文章编号:0258-7106(2008)03-0267-12

铁氧化物-铜-金(IOCG)型矿床:基本特征、研究现状与找矿勘查*

毛景文[1],余金杰[1],袁顺达[1],程彦博[2],谢桂青[1],侯可军[1],向君峰[2],杨宗喜[2]
(1 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037;2 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083)

摘 要 国际上对 IOCG 型矿床的研究如火如荼,中国则刚刚起步。文章全面评述了 IOCG 型矿床的研究现状,包括 IOCG 型矿床的定义、全球时空分布特点、成矿环境、与成矿有关的岩浆岩、矿体形态特征及围岩蚀变、矿床的形成过程、找矿评价标志等。最后,文章从 IOCG 型矿床的角度,对中国某些矿床进行了思考,认为长江中下游宁芜和庐枞盆地内的玢岩铁矿可能属 IOCG 型矿床,河北邯邢铁矿和湖北大冶铁矿也有 IOCG 型矿床的某些特点。

关键词 地质学;IOCG 型矿床;钠化;钾化;角砾岩筒;成矿过程;矿床模型;找矿评价标志;地质勘查
中图分类号:P618.3;P618.4 **文献标志码**:A

Iron oxide-copper-gold deposits: Characteristics, present research situation and ore prospecting

MAO JingWen[1], YU JinJie[1], YUAN ShunDa[1], CHEN YanBo[2], XIE GuiQing[1], HOU KeJun[1], XIANG JunFeng[2] and YANG ZongXi[2]
(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract

The iron oxide copper-gold deposits (IOCG deposits) are being extensively and intensively studied abroad, but in China the study of such deposits is still in its beginning stage. In this paper, the authors present a review of the present research situation of the IOCG deposits, which includes definition of the iron oxide copper-gold deposits, temporal and spatial distribution, ore-forming environments, magmatic rocks associated with the deposits, shapes of the ore bodies and alteration of the country rocks, ore-forming processes and criteria for ore prospecting and evaluation. From the point of view of the iron oxide copper-gold deposits, the authors have pondered some IOCG deposits in China. The porphyrite iron deposits in the Ningwu and Luzong basins of the Lower Yangtze Valley probably belong to IOCG deposits, and the Daye iron deposit in Hubei Province and the Hanxing iron deposit in Hebei Province also have some IOCG features.

Key words: geology, IOCG deposits, albitization, potassium alteration, breccia pipe, ore-forming process, deposit model, criteria for ore prospecting and evaluation, geological exploration

http://www.kcdz.ac.cn/

* 本文得到国家自然科学基金(40434011,40472055)和国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411405)的联合资助
第一作者简介 毛景文,男,1956 年生,研究员,主要从事矿床和地球化学研究。E-mail:jingwenmao@263.net
收稿日期 2008-01-29;改回日期 2008-04-01。许德焕编辑。

20 世纪 70 年代在南澳大利亚 Stuart Shelf 地区探明了奥林匹克坝超大型铜-铁-金-铀矿床(20 亿吨矿石,铁 35 %,铜 1.6 %,U_3O_8 0.06 %,金 0.6 g/t,银 3.5 g/t)(Roberts et al.,1983;Scott,1987)。这一重要发现促使人们关注富铁氧化物矿床,但其独特性又很难将其归为某一已知矿床类型。随着研究的深入,Bell(1982)、Youles(1984)、Hauck 等(1989)、Hauck(1990)根据奥林匹克坝矿床富含氧化铁、具大量角砾岩筒控矿、形成于元古代等显著特征,将其与美国密苏里东南部的铁矿省、加拿大育空地区的 Wernecke 山、南澳大利亚的 Mount Painter 地区、中国的白云鄂博以及瑞典的基鲁纳等矿床进行了对比。直到上世纪 90 年代初,Hitzman 等(1992)才以新的视角把这些看起来关系不大的矿床联系在一起,统称为元古代铁氧化物(Cu-U-Au-REE)矿床,并认为基鲁纳型铁矿应是此大类矿床中的一个亚类。尽管此类矿床可能与深成岩浆活动有关,但矿体则是浅成就位。由于这一概念把奥林匹克坝、基鲁纳和白云鄂博等具有巨大经济价值的矿床有机地联系在一起,引起了国际上的巨大反响和高度关注,学术界和矿业界都表示出极大的兴趣。可以认为,这是过去 40~50 年间继斑岩铜矿、块状硫化物矿(包括 VMS 型和 SEDEX 型)、浅成低温热液型金矿之后,矿床学研究和勘查的又一个新高潮。尽管 Hitzman 等(1992)当初将其限定为元古代,但现有资料表明,此类矿床从太古代到中生代、新生代都有分布,而且,除 Fe、Cu、U、Au、REE 外,有些矿床还不同程度地含有钴、银、铋、钼、氟、碲、硒,甚至锡、钨、铅锌和钡等元素(Niiranen, 2005)。目前,对此类矿床统一使用的名称为铁氧化物-铜-金型矿床(iron oxide-copper-gold deposits),简称为 IOCG 型矿床。基鲁纳型铁矿仅包含铁或铁-铜元素,被认为是 IOCG 型矿床的一个端员组成。

在中国,对此类矿床的研究刚刚起步,张兴春等(2003)和王绍伟(2004)介绍了此类矿床的国际研究现状。在过去几年中,笔者在执行中国地质调查局的《中国矿床模型》项目时,积极倡导开展对这类矿床的研究和勘查,提出长江中下游宁芜-庐枞地区的玢岩铁矿和海南石碌铁矿即属此类矿床。最近,许德如等(2007)初步论述了石碌铁钴铜(金)矿床可能是一个 IOCG 型矿床。

本文系统介绍和全面评述了 IOCG 型矿床的研究现状,以期进一步促进对 IOCG 型矿床的研究和勘查。

1 氧化铁-铜-金(IOCG)型矿床的定义

Sillitoe(2003)将铁氧化物-铜-金(IOCG)型矿床定义为含有大量磁铁矿和(/或)赤铁矿的矿床,并伴有黄铜矿±斑铜矿,矿产组合变化范围大,与一定的构造-岩浆环境有关。IOCG 型矿床与深成侵入岩及同时期活动的断裂有密切的关系。根据矿床形态、岩性和构造特点,IOCG 型矿床可分为以下几种类型 脉状、热液角砾岩型、矽卡岩型、沿层交代层状(mantos)和前几项(或部分)的复合型。脉状矿床往往产在侵入岩体内,尤其是等粒辉长质闪长岩和闪长岩中,而大型矿床则出现在距侵入岩体接触带 2 km 内的火山-沉积序列中。IOCG 型矿床通常与沿断裂侵入的闪长质成分的岩墙有关,伴随有钠质、钙质和钾质或复合性的蚀变作用,从侵入岩体向上或向外,蚀变分带从磁铁矿-阳起石-磷灰石变成镜铁矿-绿泥石-绢云母,含有矿化元素 Cu-Au-Co-Ni-As-Mo-U-LREE,可以见到矽卡岩围绕闪长岩体接触带展布。

2 IOCG 型矿床的全球时空分布特点

从目前的研究和报道来看,在形成时间上,IOCG 型矿床从太古宙至新生代均有展布,在空间上,遍及北美洲、南美洲、亚洲、欧洲、澳洲以及非洲的一些地区(图 1),每个地区都包含几个或几十个矿床。总体来讲,这些地区以富集氧化铁为特征,而 Cu、Au、Co 和 REE 一般都是副产物。地球上最早的 IOCG 型矿床位于巴西的 Carajas 地区,其形成时代为晚太古代,时间为 2.35~2.75 Ga(Tazava et al., 2000;Dreher et al., 2008)。很多 IOCG 型矿床形成于元古宙,包括南澳大利亚的奥林匹克坝、昆士兰西北部的 Cloncurry 地区、澳大利亚北部的红岸(Redbank)地区、中国的白云鄂博、加拿大育空地区的 Wernecke 山及大熊(Great Bear)岩浆带、美国密苏里东南的旧金山地区、瑞典的基鲁纳地区(Hitzman et al.,1992)、芬兰的 Kolari 和 Misi 地区(Niiranen, 2005),其形成时代为 1 900~1 600 Ma。还有一些 IOCG 型矿床形成于古生代,伊朗中部 Bafq 矿集区内 IOCG 型矿床的成矿时代为 515~529 Ma(Torabandetal.,2007)。在南美大陆西缘的智利和秘鲁,发育

