

海相砂岩型铜矿研究进展及若干问题

——以中非加丹加铜矿和云南东川铜矿对比研究为例

曾瑞垠^{1,2,3}, 祝新友², 张雄², 詹勇³, 肖剑^{2,4}, 谭康雨³, 黄建业³, 张华⁵,
曾保成⁵, 杨凤军⁵

ZENG Ruiyin^{1,2,3}, ZHU Xinyou², ZHANG Xiong², ZHAN Yong³, XIAO Jian^{2,4}, TAN Kangyu³,
HUANG Jianye³, ZHANG Hua⁵, ZENG Baocheng⁵, YANG Fengjun⁵

1.昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2.北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012;

3.中色地科矿产勘查股份有限公司, 北京 100012; 4.中国地质大学(北京), 北京 100083;

5.云南金沙矿业股份有限公司, 云南 昆明 654100

1.Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2.Beijing Institute of Geology for Mineral Sinotech, Beijing 100012, China;

3.Sinotech Minerals Exploration Co., Ltd., Beijing 100012, China;

4.China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China;

5.Yunnan Jinsha Mining Co., Ltd., Kunming 654100, Yunnan, China

摘要:海相砂岩型铜矿床是世界铜矿床主要类型之一,多产于新元古代和二叠纪的大型沉积盆地中。矿体通常呈层状、似层状赋存于碎屑岩或海相碳酸盐岩地层中,具多层位成矿特征。根据海相砂岩型铜矿的研究现状,从成矿物质来源和成矿流体性质、来源、运移、金属元素的沉淀机制等方面,综述中非加丹加铜矿带和云南东川铜矿带近年的研究成果,发现盆地卤水成矿模式逐渐替代了原来的沉积-改造模式,具有后生成矿特征。2个铜矿带属于元古宙砂页岩-白云质碳酸盐岩-黑色炭质页岩含铜建造,矿体具明显层控特征,受褶皱、断层和角砾岩的控制。通过2个铜矿带的含矿建造、矿化特征等对比,发现东川铜矿与中非加丹加铜矿有高度的相似性,具有盆地卤水成矿模式的特征。最后对海相砂岩型铜矿和东川铜矿的成因类型、成矿机制、流体来源等问题进行了讨论。

关键词:砂岩型铜矿;盆地卤水;蒸发岩;加丹加铜矿;东川铜矿

中图分类号:P618.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)10-1608-17

Zeng R Y, Zhu X Y, Zhang X, Zhan Y, Xiao J, Tan K Y, Huang J Y, Zhang H, Zeng B C, Yang F J. Research progresses on marine sandstone copper deposit and some existent problems: A comparative study of the Katanga copper mine in Central Africa and the Dongchuan copper mine in Yunnan. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(10): 1608-1624

Abstract: Marine sandstone-hosted copper deposits constitute one of the most important copper deposits in the world, and most of them occur in giant Neoproterozoic and Permian sedimentary basins. The orebodies are usually stratified and stratoid in clastic or marine carbonate rock formations with multi-layered metallogenic characteristics. Based on the research status of marine sandstone-hosted copper deposits, the authors reviewed the research results of the Katanga copper belt and the Dongchuan copper belt discovered in recent years in the aspects of metallogenic material source, metallogenic fluid property, source, transportation and metal element precipitation mechanism, and found that the basin-brine-metallogenic model of epigenetic mineralization has gradually replaced the original

收稿日期:2020-03-12; **修订日期:**2020-04-26

资助项目:中国铜业有限公司重点科技计划项目《云南东川铜矿成矿规律与成矿预测》(编号:2018K01)和《我国稀有金属矿床形成的深部过程与综合探测技术示范项目》(编号:2017YFC0602403)》

作者简介:曾瑞垠(1991-),男,在读硕士生,工程师,从事矿床地质研究。E-mail: zengqingqin0428@sina.com

通讯作者:祝新友(1965-),男,教授级高工,从事矿床学研究。E-mail: zhuxinyou@outlook.com

sedimentary-transform model. Two copper deposit belts belong to the Proterozoic sand shales-dolomitic carbonate-black carbonaceous shales. The orebody has obvious stratigraphic characteristics, and is controlled by fold, fault and breccia. A comparison of the two copper belts in the aspects of ore-bearing structure and mineralization characteristics reveals that the Dongchuan copper deposit has a high degree of similarity to the Katanga copper deposit in that they both have the characteristics of basin-brine-metallogenic model. Then, the existing problems in the study of genetic type, metallogenic mechanism and fluid source from marine sandstone copper deposit and the Dongchuan copper deposit are discussed.

Key words: sandstone copper deposit; basin brine; evaporate; Katanga copper deposit; Dongchuan copper deposit

砂岩型铜矿,也称沉积岩容矿层状铜矿(Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits, SSC),指产于不同时代沉积岩、沉积变质岩中的层状和层控的铜矿床^[1-2]。砂岩型铜矿床是全球第二大铜矿类型,约占全球铜产量的 23% 和已知储量的 20%^[1,3],也是全球钴矿和银矿最重要的来源,其中 14% 的砂岩型铜矿床含钴,25% 的砂岩型铜矿床含银^[1]。该类型铜矿多分布在古赤道附近 20°~30° 范围的陆内盆地,炎热、干燥的气候在盆地中产生了厚厚的红色岩层,通常也会产生蒸发岩^[4],赋矿岩石分为钙质白云质粉砂岩、页岩、海相或湖泊相碳酸盐岩和源自大陆的砂岩、长石砂岩、砾岩^[5]。砂岩型铜矿根据形成环境分为海相砂岩型和陆相砂岩型铜矿两大类,海相砂岩型铜矿指产于海相细碎屑岩-碳酸盐建造中的铜矿^[6]。根据赋矿围岩及还原剂的不同,砂岩型铜矿分为还原相型、红层型和陆相砂岩型^[5]。海相砂岩型铜矿对应还原相型,主要指矿体赋存在盆地还原性地层中,如黑色-灰色炭质页岩、粉砂岩或含有机质和含黄铁矿的白云岩,一般沉积于海进的

浸水面之上,富有机质、渗透性差的沉积岩是还原相砂岩铜矿的特征^[1,3,5]。还原相砂岩型铜矿规模最大,更具有经济价值,陆相砂岩型铜矿次之,而红层型砂岩铜矿的矿石量很少达到 1000×10⁴t 以上。

笔者以中国东川铜矿带和中非加丹加铜矿带为主要研究对象,结合全球海相砂页岩型铜矿的研究现状,分析对比 2 个铜矿带的成矿地质特征和矿化特征,从成矿物质来源和成矿流体性质、来源、运移及金属元素的沉淀机制等方面,总结 2 个铜矿带近年的研究成果,综述海相砂岩型铜矿“沉积-改造”和“盆地卤水成矿”2 种典型成矿模式。最后讨论东川铜矿带的成因争议、成矿机制、成矿流体与蒸发岩层的关系等问题,并提出建议,为该类型铜矿床的找矿勘查工作提供参考。

1 海相砂岩型铜矿研究现状

世界上主要海相砂岩型铜矿床有中非铜矿(CACB,刚果-赞比亚)、中欧地区 Kupferschiefer 铜矿、哈萨克斯坦 Dzhezkazgan 铜矿、阿富汗 Aynak 铜

