

氧化铁型铜-金 (IOCG) 矿床的地质特征、成因机理与找矿模型

聂凤军¹ 江思宏¹ 路彦明²

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 武警黄金地质研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要: 氧化铁型铜-金 (IOCG) 矿床主要指那些铁氧化物含量大于 20% 的铜-金矿床, 其成矿理论研究和找矿勘查倍受国内外地质学家所关注。笔者对国外重要 IOCG 矿床地质特征进行了总结, 同时, 对其成矿作用和找矿模型进行了讨论。初步研究结果表明, 尽管单一铁矿床和 IOCG 矿床同属氧化型成矿体系, 但是它们分别为该体系的两个端元组分, 因此, 不应该将单一铁矿床列入 IOCG 矿床之列。另外, 根据对澳大利亚 IOCG 矿床野外考察时所获经验, 笔者对中国新疆、云南、安徽、四川和海南等省 (区) 铁-铜矿床的产出环境、地质特征和成矿作用进行了对比分析, 其中雅满苏、天湖、老山口、乔夏哈拉、大红山、鹅头厂、拉拉、大小岭和石碌矿床与典型 IOCG 矿床存在许多相似之处, 它们是否可划属为 IOCG 矿床尚值得进一步工作。

关键词: 氧化铁型铜-金 (IOCG) 矿床; 单一铁矿床; 地质特征; 成矿机理; 找矿模型

中图分类号: P618.41; P618.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)06-1074-14

1 问题提出

氧化铁型铜-金 (Iron Oxide Copper-Gold, 简称 IOCG) 矿床主要指那种铁氧化物 (低钛磁铁矿和赤铁矿) 含量大于 20% 的铜-金 (或银、铌、稀土元素、铀、铍和钴) 矿床^[1-2]。鉴于此类矿床具有规模大、品位高、元素多、埋藏浅和易采选等特点, 因此, 在过去 25 年中, 其成矿理论研究和找矿勘查工作倍受国内外地质学界所关注^[3-10]。许多学者认为, “氧化铁型铜-金矿床”概念的重要性、实用性和合理性完全可与“火山成因块状硫化物矿床 (VHMS)”、“密西西比河谷型 (MVT) 矿床”、“喷流沉积型 (SEDEX)”和“斑岩型矿床”等概念相比^[1-2, 11]。另外, 随着传统硫化铁型铜多金属矿床资源储备量急剧减少和已有老矿山周边找矿勘查难度的不断增大, 人们必须寻找新的矿床类型和开拓新的找矿领域, 进而缓解铜、金、

铀和其他金属的供给矛盾。有专家认为, 随着氧化铁型铜-金矿床成矿理论模型的不断完善和找矿勘查工作的深入进行, 以氧化铁为主体的铜-金矿床完全有可能取代以传统硫化铁为主体的铜多金属矿床, 从而成为铜、金、铀、钴、铍、铌和稀土元素以及其他金属开发利用的对象^[11]。如果了解到上述情况, 人们就不难解释 IOCG 矿床成因理论研究和找矿勘查工作如火如荼开展的原委。

在中国, 张兴春^[12]、王绍伟^[13]和毛景文等^[10]曾对氧化铁型铜-金 (IOCG) 矿床的国外研究现状进行过综合性评述, 并且讨论了在一些重要成矿带寻找此类矿床的可行性。许德如等^[14]通过对海南石碌矿床的研究, 将其确定为氧化铁型铜-金矿床。聂凤军和路彦明^②认为东准噶尔地区的老山口和乔夏哈拉铁-铜-金矿床与典型 IOCG 矿床存在许多相似之处, 完全可以划归在 IOCG 矿床之列。尽管国内许

收稿日期: 2008-11-19; 改回日期: 2008-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40573025) 和国家科技支撑项目 (2007BAB25B02) 资助。

作者简介: 聂凤军, 男, 1956 年生, 研究员, 博士生导师, 从事金属矿床地质和地球化学研究; E-mail: nfj@mx.cei.gov.cn。

① 聂凤军. 铜金矿床成矿理论新发展. 中国矿业报, 2008, 第 2163 期 (B4 版)。

② 聂凤军, 路彦明. 老山口成矿带宜找氧化铁型铜金矿床. 地质勘查导报, 2008, 第 598 期 (第 3 版)。

多学者对氧化铁型铜-金矿床的概念模型有了初步了解,同时也认识到此类矿床在未来成矿理论研究和找矿勘查工作中的重要地位,但是人们对于该矿床详细地质特征和形成过程所知甚少,对于如何确定此类矿床与单一铁矿床的成因关系尚不十分清楚,对于如何去发现此类矿床不知道从哪里入手。针对上述存在的问题,笔者对澳大利亚代表性氧化铁型铜-金矿床进行了系统野外地质调查,同时结合对此类矿床的成因理论和找矿模型的理解,这里对其地质特征、成因机理和找矿模型做一粗略讨论。

2 何谓氧化铁型铜-金(IOCg)矿床

自 20 世纪 70 年代起,随着一系列高新技术在地球科学领域的应用,找矿勘查活动获得了巨大成功,其最明显的标志就是在全球范围内找到一大批铜-金矿床。与此同时,人们也开始注意到部分新发现矿床与传统铜-金矿床存在明显差异(表 1),这些矿床包括:(1)1975 年在澳大利亚南澳州发现的奥林匹克坝(Olympic Dam)铜-金-铀矿床;(2)1980 年在澳大利亚昆士兰州找到的斯坦(Starra)铜-金矿床;(3)1987 年在智利发现的拉坎德拉利亚(La Candelaria)铜-金矿床;(4)1988 年在澳大利亚南澳

州找到的奥斯本(Osborne)铜-金矿床;(5)1991 年在澳大利亚昆士兰州发现的欧内斯-亨利(Ernest-Henry)铜-金矿床;(6)1996 年在巴西找到的萨洛博(Salobo)铜-金矿床(图 1)。除了上述矿床之外,世界上与其相类似的铜-金(或银、铌、稀土元素、铀、铋和钴))矿床还有很多,例如,澳大利亚的阿卡帕利斯(Acropolis)、蒙塔(Moonta)、奥科坝(Oak Dam)、博罗敏特山(Prominent Hill)、威里达威尔(Wirrda Well)、艾洛斯(Eloise)、蒙特艾洛特(Mount Elliot)、北博特(North Portia)、基库(Gecko)、匹库/九诺(Peko/Juno)和瓦日沟(Warrego);巴西的克里斯塔利努(Cristalino)、阿莱毛/伊加拉佩-巴伊亚(Alemao/Igarapé Bahia)和索塞克(Sossego);加拿大的苏迪尼(Sue-Dianne)、尼科(NICO)、韦尔内克(Wernecke)、艾安兰基(Iran Range)和柯吉博(Kwyjibo);智利的艾尔-阿尔嘎洛博(El Algarrobo)、艾尔-罗莫尔(El Romeral)、曼托-威尔德(Manto Verde)和蓬塔-库博力(Punta del Cobre);中国的白云鄂博(Bayan Obo)、石碌(Shilu)和老山口(Laoshankou);伊朗的楚古斯特(Chogust)、查杜-马禄(Chadoo Malu)和什查弘(Seh Chahoon);毛里塔尼亚的阿科居特(Akjoujt);

表 1 部分代表性氧化铁型铜-金矿床矿石量及其铜和金平均含量^①
Table 1 The ore reserve and grade of the representative IOCg deposits

矿床名称	所在国家	矿石量(百万吨)	铜/%	金/10 ⁻⁶	矿床英文名称
奥林匹克坝 ^②	澳大利亚	3810	0.96	0.28	Olympic Dam
欧内斯特-亨利	澳大利亚	167	1.10	0.55	Ernest Henry
奥斯本	澳大利亚	15.5	3.0	1.1	Osborne
斯坦	澳大利亚	7.40	1.90	3.80	Starra
帕拉博鲁瓦 ^③	南非	850	0.50	-	Phalaborwa
艾迪克	瑞典	355	1.10	0.20	Aitik
苏迪尼	加拿大	17	0.72	2.7	Sue Dianne
曼托-威尔德	智利	600	0.50	0.10	Manto Verde
拉坎德拉利亚	智利	470	0.95	0.22	La Candelaria
萨洛博	巴西	789	0.96	0.52	Salobo
克里斯塔利努	巴西	500	1.0	0.3	Cristalino
索塞克	巴西	355	1.1	0.28	Sossego
伊加拉佩-巴伊亚	巴西	170	1.50	0.80	Igarape Bahia

注:①尽管在中国白云鄂博铁-铌-稀土元素矿床中尚未找到具有工业价值的铜和金矿体,但是由于铌和稀土矿体产出规模巨大,并且与奥林匹克坝矿床存在许多相似之处,因此,许多学者建议将其划归为氧化铁型铜-金矿床。该矿床的矿石量为 16 亿 t,铁、铌和稀土元素的平均含量分别为 35%、0.13%和 6%;②除铁和铜外,U₃O₈和 REO 的平均含量分别为 0.33%和 0.24%-0.45%;③除铜外,金、银、铀、钼族和稀土元素亦可作为伴生组分回收;④表中数据主要引自 Corriveau^[1]和 Cox and Singer^[2]。