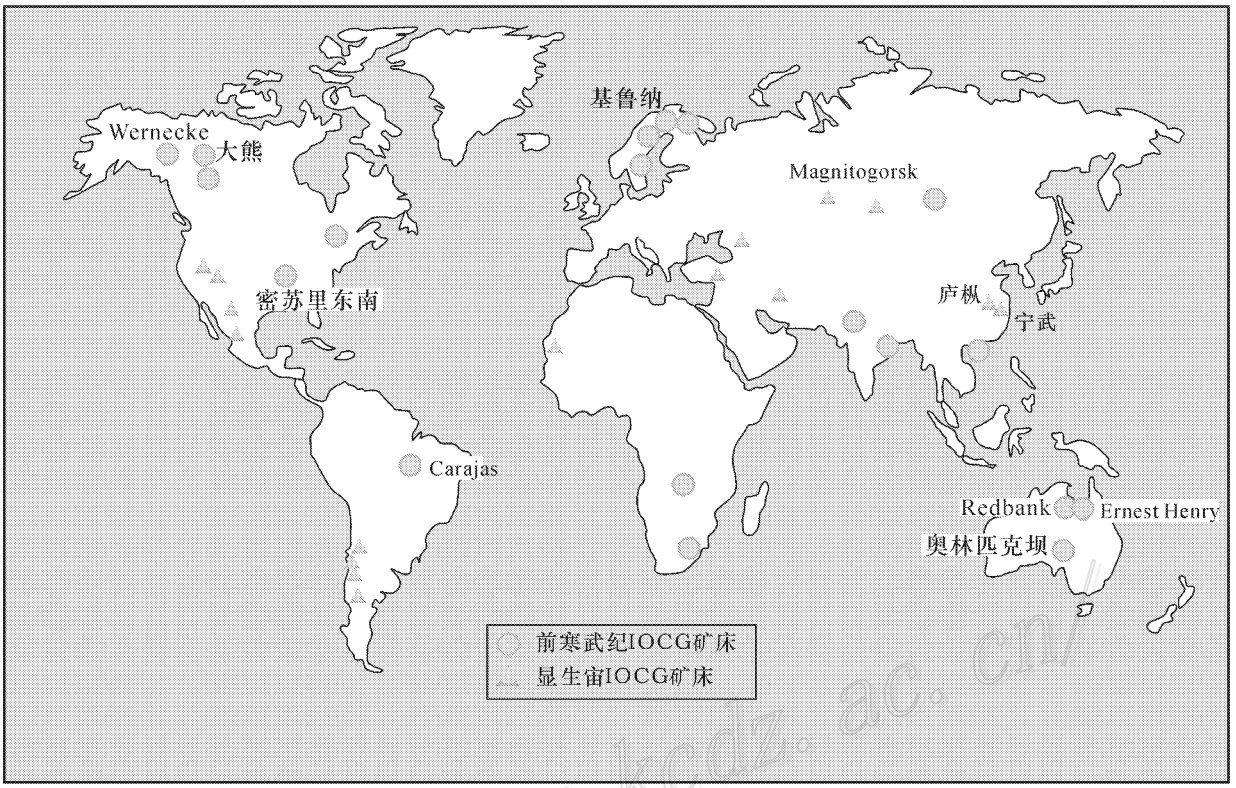

图 1　全球主要 IOCG 型矿床及成矿省的分布（根据 Hitzman et al.，1992 修改）

Fig. 1　Global distribution of IOCG deposits and related metallogenic provinces (modified from Hitzman et al., 1992)

一条与著名的新生代斑岩铜矿带相平行的 IOCG 矿带，其成矿时代为 165～112 Ma（Sillitoe，2003）。据 Dow 等（2000）报道，在阿根廷西北部的 Salta 省境内，产有 2 个中新生代 IOCG 型矿床（Arizario 和 Lindero）。墨西哥 Durago 地区的 Cerro de Mercado 矿床（Lyons，1988；Williams et al.，2005）、美国犹他州的铁泉矿床和智利的 El Laco 铁矿床被认为是新生代的 IOCG 型矿床。Herrington 等（2000）描述了俄罗斯乌拉尔南部的古生代 Magnitogorsk 超大型矽卡岩铁矿，认为其可能是 IOCG 型矿床，但尚需进一步工作。中国东天山晚古生代的沙泉子和雅满苏含铜铁矿床可能属于此类，同样需要进一步开展研究；而宁芜-庐枞地区的几十个矿床则可与基鲁纳式铁矿床进行对比，按照新的定义可将其归为 IOCG 型矿床组合，宁芜研究项目编写小组（1978）所建立的玢岩铁矿模型，在今天来看，作为 IOCG 矿床仍然具有重要的示范作用。最近几年的精确测年表明，这些玢岩铁矿的成矿年龄为 122～125 Ma（余金杰等，2002；Mao et al.，2006）。

3　主要成矿环境

对于 IOCG 型矿床的成矿环境，Hitzman 等（1992）最早认为此类矿床出现在克拉通或大陆边缘，与伸展构造具有密切的时空关系（图 2）。事实上，大多数矿化区沿大陆边缘主要构造带分布。这种伸展构造体系为大量的岩浆流体从高分异的岩浆房向外流动提供了空间。伸展构造带内的断裂往往成为流体向地壳浅部流动的通道。正断层则有助于大量大气降水的深循环和加热。相对低温的流体可能指示大气降水或变质流体参与了成矿作用，也许跟大气降水或变质流体与岩浆流体的混合有关。

随着研究程度的提高以及越来越多的 IOCG 型矿床被鉴别出来，现已有的资料表明，此类矿床出现于 3 种环境：①与非造山岩浆有关的大陆地块内部（如奥林匹克坝）；②与中性岩浆有关的较年轻大陆边缘弧（如南美安第斯）；③褶皱和推覆带（Mount Isa 线形褶皱带内的矿床）。Williams 等（2005）则认为，

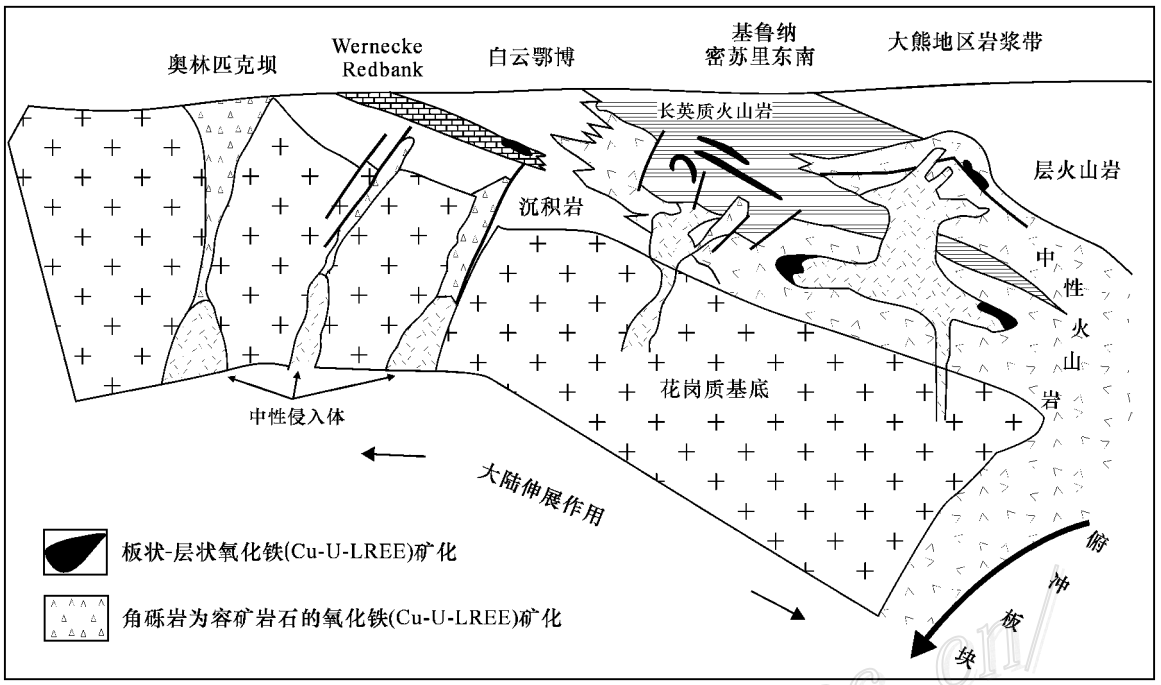

图 2 氧化铁(Cu-U-REE-Au)矿床的构造环境及赋矿岩石序列示意图(据 Hitzman et al.,1992)
所有的矿床都出现在大陆边缘伸展带或裂谷带