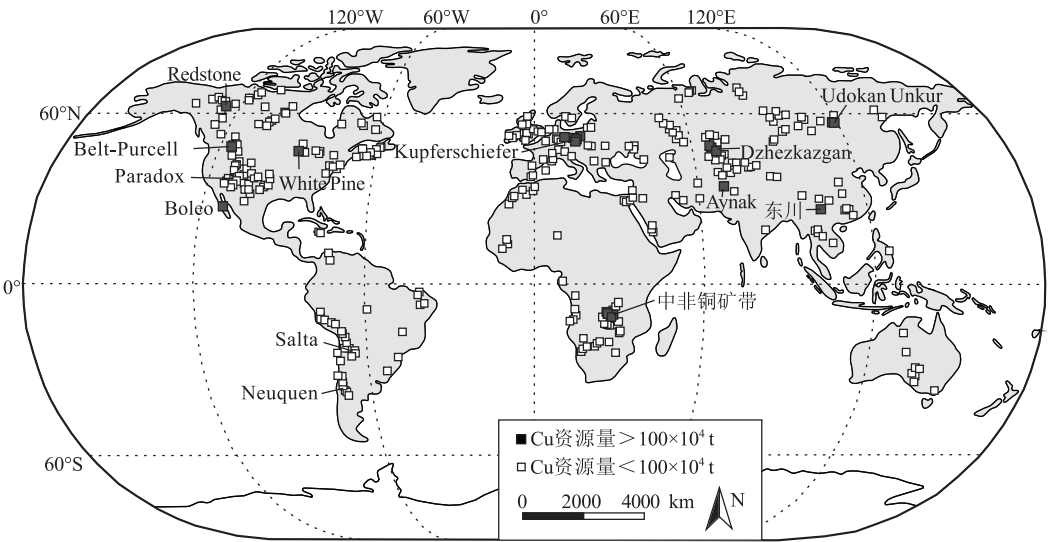


图 1 全球主要砂岩型铜矿分布图^[1,3]

Fig. 1 The distribution of sediments-hosted copper deposits in the world

矿、美国 White-Pine 铜矿、加拿大 Red-Stone 铜矿、中国东川铜矿等^[1,7-11](图 1)。

海相砂岩型铜矿一般形成于古元古代早期的大气氧化之后,主要成矿时代为新元古代和二叠纪,分别与 Rodinian 超大陆和泛古陆的裂解一致,2 个时间段都以广泛的蒸发岩沉积和主要的全球冰川事件为标志^[2,8,12-13](图 2-a)。砂岩型铜矿多产于大型陆内沉积盆地中,如西伯利亚古元古代 Kodaro-Udokan 盆地、中非新元古代 Katangan 盆地、欧洲二叠纪 Zechstein 盆地均含有超大型铜矿床($\text{Cu}>2400\times 10^4\text{ t}$),美国中元古代 Keweenaw 盆地、阿富汗的新元古代寒武纪盆地、哈萨克斯坦泥盆纪—石炭纪 Chu-Sarysu 盆地含有大型铜矿床($\text{Cu}>200\times 10^4\text{ t}$)^[8],除 Kodaro-Udokan 和 Chu-Sarysu 盆地盛产陆相砂岩型铜矿外,其他盆地均以海相砂岩型铜矿床为主(图 2-b),尤其是中非铜矿带。与红层的组合是砂岩型铜矿的一个重要标志^[1],红层指陆相环境下形成的陆缘碎屑岩,含少量泥质岩和碳酸盐岩,局部存在少量火山岩和蒸发岩,这些岩石沉积于氧化环境,常含有赤铁矿、镜铁矿、针铁矿等。红色与赤铁矿、石英、白云石和电气石的矿物色素有关,海相砂岩型铜矿的赋矿地层一般位于红层之上,盆地内的红层有利于高氧化盐碱型盆地卤水的形成^[7]。

海相砂岩型铜矿床通常分布在陆相红层与上覆的海相或湖泊相碎屑岩或碳酸盐岩之间的接触带^[8]。这些矿床常具有明显的层控特征,但不一定

遵循沉积层理^[5],呈层状、似层状,矿体横向规模是厚度的数百到数千倍。矿石矿物主要为黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿,其次为硫铜钴矿、富钴黄铁矿和少量自然铜、自然银,常具有黄铁矿-黄铜矿-斑铜矿-辉铜矿-赤铁矿的横向与垂向分带,铜矿化的外围也有方铅矿和闪锌矿分布^[3],盆地红层中存在钒和铀的氧化矿物^[14]。多数铜矿床中存在大范围的蚀变带,主要包括钙-镁-质、钠质和钾质蚀变,蚀变带常与硫化物的分带平行^[3,7]。

早期的多数研究将海相砂岩型铜矿床解释为同沉积型和沉积-改造型矿床^[15-18],根据近年来的研究,已排除同沉积和岩浆热液成因^[2]。随着中非铜矿带^[3,5,7-8,19-20]、Kupferschiefer 铜矿^[21-22]、Aynak 铜矿^[6]、东川铜矿^[10-11,23-24]、Bhudoli-Basari 铜矿^[25]等海相砂岩铜矿,以及 Spark Lake 铜矿^[1,26]、Udokan 铜矿^[27-28]、新疆萨热克铜矿^[29]等陆相砂岩型铜矿的深入研究,发现砂岩型铜矿床的主要成矿作用为卤水交代作用,广泛存在后生成矿的特征。蒸发岩溶解形成的卤水、残余海水、建造水(苦卤水)等,淋滤红层和基底中金属物质形成含矿流体,遇到富含有机物的还原性沉积物或还原性流体,沉淀形成层状铜矿床。赋矿地层中的沉积黄铁矿、海水蒸发岩及有机质(或油气)为成矿作用提供了硫源和还原剂。盆地卤水活动不仅形成了巨大规模的油气藏,也形成了大规模的铅锌矿化^[29]。目前普遍认为,硫化物的形成晚于围岩沉积作用,但是矿化相对于沉积作用的绝对年龄仍存在相当大的争议^[2,7,30-31]。

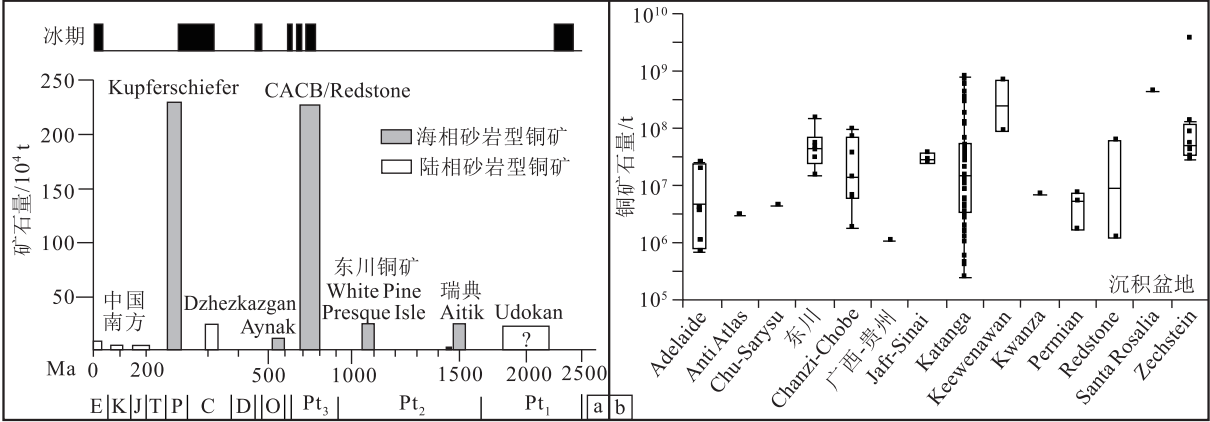


图2 砂岩型铜矿主要成矿年代与铜矿石量关系(a)和海相砂岩型铜矿不同盆地的矿石量^[3](b)
(a 据参考文献[2,7-8]修改)

Fig. 2 The relationship between tons of copper in sediments-hosted copper deposits and ore-forming epochs(a) and the characteristics of tons of copper in different basins of marine sandstone type copper deposits(b)