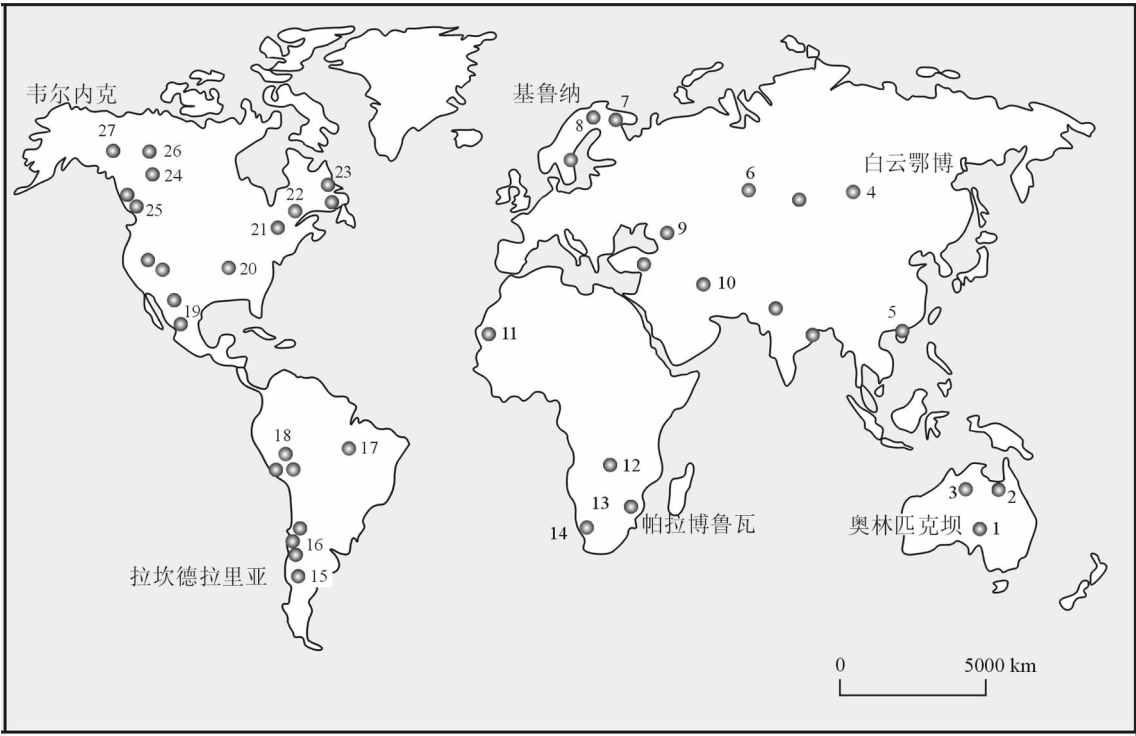


图 1 世界范围内重要氧化铁型铜-金 (IOCG) 矿床或矿化集中区位置图(据参考文献[1-3]改编)

- 1—高勒铜-金-铀矿化集中区(奥林匹克坝、阿卡帕利斯、蒙塔、奥科坝、博罗敏特山和威里达威尔矿床);
2—克朗克里铜-金矿化集中区(欧内斯特-亨利、艾洛格、蒙特艾洛特、奥斯本和斯坦矿床);3—藤南特阿里克铜-金-铋矿化集中区(基库、匹库/九诺和瓦日沟矿床);4—白云鄂博铁-铌-稀土元素矿床;5—石碌铁-铜矿床;
6—马格尼特哥斯基铁-铜矿床;7—艾蒂克铁-铜矿床;8—基鲁纳铁(铜)矿床;9—巴纳特铜-金矿床;
10—巴夫格铁-铜矿化集中区(楚古斯特、查都玛鲁、什查弘矿床);11—阿克茹特铁-铜矿床;
12—思伏卡、坎顿嘎和凯图巴铁-铜矿床;13—帕拉博鲁瓦铜多金属矿床;14—维格茹根栋铜多金属矿床;
15—坎德拉利亚铁-铜矿床;16—智利铁-铜成矿带(艾尔-阿尔嘎洛博、艾尔-罗莫尔、曼托-威尔德和蓬塔-库博力矿床);17—卡拉雅斯铜-金矿化集中区(克里斯塔利努、阿莱毛/伊加拉佩-巴伊亚、萨洛博和索塞克矿床);
18—拉乌尔和康德斯特帕铁-铜矿床;19—杜兰戈铁-铜矿床;20—密苏里东南铁-铜成矿带(皮瑞吉和皮洛特-诺博矿床);21—大西洋中部铁-铜成矿带(瑞丁-普朗矿床);22—阿迪荣达克铁-铜矿床;
23—柯吉博铜多金属矿床;24—海芬铁-铜矿床;25—西海岸带矽卡岩型铁-铜成矿带;
26—大熊铁-铜矿化集中区(尼科和苏德尼矿床);27—韦尔内克铁-铜矿床

Fig.1 Distribution of major Iron oxide copper-gold deposits and metallogenic districts (Belts) occurring in the world (modified from Corriveau, 2006^[1], Cox and Singer, 2007^[2]; and Hitzman et al., 1992^[3])

- 1—Gawler Cu-Au-U mineralized district (Olympic Dam, Acropolis, Moonta, Oak Dam, Prominent Hill and Wirrda Well deposits); 2—Cloncurry Cu-Au mineralized district (Ernest Henry, Eloise, Mount Elliot, Osborne and Starra deposits);
3—Tennant Creek Cu-Au-Bi mineralized district (Gecko, Peko/Juno and Warrego deposits); 4—Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit; 5—Shilu Fe-Cu deposit; 6—Magnitogorsk Fe-Cu deposit; 7—Aitik Fe-Cu deposit; 8—Kiruna Fe (Cu) deposit;
9—Banat Fe-Cu deposit; 10—Bafg Fe-Cu mineralized district (Chogust, Chadoolu, Seh Chahoon deposits);
11—Akjouit Fe-Cu deposit; 12—Shimiyoka, Kantonga, and Kitumba Fe-Cu deposits; 13—Phalaborwa Cu-polymetallic deposit;
14—Verganoegen Cu-polymetallic deposit; 15—Candelaria Fe-Cu deposit; 16—Chilian Fe-Cu metallogenic belt (El Algarrobo, El Romeral, Manto Verde and Punta del Cobre deposits); 17—Carajas Cu-Au mineralized district (Cristalino, Alemão/Igarapé Bahia, Salobo, and Sossego deposits); 18—Raoul and Condestable Fe-Cu deposits;
19—Durango Fe-Cu deposit; 20—Southeastern Missouri Fe-Cu metallogenic belt (Pea Ridge and Pilot Knob deposits);
21—Mid-Alantic Fe-Cu metallogenic belt (Reading Prong deposit); 22—Adirondack Fe-Cu deposit;
23—Keweenaw Fe-Cu deposit; 24—Heff Fe-Cu deposit; 25—Western Coast Fe-Cu metallogenic belt;
26—Great Bear Fe-Cu mineralized district (Sue-Dianne and NICO deposits); 27—Wernicke Fe-Cu deposit

墨西哥的塞日鸥—莫尔卡杜(Cerro de Mercado);秘鲁的莱乌尔(Raul)、康德斯苔伯(Condestable)、艾力安纳(Eliana)、蒙特鲁莎斯(Monterrosas)和马库纳(Marcona);瑞典的艾蒂克(Aitik);南非的帕拉博鲁瓦(Phalaborwa)和维格茹根(Vergenoeg);美国的皮瑞吉(Pea Ridge)、皮洛特—诺博(Pilot Knob)、阿迪朗达克(Adirondack)和瑞丁—普朗(Reading Prong);赞比亚的思伏卡(Shimiyoka)、坎顿嘎(Kantonga)和凯图巴(Kitumba)。上述矿床大多以规模大和品位高为特征,是其他类型铜-金(或银、铌、稀土元素、铀、

铍和钴)资源的重要补充(图 2)。

考虑到上述各类铜-金(或银、铌、稀土元素、铀、铍和钴)矿床均以含有大量低钛磁铁矿或赤铁矿(含量大于 20%)为特征(表 1),并且与传统的铜多金属矿床存在明显差异,因此,部分学者将其称之为氧化铁型铜-金(IOCG)矿床^[3,5,14]。为了确定此类矿床在矿床学领域内的位置,人们对这类矿床的产出环境、地质特征、形成机制和找矿模型进行了系统的工作,并且发表有一批具有里程碑特色的论著^[1-6,11,15-21]。所有这些论著为提高氧化铁型铜-金(IOCG)矿床