Fig. 2 Schematic representation of the tectonic setting and host rock sequence for iron oxide (Cu-U-REE-Au) deposits (after Hitzman et al., 1992)

这类矿床缺乏明确的构造环境控制。Groves 等(2007)反对 Wiliams 等(2005)的上述提法,认为:"如果仅考虑前寒武纪大型-超大型矿床,这些矿床(包括巴西的 Carajas 地区,澳大利亚的奥林匹克坝,南非的 Plabora)都位于太古宙大陆边缘 100 km 以内或靠近太古宙与元古宙岩石界面附近;它们在时空上都与克拉通内非造山型花岗岩或 A 型花岗岩有关,与板块俯冲有关,或与由地幔柱导致的次大陆岩石圈地幔部分重熔有关,因此说,构造环境很重要"。瑞典和芬兰北部赋存基鲁纳超大型铁矿及其周围一系列矿床的地区,在早元古代时期为一大陆边缘,Weihed 等(2005)对其提出了矿床形成的地球动力学模型,强调地幔柱活动与 IOCG 型矿床、铜镍硫化物矿床、层状铅锌矿床、铜金矿床和浅成低温热液矿床的关系(图 3)。与此类同,时代较新的 IOCG 型矿床(如智利北部-秘鲁南部的世界级大型矿集区),在时空上与次碱性和碱性花岗岩有关,其构造环境为与板块俯冲有关的大陆边缘弧,矿床产于长期活动的平行断裂带内,受压扭构造和盆地反转所支配。伊朗中部的 Bafq 铁矿集中区位于寒武纪 Kashmar-Kerman 构造带内,构造环境属大陆边缘火山深成弧(Forster et al.,1994;Torab et al.,2007)。中国长江中下游宁芜-庐枞白垩纪盆地中 129~122 Ma 的 IOCG 铁矿(玢岩铁矿)位于中国东部大陆边缘,与同时代的中基性火山-次火山岩有关,是白垩纪岩石圈拆沉过程在地壳的响应。白云鄂博 IOCG 型矿床位于华北克拉通北缘,其形成环境为大陆被动边缘元古宙裂谷带。

4 与成矿有关的岩浆岩

全球典型的 IOCG 型矿床或矿集区〔如澳大利亚东部 Gawler 克拉通内的奥林匹克坝和凸山(Prominent Hill),以及昆士兰 Cloncurry 地区的 Ernest Henry;巴西 Carajas 地区的 Salobo, Critalino, Sossego, Alemão;智利的 Candelaria 和 Manto Verde〕的成矿作用在时空上与岩浆岩关系密切。与 IOCG 型矿床有关的花岗质岩石大都显示出高钾到橄榄安粗岩的性质,仅巴西 Salobo 花岗岩为偏铝到弱过铝组分,该岩石由长石、石英、辉石和角闪石组成,缺少碱性矿物。单从岩性上来看,与 IOCG 型矿床有关的岩石主要为闪长岩、辉石闪长岩和花岗闪长岩,也

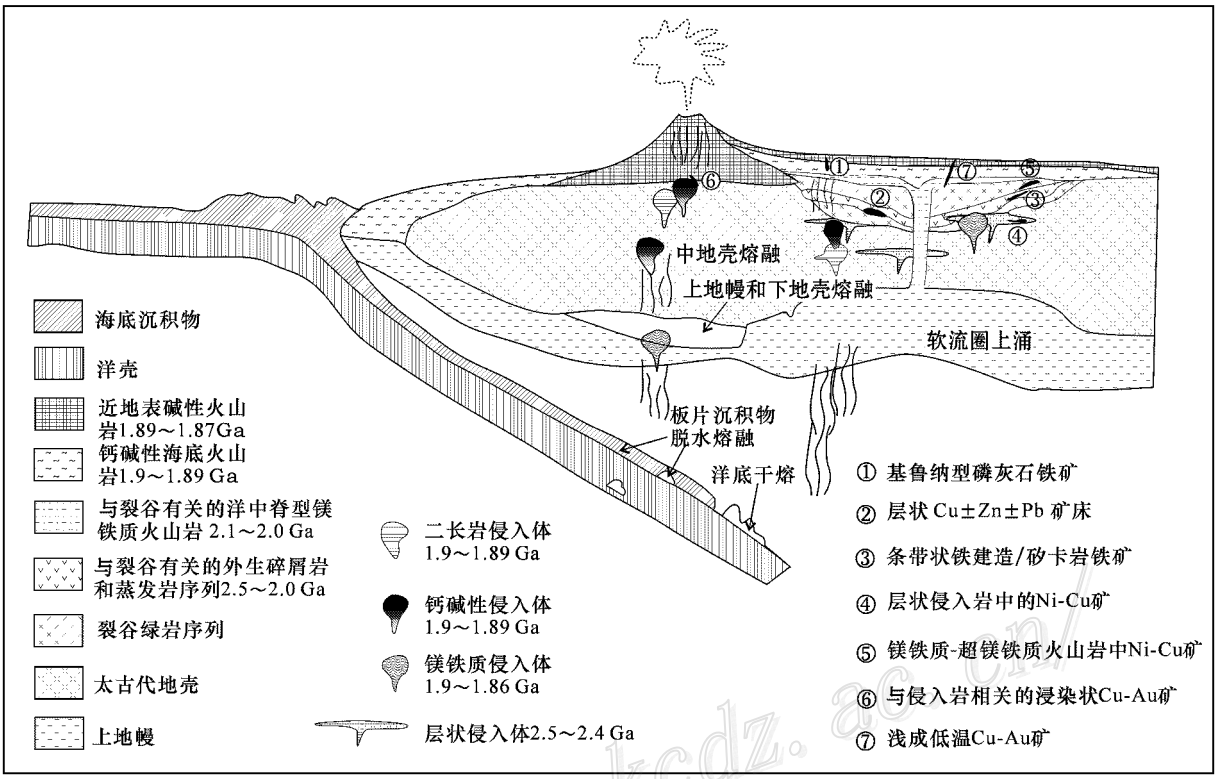

图 3　北欧 IOCG 型矿床成矿的地球动力学特征示意图（据 Weihed et al.，2005）

这一总体构造剖面示意图表明，主岩、构造环境与 IOCG 型矿床及其他与绿岩有关矿床之间的关系。该剖面示意图未特别强调时间关系，但总体在约 500 Ma 之间（2.45～1.85 Ga），从陆内向 Karelain 克拉通大陆边缘裂谷演化

Fig. 3　Key geodynamic features of IOCG deposits by Weihed et al.（2005）

The generalized tectonic section illustrates the relationship between host rocks, tectonic setting and IOCG deposits and other greenstone-related ore types. The section is not meant to illustrate specific temporal relationships, but is a generalization over 500 million years of basically intracontinental to continental margin evolution of the rifted Karelian craton between 2.45 and 1.85 Ga

http://www.kcdz.ac.cn/

有花岗岩。花岗质岩石在成分上虽有差别，但都属于磁铁矿系列花岗岩类或 I 型花岗岩，跟与斑岩铜金矿有关的花岗质岩石类似，两者的氧化-还原电位和分异程度基本相同。在 Rb-（Y + Nb）图解（Pearce et al.，1984）上，花岗质岩石的形成环境为大陆边缘或板内，而不是造山带或同碰撞环境，这与上述成矿环境是一致的。宁芜-庐枞盆地内与 IOCG 铁矿有关的岩石组合为辉长岩、辉石闪长岩、石英闪长岩、石英二长岩和花岗岩，稍晚出现碱性岩类，而与矿化有关的岩石都是辉石闪长岩类（宁芜研究项目编写小组，1978）。