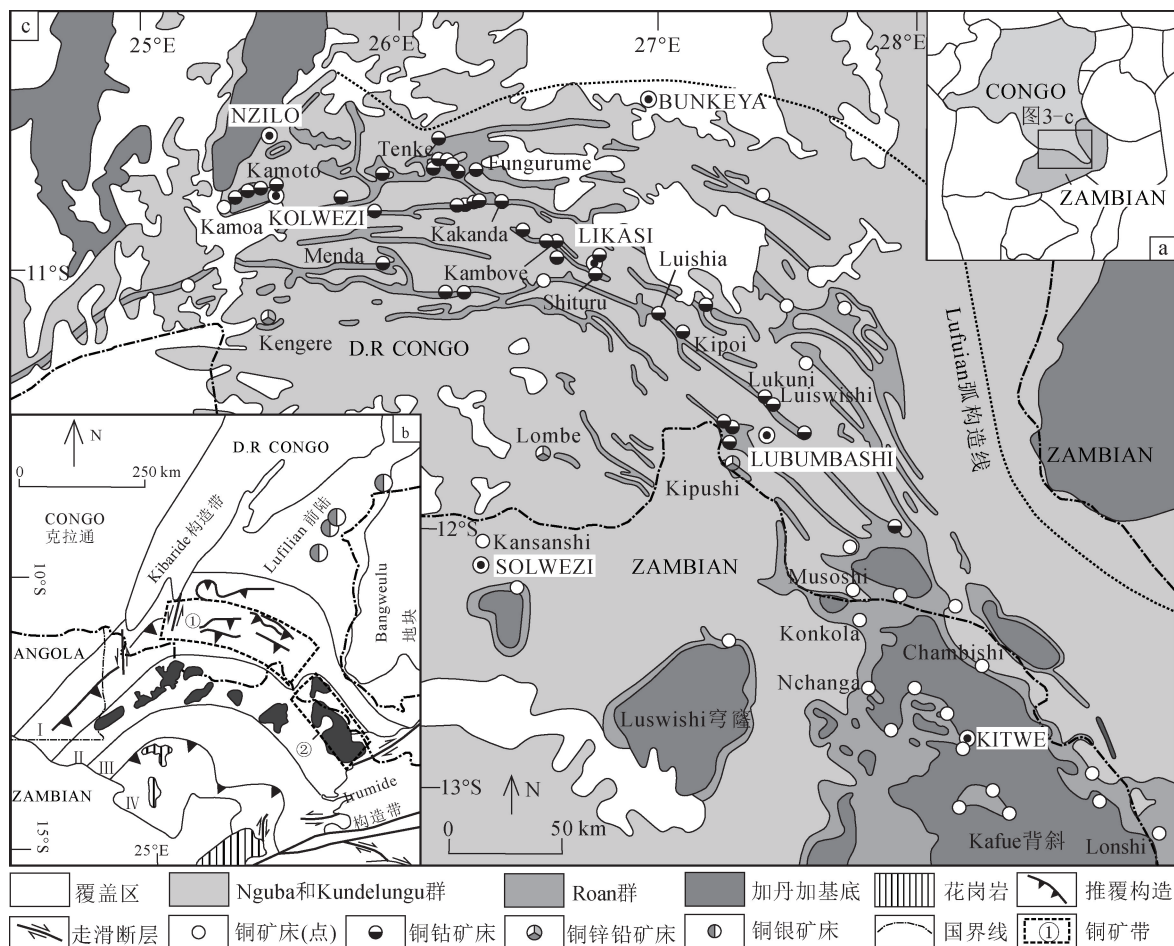


图3 中非铜矿带地理图(a)、区域构造简图(b)和矿产地质简图(c)

(a、c 据参考文献[1,19,30]修改;b 据参考文献[33]修改)

Fig. 3 Geographic map(a), regional tectonic map(b) and mineral geological map(c) of Central Africa copper belt

①—加丹加铜钴矿带;②赞比亚铜矿带;I—Lufilian 弧外部褶皱推覆带;II—穹窿地区;III—复式向斜带;IV—加丹加高原

2 基本地质特征

2.1 中非加丹加铜矿带基本地质特征

中非铜矿带(CACB)位于新元古代 Lufilian 造山带^[32],横跨刚果(金)与赞比亚两国(图 3-a),长约 400 km,是世界上规模最大、品位最高的砂岩型铜矿带,拥有约 2×10^8 t 的铜资源量和世界上最大的钴资源量(650×10^4 t)^[3, 8, 19],铜产量占全球铜矿产量的 7.2%^[3]。中非铜矿带分为加丹加铜矿带(KCB)和赞比亚铜矿带(ZCB)(图 3-b),加丹加铜矿带位于刚果(金),广泛发育海相砂岩型铜钴矿(图 3-c),长约 270 km,平均 Cu 品位为 2.59%^[3]。

新元古代加丹加超群沉积岩在加丹加盆地广泛分布,分为 3 个岩石地层单元:Roan 群、Nguba 群

和 Kundelungu 群(图 4-a)。加丹加铜矿带 Roan 群从上至下分为 Mwashya、Dipeta、矿 山和 RAT 四个组,岩石系列为一套滨海-浅海-深海相碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩组合的沉积建造^[34-35] 和一套规模巨大的 Roan 角砾岩带^[32, 36]。加丹加超群在 Lufilian 造山运动中发生变形,形成大规模的褶皱、逆冲断层和推覆体,加丹加铜矿带赋存于 Lufilian 弧外部褶皱逆冲带区域(I)(图 3-b)。加丹加铜矿带岩浆活动不发育,镁铁质侵入岩主要发育在 Dipeta 组,熔岩和凝灰岩主要呈夹层出现在 Mwashia 组下部沉积岩中^[35]。

Roan 群矿山组铜钴矿化层具有明显的层控特征,沿走向非常稳定,但横向岩相变化较大,由北至南呈现从近海岸到多礁环境的逐渐演变^[34],南部多礁层序以 R2.3 和 RSC 层中丰富的藻类生物礁为特征,

该部分拥有最典型的高品位铜钴矿床,如 Luiswishi 和 Kamoto 铜钴矿床^[18,34]。除受 Roan 群严格控制外,铜钴矿床明显受褶皱、断层和巨型角砾岩的控制^[37]。

最典型的矿体主要发育在 Roan 群矿山组 R2.1~R2.2(图 4-b),形成上、下 2 个主矿体,矿体呈层状、似层状,总厚度 15~55 m,平均 20~25 m,赋矿岩石主要为白云质页岩、细-粗粒白云岩、白云质粉砂岩等^[34],矿体品位 Cu 约 4.5% 和 Co 约 0.2%^[19]。这 2 个矿体被一个普遍弱铜矿化、低品位的 RSC 层分隔,该层由块状礁状叠层石白云岩和浅灰色-浅灰白色硅化结晶白云岩组成。第三层矿体赋存于矿山组 Kambove 段(R2.3)下部(图 4-b),位于上部矿体之上 60~100 m 处,该矿体仅在局部发育,厚度 4~20 m,赋矿岩石是海退层序的一部分,主要为灰黑色含炭质白云岩、含炭质白云质页岩^[18,34]。局部地区 R2.2 段 SDS 层深灰色-黑色富含有机物的炭质页岩和结晶白云岩、白云质页岩中发育小型铜钴矿体^[34],Cu 品位一般较低,约为 0.5%^[19]。矿山组的铜钴矿体呈多层位成矿特征,空间上具明显的垂直分带现象,储量规模巨大^[18]。

矿石矿物包括黄铜矿、硫铜钴矿、斑铜矿、辉铜矿等,氧化矿物有孔雀石、蓝铜矿、赤铜矿、水钴矿等,还有少量闪锌矿、辉钼矿等,脉石矿物主要有白云石、石

英、云母,其次为透闪石、滑石、绿泥石、方解石、硬石膏、电气石等^[3]。黄铁矿在矿化地层中几乎没有,但在矿化带外和贫矿带中大量存在,表明富矿区的黄铁矿可能被铜钴硫化物所取代^[3,18]。加丹加铜矿带具有明显的矿物分带特征,在横向上由盆地中心向两侧,纵向上由顶部向深部呈现黄铁矿-硫铜钴矿-黄铜矿-斑铜矿-辉铜矿-赤铁矿的分带特征^[19]。加丹加铜矿带内主要的围岩蚀变有白云石化、褪色化、泥化、方钠石化、钾化、滑石化、硅化、绢云母化等,强烈的蚀变可能是盆地卤水活动引起的^[3]。