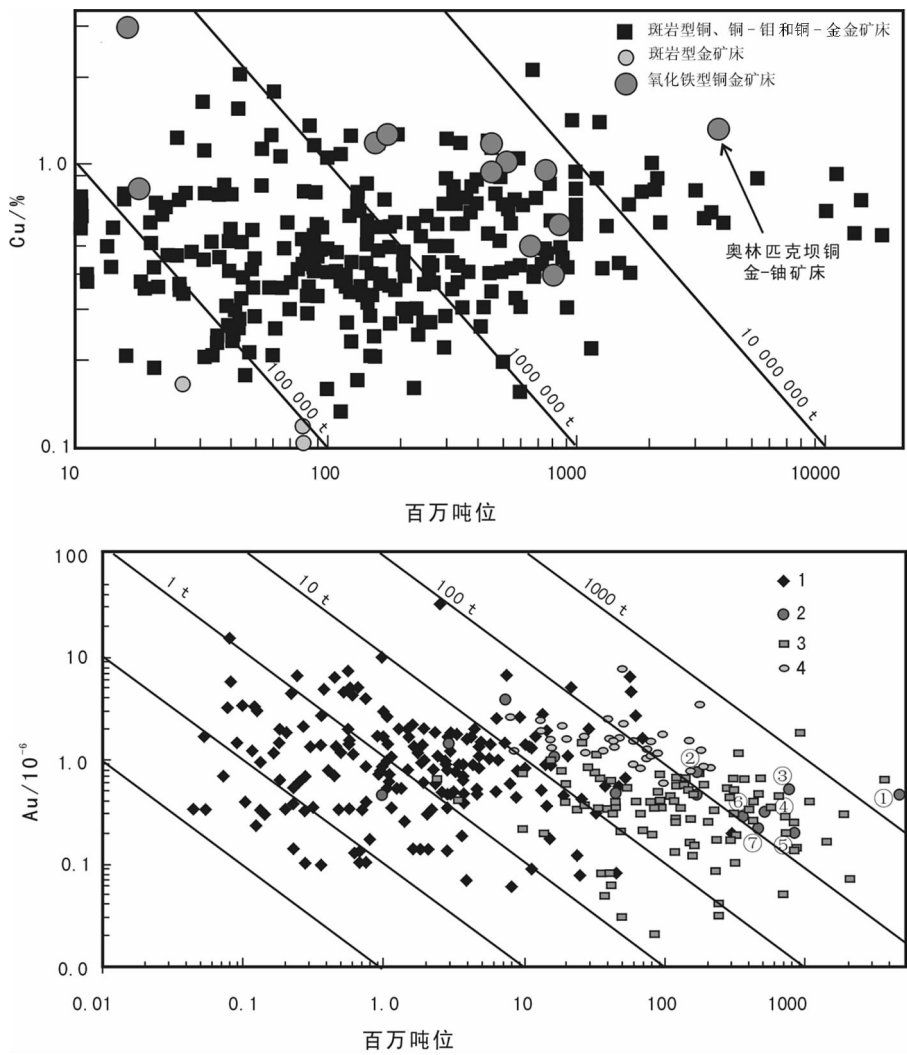


图 2 重要铜-金矿床铜的吨位-品位模型对比图(据参考文献[1]改编)

1-火山岩型块状硫化物矿床; 2-氧化铁型铜-金(IOCG)矿床; 3-斑岩型铜、铜-钼和铜-金矿床; 4-斑岩型金矿床
①-奥林匹克坝; ②-伊加拉佩-巴伊亚; ③-萨洛博; ④-克里斯塔利努; ⑤-艾迪克; ⑥-索塞克; ⑦-坎德拉利亚
Fig.2 Comparison diagram showing the copper grade and tonnage characteristics of important copper and gold deposits (modified from Corriveau, 2006^[1])
1-VHMS deposits; 2-IOCG deposits; 3-Porphyry Cu, Cu-Mo and Cu-Au deposit; ①-Oiymptic Dam; ②-Igarape Bahia; ③-Salobo; ④-Cristalino; ⑤-Aitik; ⑥-Sossego; ⑦-Candelaria

成矿理论研究水平和推动此类矿床找矿勘查工作做出了重要贡献。

鉴于氧化铁型铜-金(IOCg)矿床无论在产出环境和地质特征方面,还是在形成机理上均具有多样性和复杂性特点,因此,人们对其类型的划分尚存在有不同的看法。这类铜-金矿床究竟是一种独立的矿床类型还是其他类型矿床的变种? 尽管矿床地质学家在上述问题上争议颇大,但是他们均认为,将含有大量氧化铁(磁铁矿或赤铁矿)与含有大量硫化铁(黄铁矿或磁黄铁矿)的铜-金矿床划分开,对于重新认识金属矿床的形成机理和有效指导找矿勘查工作具有重要的理论和实际意义^[1-2]。一般来讲,单一铁矿床和含铜、金(或铀、铌、钽、铍、银、铂族元素、稀土元素)铁矿床均属氧化型成矿体系,其中单一铁矿床和氧化铁型铜-金矿床是这一成矿体系的两个端元组分。国内外的找矿勘查结果表明,在大型或巨型单一铁矿床分布的地域很难找到大、中型氧化铁型铜-金矿床,同样,在大型或巨型氧化铁型铜-金矿床产出的地段也不会存在大、中型单一铁矿床。根据上述状况,笔者不赞成将单一铁矿床划归为氧化铁型铜-金矿床。

尽管受成矿理论研究水平和现有知识积累不足所限,目前尚不能对氧化铁型铜-金矿床进行合理和正确的分类,但是为了成矿理论研究和找矿勘查工作的方便,可根据与 IOCg 矿床有关侵入岩的类型将此类金属矿床划分为 4 大类,即奥林匹克坝型

(Olympic Dam)、克朗克利型(Cloncurry)、帕拉博鲁瓦(Phalabowa)型和白云鄂博型(Bayan Obo),其中前两类矿床与钙-碱性火成岩有关,后两类矿床与火成碳酸岩有关,其基本地质特征见表 2。

3 氧化铁型铜-金(IOCg)矿床地质特征

3.1 与容矿围岩的关系

前人研究结果表明,氧化铁型铜-金矿床可在不同地质时代和各种成因类型的岩层(体)中产出,岩层(体)的成矿专属性不是十分明显。代表性容矿围岩可以是低品位铁矿层、条带状含铁建造(BIF)或者富铁岩石(Ironstone),也可以是镁铁质到长英质火山岩或深成侵入岩,还可能是一些片岩和片麻岩^[1-2,3,8]。无论是哪种岩石类型,若要成为氧化铁型铜-金矿床的成矿主岩,还必须具备下述几个条件:(1)渗透性好和易发生化学反应;(2)靠近深大断裂及其次级构造;(3)与侵入岩体具有密切空间分布关系;(4)角砾岩化和热液蚀变十分发育;(5)地处明显的氧化环境。澳大利亚代表性 IOCg 矿床与容矿围岩的空间分布关系见图 3。

3.2 与侵入岩体的关系

许多大型或特大型氧化铁型铜-金矿床的成矿作用均与大规模岩浆活动有关,其成矿主岩可以是火山岩,也可以是深成侵入岩或变质岩。一般来讲,此类矿床的成矿作用与两类岩浆活动有关。其一,与

表 2 氧化铁型铜-金矿床分类及其基本地质特征
Table 2 Basic geological features and classification of the major IOCg deposits

矿床类型	奥林匹克坝型矿床	克朗克利型矿床	帕拉博鲁瓦型矿床	白云鄂博型矿床
矿体形态	不规则管状、漏斗状和不规则块体	似层状、条带状和角砾筒状	似层状、脉状、条带状和不规则状块体	层状、似层状、脉状和不规则状块体
矿物组分	磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、沥青铀矿、金矿物。赤铁矿>>磁铁矿	磁铁矿、赤铁矿、黄铜矿、斑铜矿、金矿物。磁铁矿>>赤铁矿	磁铁矿、黄铜矿、黄铁矿、磷灰石、金-银矿物	磁铁矿、赤铁矿、氟碳铈矿、金云母、铌氧化物、萤石、独居石和碳酸盐类
元素组合	铁、铜、金、铀、银和稀土元素	铜、金、银、铍、钽和钨	铜、金、银、铂族元素,铀和稀土元素	铁、铌、稀土元素
蚀变类型	钾质蚀变(钾长石、黑云母、绢云母)	钾质蚀变(钾长石、黑云母、绢云母)	钠化(钠长石、方柱石)和钾化(钾长石、绢云母)	钾化(钾长石、绢云母)和钠化(钠长石)
岩浆性质	钙-碱质中性到酸性岩浆活动	钙-碱质到碱性岩浆活动	火成碳酸岩浆	火成碳酸岩浆
矿床实例	奥林匹克坝铜-金-铀矿床	欧内斯-亨利铜-金矿床	帕拉博鲁瓦铜多金属矿床	白云鄂博铁-铌-稀土元素矿床

