.*,2006 修编)

Fig. 8 Ore – field structure of the Manto Blancos hydro–thermal breccias pipe (modified after Ramírez L E *et al.*,2006)

1 – 闪长岩墙; 2 – 花岗闪长岩 – 闪长岩岩浆热液角砾岩; 3 – 花岗闪长岩; 4 – 闪长岩; 5 – 流纹岩岩浆热液角砾岩; 6 – 流纹岩穹窿; 7 – 中侏罗花岗闪长岩; 8 – 断裂

1 – dioritic dike; 2 – granodioritic – dioritic magmatic hydronothermal rec–cia; 3 – granodiorite; 4 – diorite; 5 – rhyolitic magmatic – hydrothermal breccia; 6 – rhyolitic dome; 7 – Middle Jurassic grandiorite; 8 – fault

断层控制着岩体的侵入及金属带。侏罗到早白垩强烈岩浆活动形成的辉长岩、闪长岩到石英闪长岩、石英二云闪长岩、英云闪长岩和花岗闪长岩等氧化磁铁矿系列组合沿断裂多期次侵入形成杂岩体,锶同位素研究表明具幔源特征并有较小的地壳混染作用,从西向东随时代变年轻,矿化作用有相同的时空演化特征。矿床一般产出于深成岩体 1 ~ 2km 范围内并同期产生矿化,在 Mantoverde 和 Canderalia 矿化年龄均与深成岩体年龄时代相近。侵入岩体中的矿床与岩体同期矿化如 Las Animas 矿床蚀变年龄 162 ±4 Ma,闪长岩 161 ±4 Ma(Gelcich E S *et al.*, 1998) 。

总的来说,岩浆活动、断裂系统及成矿时代区域上时间相近,如果不相互叠加则不成矿或少有矿化,若三者相互叠加、次级构造发育则容易形成矿化,矿化类型也取决于围岩、灰岩、火山岩形成不同的控矿蚀变组合。

3.2 矿田构造的控矿特征

中生代安第斯岩浆弧 – 弧后盆地的演化中,在转换扩张应力机制下,岩浆、断裂系统的多期次、同时代活动,使矿田构造形成多样化并有不同的控矿特征,主要有以下几个特点:

(1) 从岩浆弧到弧后盆地矿田构造型式的变化: 岩浆弧多形成以火山构造 + 侵入岩 + 断裂的复合矿田构造型式,由深部到浅部形成磁铁矿 – 赤铁矿化; 弧后盆地由更多的沉积岩盖层形成复式背斜或向斜,形成褶皱 + 侵入岩 + 断裂的复合矿田构造型式,多为赤铁矿化。大型矿床中多种构造型式共存。单个矿床沿主要断裂带呈等距排列,而热液角砾岩筒往往形成富矿体。

(2) 在矿田构造中,侵入岩对矿化起着主要作用,关键因素是岩性,因为来自深部的中基性岩浆不仅带来热源同时又有大量的金属物质,在岩浆侵入构造带形成弥漫型的钙碱性蚀变。大量岩脉及断层构造系统,构成了深部来源热液的通道,这就可以解释矿化常产于侵入岩体附近的规律。

不管哪种矿田构造均是构造 + 岩浆 + 地层的综合产物,其关键因素是岩浆活动(不仅是热源,同时又提供了深部成矿物质) ,侵入岩体的多期次是形成大型矿田(矿床) 构造基础。前期岩浆活动形成的构造,由于后期岩浆活动而重新活化,热液更容易发生矿化和沉淀。