2.2 东川铜矿基本地质特征

云南东川铜矿区域上位于扬子地块西缘的康滇构造带内,西部为青藏高原^[10](图 5-a)。东川断陷盆地处于普渡河断裂带和小江断裂带之间(图 5-b),区域构造由南北向与东西向 2 组主干断裂组成,形成区域性的“Z”形构造^[23](图 5-c),主要出露地层以汤丹群和东川群为代表,东川群包括因民组、落雪组、黑山组、青龙山组,主要为一套碎屑岩-泥质岩-碳酸盐岩组合的沉积建造,在新元古代受到绿片岩相浅变质作用^[10]。因民组(Pt₂y)为一套紫红、灰紫色含铁碎屑岩、板岩和一套角砾岩,这些岩石被认为是扬子地块最古老的陆相红层单元^[40-41]。落雪组(Pt₂l)主要岩性为青灰色、灰白色、

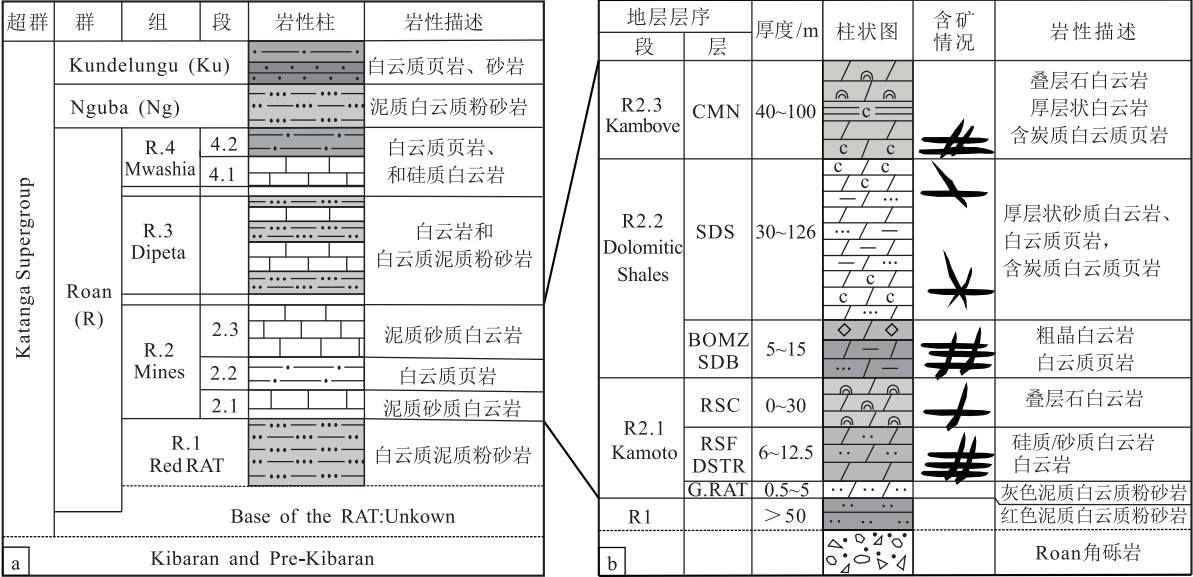


图 4 加丹加超群(a)及 Roan 群矿山组(b)地层柱状图^[3,19]

Fig. 4 Stratigraphic column of Katanga Supergroup(a) and Roan Group mine subgroup(b)
CMN—黑色炭质、白云质页岩层; SDS—白云质页岩层; BOMZ—黑色矿化岩层; SDB—底部白云质页岩层;
RSC—多孔硅质白云岩层; RSF—层状硅质白云岩层; DSTR—白云岩层; G.RAT—灰色泥砂质岩层

黄铁矿的分带规律^[38, 41]。东川矿床围岩表现为复杂的蚀变成矿共生序列,常见的围岩蚀变包括白云石化、褪色化、硅化、钠长石化、绿泥石化、绿帘石化,以及少量黑云母化、透闪石化、阳起石化等^[10-11]。

3 研究进展

3.1 矿床成因

20 世纪初,中非层状铜矿床的成因(表 1)一般认为与岩浆侵入热液作用有关。20 世纪 30—40 年代,有学者提出了同沉积观点,将金属与围岩沉积物的沉积作用联系在一起。20 世纪 80 年代,在“裂谷成矿模式”研究的基础上,认为该区是同成岩裂谷成矿。20 世纪 90 年代,根据中非铜矿带层状和脉状 2 类矿体特征,提出沉积-改造观点^[15-18, 34-45],认为中非铜矿带成矿作用分 2 个阶段:第一阶段是伴随沉积成岩作用,在原始沉积物压实和固结作用之前形成的同生沉积铜钴矿床,同生沉积作用是主要成矿阶段,部分学者认为矿化主要发生在沉积物压实和固结作用的成岩期^[37];第二阶段是与 Lufilian 造山作用有关的热液活动改造了层状铜钴矿床,但部分学者认为,除在 Kansanshi、Lubembe 等少数地方外,第二阶段对铜矿化贡献不大^[9, 37]。随着海相砂岩型铜矿和中非铜矿的深入研究,尤其是在矿体、矿石矿物特征和矿床地球化学,以及围岩蚀变特征等方面的新认识,许多学者提出了中非铜矿床是后生的,部分为成岩期的,与盆地卤水循环作用有关^[1, 3, 5, 7-8, 19]。

对于东川铜矿的成因,前人做了大量的研究并提出了诸多不同的观点(表 1)。20 世纪 60 年代以前,一般认为成矿与基性岩浆热液有关,是热液顺层交代而成。80 年代,随着易门铜矿床中钠质火山岩的发现,东川—易门地区的铜矿床成因被确定为海相喷流-沉积(SEDEX)型^[45-46]。龚琳等^[38]于 1996 年根据元古宙裂谷型铜矿成矿系列,认为东川铜矿是裂谷演化各个阶段形成的不同类型铜矿床的组合,提出稀矿山式、东川式、桃园式、滥泥坪式 4 种类型铜矿床组成的“四层楼”式矿床模式,其中东川式铜矿为喷流-热卤水沉积岩型铜矿床。冉崇英等^[40, 47]于

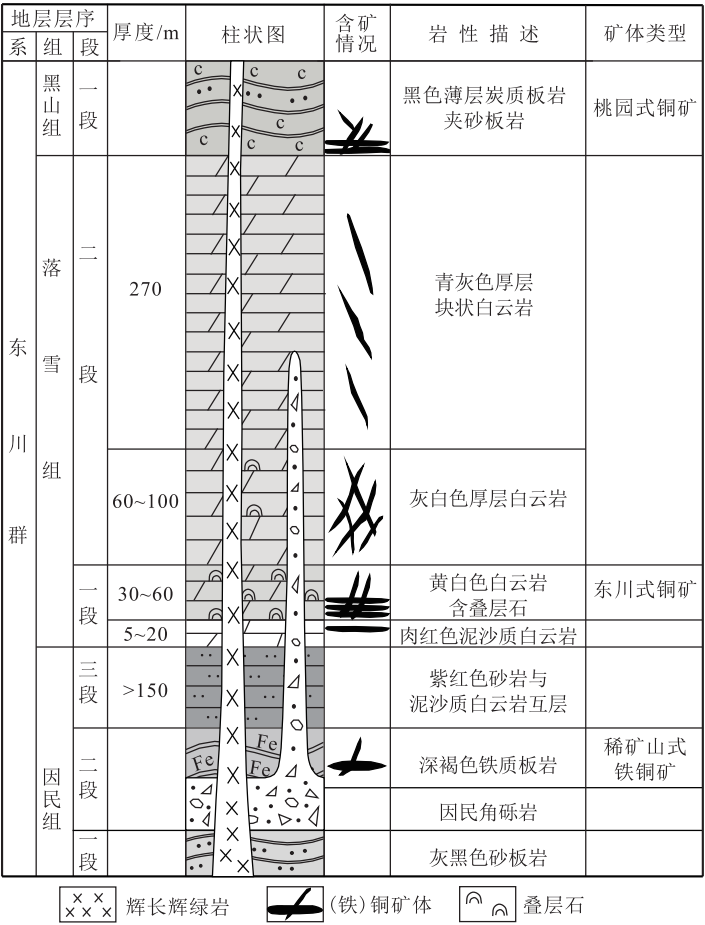


图 6 东川群地层矿产柱状图(据参考文献[10, 38]修改)
Fig. 6 Stratigraphic-mineral column of Dongchuan Group