注:根据 Corriveau^[1]和 Cox and Singer^[2]资料数据改编。

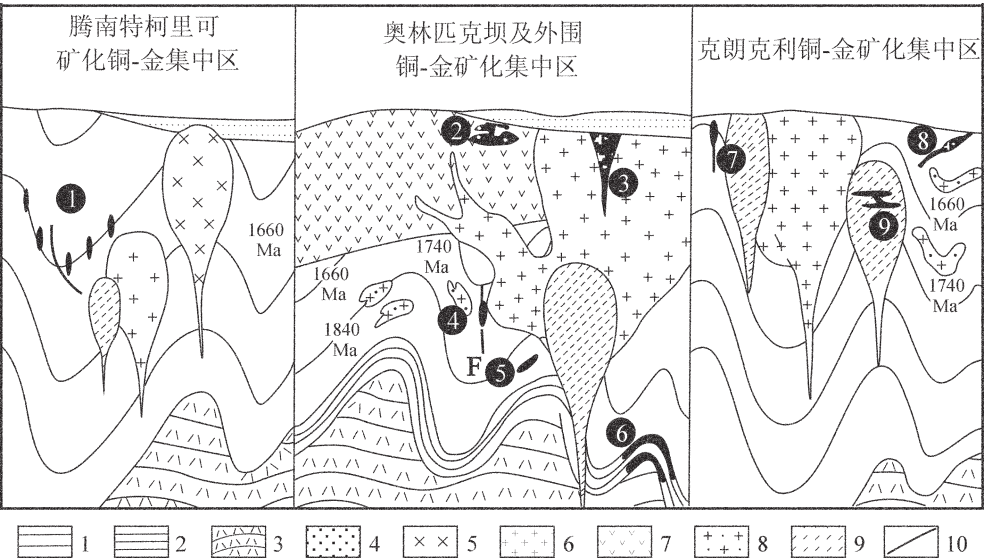


图 3 澳大利亚主要氧化铁型铜-金(IOCg)矿床成矿环境(据参考文献[24]改编)

1—古元古代沉积岩;2—古元古代绿片岩和角闪岩;3—太古代变质岩;4—盖层;5—成矿期后花岗岩;6—成矿期前花岗岩;7—同成矿期火山岩;8—同成矿期花岗岩;9—同成矿期辉长岩、闪长岩和二长岩;10—断裂带

①—瓦日沟、诺贝尔、九诺和 TC8 铜-金矿床;②—阿卡帕利斯/威里达威尔铁-铜-稀土元素矿床;③—奥林匹克坝铁-铜-金-铀-稀土元素矿床;④—蒙塔铜-金矿床;⑤—曼克斯门铁-铜-稀土元素矿床;⑥—含铁建造(BIF);

⑦—斯塔铁-金-铜矿床;⑧—欧内斯-亨利铁-铜-金矿床;⑨—莱特宁铁-铜矿床

Fig.3 Geological setting of major IOCG deposits occurring in australia (modified from First, 2001^[24])

1—Paleoproterozoic sedimentary rocks;2—Late Paleoproterozoic greenschist and amphibolite;3—Archean metamorphic rocks;

4—Cover;5—Post mineralization granitoids;6—Pre-mineralization granitoids;7—Syn-mineralization volcanic rocks;

8—Syn-mineralization granitoids;9—Syn-mineralization gabbro, diorite and monzoite;10—Faults

①—Warrego, Juno, Nobles and TC8 Cu-Au-Bi deposits;②—Acropolis and Wirda Well Fe-Cu-REE deposits;

③—Olympic Dam Fe-Cu-Au-U-Ba-REE deposit;④—Moonta Fe-Cu-REE deposit;⑤—Manxman Fe-Cu-REE deposit;

⑥—Banded Iron Formation (BIF);⑦—Starra Fe-Au-Cu deposit;⑧—Ernest Henry Fe-Cu-Au-Ba deposit;

⑨—Lightning Creek Fe-Cu deposit

钙-碱性岩浆活动具有密切成因联系,如奥林匹克坝铜-金-铀矿床和克朗克利铜-金矿化集中区;其二,与火成碳酸岩岩浆活动具有密切成因联系,如帕拉博鲁瓦铜多金属矿床和白云鄂博铁-铈-稀土元素矿床。需要指出的是,与氧化铁型铜-金矿床有关钙-碱性火成岩(火山岩和深成岩)大都是具双模式地球化学特点的火山岩或侵入岩。在奥林匹克坝矿区及外围,希尔塔巴(Hiltaba)A-型深成岩套主要由二长闪长岩和花岗岩所构成^[1,8]。相比之下,克朗克利铜-金矿化集中区范围内的欧内斯-亨利(Ernest Henry)、斯塔瑞(Starra)和来特宁-柯里克(Lightning Creek)矿床均与磁铁矿系列(I型)闪长岩和碱性花岗岩有关^[21-23]。尽管巴希萨洛博(Salobo)铜-金矿床与A-型花岗岩具有密切成因联系,但是人们怀疑在其深部可能存在有二长岩、闪长岩或辉长岩侵入

岩。大量研究结果表明,辉长质、闪长质和二长质岩浆活动及相关流体在氧化铁型铜-金矿床的形成过程中曾发挥过重要作用^[1,18]。基于上述认识,无论是在此类矿床成矿理论研究中,还是在找矿勘查工作中,均要注意这样一个问题,即在中性到酸性火成岩中是否存在有基性或超基性岩包体或岩块以及代表性矿物组合。另外,在地表观察不到大面积基性中性火成岩(深成岩、火山岩、岩脉带)的地域,要对附近大面积分布的花岗岩类侵入岩进行详细的岩相学研究,注意寻找镁铁质与长英质岩浆相互混合的结构构造。通过含矿火成岩的岩相学和岩理学研究,人们将会查明岩浆活动与氧化铁型铜-金矿床成矿作用的关系,进而为找矿勘查指明方向。

3.3 与断裂构造的关系

前人研究结果表明,氧化铁型矿床大都在古大陆

边缘分布,特别是沿古大陆向拉张性大陆弧转换的部位产出。其空间展布形态与多期次活动的条带状断裂有关。拉张性和走滑断裂为深源岩浆及相关流体的上侵(涌)和大气降水(地表水)的下渗提供了有利通道。尽管各类矿床无论在产出深度上,还是在分布形态上均存在一定的差别,但是它们的主导控制因素为各种不同级序和不同形式的断裂构造^[6,19,22-23]。代表性构造形迹主要包括:(1)断层与高渗透性地层单元交汇处;(2)张裂断层的凹凸部位;(3)逆掩断层内部及旁侧;(4)韧、脆性剪切带的分枝处;(5)各种褶皱的核部;(6)高、低渗透性地层单元的接触部位。无论是澳大利亚奥林匹克坝铜-金-铀矿床和克朗克利铜-金矿化集中区,还是南非的帕拉博鲁卡铜多金属矿床和巴西的萨洛博铜-金矿床,它们的底部要么产出有漏斗状角砾岩筒(带)及相关热蚀变带,要么出现陡倾的条带状断裂带,要么存在有地球物理(重、磁和激电)异常,其中含赤铁矿的角砾岩筒(带)代表了成矿流体重金属元素发生卸载的部位。相比之下,含磁铁矿的钾化蚀变带代表了成矿流体的补给带。

3.4 与角砾岩筒(管、墙、带)的关系

对于大多数氧化铁型铜-金矿床来讲,其最明显的一个鉴别标志就是与角砾岩带具有密切的时空分布关系。铜-金矿化可在不同形成时代、各种成因类型和不同几何形态的角砾岩带(筒、管、墙)内呈似层状、板条状、条带状、脉状、带状、网脉状和透镜体状产出^[1,8,19,22]。这些角砾岩筒(带、管)的出露面积变化范围较大,一般为1~10 km²,大多数为几十平方米到3000 m²,深度可达千余米。在剖面上,这些角砾岩筒(管)可以是平缓的,也可能是陡倾的,可以是单相的,也可能是多相的。角砾岩大多呈灰色、黑灰色、绿色、斑杂红色到红色,主要由角砾(各类岩块和氧化铁块体)和胶结物(岩屑、矿物碎屑和铜-铁硫化物)构成。角砾大都呈不规则棱角状,磨圆度较差,一般为1 cm²到数百平方米。从角砾带的中心到边部,岩石类型依次为角砾岩、角砾岩化围岩和弱碎裂化岩体(或地层)。在剖面上,角砾岩带底部为角砾岩化岩体(层),中部为原位角砾岩,上部为发生过一定位移的角砾岩。角砾岩带与围岩的接触关系大体可以划分为以下几种类型:(1)过渡型:角砾岩带与围岩呈逐渐过渡关系,过渡带的宽度为几十米到百余米;(2)易辨型:角砾岩带与围岩的接触关系很容易辨认,过渡带的宽度仅有数厘米到几米;(3)突变型:

角砾岩带与围岩接触界线十分清晰,不存在任何过渡带。鉴于热液、构造和火山角砾岩存在有许多相似之处,因此,在野外矿产地质调查工作中,将这三者完全区别开是很难做到的一件事。例如,同样一种角砾岩,有人将其看作为火山碎屑岩,有人认为这是一种变形的底砾岩,还有人将其命名为破碎的英云闪长岩。为了准确地了解角砾岩带的产出环境、成因类型和形成机理,对其进行系统的野外地质填图和详细的岩矿鉴定是完全有必要的。

3.5 氧化铁型铜-金矿床矿物学

尽管各个矿床的矿物组分变化很大,但是主要矿物、次要矿物和脉石矿物的种类大体相似,并且与斑岩型和火山成因金属矿床存在较明显差别^[1-3,8,19,22]。主要矿物有赤铁矿(镜铁矿、赤铁矿和假像赤铁矿)、低钛磁铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿和黄铁矿;次要矿物有铜(银、镍、钴和铀)砷化物、钙铀云母、氟碳铈矿、辉铈矿、钛铀矿、铈磷灰石、硫铜钴矿、辉钴矿、硅铀矿、铜蓝、蓝辉铜矿、磷铝铈矿、斜方砷铁矿、孔雀石、辉钼矿、独居石、沥青铀矿、晶质铀矿、磷钇矿、金(银、铋和钴)碲化物、自然铋(铜、金和银)和蛭石。脉石矿物有钠长石、钾长石、绢云母、碳酸盐、绿泥石、石英、角闪石、辉石、黑云母和磷灰石。其他矿物可能还有褐帘石、重晶石、绿帘石、萤石、黑柱石、石榴石、钙钛矿、金云母、金红石、方柱石、楣石和电气石。氧化铁型铜-金矿床的元素组合变化范围较大,代表性元素组合有Fe-REE-Nb, Fe-Cu-Au和Fe-Cu-Au-U-Ag-REE。另外,此类矿床含量较高的元素还可能有Co±F±B±Mo±Y±As±Bi±Mn±Se±Ba±Pb±Ni±Zn。

3.6 热液蚀变

氧化铁型铜-金矿床热液蚀变分布广泛,并且与斑岩型矿床和火山成因矿床存在有明显差别。代表性热液蚀变类型有钙-钠化蚀变、铁化蚀变和钾化蚀变^[15,17,20-21]。从空间分布上看,钙-钠化蚀变分布范围一般均大于1 km²,属于一种区域性热液蚀变带,其产出方式可以是单一的钠化蚀变带,主要由斜方辉石和楣石组成,也可以是富钠的钙-碱性蚀变带,主要由斜方辉石、铁闪石、绿钙闪石、角闪石和石榴子石所组成。局部地段见有钠-钾化蚀变带,代表性矿物组合有钠长石、钾长石、阳起石、磁铁矿、磷灰石、绿帘石、黄铜矿、黄铁矿和斑铜矿。如果在成矿区范围内分布有富钙的火山-沉积岩,那么受构造-岩

浆活动影响,完全有可能形成矽卡岩化带,代表性矿物组合为磁铁矿、石榴子石、斜方辉石和方柱石,例如,加拿大的海芬(Heff)铜-金矿床、智利的拉坎德拉利亚(La Candelaria)铜-金矿床、赞比亚思优卡(Shimiyoka)和坎顿嘎(Kantonga)铜-金矿床。铁化蚀变主要指那些与氧化物集合体密切共生的热液蚀变,其形成时间略早于铜-铁硫化物,代表性矿物组合为磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿、铁白云石、绿泥石、角闪石(铁闪石和绿钙闪石)和磷灰石。与赤铁矿相比,磁铁矿大都在矿体的中部和深部产出。钾化(钾长石、黑云母和绢云母)蚀变带与铜、铁和金硫化物集合体具有密切的时空分布关系,代表性矿物有钾长石、黑云母、磁铁矿或赤铁矿、绢云母、绿泥石、碳酸盐、铁-铜硫化物、铀和稀土矿物。受后期构造-岩浆-热液活动影响,强烈的绿泥石化作用导致镁铁质矿物全部分解,同时形成新的蚀变矿物组合,主要有石英、萤石、榍石、重晶石、独居石、碳酸盐、正长石、金红石、绿帘石、钙钛矿和电气石。代表性 IOCg 矿床热液蚀变垂向分带见图 4。

4 氧化铁型铜-金(IOCg)矿床成矿机理

关于氧化铁型铜-金(IOCg)矿床的流体来源和形成机理目前主要存在以下 3 种不同的认识,即岩浆流体说、地表/盆地流体说和变质流体说,前者被称为岩浆成因理论,后两者被称之为非岩浆成因理论(表 3,图 5~7)。

部分学者指出,氧化铁型铜-金矿床的形成过程与深位断裂构造作用和大规模岩浆活动具有密切成因联系,前者为火成岩浆及相关流体的上涌提供了通道,后者为成矿流体对流循环提供了驱动力和物质来源^[1,8,11,17-18]。上述推论的主要地质证据是,许多氧化铁型铜-金矿床的成矿流体无论是在温度和盐度上,还是在物质组分上均与岩浆热液流体相似。一般情况下,在岩浆流体沿有利构造通道上涌过程中,它将会与下渗的大气降水、盆地水(卤水)和其他种类流体发生混合作用,并且对早期形成的蒸发岩、红层和含铁矿层进行淋滤、萃取和交代。上述各种流

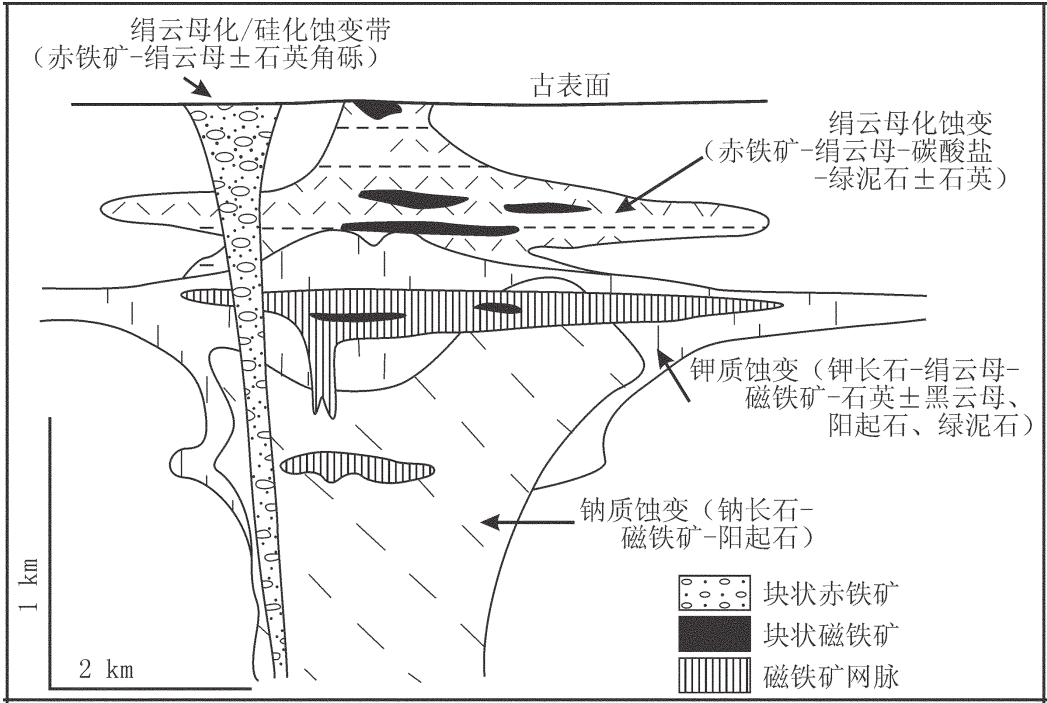


图 4 代表性氧化铁型铜-金(IOCg)矿床热液蚀变分带剖面图(据参考文献[3,10]改编)
Fig.4 Schematic geological profile showing the hydrothermal alteration zone of the representative IOCg deposits (modified from Hitzman et al., 1992^[3] and Mao et al., 2008^[10])

表 3 氧化物型铜-金 (IOCG) 矿床几个重要成矿模式
Table 3 Alternative genetic models for the IOCG deposits