3.3 储矿构造与蚀变特征

深源的岩浆热液沿深大断裂及次级断裂运移,而高的地热梯度有助于热液上侵,在低级构造及岩体接触带或岩性界面,形成金属的沉淀或交代富集,岩层、岩性界面、断层交汇处、断层弯曲部位、角砾岩筒、劈理裂隙、背斜轴部等,不同的储矿型式形成不同的矿体及蚀变矿化特征。主要有脉型、热液角砾岩型、角砾岩筒型、矽卡岩型、层控曼陀型(mantos) 和复合型。在岩浆岩接触带,形成面型钠钙热液蚀变带,在断裂中蚀变较小,与区域蚀变较难区分。与矿化有关的蚀变主要是碱性蚀变和铁氧化物组合,深部为早期钠钙蚀变,以钠长石 + 磁铁矿 + 阳起石 + 磷灰石为特征,中浅部为典型的近源钾化蚀变,以黑云母 + 钾长石 + 磁铁矿 + 黄铁矿 + 黄铜矿及镜铁矿(赤铁矿) 为特征。浅表蚀变为钾长石 – 白云母 ± 绿泥石 ± 碳酸盐(绢云母蚀变) 。浅部常发育粗晶方解石脉,可能代表了热液晚期活动,而在部分矿床的旁侧也可有黄铁矿化及硅化及绢云母和(或) 高级泥化蚀变。碳酸盐的存在则可形成矽卡岩(Candelaria) 。矿物同样有明显分带,深部为磁铁矿化,而浅部为镜铁矿化并可含有铁的碳酸盐。

3.4 构造蚀变岩相学填图与储矿构造圈定

火山构造岩相学填图是有效的勘查及研究思路。通过遥感、地质、构造学等方法的综合研究,分

析矿田构造、圈定储矿构、研究岩相构造蚀变及成矿规律。

通过对 Los Quilos 构造岩相学填图,发现矿床受火山构造控制。安山质火山集块岩呈 NS 向分布形成线性火山构造,矿床沿主断裂线状等距分布。白垩纪闪长岩体多期次侵入显示明显的时空关系。由岩体侵入构造带向外形成面型的钠钙蚀变 – 穿插脉状的绿泥石化、碳酸盐化、硅化蚀变带 – 碳酸盐化带,垂向有同样的蚀变规律,矿化主要发生在中带,矿体距岩体约 1000m,赋存于火山角砾岩及凝灰岩中。NS 向主断裂控制了主矿体的分布,既是导矿构造,同时与其它次级断裂及岩性变化的界面共同形成了储矿构造,在构造交汇部位形成富矿体。

4　结论与选区勘查标志

通过以上分析认为中生代智利安第斯型活动大陆边缘的 IOCG 矿床矿田构造是断裂 + 岩浆侵入构造 + 岩性共同作用的结果,类型复杂,在选区及勘查中应注意以下几点:

(1) 中生代岩浆弧或弧后盆地中侏罗 – 白垩纪火山岩及碎屑岩均是有利的成矿层位。在岩浆弧中以断裂 + 岩浆岩(火山构造) 为主要选区标志; 弧后盆地碳酸盐层形成有利盖层,盆地边缘或大断裂附近深成岩体的存在,预示着大量的岩浆活动,有利于矿床形成。

(2) 断裂 + 侵入岩是所有矿田构造型式基本组合。大型断裂带中多条平行断裂加上大规模的深成侵入杂岩体,发育较好的钠钙质热液蚀变接触带是形成矿床的有利构造,断裂带为矿液流动和沉淀提供了有利的封闭场所。关键是岩相和岩性(高渗透性) ,其次大型断裂的走滑弯曲部位和构造交汇部,既是矿田构造又是很好的储矿构造,热液角砾岩筒常发生在浅表的火山穹窿及断裂交汇部位,形成富矿体。

(3) 在矿田或矿床中常包含多种储矿构造。火山穹窿、层理(岩层、岩性分界面) 、角砾岩筒、断裂交汇部位、走滑断裂弯曲部位、次级断裂产状变化处及背斜的轴部及层间滑脱部位等均是较好储矿构造。

(4) 实践说明矿田范围内大比例尺构造蚀变岩相填图是一种有效的工作方法。

[References]

Benavides J, T. K. Kyser ,Alan H. Clark, Oates C J, Zamora R. 2007. The Mantoverde Iron Oxide – Copper – Gold District, III Región, Chile: The Role of Regionally Derived, Nonmagmatic Fluids in Chalcopyrite Mineralization [J]. Economic Geology ,102(3) : 415 – 440