1983 年和 2014 年指出东川式铜矿属沉积-改造成因,即“红层汲取-藻控成岩成矿-构造富集”模式,其中层状铜矿属“沉积-成岩”成因。华仁民、阮惠础等^[41, 48-49]于 1988 年、1989 年和 1993 年提出东川式矿体为“沉积-活化改造”成因,形成于成岩作用期间或成岩作用之后。邱华宁等^[50]于 2002 年根据层状铜矿石中石英脉的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄明显小于赋矿地层落雪组,认为东川式层状铜矿为热液交代成因。已有多数学者的研究发现,东川铜矿与典型的砂岩型铜矿在成矿地质特征高度相似^[2, 6, 10-11, 54], Zhao 等^[10-11]于 2010 年、2012 年提出东川铜矿的成矿作用发生在盆地演化历史的晚期,铜矿化及蚀变是下伏红层序列中的氧化卤水与白云岩的相互作用所致。祝新友等^[24]于 2017 年指出,东川铜矿不同于广义上的 SEDEX 型矿床或 VMS 型矿床,铜的沉淀富集受供给系统控制,同时与赋矿层位的岩性有关,与砂岩型铜矿一致,均为后生矿床。

表 1 中非铜矿带与东川铜矿成因观点

Table 1 Genetic view of central Africabelt and the Dongchuan copper deposit

中非铜矿带			东川铜矿		
年代	成因观点	观点代表	年代	主要成因观点	观点代表
20 世纪初	岩浆侵入热液成因		20 世纪 60—80 年代	基性岩浆热液成因	
20 世纪 30—40 年代	同沉积成因			沉积-变质学说	
				海相喷流-沉积成因	文献[45-46]
20 世纪 80 年代	裂谷成矿模式		20 世纪 90 年代至今	元古宙裂谷型铜矿成矿: “四层楼”式矿床模式	文献[38,52]
20 世纪 90 年代至今	沉积-改造成因: 同生沉积作用 是主成矿阶段	文献[15-18, 34-35,44]		沉积-改造成因	文献[40,47,51,53]
	海相砂岩型铜矿 (盆地卤水成矿)	文献[1,3,5, 7-8,19]		“沉积-活化改造”	文献[41,48-49]
				热液成因	文献[50]
				海相砂岩型铜矿 (盆地卤水成矿)	文献[6,10,24]

3.2 成矿物质来源

3.2.1 金属物质来源

海相砂岩型铜矿床与红层岩系具有紧密联系,赋存有层状铜矿的盆地底部通常存在一套或多套红层,这些陆缘碎屑岩为铜矿床最有可能的金属物质来源^[12]。

加丹加铜矿带金属物质一般认为来自于红层(RAT)碎屑岩和古元古代基底^[19,33-34],基底地台内金属来源为加丹加前陆相岩石,特别是在Bangweulu 地块中发现的古元古代低品位斑岩型铜矿床和津巴布韦太古宙克拉通中发现的铜-钴-镍矿床。古元古代基底中常见有大规模侵入体,并具有多期次侵入的特征,这些侵入体中富含铜元素,如Samba 花岗岩(5000×10⁴ t 矿石量,Cu:0.7%)、Nchanga 花岗岩等(150×10⁴ t 矿石量,Cu:1.5%)^[34]。

对东川铜矿金属和成矿流体来源一直争论不休^[38]。从铜的背景值看,因民组、落雪组及狮山段三层 Cu 的含量均高于地壳元素丰度数倍至数十倍,都可能成为铜的矿源层^[55]。冉崇英^[55]于 1989 年提出含矿层下伏因民组紫色层(红层)是铜的主要矿源层,因民组中的 Cu、Fe 等成矿元素背景值高于区域同层位对应地层^[38],发生褪色蚀变的砂岩、砂质白云岩 Cu 元素由 2000×10⁻⁶下降到 500×10⁻⁶~700×10⁻⁶^[56]。红层中的铜来自更古老的含铜蚀源区^[40-41],各种富铜岩石,尤其是花岗岩类、(变质)火山岩类的风化产物都可以作为铜的重要来源^[57]。东川地区大量辉长辉绿岩的 Cu 背景值较高,范围

为 52.4×10⁻⁶~3045×10⁻⁶,平均值为 952.2×10⁻⁶^[58],因此基性岩浆侵入活动为成矿提供了部分铜质。

3.2.2 硫源

根据海相砂岩铜矿的大量研究,该类矿床硫的来源具有多样性,主要有 5 个来源。

(1)海水、潟湖和蒸发演化卤水中的硫酸盐。国内外近年的研究数据显示(图 7),中非加丹加铜矿带硫化物中的硫同位素数据较广泛,δ³⁴S 值在-13.1‰~+23.1‰之间^[16,18,34],东川铜矿带硫化物的 δ³⁴S 范围为-14.7‰~+19.5‰^[11,38,42,59],层状硫化物与脉状硫化物的 δ³⁴S 特征极相似。大多数学者认为,该类型铜矿床 S 元素主要是起源于海水硫酸盐的细菌还原作用,重硫同位素与热化学还原反应相关。

(2)成岩期形成的黄铁矿。海相砂岩型铜矿资料显示,黄铁矿普遍存在,铜硫化物属于黄铁矿形成后转移叠加的矿物。中非 Luiswishi 铜钴矿床中的黄铁矿 δ³⁴S 值在-29.9‰~+25.5‰之间^[18,34](图 7),草莓状黄铁矿的轻硫同位素特征可能是海水细菌硫酸盐还原的产物,横切脉中粗粒黄铁矿具有重硫同位素特征,与小于 300℃时热化学还原反应一致^[18],东川地区的 2 类黄铁矿具有相同的特征^[49,53]。

(3)有机质和生物降解促使还原硫的生成。Roan 群矿山组白云岩和落雪组一段灰白色白云岩中均有大量的叠层石发育,藻席及藻礁普遍可见,藻类生物的死亡产生大量有机质,将卤水中的 SO₄²⁻还原成 H₂S,还原硫是形成金属硫化物必不可少的

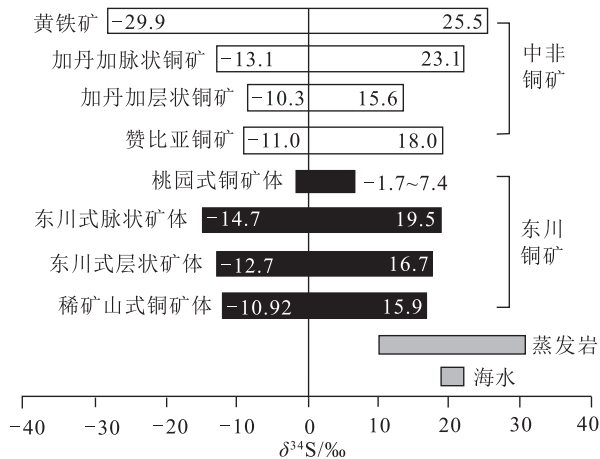
图7 中非铜矿带与东川铜矿的硫同位素值对比^[34, 59]

Fig. 7 Sulfur isotope values from Central Africa and the Dongchuan copper deposit

物质^[12]。由有机质化合物通过细菌还原反应,还原硫酸盐也可以提供丰富的硫源^[5],过程见公式(1)。



(4) 蒸发岩的溶解。发育海相砂岩型铜矿的盆地中通常发育较厚的海相蒸发岩层,通常由石膏、硬石膏及其他盐类组成,蒸发岩溶解形成的盆地流体可以为矿化提供大量的硫。中非加丹加盆地、中欧的 Zechstein 盆地、哈萨克斯坦 Chu-Sarysu 盆地等均发育一定规模的蒸发岩层^[12, 7]。