流体来源	岩浆成因	非岩浆成因	
		地表/盆地流体	变质流体
构造背景	各类岩浆弧或张性构造环境，其内产出有高氧化性和高钾质或碱性岩浆岩	干燥的气候条件和古老的富氯地层以及有利构造分布区，附近见有流体运移通道和热源	富氯的低到中级序变质岩；挤压构造环境，特别是盆地崩塌构造带或者进变质岩带
成矿环境	◆沿条带状区域构造线分布，位于侵入岩体内部或旁侧； ◆地处地壳浅部到中等深度	◆区域性或火山构造为成矿流体提供了有利通道； ◆位于上地壳脆性破碎带内	◆靠近或者位于主要构造带内或旁侧； ◆地处地壳浅部到中等深度
火成岩组合	◆氧化程度较高的富钾火成岩套，闪长岩到花岗岩； ◆部分矿床与火成碳酸岩有关； ◆部分矿床与碱性火成岩有关	◆各种火成岩（辉长岩到花岗岩），部分矿区未见火成岩； ◆大多数情况下为成矿作用提供了热源； ◆多元化成矿物质来源	◆尚未找到与火成岩有关的地质证据； ◆可能为部分矿床的形成作用提供了热源； ◆可能为部分矿床的形成提供了物质来源
热液蚀变	◆与岩浆活动有关的钠（钙）质和其他类型（钾和水化）热液蚀变； ◆与铜-金矿化没有直接关系的区域性钠（钙）质热液蚀变	◆浅部带中存在钾（I 型）化，水化或钠（钙）热液蚀变； ◆补充带中存在钠（钙）或钾（II 型）化热液蚀变	◆钾化和水化热液蚀变与成矿作用有关； ◆区域性钠（钙）质热液蚀变分布广泛
与铁矿体的关系	◆与铜-金矿体伴生的铁氧化物集合体是深源高温流体的产物； ◆不含铜-金的铁氧化物可能是另外一种成矿流体早期活动的结果	◆富磁铁矿的铜-金矿化带是早期高温流体活动的产物； ◆不含铜-金的铁氧化物反映了成矿流体中硫含量严重不足	铁氧化物在黑云母和绿泥石蚀变带内较为少见，其形成作用与镁铁矿物分解活动有关
成矿作用	◆受上升浮力影响，岩浆释放出贫硫的含矿流体； ◆冷却效应、水-岩反应和流体混合导致成矿物质沉淀	◆非岩浆流体对流循环，并且形成含矿流体； ◆冷却效应、水-岩反应和流体混合导致成矿物质沉淀	◆受上升浮力影响，脱挥发分作用产生变质流体； ◆冷却效应、水-岩反应和流体混合导致成矿物质沉淀
参考文献	Pollard ^[17] , Barton and Johnson ^[20]	Haynes ^[5] , Barton and Johnson ^[20]	Hitzman ^[4] , Barton and Johnson ^[20]

体混合效应和水-岩作用可导致流体中成矿组分进一步富集，同时在构造有利地段形成具有工业价值的矿体。尽管蒸发岩和红层可对此类矿床的成矿作用产生重要影响，但是它们的产出规模或者是否存在并不是氧化铁型铜-金矿床成矿作用发生的必要条件。对于大多数氧化铁型铜-金矿床来讲，同成矿期 A-型花岗岩和碱性侵入岩不仅是氧化铁型铜-金矿床成矿物质的供给源和“搬运机”而且也是成矿流体对流循环的“发动机”(图 5)。

与岩浆成因理论相比，部分学者^[2,4-5,20]认为，尽管

岩浆活动为氧化铁型铜-金矿床的成矿作用提供了热力和动力来源，但是并没有带来多少成矿物质。这种推论的主要地质依据有 2 条，其一：与此类矿床有关侵入岩的岩石类型变化较大，不存在特定的岩石成矿专属性；其二：大面积分布的钠长石和方柱石表明，富钠流体与围岩发生过一定规模的水-岩作用。另外，对全球范围内 36 处氧化铁型铜-金矿床的调查结果表明，在 19 处矿床的容矿围岩中或者附近找到了富钠质和金属元素的沉积岩，因此，大规模的富钠质流体很可能来自沉积岩，而不是火成岩(图 5)。

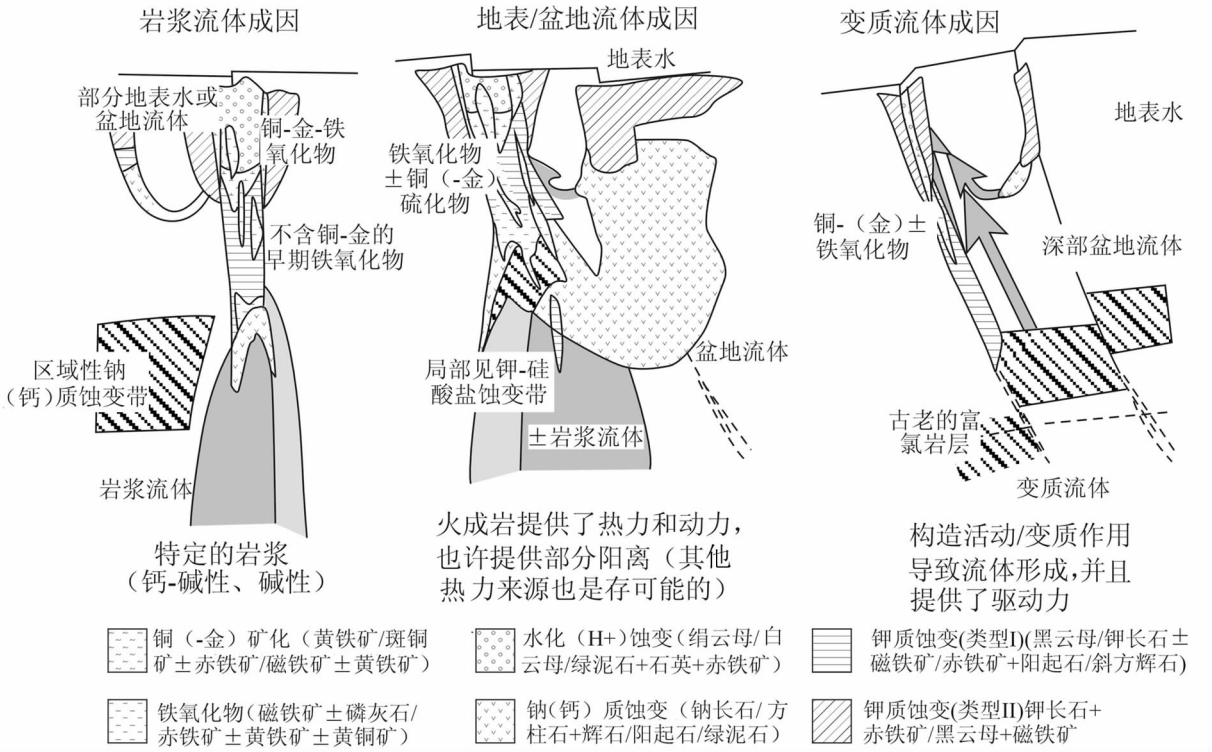


图5 代表性氧化铁型铜-金(IOCg)矿床成矿流体来源及其运移途径
(据参考文献[20]改编)

Fig.5 Possible fluid sources and their flow paths of the Representative IOCg deposits (modified from Barton et al.,^[20])

一般来讲,镁铁质、长英质和碱性岩浆以及相关流体对沉积岩(红层和蒸发岩)的交代和烘烤作用可以产生富钠的热液流体,这种受热流体可从围岩中淋滤和萃取出大量的钾、铁、铜、金和铀及其他成矿组分。同时,多期构造-岩浆活动不仅为上述流体的对流循环提供了空间条件,而且提供了热力和动力来源。从图 6 可以看到,奥林匹克坝和普罗敏特山铜-金-铀矿床的形成作用主要是在氧化环境中进行的,大量赤铁矿的出现就是最好的例证。相比之下,腾南特柯里克和克朗克里铜-金矿化集中区各类矿床的形成作用就要复杂得多,其形成过程大体可以划分为 2 个阶段,即氧化物和硫化物形成阶段(图 7)。在氧化物形成阶段,少量岩浆流体与大量大气降水或变质流体混合,进而沿断层破碎带或角砾岩带进行运移,并且对围岩进行淋滤与萃取,同时在构造有利部位形成具工业价值的铁矿体或富铁火山岩或沉积岩(ironstone)。在硫化物形成阶段,受多期次构造-岩浆活动的影响,大量含铜-金-铀的岩浆热液流体可沿渗透性较好的破碎带运移,并且与围岩发生

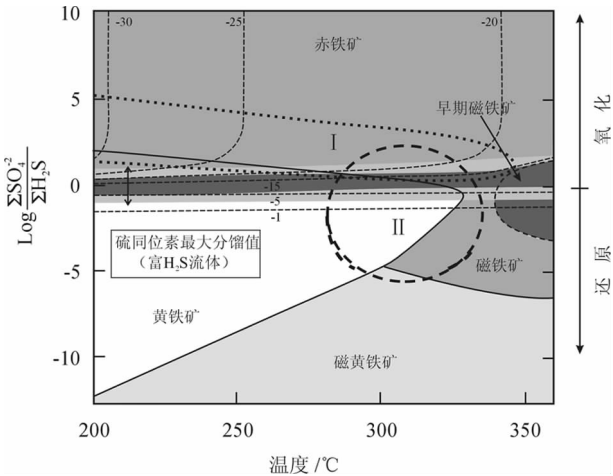


图 6 代表性氧化铁型铜-金(IOCg)矿床成矿作用发生的物理-化学条件(据参考文献[24] 改编)

I—奥林匹克坝 Cu-Au-U 矿床主要金属矿物沉淀范围;II—腾南特柯里克 Au-Cu-Bi 矿化集中区、克朗克里 Cu-Au 矿化集中区和奥拉里 Cu-Au-Mo 矿床金属矿物沉淀范围