另外，Crease（1996）和 Pollard 等（2000）注意到，镁铁质岩和超镁铁质岩与花岗质岩石组合同时出现，这些镁铁质岩石与铜镍硫化物矿化有关。他们认为，这些幔源岩浆为花岗质岩石在下地壳发生部分熔融提供了热源。Sillitoe（2003）推测，相对基性的岩浆作用有利于解释矿床内为何出现 Cu-Au-Co-Ni-As-Mo-U 元素组合。

5　矿体形态特征及围岩蚀变

矿体形态是一定成矿作用的遗迹，在某种程度上可以反映出矿床的形成过程。总体上看，IOCG 型矿床是一种后生矿床，其矿体形态可分为脉状、筒状、板状、层状（或 manto 矿体）和不规则状。与其他类型矿床相比，IOCG 型矿床的最大特点是广泛发育角砾岩筒矿体。例如，奥林匹克坝矿床的主矿体位于一个巨大的角砾岩筒中（Hitzmanet al.，1992）；加拿大育空地区 Wernecke 山一带矿床的主矿体也受控于角砾岩筒（Bell，1986）；瑞典基鲁纳地区出露 40 个铁-磷矿床，其矿化主要呈角砾岩状，也包括层状或层控型（Bergman et al.，2001）。在南美安第斯成矿带中，正如 Sillitoe（2003）所述，除了脉状矿体之外，局部可见独立存在的角砾岩筒矿体（如 Carrilillo

de las Bombas，Tersa de Colmo)和矽卡岩矿体(如 San Antonio，Panulcillo，Farola 等)。当多个类型的矿体复合存在时，就构成超大型矿床，如超大型的 Candelaria-Punta del Cobre 矿床就包括脉状、角砾岩筒状、细网脉状及沿层交代的 manto 等矿体(图 4)。中国宁芜盆地内凹山铁矿的主矿体位于辉石闪长玢岩接触带，产于大型角砾岩筒中。事实上，玢岩铁矿模型(宁芜研究项目编写小组，1978)是解释 IOCG 型矿床的最好例子。玢岩铁矿由各种类型的矿体组成，包括：由块状、角砾状和浸染状矿石组成的筒状或板状矿体，沿岩层交代的层状(或 manto)矿体，沿裂隙(在岩体或围岩内)形成的脉状矿体，以及沿岩体接触带形成的不规则状矿体。

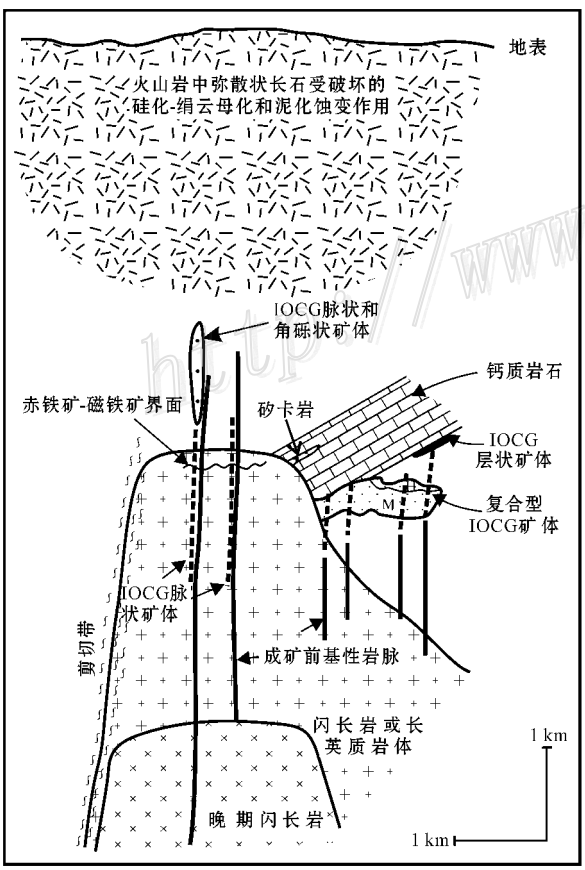

图 4 中安第斯沿海科迪勒拉 IOCG 矿床类型概要图
(据 Hitzman et al.，1992 修改)

大矿床由复合类型矿化组成，脉状角砾岩筒型(包括沿层交代的角砾岩化)矿化出现在浅部，故成矿围岩通常是火山成因的岩石主要热液铁氧化物从下到上，由磁铁矿到镜铁矿。来自深部的岩浆流体沿同源的岩墙向上运移和成矿

Fig. 4 Schematic styles of IOCG deposits in the coastal Cordillera of the central Andes
(modified from Hitzman et al.，1992)

在研究早期，Hitzman 等(1992)提出，IOCG 型矿床的围岩蚀变通常是很强烈的，蚀变类型依赖于围岩的性质及矿化蚀变的深度。总体来讲，在深部，蚀变作用为钠质蚀变组合，在中浅部，为钾质蚀变组合，在浅表，为绢云母化和硅化(图 5)。需要指出的是，这一整体的理论蚀变模型，主要来自于对奥林匹克坝矿床的观察和研究。在瑞典北部的基鲁纳地区，矿区的围岩蚀变没有如此明显的分带现象，但 Smith 等(2007)还是鉴定出有 2 次钾化与 2 次钠化交替出现，钠长石-阳起石-磁铁矿及黑云母-钾长石-方柱石是最主要的蚀变类型。一般来讲，以磁铁矿为主的矿化以钠质蚀变为主，以赤铁矿为主的矿化则以钾质蚀变为主。例如，在澳大利亚的 Lightning Creek 矿区，其蚀变矿物组合为钠长石-磁铁矿-石英，出现在富铁矿体内，可见到钠长石呈钾长石假象，磁铁矿脉周围出现浸染状磁铁矿-单斜辉石蚀变(Perring et al.，2000)。在加拿大西北部的大熊岩浆-成矿带，其主体蚀变为磁铁矿-磷灰石-阳起石组合，磷灰石和阳起石是矿体中的主要脉石矿物(Hildebrand，1986)。

中国宁芜-庐枞地区的 IOCG 铁矿发育有比较清楚的蚀变分带，其下部是磁铁矿-钠长石化带，中部为磁铁矿-透辉石(阳起石)-磷灰石(-绿泥石-绿帘石)带，上部为泥化、硅化和黄铁矿-明矾石-硬石膏化带(宁芜研究项目编写小组，1978)，最明显或最有代表性的蚀变是钠质蚀变组合。

6 IOCG 型矿床的形成过程探讨

由于所有的 IOCG 型矿床在时空上与岩浆岩的关系非常清楚，绝大多数研究者都认同这两者之间的成因联系，因而，在找矿勘查过程中始终把辉石闪长岩和闪长岩作为找矿评价的主要标志之一。关于 IOCG 型矿床的形成过程，争议较大，其焦点在于成矿物质是否主要来源于岩浆热液。对此，存在两种观点，即岩浆流体成矿(Hitzmanet al.，1992；Pollard etal.，2000)以及加热的盆地流体成矿(Barton et al.，1996)。这两种观点都认为岩体与成矿有着密切的关系，只是岩体所起的作用不同，前者强调岩体的能源和物质源，而后者则强调岩体的能源。

稳定同位素研究表明，IOCG 型矿床的形成与相关岩体有关，例如，硫同位素值显示为岩浆来源(Marschiket al.，2001；Sillitoe，2003；Oliver et al.，2004)，尽管在一定程度上，金属和硫可以由不同类型