(5) 流动性烃类和油气藏中的 H_2S 。研究显示,多个典型海相砂岩型铜矿中发现了碳氢化合物或原油,如美国 White Pine 矿床中发现了油气包裹体和固态焦性沥青,硫同位素分布表明,所有硫均来源于海水硫酸盐细菌还原,其次是石油烃源岩有机质中硫化物的溶解^[11, 26]。东川铜矿目前未发现油气包裹体,但包裹体中也发现了 CH_4 、 C_2H_6 、 C_6H_6 等有机化合物^[39, 56, 60]。

3.3 成矿流体性质、来源与搬运

3.3.1 成矿流体特征

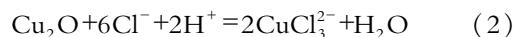
中非铜矿以往的流体包裹体研究表明,成矿流体为中低温、中高盐度、富含硫酸盐和氯化物的地下氧化卤水^[7, 19],含有多种子晶矿物,一般含有大量石盐和钾盐子晶,含部分硫铜钴矿、赤铁矿等金属矿物和少量硬石膏、重晶石、菱镁矿、磷灰石等非金属矿物^[20, 32, 61~62]。包裹体的盐度为 15%~40% NaCl,少量大于 46% NaCl,均一温度集中在 90~220℃^[16, 20, 32~33, 37, 63]。

此外,也记录了一些高温 (200~467℃) 的流体特征^[20, 44, 61, 63],一般认为是 Lufilian 运动期间或之后形成的,对铜矿化贡献不大^[9, 37, 61],部分学者认为高温流体为后期改造热液^[44]。

东川铜矿以往的成矿流体研究集中在稀矿山式铁铜矿和东川式铜矿,成矿流体具中低温、中高盐度、高密度特征^[38~39, 46, 55~56, 59~60],包裹体含有丰富的 NaCl 和 KCl 子晶,少量硬石膏子晶^[39],液相和气相部分主要为 H_2O ,其他气相组分包括 CO_2 、 N_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、Ar、 H_2S ^[56, 60],液相中含有 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子^[60]。原始成矿溶液为 Na-Ca-Cl 型及硫酸盐型热卤水,富含有机质^[49]。流体中 CO_2 的存在,以及少量 N_2 和 CH_4 的存在^[56],可能是由于在沉积序列中存在较高的碳氢化合物的分解。

3.3.2 成矿流体的来源

形成海相砂岩型铜矿床需要的流体数量是巨大的,需要长期维持或恢复。成矿流体的来源可能包括演化的残留海水、建造水(苦卤水)、蒸发岩溶解形成的卤水、烃成熟过程中产生的流体、石膏脱水、蒙脱石-伊利石转化、低级变质脱水形成的流体,以及液态烃和气体(CH_4 和 CO_2),大气降水沿盆地边缘的地形重力驱动流体流动可以提供大量的流体^[2~3, 7]。大量的碳-氧同位素数据显示,海相碳酸盐提供了主要的碳,如东川铜矿带和加丹加铜矿带含硫化物碳酸盐脉 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 $-8.5\text{‰} \sim -1.7\text{‰}$ ^[11, 38, 46, 59~60] 和 $-10.1\text{‰} \sim -3.7\text{‰}$ ^[20, 44],存在较低的碳同位素值,表明成矿流体可能与有机碳或石油的同位素交换有关。东川铜矿带因民铜矿氢-氧同位素 ($\delta\text{D}_{\text{SMOW}}: -86.4\text{‰} \sim -65.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}: 0.7\text{‰} \sim 4.3\text{‰}$)^[59] 显示,建造水(苦卤水)也是成矿流体的主要来源之一。在多数大型沉积盆地中,深部卤水的分布与上覆蒸发岩有关^[64],通过蒸发岩的溶解可以获得高盐度的卤水。根据地层重建,中非加丹加铜矿带 Roan 群内至少含有 3 个蒸发岩层,其中一个位于主矿体之下^[32, 36],东川地区因民组中已发现的石盐和硬石膏假晶,表明可能存在蒸发岩原岩^[23, 38, 49]。蒸发岩可以提供富含氯的地下卤水,通过 Cl^- 络合作用,萃取红层中的金属元素形成含矿流体^[5, 65](公式(2))。



3.3.3 成矿流体的运移

盆地卤水对流是通过连续的卤水生产和卤水

温度的变化来实现的,盐底辟构造和辉绿岩侵入作用引起的热异常为含矿卤水循环提供了热动力^[7, 23, 49, 64, 66]。沉积过程中的压实作用、地貌高差、地温梯度、蒸发岩溶解、地下水补给、放射性衰变放热、构造运动、盐底辟、冰川作用、岩浆活动等都可以导致地下流体大规模地运移^[3, 6-7]。

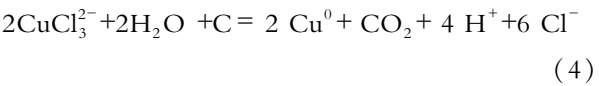
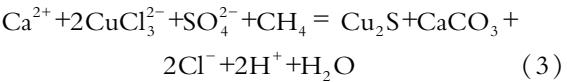
在海相砂岩型铜矿与 MVT 铅锌矿床中,断裂构造对成矿有重要影响,是成矿流体循环对流的主要驱动机制和上升通道^[7, 24, 41],断裂构造规模越大、发育越密集,成矿流体向上迁移成矿的可能性也越大,如加丹加铜矿带 Nguba 群的 Kamoa 铜矿。高盐度卤水在盆地内形成对流或者通过其他途径流出盆地,引起盆地内金属运移区域广泛的蚀变,对这些蚀变带的研究将有助于识别盆地内的流体流动路径,一般断层带和盆地边缘是高流区(图 8),其次是在具有较好渗透性的层序中^[7]。

3.4 金属元素的沉淀

海相砂岩型铜矿床的成矿研究表明,含矿流体与还原性流体发生混合作用或交代沉积黄铁矿而造成金属硫化物的沉淀^[1-9, 11-12, 20, 64, 67]。该类型矿床中与硫化物共生的碳酸盐矿物具有较低的碳同位素,说明矿床内曾经存在碳氢化合物储库^[6]。一般认为,碳氢化合物是一种流动的还原性流体^[3]。含矿流体与还原性富硫流体或储层中天然气(CH₄和 H₂S)发生还原反应时^[1, 3](公式(3)),成矿体系温

度、Eh 和 $f(S_2)$ 降低, pH 值升高,铜、铁络合物发生失稳,先后生成磁铁矿、赤铁矿等氧化物,以及黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿等硫化物^[43]。矿化层位往往位于氧化与还原、陆相与海相的界面附近,从氧化还原界面向上和向外一般发育辉铜矿-斑铜矿-黄铜矿的次级分带,该硫化物的分带特征在垂直方向上与海进序列模式正好相反,说明不能用简单的同生沉积分带解释硫化矿物带状分布^[41],而可能是卤水迁移过程中经历氧化-还原障形成的矿物沉淀分带^[24]。

铜矿物亦可富集于细碎屑相和泥质相中^[5],富含有机质的黑色泥质岩石是这类铜矿最佳的产出层位。如产于加丹加铜矿带矿山组炭质页岩中的铜钴矿体和东川铜矿黑山组炭质板岩中的桃园式铜矿体,富铜卤水与有机碳接触可以产生天然铜^[5, 65],见公式(4)。根据因民铜矿区有机碳的含量分析,Cu 元素与有机碳含量之间的相关系数达 0.90^[49],在阿富汗 Udokan 矿床中有机质与铜矿化关系具有同样的特点^[27]。



4 成矿模式

过去 50 年来,对于海相砂岩型层状铜矿床成因认识经历了巨大的变化,先后提出了岩浆热液交代成因、裂谷成因、同生沉积成因、沉积-改造成因、后生成因等多种成因。因其成因复杂,争议很大,长期存在“同生”和“后生”2 种成矿模式的争论。