Fig.6 Physical-chemical conditions of metal mineral depositions for the representative IOCg Deposits (modified from First,^[24])

I—Depositional district of metal minerals from the Olympic dam Cu-Au-U Deposit;II—Depositional district of metal minerals from the Tennant Creek Au-Cu-Bi mineralized district, Cloncurry Cu-Au mineralized district and Olary Cu-Au-Mo deposit

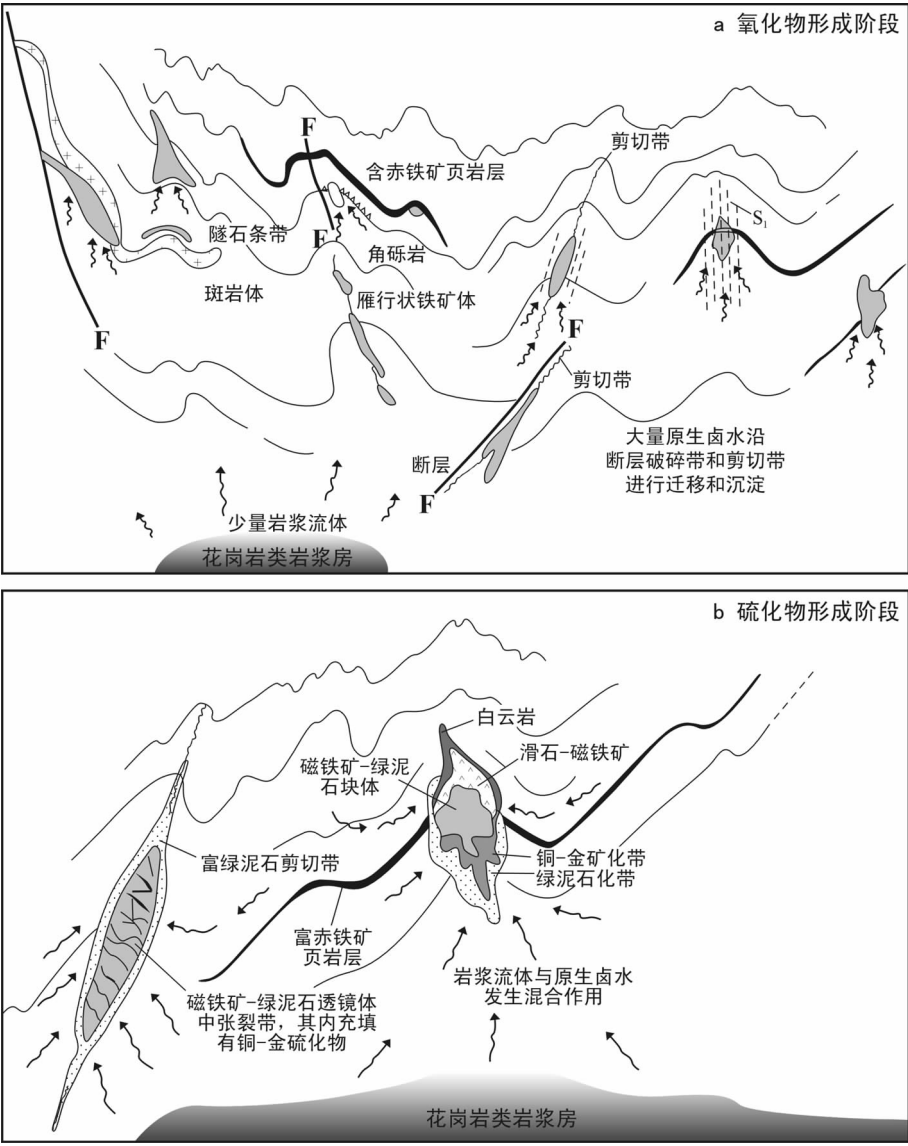


图 7 澳大利亚腾南特克里克铜-金-铋矿化集中区代表性金属矿床两阶段成矿模式
(据参考文献[16]改编)

a—氧化物形成阶段:火山岩或沉积岩形成和变形过程中,铁质组分可从沉积岩和火山岩中迁移出来,并且在构造有利部位形成具工业价值的铁矿体或富铁火山岩或沉积岩(ironstone);b—硫化物形成阶段:含铜-金-铋的岩浆热液流体沿着断裂破碎带运移,并且与围岩发生水-岩反应或与原生卤水发生混合,进而形成具有工业价值的铜-金矿体

Fig.7 Two stage ore-forming model of the representative ore deposits occurring in the Tennant Creek

Au-Cu-Bi mineralized district, Australia (modified from Ahmad et al.,^[16])

a—Oxide stage: During diagenesis and early deformation iron oxides were remobilized from sediments and igneous rocks, then concentrated in structural and stratigraphic traps to form massive pods and pipe-like bodies;
b—Sulfide stage: Development of extension fissures in ironstones within ductile chloritic shear zones. Au-Cu-Bi-bearing fluids derived from granites precipitate within fractured ironstones and adjacent altered metasediments

大规模水-岩反应或与变质流体(大气降水?)发生混合作用,同时形成具有工业价值的铁-铜-金矿体。需要提及的是,矽卡岩型矿物集合体和钾化蚀变带常出现在部分氧化铁型铜-金矿床中,前者与岩浆流体对围岩的变质交代作用有关,后者则是含钾热液流体与镁铁质围岩水-岩作用的产物。

5 中国氧化铁型铜-金(IOCG)矿床找矿前景

中国幅员辽阔,华北陆块、扬子地台和塔里木板块及邻区前寒武纪,特别是元古宇变质火山-沉积岩分布广泛,深大断裂纵横交错,各类花岗岩类侵入岩十分发育,是寻找氧化铁型铜-金(IOCG)矿床的理想场所。为了推动国内 IOCG 矿床成矿理论研究和找矿勘查工作的开展,笔者对澳大利亚代表性 IOCG 矿床进行了系统野外地质调查,同时,对中国新疆、云南、四川、安徽和海南等省(区)产出的铁-铜矿床进行了资料数据收集、分析和对比。初步研究结果表明,上述 5 省(区)中的部分铁-铜矿床与典型 IOCG 矿床存在有许多相似之处,它们能否划属为 IOCG 矿床尚需要开展深入的综合性研究工作。这几处矿床包括新疆的雅满苏、天湖、老山口和乔夏哈拉铁-铜-金矿床(点);云南的大红山和鹅头厂铁-铜矿床;四川拉拉铜-铁矿床;安徽大小岭铜-铁矿床和海南石碌铁-铜矿床。这些矿床成矿类型和形成作用的再研究和再讨论,无论对于提升它们的成矿理论研究水平,还是对于推动它们深部或外围的找矿工作均具有重要意义。内蒙古白云鄂博铁-铈-稀土元素矿床的产出环境、地质特征和成矿作用与典型 IOCG 矿床大体相似,因此,该矿床被许多国外学者认为是中国最具有代表性的 IOCG 矿床^[1-2]。现在摆在我们面前的问题是,如果白云鄂博矿床属于典型的 IOCG 矿床,那么在其深部或外围是不是也能找到铜、铜-金或铜-金-铀矿床?如果该矿床没有见到铜-金矿化的存在,那么将其称作为氧化铁型铜-金矿床是否合适?与国外众多 IOCG 矿床成矿理论研究面对的难题一样,中国 IOCG 矿床成矿作用研究中亟待解决的问题主要表现在以下几个方面:(1)IOCG 矿床的成矿环境以古板块边缘侧向增生构造-岩浆岩带为主,还是以古大陆边缘垂向增生构造-岩浆岩带为主?(2)IOCG 矿床的空间分布形态究竟是受大规模火山或岩浆角砾岩带控

制,还是受与断裂有关的构造角砾岩带制约?(3)IOCG 矿床的成矿流体究竟是岩浆流体、变质流体、盆地流体和大气降水,还是它们的混合产物?(4)IOCG 矿床范围内常见的钠-钙-氯热液蚀变带与斑岩型铜-金矿床的青磐岩化带在形成过程上存在什么样的差别?(5)氧化还原效应、流体混合作用和成矿组分活化在成矿过程中究竟发挥了什么样的作用?(6)单一铁矿床与 IOCG 矿床在产出环境、物质来源和形成过程方面究竟存在哪些异同点?(7)矽卡岩型铁-铜矿床与典型 IOCG 矿床存在什么样的异同点?它是一种独立的矿床类型,还是 IOCG 矿床的亚类?尽管在 IOCG 矿床成矿理论研究和找矿勘查工作过程中还存在有许多这样或那样的问题,但是随着此类矿床研究和找矿资料数据的不断积累和矿床地质学家认知水平的不断提高,符合地质实际的成矿模式和找矿模型也将会逐渐为人们所接受,进而为 IOCG 矿床的找矿勘查提供科学依据。