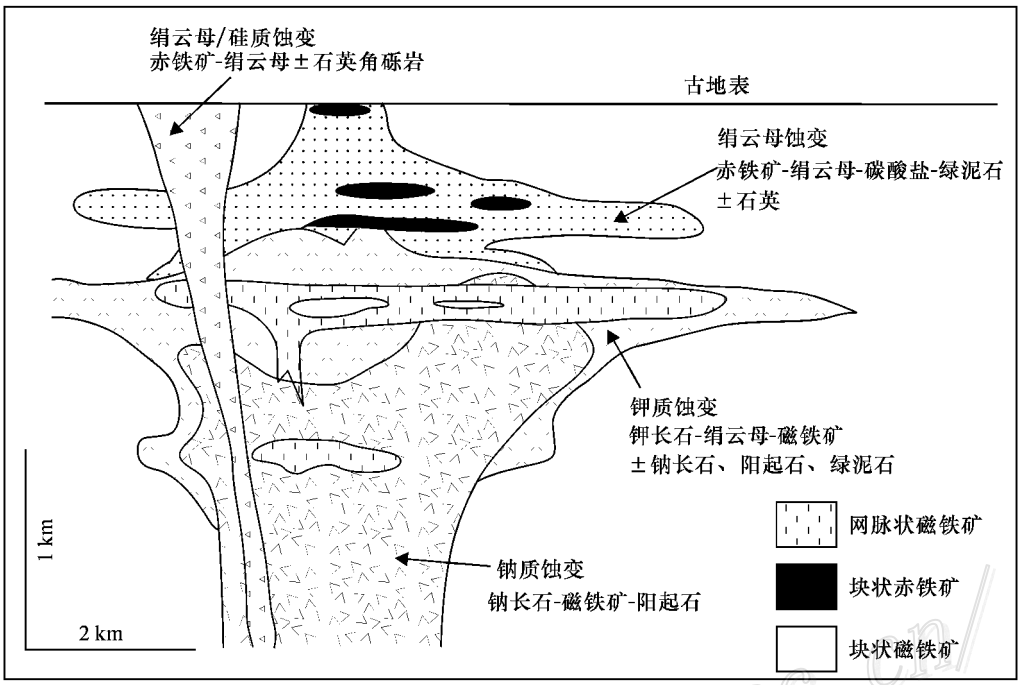

图 5　IOCG 型矿床的蚀变分带剖面图(据 Hitzman et al.,1992)

Fig. 5　Schematic cross section of alteration zoning in IOCG deposits (after Hitzman et al., 1992)

的流体搬运,硫也可能是由流体从附近的岩体或火山岩中萃取而来。钠(-钙)质蚀变的稳定同位素研究也表明岩浆流体为最主要来源(Perring et al.,2000;Mark et al.,2004;Oliver et al. 2004)。Pollard(2001)提出,钠(-钙)质蚀变可能由类似于斑岩铜金矿岩浆中的不混溶 H_2O-CO_2-NaCl 流体所形成。与矿化有关的流体包裹体内普遍存在 CO_2 也是岩浆来源的一个标志。CO_2 的存在可以影响硅酸盐熔融体与流体之间的碱质配分,有可能生成具高 Na／K 比值的卤水,这种卤水有可能导致广泛钠质蚀变作用的形成。Pollard(2006)认为,与 IOCG 矿化有关的岩体的侵位深度为 2～15 km,许多 IOCG 型矿床的形成深度比典型的斑岩铜矿床深得多。在这样的深度,岩体结晶过程的机械能量释放不足,不可能在上部围岩产生破裂而形成斑岩型矿床,流体只能沿岩体侵位前的断裂成矿,或沿可交代的地层形成 manto 矿床(图 6)。矿化可出现在构造的交汇部位(如 Manto Verde),或构造与地层的不整合界面(如 Candelaria),以及平移断层的虚脱部位(如 Salobo)。在某些情况下,当矿床在浅部产出时,矿化位于角砾岩筒内或呈脉状(如奥林匹克坝、Alemão)。

Barton 等(1996)提出了"盆地蒸发岩物质源模型",认为 IOCG 型矿床的流体具有高的 Cl／S 比值,可能主要是来自与古蒸发岩有关的同生盆地流体,岩浆流体则为次。下伏岩体提供的热源导致盆地流体发生循环,形成热对流系统,与此同时,盆地流体与岩浆流体发生混合,导致矿床的形成。这一模型有助于理解 IOCG 型矿床成矿系统中富集特色元素(亲铁元素和亲石元素)和发生热液蚀变(钠质蚀变和局部的钾质蚀变)的现象。此外,与蒸发岩反应而产生贫硫的卤水也与地质观察相吻合。Oliver 等(2004)综合了澳大利亚 Cloncurry 地区的矿床资料,得出如下认识:① 该地区几个阶段的钠长石化先后叠加,不仅与 1 600～1 500 Ma 期间发生的变质事件有关,而且与 1 550～1 580 Ma 期间 William 岩套侵位所引起的热事件有关;② 该地区内大多数 IOCG 型矿床的形成晚于区域变质作用,而与 William 岩套侵位同时,因而,变质作用无法解释其成因;③ 该地区矿床内钠化围岩的地球化学资料表明,在蚀变过程中,Na 被带入,而 Fe、K、Ba、Rb(±Ca、Sr、Co、V、Mn、Pb、Zn)被带出,被带出的元素主要富集在富铜金的铁矿石中。据此,Oliver 等(2004)将钠质蚀变、高盐度卤水及 IOCG 型矿床的形成联系在一起,建立了 Cloncurry 地区矿床的成因模型:① 卤水在 William 岩套侵入体结晶时被释放;② 循环卤水参与钠化反应;③循环的富金属卤水借助裂隙流动,在

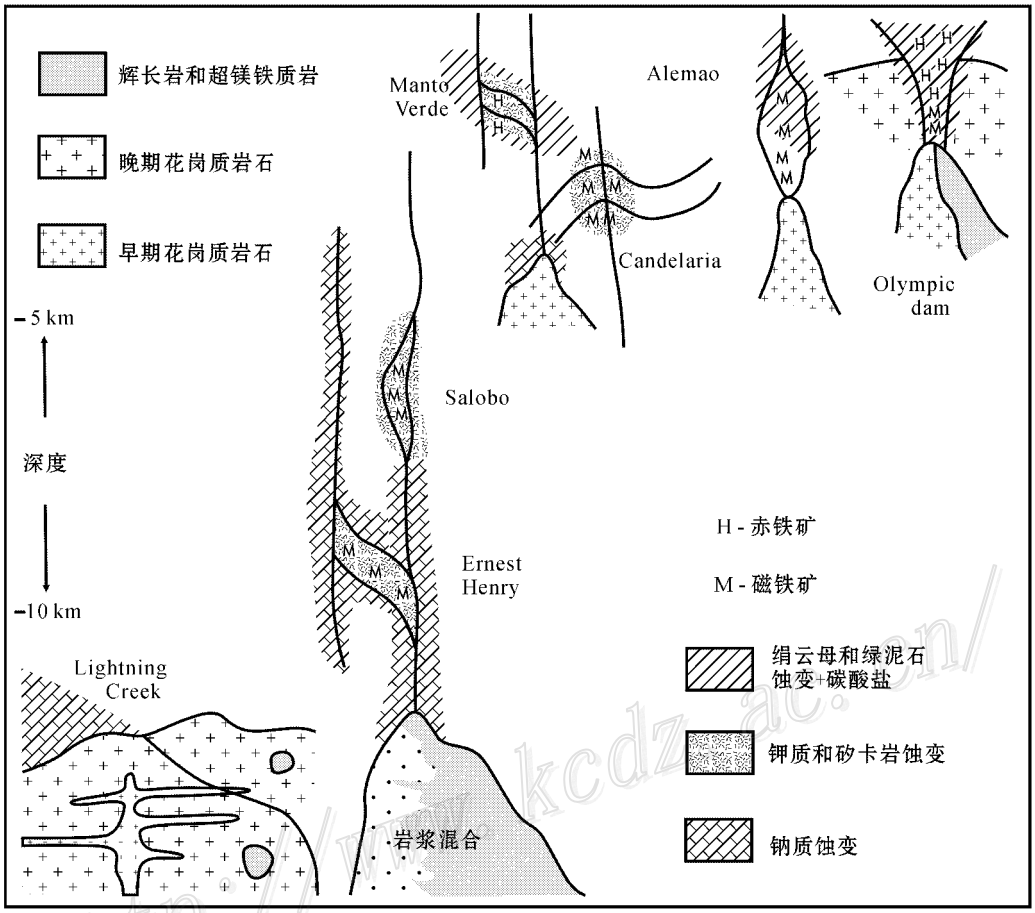

图 6 不同类型 IOCG 矿床的总体模型图(据 Pollard, 2006)