4.1 “同生成矿”模式

20 世纪初,同沉积的或“同生”成因被认为是该类型层状铜矿床形成的主要模式,即“沉积-成岩”模式,该模式指直接由沉积作用形成铜的富集而成矿,或在沉积阶段已经有铜的初步富集,经过成岩作用而最终形成层状铜矿,在空间上矿体产于赋矿岩石中,二者在时间上同时形成^[57]。随着深入研究,对沉积岩型铜矿又提出了“沉积-改造”模式^[15-18, 34-35, 38, 40, 44, 51, 53],指矿床或矿化地层于沉积作用形成后,在另一次或多次地质作用中,处于绿片岩相变质程度的温度、压力范围,不均一围压和宏观破裂中的各种改变,包括重结晶、溶解、重新沉淀

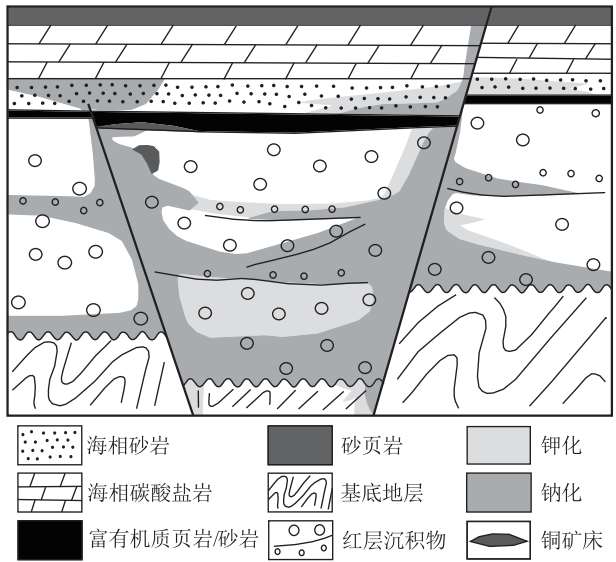


图 8 红层盆地卤水循环与蚀变带的关系图^[7]

Fig. 8 The brine circulation model of a red-bed basin and relationship with alteration zone

和富集成矿^[48, 53]。在改变过程中对层状铜矿的矿质加以改造,金属元素发生了转移,重新沉淀于有利岩层中,形成脉状矿体,而不是原地成矿^[40, 57]。改造部分可以发生于成岩后一次或多次地质作用,也可以发生于成岩阶段^[18, 37, 52, 56-57],与后期的构造运动或造山运动相关,如中非铜矿带的 Lufinan 运动和东川地区的晋宁-澄江运动。部分学者认为改造部分主要为侵入岩的改造,在其多旋回活动中带来巨大热能和铜(铁)矿源,对多层位层状铜矿起到改造和富集作用^[51]。

部分学者在东川铜矿的形成机制研究中,提出“沉积-活化改造”模式^[41, 48-49],铜质在沉积阶段进入因民组红层中形成矿源层,成岩作用期间或成岩作用之后,由热液将因民组中的铜质转移到落雪组底部形成层状、似层状矿体,硫化铜在白云岩中的沉积是由于富有机质富硫流体与携带铜质的热卤水的混合作用所致^[23, 49]。“沉积-活化改造”模式在物质来源、成矿流体来源、金属元素沉淀等多个方面与盆地卤水成矿模式较相似,但东川地区的蒸发岩仍存在证据不充分的问题,本文第 6 节中存在问题作了分析讨论,此处不作赘叙。

4.2 “后生成矿”模式

Cox 等^[5]于 2003 年提出了砂岩型铜矿床是后生的,部分为成岩期的,与盆地卤水循环作用有关。盆地卤水成矿模式是该类矿床最能反映后生成矿观点的成因模式^[2],根据 Hightman 等^[7-8]总结的海相砂岩型铜矿成矿模式,以加丹加成矿带为例进行分

析(图 9):加丹加超群蒸发岩溶解形成的残余盐水或卤水,向下移动到下部的氧化红层(RAT)中,这些卤水能够从红层和基底中浸出金属元素形成含矿流体,盐底辟构造和辉绿岩侵入作用提供热动力^[23, 49, 64],引发高盐度含矿卤水的对流,同时期的断裂作为供给系统^[24],使氧化的含铜卤水向上循环到红层上部,越过氧化-还原界面,在水文封闭的物理化学圈闭内,遇到富含有机物的沉积岩或还原性流体,还原沉淀形成层状铜矿床。

根据海相砂岩型铜矿的总结,盆地卤水成矿一般需要以下 6 个条件^[1, 3-5, 7, 12, 25]。①铜源岩,盆地必须含有至少 300 m 的氧化、含赤铁矿的渗透性铜源岩^[1]。典型的矿源岩为陆相红色砂岩、页岩、砾岩和陆相火山岩。海相火山岩中所含的还原态硫阻止了赤铁矿的形成,因此不适合作为矿源岩^[5]。②能溶解和运输金属元素的地下卤水来源。蒸发岩提供了富含氯的地下卤水,在铜-钴热液系统中,Cl⁻络合是金属输运和萃取金属元素的主导过程^[5, 65]。③含铜卤水的迁移。沉积卤水中的 Cu 元素从铜源岩向赋矿岩层运移的流体系统,需要不同水文驱动力,如果盆地有盐构造运动的历史就更好了^[1]。④能沉淀铜并形成矿床的还原性流体。还原性流体可能来源于富含有机物的页岩和碳酸盐岩,也可能来源于沉积物中的液态或气态烃类(天然气、石油和硫化氢)^[65]。⑤有利于流体混合的环境。Haynes^[68]提出大多数硫化矿是在沉积物-水界面 50 cm 内沉淀的,因为在这个深度以下的细菌还原硫酸盐作用被

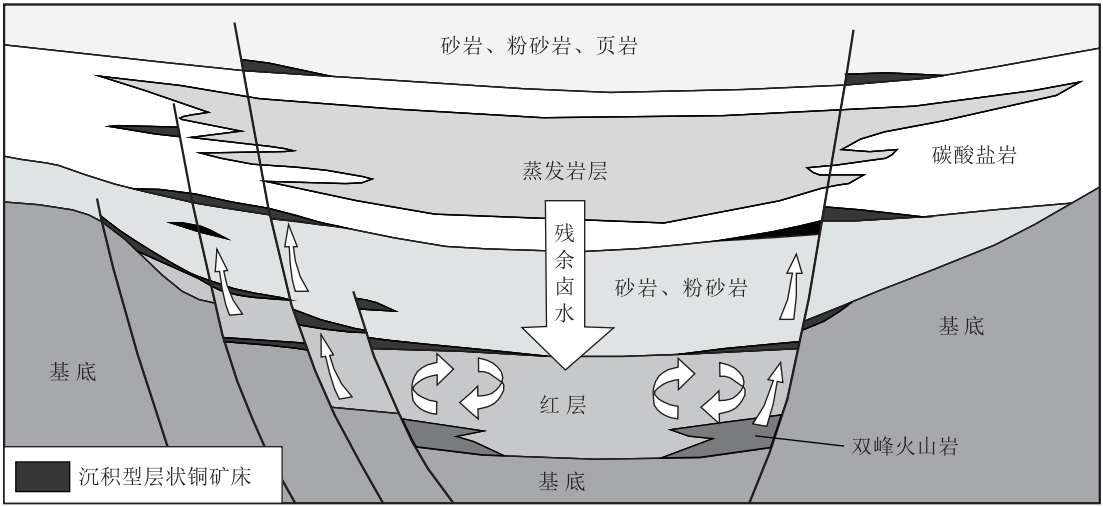


图 9 盆地卤水成矿模式图^[7]

Fig. 9 A metallogenic model of basin brine

抑制了。角砾岩、砂岩、白云岩等可渗透的赋矿岩石,不但是成矿流体良好的运移通道,也为流体混合提供了沉淀场所。断层或褶皱可能产生一个压力水头,导致 2 类流体的流动混合^[23]。⑥具有封闭空间。盆地内封闭层可以是细粒、富有机质的沉积岩,覆盖于油气藏或渗透性较好的地层之上^[1],也可能为地层尖灭或背斜圈闭,以及成矿前的褶皱和断裂作用形成的复杂组合圈闭^[3]。