6 氧化铁型铜-金(IOCG)矿床找矿模型

(1)产出环境:呈现挤压构造特征的古大陆边缘俯冲带(各类岩浆弧)或具有张性构造特点的克拉通盆地(裂谷、张裂带);

(2)容矿围岩:大多数矿床为元古宙、中生代和新生代火山-沉积岩,局部地段见有红层和蒸发岩;

(3)侵入岩:A 型、I 型或磁铁矿系列侵入岩有关,主要岩石类型有辉长岩、闪长岩、二长岩、花岗闪长岩和正长岩以及火成碳酸岩;

(4)时空分布:矿床几何分布形态严格受条带状深位断裂及其次级构造控制,成矿时代为元古宙、中生代和新生代;

(5)矿体特征:矿体主要由角砾状、脉型、浸染状和块状铁-铜-金矿石构成。各种角砾岩的胶结物中,铜、金和其他金属矿物分布广泛;

(6)金属矿物:主要有磁铁矿和赤铁矿(铁氧化物含量大于 20%),次要为黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铋矿、辉钴矿和自然金;

(7)脉石矿物:钾长石、石英、绢云母、黑云母、钠长石、绿泥石、阳起石、方解石和电气石,局部地段见有石榴石和透辉石;

(8)元素组合:各个矿床元素组合变化范围较大,主要为 Fe-Cu-Au±Ag±Bi±Nb±P±U±Ni±Co±

PGE±REE;

(9)热液蚀变:从深部经中部到浅部分别为钠化(钠长石-磁铁矿)蚀变带,钾化带(钾长石、黑云母)和硅化-绢云母-赤铁矿化带;

(10)成矿体系:单一铁矿床与氧化铁型铜-金矿床为同一个成矿体系的两个端元组分,前者分布区很难找到氧化铁型铜-金矿床,同样,在氧化铁型铜-金矿床也不会存在大、中型单一铁矿床;

(11)镁铁质到长英质岩浆活动为热液流体的对流循环提供了动力和热力来源,热液对围岩的萃取效应可形成富钾、铜和金的成矿流体,并且在构造有利部位形成具有工业价值的矿床;

(12)找矿标志:①含磁铁矿和赤铁矿角砾岩带;②钠长石、绢云母、电气石和萤石蚀变带;③重、磁和激电异常叠加部位。

参考文献 (References):

[1] Corriveau L. Iron oxide copper-gold (+/-Ag +/-REE +/-U) deposits: A Canadian perspective [M]. Open-File Report of Geological Survey of Canada, 2006;1-56 (<http://gsc.nrcan.gc.ca/mindep/synth-dep/iocg>).

[2] Cox P, Singer D A. Descriptive and grade-tonnage models and database for iron oxide Cu-Au deposits. U.S. Geological Survey Open File Report, 2007;2007-1155:3-14.

[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, 58:241-287.

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

[5] Haynes D W. Iron oxide copper gold deposits: their position in the ore deposit spectrum and modes of origin [C]//Porter T M (ed.), Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective. Australian Mineral Foundation, Adelaide, 2000; 71-90.

[6] Haynes D W. Giant iron oxide-copper-gold deposits: are they in distinctive geologic settings [C]//Cooke D R and Pongratz June (eds.). Giant ore deposits: Characteristics, genesis, and exploration. Centre for Ore Deposits Research Univ. of Tasmania, Hobart, 2002;57-78.

[7] 李泽琴, 胡瑞忠, 王奖臻, 等. 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, 2002, 21 (4): 258-260.

Li Zeqin, Hu Ruizhong, Wang Jiangzhen, et al. Lala iron-oxide Cu-Au-U-REE ore deposit, Sichuan China-An example of superimposed mineralization [J]. Bulletin of Mineralogy,

Petrology and Geochemistry, 2002, 21(4):258-260(in Chinese with English abstract).

[8] Belperio Antonio, Flint Richard, Freeman Hamish. Prominent Hill: A hematite-dominated iron oxide copper-gold system [J]. Econ. Geol., 2007, 102:1499-1510.

[9] Smith M, Coppard J, Herrington J, et al. The Geology of the Rakkorijvi Cu-(Au) prospect, Norrbotten: A new iron oxide-copper-gold deposit in North Sweden [J]. Econ. Geol., 2007, 102: 393-414.

[10] 毛景文, 余金杰, 袁顺达, 等. 铁氧化物-铜-金 (IOCG) 型矿床: 基本特征、研究现状与找矿勘查 [J]. 矿床地质, 2008, 27 (3): 267-278.

Mao Jingwen, Yu, Jinjie, Yuan Shunda, et al. Iron oxide-copper-gold deposits: Characteristics, present research situation and ore prospecting [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(3):267-278(in Chinese with English abstract).

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

[12] 张兴春. 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, 2003, 18(4):551-557.

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

[13] 王绍伟. 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, 2004, (2):45-51.

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

[14] 许德如, 肖勇, 马驰, 等. 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, 2007, 27 (增刊):307-308.

Xu Deru, Xiao Yong, Ma Chi et al. The Shilu iron-cobalt-copper-(gold) deposit: A IOCG type of stratabound skarn deposit [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(Supp.):45-51(in Chinese).

[15] Baker T. Alteration, mineralization and fluid evolution at Eloise Cu-Au deposit, Cloncurry district, northern Queensland, Australia [J]. Econ. Geol., 1998, 93(8):1213-1236.

[16] Ahmad M, Wygralak A S, Ferenczi P A. Gold deposits of the Northern Territory [M]. Report No.11 of Northern Territory Geological Survey, Australia, 1999;1-95.

[17] Pollard P J. Evidence of a magmatic fluid and metal source for Fe-oxide Cu-Au mineralization [C]//Porter T M (ed.). Hydrothermal Iron Oxide Copper-Gold and Related Deposits: A Global Perspective. Australian Mineral Foundation, Adelaide, 2000;27-41.

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

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

- [20] Barton M D, Johnson D A. Footprints of Fe oxide (-Cu-Au) systems [M]. University of Western Australia Special Publication, 2004, 33:112-116.
- [21] Oliver N H S, Cleverley J S, Mark G, et al. Modeling the role of sodic alteration in the genesis of iron oxide-copper-gold deposits, Eastern Mount Isa block, Australia [J]. *Econ. Geol.*, 2004, 99: 1145-1176.
- [22] Perring C S, Pollard P J, Dong G, et al. The Lightning Creek sill complex, Cloncurry district, Northwest Queensland: A source of fluids for Fe oxide Cu -Au mineralization and sodic -calcic alteration [J]. *Econ. Geol.*, 2000, 95:1067-1089.
- [23] Mark G, Oliver N H S, Williams P J, et al. The evolution of the Ernest Henry Fe-oxide-(Cu-Au) hydrothermal system[C]//Porter T M (ed.). *Hydrothermal iron oxide copper -gold and related deposits: A global perspective*. Australian Mineral Foundation, Adelaide, 2000:123-136.
- [24] First David. *Iron Oxide Cu -Au Deposits: Australia*. Joint copper workshop organized by China Geological survey and BHP BILLITON, Ming Tombs Training Center of Ministry of Land and Resources, Beijing(15-17 July 2001). 2001:1-43.

Geological features, ore-forming processes and prospecting model of iron oxide-copper-gold deposits

NIE Feng-jun¹, JIANG Si-hong¹, Lu Yan-ming²

(1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

2. *Institute of Gold Geology, CAPG, Langfang 065000, Hebei, China*)

Abstract: In general, the copper-gold (-silver-niobium-platinum group element-rare earth element-uranium) deposits that contain iron oxides (magnetite and/or hematite) more than 20% are called iron oxide copper-gold (IOCG) deposits. The geological features, metallogenic mechanism and prospecting models have been extensively and intensively studied both at home and abroad. The geology of the major IOCG deposits worldwide has been summarized in this paper. Meanwhile, the ore-forming processes and prospecting criteria on these typical IOCG deposits have also been discussed. Our preliminary studies show that both iron-only deposit and IOCG deposit belong to the oxide iron ore-forming system, but they are the end-member of the system, respectively. Therefore, the iron-only deposits should not be listed in the IOCG family at present. Based on our knowledge obtained from the geological field investigation on the Australian typical IOCG deposits, the tectonic setting and geological features of the iron-copper deposits occurring in Xinjiang, Yunnan, Sichuan, Anhui and Hainan provinces (or autonomous regions) have been analyzed. Among these studied deposits, the Yamansu, Tianhu, Laoshankou, Qiaoxiahala, Dahongshan, Etouchang, Daxiaoling, Lala and Shilu deposits show a lot of similarities to these typical IOCG deposits. To demonstrate the genetic type and ore-forming mechanism of these iron-copper deposits, the comprehensive studies will be needed.

Key words: iron oxide copper-gold (IOCG) deposit; iron-only deposit; geological features; ore-forming processes; prospecting models

About the first author: NIE Feng-jun, male, born in 1956, research professor and PhD. Main research interests including geology and geochemistry of ore deposits; E-mail: nfj@mx.cei.gov.cn.