Fig. 6 Comprehensive model showing the varied IOCG deposits(after Pollard, 2006)

适宜的位置(例如构造膨大处)沉淀成矿,尤其是在富金属卤水与富硫围岩发生反应时,或在富金属卤水与富硫的表生流体发生混合时(图 7)。

Barton 等(2004)研究了 IOCG 型矿床的成矿过程,提出了岩浆与非岩浆 2 种成因模型(图 8);又进一步将非岩浆成因模型分为地表或浅部盆地流体模型及变质流体模型。后 2 种非岩浆模型需要提供非岩浆氯化物环境。对盆地流体模型而言,侵入体的作用是驱动非岩浆卤水的热对流,流体内的盐分可能来自温暖、干旱环境下蒸发的地表水,或来自循环水与先存蒸发盐沉积物的相互作用。与 IOCG 型矿床有关的热液活动被认为发生在中地壳深度。变质模式不需要火成热源,尽管存在同期侵入体并且侵入体向流体提供了热量和组分(如 Fe、Cu)。

总体而言,从目前的研究来看,绝大多数 IOCG 型矿床都与岩浆活动关系密切,非岩浆模型是岩浆成矿模型的补充,可能适用于少数矿床或某一矿床的局部现象。从岩浆分异出来的流体在运移过程中或多或少与其他来源的流体(包括盆地流体、大气降水、古建造水、变质流体或地幔流体)发生混合作用。由于许多盆地中存在蒸发岩层,上侵岩浆一旦吞噬这些膏盐层,或岩浆流体与之发生反应,则有助于形成大型高品位的贫硫富钠的 IOCG 型矿床。到目前为止,尚未见到变质流体形成 IOCG 型矿床的报道,仅限于理论推测。

7 找矿评价标志与勘查

IOCG 型矿床概念的提出,不仅受到学术界的积极响应,而且受到工业界的高度重视,近年来,此类矿床已经成为寻找铜金矿的重要目标。尽管把许多过去认为关系不大的一些矿床放到一起遭到一些争议,但是,越来越多的地质勘查工作者则认为这是一种找矿的新思路。这一概念给人们的最大启示是,在一定的地质环境中铁铜金可以密切共生,当发现一种矿产时,可能在一定的部位找到其他矿产,而且

http://www.kcdz.ac.cn/

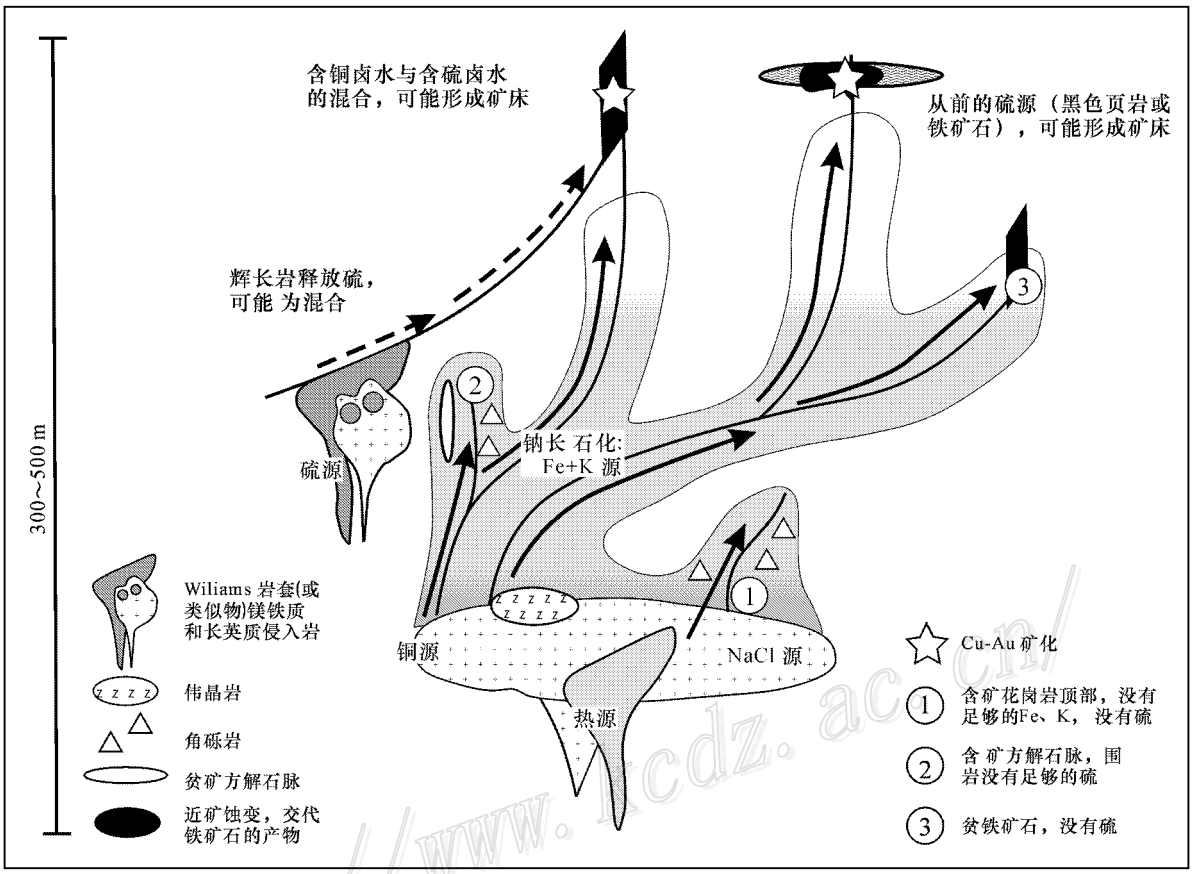

图 7　澳大利亚昆士兰 Cloncurry 地区 IOCG 型矿床的成矿模型(据 Oliver et al.，2004)
实线箭头代表岩体来源卤水的运移路径，虚线箭头代表含硫流体的运移途径

Fig. 7　Genetic model for IOCG deposits in the Cloncurry region, Queensland, Australia (after Oliver et al., 2004)
Solid arrows illustrate the path of the brines derived from intrusions. Dashed arrows illustrate path of the sulphur bearing fluid

还可能找到钴、镍、钼、铀和稀土元素矿产，甚至铋和砷。对于该类型矿床的勘查标志和有效的找矿方法正在积累之中，目前，主要有以下几种：

(1) IOCG 型矿床一般出现在大陆边缘伸展带(包括弧后裂谷和造山带中的局部伸展带)及大陆裂谷带；

(2) 以发育大量氧化铁〔包括磁铁矿和(/或)赤铁矿〕为特征，大多数矿床含有铜铁硫化物和金矿化，像基鲁纳矿床那样的端员组分可以不含铜和金。一旦矿体中有硫化物发育，那么，不仅存在铜金矿床，而且 Co-Ni-As-Mo-U-LREE 等都可能成矿，成为可利用的有用组分；

(3) 无论是起到物质源和(/或)能量源的作用，岩浆岩是成矿的一个重要条件，与成矿有关的岩体通常具有橄榄安粗岩性质，主要岩性为闪长岩、辉石闪长岩和花岗闪长岩，也有花岗岩；

(4) 以破碎的火山岩或火山碎屑岩为成矿围岩时，由于其高渗透性，有利于形成大型复合性质的 IOCG 型矿床，当具有深穿透断裂存在时，其效果更佳，高角度或低缓角度的断层，或者剪切带，能起到构造渗透作用；

(5) 围岩蚀变发育，其最基本的特点是钠化和钾化。钠化以钠长石-磷灰石-阳起石-方柱石(或钠柱石)-绿泥石-磁铁矿为特征，钾化则以钾长石-绢云母-黑云母-碳酸盐矿物为特征。在大多数矿床中，或以钠化为主，或以钾化为主，在个别矿床中这 2 种蚀变同时发育，而且有下部为钠化、上部为钾化的空间分布规律；