Boric R, Holmgren C, Wilson N S F, Zentilli M. 2002. The Geology of the El Soldado Manto Type Cu (Ag) Deposit, Central Chile [A]. In: Porter T M ed. Hydrothermal Iron Oxide Copper – Gold & Related Deposits: A Global Perspective, Volume 2 [C]. Adelaide : PGC Publishing: 163 – 184

Camus F, Boric R, Skewes M A, Castelli J C, Reichhard E, Mestre A. 1991. Geologic, Structural, and Fluid Inclusion Studies of El Bronce Epithermal Vein System, Petorca, Central Chile [J]. Economic Geology, 86: 1317 – 1345

Dallmeyer R D, Grocott J, Taylor G. , Treloar P. 1996. Mesozoic magmatic and tectonic events with the Andean plate boundary zone 26° – 27°30′S, north Chile: constraints from $^{40}Ar - ^{39}Ar$ mineral ages [J]. Geol, 104: 19 – 40

Fang Wei – xuan, Liu Yu – long, Zhang Shou – lin, Guo Mao – hua. 2009. Three types of continental geodynamics and metallogenic models for IOCG(Iron – oxide Copper Gold Deposits from the global view [J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition) ,39 (3) : 404 – 413

Far West Mining Limited. 2008. Review of the Santo Domingo Su and Iris Project

Gelcich E S, Espinoza P C, Vivallo S W . 1998. Yacimientos metalíferos de las Hojas Cha? aral y Diego de Almagro, Región de Atacama. Serv Nac Geol Miner Mapa Recursos Mineral Chile, 3: 17

Grocott J, Taylor G K . 2002. Magmatic arc fault systems, deformation partitioning and emplacement of granitic complexes in the Coastal Cordillera, northern Chilean Andes (25°30′S to 27°00′S) [J]. Geol Soc Lond, 159: 425 – 442.

Han Run – sheng. 2003. Preliminary discussion on research contents and methods of tectono – metallogenic dynamics and conecaled ore orientation prognosis [J] . Geology and Prospecting,39(1) : 5 – 9

Hitzman M W, Oreskes N, Einaudi M T . 1992. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu – U – Au – REE) deposits [J]. Precambrian Research , 58: 241 – 287

Iriarte D S, Arévalo V C, Mpodozis M C, Rivera H O. 1996. Mapa geológica de la Hoja Carrera Pinto, Región de Atacama. Serv Nac Geol Miner Mapas Geol 3

Levi B, Nyström JO, Thiele R, Aberg G . 1988. Geochemical trends in Mesozoic – Tertiary volcanic rocks from the Andes in central Chile and tectonic implications [J]. J S Am Earth Sci, 1: 63 – 74

Marschik R , So llner F. 2006. Early Cretaceous U – Pb zircon ages for the Copiapó plutonic complex and implications for the IOCG mineralization at Candelaria, Atacama Region, Chile [J]. Miner Deposita, 41: 785 – 801

Marschik R and Leveille R A. 1998. The Candelaria – Punta del cobre iron oxide copper – gold deposits, Chile, Geological Society of America, Abstracts with Programs, A – 371

Marschik R, Fontboté L. 2001. The Candelaria – Punta del Cobre Iron Oxide Cu – Au(– Zn – Ag) Deposits, Chile [J]. Economic Geology, 96: 1799 – 1826

Mei You – song. 2005. Some questions in mineralization regularity [J]. Geology and Prospecting, 41(6): 3 – 14

Mpodozis C, Ramos V. 1990. The Andes of Chile and Argentina [A]. In: Ericksen GE, Ca? as Pinochet MT., Reinemund, JA. eds. Geology of the Andes and its Relation to Hydrocarbon and Mineral Resources [C]. Houston: Circum – Pacific Council for Energy and Mineral Resources Earth Science Series 11: 59 – 90.