(6) 在辉长闪长岩体或闪长岩体接触带，强烈发育接触热变质角岩带和接触交代岩(钠-钙质或钾质蚀变)带，是大型复合性质 IOCG 型矿床很好的指示标志；

(7) 当浅部存在矿化热液角砾和(/或)磁铁矿被交代而形成大量镜铁矿时，指示深部可能存在 IOCG型矿床。广泛发育的磁铁矿-阳起石组合表明

http://www.kcdz.ac.cn/

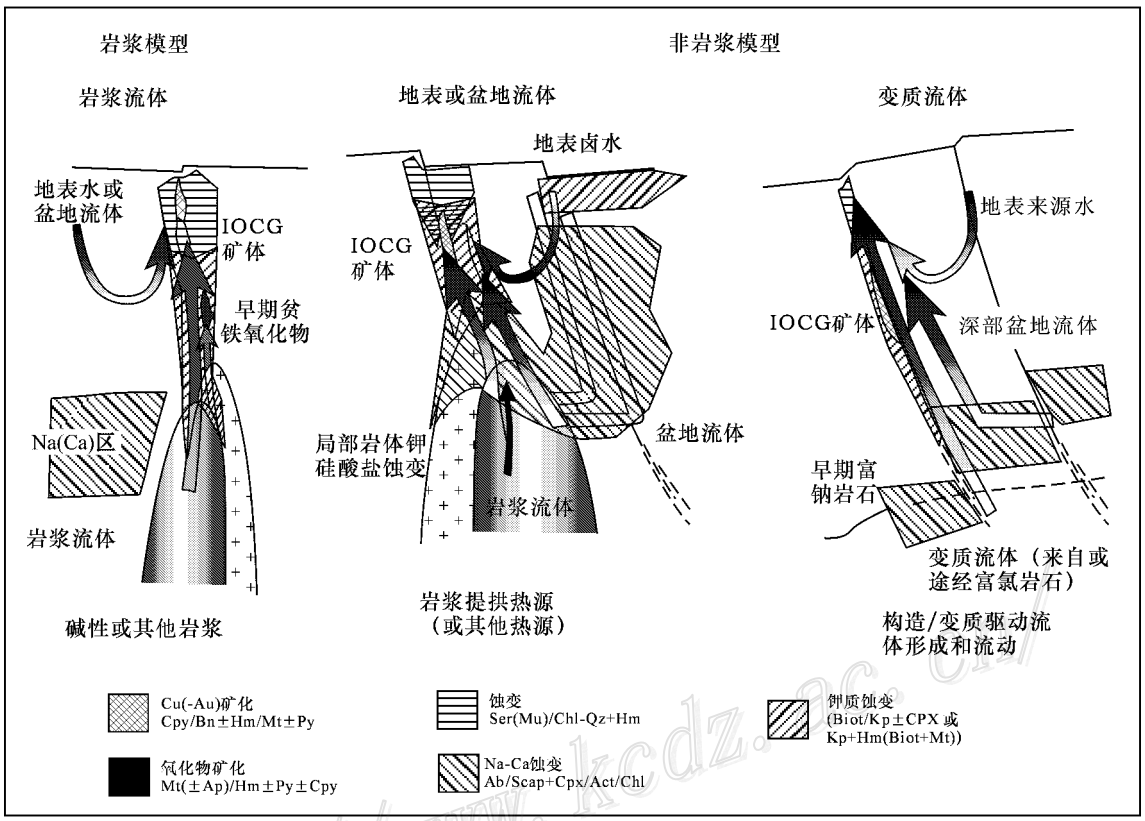

图 8 IOCG 矿床流体特征及其运移途径综合性模型(据 Barton et al.，2004 修改)

矿物代号为：Cpy—黄铜矿；Bn—斑铜矿；Hm—赤铁矿；Mt—磁铁矿；Py—黄铁矿；Ser—绢云母；Mu—白云母；Chl—绿泥石；Qz—石英；Biot—黑云母；Kp—钾长石；Act—阳起石；Cpx—单斜辉石；Ab—钠长石；Scap—方柱石；Ap—磷灰石

Fig. 8 Schematic illustration of flow paths and hydrothermal features for alternative models for IOCG deposits (modified from Barton et al., 2004)

IOCG 型矿床形成相对较深，在深部发现具有经济价值的铜金矿的可能性较小；

(8) 粗晶方解石和铁白云石位于 IOCG 型矿床的顶部或最远离主矿体。在某些矿床中，黄铁矿晕可能指示 IOCG 型矿体的存在；

(9) 由于 IOCG 型矿床富含铁氧化物，常缺少硫化物或硫化物含量低，因此，地球物理是找矿评价的有效手段。在隐伏矿区，使用磁法和重力手段效果最好。成矿区的磁场和重力效应明显，以重力高、中等到高幅度磁异常为标志。

8 对中国 IOCG 型矿床研究的点滴思考

尽管国际上对 IOCG 型矿床的研究如火如荼，但在中国则刚刚起步。长江中下游宁芜和庐枞 2 个盆地中广泛发育的玢岩铁矿，可与基鲁纳式铁矿进行对比，可能属较为典型的 IOCG 型铁矿床。对其他许多矿床，如海南省的石碌铁(铜钴)矿、新疆的雅满苏铁(铜)矿、蒙库铁(铜)矿、云南大红山铁铜矿等等，也值得重新思考，需研究其形成过程，厘定其成因类型，而建立相应的矿床模型尤为重要，只有这样才能推动找矿评价和勘查工作的开展。在 IOCG 型矿床概念提出的初期，Hitzman 等(1992)将白云鄂博列为典型的 IOCG 型矿床，但是，这一认识从一开始就遇到争议。白云鄂博矿床富含磁铁矿和 LREE，具有 IOCG 型矿床的基本特征，但也有一些学者认为，其形成与地幔过程(抑或与碳酸岩浆，抑或与地幔流体交代有关)密切相关。河北邯邢铁矿和湖北大冶铁矿是比较标准的矽卡岩型铁矿，也具有 IOCG 型矿床的某些特点，例如，在深部发现的铜矿体或硫矿体，除了矽卡岩矿体外还有角砾岩筒矿体，存在强烈的钠-钙化蚀变作用，地层中的膏盐层对成矿可能有贡献。与国外的同类研究相类似，如何正确厘定 IOCG 型矿床与矽卡岩型矿床是一个挑战性的科学

问题。可以相信，从 IOCG 型矿床的角度对这些矿床进行深入解剖后，很多问题将会得到合理的解决。只有建立起符合客观规律的矿床模型，才能有效地推动矿产勘查工作。

References

Barton M D and Johnson D A. 1996. Evaporitic-source model for igneous-related Fe-oxide (-REE-Cu-Au-U) mineralization[J]. Geology, 24: 259-262.

Barton M D and Johnson D A. 2004. Footprints of Fe oxide (-Cu-Au) systems[J]. University of Western Australia Special Publication, 33: 112-116.

Bell R T. 1982. Comments on the geology and mineralization of the Wernecke Mountains, Yukon and District of MacKenzie[J]. Can. Geol. Surv. Pap., 279-284.

Bell R T. 1986. Megbreccias in northeastern Wernecke Mountains, Yukon Territory[J]. Can. Geol. Surv. Pap., 375-384.

Bergman S, Kübler L and Martinsson O. 2001. Description of regional geological and geophysical maps of northern Norribotten County[J]. Sveriges Geologiska Undersökning Ba, 56: 110.

Creaser R A. 1996. Petrogenesis of a Mesoproterozoic quartz latite-granitoid suite from the Roxby Downs area, South Australia[J]. Precambrian Research, 79: 371-394.

Dow R J and Hitzman M W. 2000. Geology of the Arizario and Lindero prospects, Salta province, northwestern Argentina[A]. In: Porter T M, ed. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective[M]. Adelaide: Australian Mineral Foundation. 153-162.

Dreher A M, Xavier R P, Taylor B E and Margtini S L. 2008. New geologic, fluid inclusion and stable isotope studies on the controversial Igarapé Bahia Cu-Au deposit, Carajás province, Brazil[J]. Mineralium Deposita, 43(2): 161-184.

Forster H and Jafarzadeh A. 1994. The Bafq mining district in central Iran-A highly mineralized Infracambrian volcanic field[J]. Econ. Geol., 89: 1697-1721.

Groves D I and Bierlein F. 2007. Geodynamic settings of mineral deposit system[J]. Jour. Geol. Soc. London, 164: 19-30.