Myrl E, Beck Jr. 1998. On the mechanism of crustal block rotations in the central Andes [J]. Tectonophysics, 299: 75 – 92

Oliveros V, Féraud G, Aguirre L. 2008. Detailed $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of geologic events associated with the Mantos Blancos copper deposit, northern Chile [J]. Miner Deposita, 43: 281 – 293

Oyarzun R, Oyarzún J, Jacques J, Ménard, Lillo J. 2003. The Cretaceous iron belt of northern Chile: role of oceanic plates, a superplume event, and a major shear zone [J]. Mineralium Deposita, 38: 640 – 646

Ramírez L E. 2006. The Mantos Blancos copper deposit: an upper Jurassic breccia – style hydrothermal system in the Coastal Range of Northern Chile [J]. Miner Deposita, 41: 246 – 258

S. Rivano G. 1993. Carta Geologica de Chile, 1: 250000, No. 73, Servicio Nacional de geologica y minera

Sillitoe R H. 2003. Iron oxide – copper – gold deposits: An Andean view [J]. Mineralium Deposita, 38: 787 – 812

Taylor GK, Grocott J, Pope A, Randall DE. 1998. 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, 299: 93 – 109

Vila T, Lindsay N, Zamora R. 1996. Geology of the Mantoverde copper deposit, northern Chile: A specularite – rich, hydrothermal – tectonic breccia related to the Atacama Fault Zone [A]. In: Camus F, Sillitoe RH, Petersen R. eds. Andean copper deposits: New discoveries, mineralization styles and metallogeny [C], Soc Econ Geol Spec Publ 5: 157 – 169

Zhu Xin – you, Wang Jin – bing, Zhang Zhi, Wang yan – li, Jiang Yuan – chen. 2010. Identification of the NNW Trending ore – controlling structure in the Huangshaping lead – zinc deposit, Hunan Province and its signicance to exploration [J]. Geology and Prospecting, 46(4): 0609 – 0615

[附中文参考文献]

方维萱,柳玉龙,张守林. 2009. 全球铁氧化物铜金型(IOCG)矿床的3类大陆动力学背景与成矿模式[J]. 西北大学学报(自然科学版),39(3): 404 – 413

韩润生. 2003. 初论构造成矿动力学及其隐伏矿定位预测研究内容和方法[J]. 地质与勘探,39(1): 5 – 9

梅友松. 2005. 成矿规律若干问题研究[J]. 地质与勘探,41(6): 3 – 14

翟裕生,林新多. 1993. 矿田构造学[M]. 第一版. 北京: 地质出版社: 1 – 5

祝新友,王京彬,张 志,王艳丽,江元成. 2010. 湖南黄沙坪铅锌矿NNW向构造的识别及其找矿意义[J]. 地质与勘探,46(04): 0609 – 0615

Types and Characteristics of Regional Tectonics and Ore – field Structures of Iron Oxide – Copper – Gold Deposits in Chile

LI Jian – xu[1,2], FANG Wei – xuan[2], LIU Jia – jun[1]

(1. *China University of Geosciences*, *Beijing* 100083;

2. *China Non – Ferrous Metals Resource Geological Survey Beijing Branch*, *Beijing* 100012)

Abstract: Iron oxide – copper – gold deposits in Chile were formed in the Mesozoic magmatic arc and back – arc basins on the Andes – type active continental margin. Regional tectonics are mainly characterized by magmatic intrusive faces and the Atacama fault system (AFZ). Magmatic intrusive structures and litho faces zonation control the formation of ore fields and the AFZ fault system controls the occurrences of mineralized zones and large – scale ore bodies. Structures of ore fields include five types: volcanic structure, magmatic intrusive structure + anticlinorium, NS trending parallel ductile fault zones + magmatic intrusive structures, closed arc annular structures and hydrothermal breccia – pipe structures formed by transition and expansion of bending nodes of strike – slip faults. Magmatic systems and fault systems are closely related to mineralization, and plutonic intermediate – acid magmatic intrusive activities may be the key factor. Through studies, we suggested structural indicators for target selection and exploration and thought that the structure – altered faces mapping in ore field is one of the effective working methods.

Key words: Chile, iron oxide – Cu – Au deposits, structure of ore field, prospecting indicators