Hauck S A, Hinze W J, Kendall E W and Adams S S. 1989. A conceptual model of the Olympic Dam Cu-U-Au-REE-Fe deposit: A comparison of central North America and South Australia terranes[J]. Geol. Soc. Am. Abst. With Program, 32-33.

Hauck S A. 1990. Petrogenesis and tectonic setting of middle Proterozoic iron oxide-rich ore deposits: An ore deposit model for Olympic Dam-type mineralization[J]. U.S. Geological Survey Bulletin, 4-39.

Herrington R, Smith M P, Maslennikov V, Belogub E and Armstrong R. 2000. A short review of Paleozoic hydrothermal magnetite iron-oxide deposits of the south and central Urals, and their geological setting[A]. In: Porter T M, ed. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective[M]. Adelaide: Australian Mineral Foundation. 343-353.

Hildebrand R S. 1986. Kiruna-type deposits: Their origin and relationship to intermediate subvolcanic plutons in the Great Bear magmatic zone, Northwest Canada[J]. Econ. Geol., 81: 640-659.

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

Hitzman M W. 2000. Iron oxide-Cu-Au deposits: What, where, when, and why[A]. In: Porter T M, ed. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective[M]. Adelaide: Australian Mineral Foundation. 9-25.

Li Z Q, Hu R Z, Wang J Z, Liu J J, Li C Y, Lin Y P and Ye L. 2002. Lala iron-oxide Cu-Au-U-REE ore deposit, Sichuan China: An example of superimposed mineralization[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 21(4): 258-260 (in Chinese with English abstract).

Lyons J I. 1988. Volcanogenic iron oxide deposits, Cerro de Mercado and Vicinity, Durango, Mexico[J]. Econ. Geol., 83: 1886-1906.

Mao J W, Wang Y T, Lehmann B, Yu J J, Du A D, Mei Y X, Li Y F, Zang W S, Stein H J and Zhou T F. 2006. Molybdenite Re-Os and albite $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of Cu-Au-Mo and magnetite porphyry systems in the Yangtze River valley and metallogenic implications[J]. Ore Geology Reviews, 29: 307-324.

Mark G, Foster D R W, Pollard P J, Willianms P J, Tolman J, Darvall M and Blake K L. 2004. Stable isotope evidence for magmatic fluid input during large-scale Na-Ca alteration in the Cloncurry Fe oxide Cu-Au district, NW Queensland, Australia[J]. Terra. Nova, 16: 54-61.

Marschik R and Fontboté L. 2001. The Candelaria-Punta del Cobre iron oxide Cu-Au(-Zn-Ag) deposits, Chile[J]. Econ. Geol., 96: 1799-1826.

Niiranen T. 2005. Iron oxide-copper-gold deposits in Finland: Case studies from the Peräpohja schist belt and the Central Lapland greenstone belt[D]. Ph. D Thesis, University of Helsinki.

Ningwu Research Group. 1978. The Ningwu porphyrite iron deposits [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).

Oliver N H S, Cleverley J S, Mark G, Pollard P J, Fu B, Marshall L J, Rubenach M J, Williams P J and Baker T. 2004. Modeling the role of sodic alteration in the genesis of iron oxide-copper-gold deposits, Eastern Mount Isa block, Australia[J]. Econ. Geol., 99: 1145-1176.

Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. J. Petrol., 25: 956-983.

Perring C S, Pollard P J, Dong G, Nunn A J and Blake K L. 2000. The Lingtning Creek sill complex, Cloncurry district, Northwest Queensland: A source of fluids for Fe oxide Cu-Au mineralization and sodic-calcic alteration[J]. Econ. Geol., 95: 1067-1089.

Pollard P J. 2000. Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization[A]. In: Porter T M, ed. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective

[M]. Adelaide: Australian Mineral Foundation. 27-41.

Pollard P J. 2001. Sodic (-calcic) alteration in Fe-oxide-Cu-Au districts: an origin via unmixing of magmatic H_2O-CO_2-NaCl-CaCl-KCl fluids [J]. Mineralium Deposita, 36: 93-100.

Pollard P J. 2006. An intrusion-related origin for Cu-Au mineralization in iron oxide-copper-gold (IOCG) provinces[J]. Mineralium Deposita, 41: 179-187.

Roberts D E and Hudson G R T. 1983. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia[J]. Econ. Geol., 78: 799-822.

Scott I R. 1987. The development of an ore reserve methodology for the Olympic Dam copper-uraniam-gold deposit[J]. Resource and Reserves Symposium, Australian Institute of Mining and Metallurgy, 99-103.

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

Smith M, Coppard J, Herrington J and Stein H. 2007. The geology of the Rakkoraijavi Cu-(Au) prospect, Norrbotten: A new iron oxide-copper-gold deposit in North Sweden[J]. Econ. Geol., 102: 393-414.

Tazava E and de Oliveira C G. 2000. The Igarape Bahia Au-Cu-(REE-U) deposit, Caraja mineral province, Northern Brazil[A]. geochemistry and monazite geochronology[J]. Mineralogical Magazine, 71: 347-363.

Torab F M and Lehmann B. 2007. Magnetite-apatite deposit of the Bafq district, Central Iran: Apatite geochemistry and monazite geochronology[J]. Mineralogical Magazine, 71: 347-363.

Wang Q, Wyman D A, Xu J F, Zhao Z H, Jian P, Xiong X L, Bao Z W, Li C F and Bai Z H. 2006. Petrogenesis of Cretaceous adakitic and shoshonitic igneous rocks in the Luzong area, Anhui Province (eastern China): Implications for geodynamics and Cu-Au mineralization[J]. Lithos, 89: 424-446.

Wang S W. 2004. A kind of important hydrothermal deposits: Iron oxide Cu-Au-U-REE deposits[J]. Information on Country Resources, (2): 45-51 (in Chinese).

Weihed P, Arnde N, Billström K, Duchesne J C, Eilu P, Martinsson O, Papunen H and Lathinen R. 2005. Precambrian geodynamics and ore formation: The Fennoscandian Shield[J]. Ore Geology Reviews, 27: 273-322.

Williams P J, Barton M D, Johnson D A, et al. 2005. Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin[J]. Econ. Geol., 100th Anniversary Volume: 371-405.

Xu D R, Xiao Y, Ma C, Hou W, Cai Z R, Fu Q J and Wang L. 2007. The Shilu iron-cobalt-copper-(gold) deposit: A IOCG type of stratabound skarn deposit [J]? Acta Mineralogica Sinica, 27 (Supp.): 45-51 (in Chinese).

Youles I P. 1984. The Olympic Dam copper-uranium-gold deposit, Roxby Downs, South Australia: A comment[J]. Econ. Geol., 79: 1941-1944.

Yu J J and Mao J W. 2002. Albite $^{40}Ar/^{39}Ar$ dating of the Ningwu porphyry iron deposits and its significance[J]. Progress in Natural Sciences, 12(10): 1059-1063 (in Chinese).

Zhang X C. 2003. The characteristics of the overseas iron-oxide Cu-Au deposits and the present situation of the studies[J]. Progress in Earth Sciences, 18(4): 551-557 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

李泽琴,胡瑞忠,王奖臻,刘家军,李朝阳,刘玉平,叶 霖. 2002. 中国首例铁氧化物-铜-金-铀-稀土型矿床的厘定及其成矿演化[J]. 矿物岩石地球化学通报,21(4): 258-260.

宁芜研究项目编写小组. 1978. 宁芜玢岩铁矿[M]. 北京:地质出版社.

王绍伟. 2004. 重视近20年认识的一类重要热液矿床——铁氧化物-铜-金(-铀)-稀土矿床[J]. 国土资源情报,(2): 45-51.

许德如,肖 勇,马 驰,侯 威,蔡周荣,符启基,王 力. 2007. 石碌铁-钴-铜(金)多金属矿床:一个IOCG型层控矽卡岩矿床[J]? 矿物学报,27(增刊): 307-308.

余金杰,毛景文. 2002. 宁芜玢岩铁矿钠长石^{40}Ar-^{39}Ar定年及意义[J]. 自然科学进展,12(10): 1059-1063.

张兴春. 2003. 国外铁氧化物铜-金矿床的特征及其研究现状[J]. 地球科学进展,18(4): 551-557.

http://www.kcdz.ac.cn/