5 年代学研究

(1) 中非铜矿带

中非加丹加和赞比亚铜矿带以往大量硫化物的 Re-Os 同位素和铀矿物、金红石、独居石的 U-Pb 同位素年龄数据^[30-31, 61, 66, 69-70]表明,中非铜矿大规

模的成矿作用发生于 $682 \pm 28 \sim 499.4 \pm 2.3$ Ma (图 10-a),明显晚于 880~735 Ma 的 Roan 群沉积作用^[9, 17, 31]。少量铜钴硫化物的 Re-Os 等时线数据^[66, 69]为 $821 \pm 51 \sim 762 \pm 33$ Ma,解释为 Roan 群沉积作用时形成的矿化。其中辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄集中在 $536.6 \pm 2.3 \sim 499.4 \pm 2.3$ Ma^[30, 61, 66], Sillitoe 等^[31]指出,中非铜矿带的辉钼矿受到绿片岩相的变质作用,甚至更高级的变质作用,发生在 Lufilian 造山运动后期的单独矿化,因此辉钼矿的 Re-Os 同位素年龄不能代表成矿年龄。大量的不确定性、不一致性、大范围的年龄数据,以及漫长的或多阶段的成矿事件,使大多数矿床无法确定准确的年代。一些年代测定研究表明,成矿作用的年龄晚于围岩的沉积^[61, 69],这与岩石学和地球化学研究

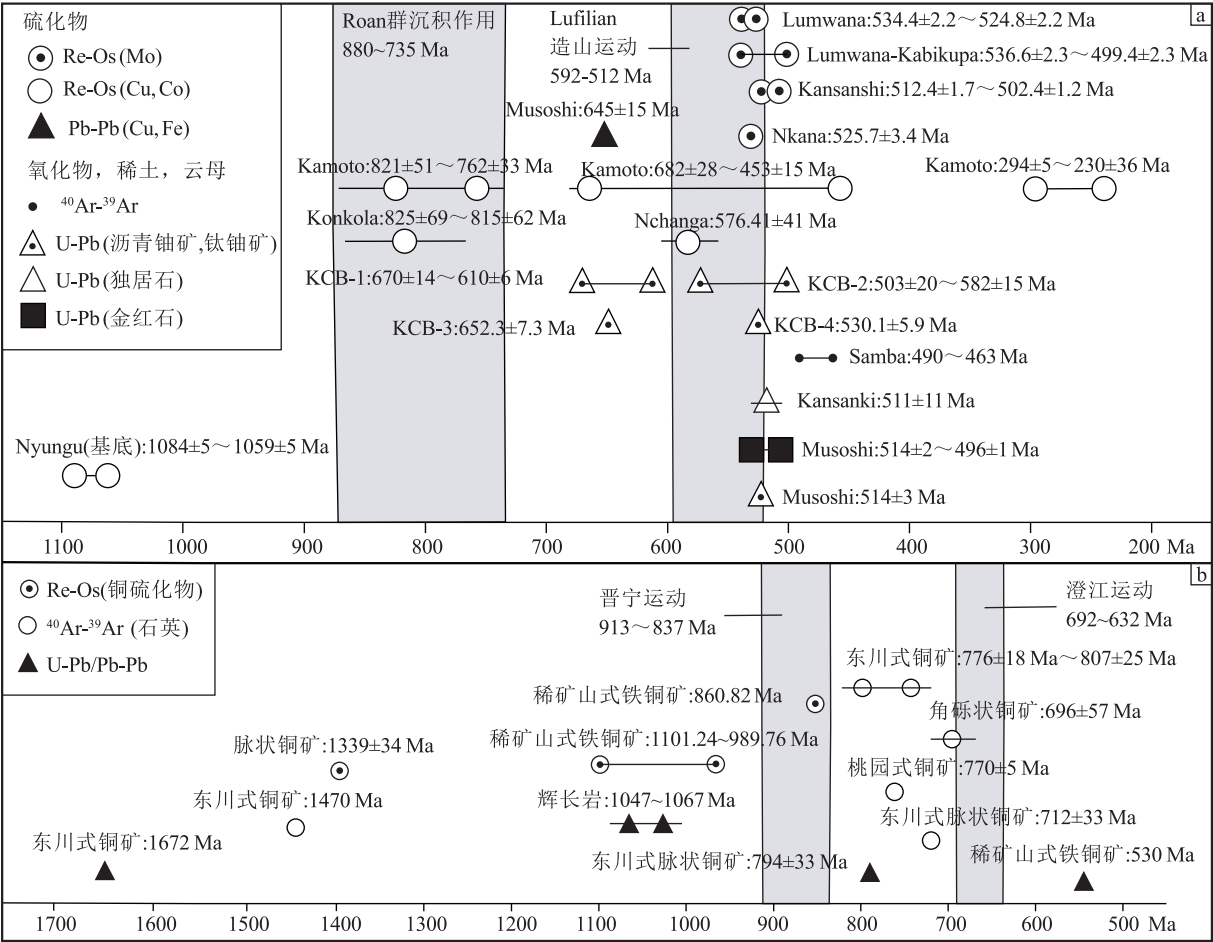


图 10 中非铜矿带(a)与东川铜矿(b)同位素年龄投影图

(a 数据据参考文献[9, 17, 30-31, 61, 66, 69-70]; b 数据据参考文献[11, 42, 50, 56, 60, 71])

Fig. 10 Isotopic ages in Central Africa(a) and the Dongchuan copper deposit(b)

KCB-1—Luiswishi, Luishia, Shinkolobwe, Swambo, Kalongwe 矿区; KCB-2—Mososhi, Luiswishi, Kambove, Kamoto 矿区;
KCB-3—Shinkolobwe, Luishia, Swambo, Kalongwe 矿区; KCB-4—Nkana, Luiswishi, Kolwezi, Kamoto, Mososhi 矿区

的结果一致^[3]。

(2) 东川铜矿带

东川铜矿近年来的 U-Pb 同位素、Re-Os 同位素、⁴⁰Ar-³⁹Ar 定年等研究揭示^[42, 50, 56, 60], 大量的年龄数据集中在 1670~990 Ma 和 790~530 Ma 两个阶段(图 10-b)。Zhao 等^[11]通过切割矿床的辉绿岩锆石 U-Pb 测年, 认为汤丹矿区铜矿化的最小年龄为 1047±3 Ma。方维萱等^[71]通过碱性钛铁质辉长岩类 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年, 认为稀矿山式铁铜矿体的形成时代为 1067±20~1047±15 Ma, 属于格林威尔同造山期形成的产物。通过辉绿岩年龄推测的成矿年龄, 与李元龙^[60]在稀矿山式铁铜矿中测得的 1101.24 Ma 和 989.76 Ma(黄铜矿 Re-Os 同位素)年龄相近。但辉绿岩的锆石年龄不能直接代表成矿年龄, 目前关于东川铜矿的成矿年龄仍存在较大争议。

6 存在问题

(1) 海相砂页岩型铜矿的矿床成因趋于后生成矿, 但仍存在争议

关于海相砂岩型铜矿的矿床成因研究, 从 20 世纪初至今, 提出了多种观点。“沉积-改造”模式是该类型矿床的传统观点, 根据铜矿体的层状与脉状特征分为 2 期成矿作用。矿体中常发育的层状、条带状、马尾丝状矿石构造是“沉积-成岩”成矿的重要证据, 然而矿石显微构造特征显示, 铜矿化一般沿砂质层分布, 与赋矿岩层的渗透性有关, 并不一定完全顺沉积层理发育^[5, 7-8], 矿石一般呈交代结构, 铜矿化沿裂隙向两侧顺层矿化逐渐减弱, 明显不同于沉积成因的条纹条带。华仁民等^[48]指出, 东川式层状铜矿明显产于海进序列中, 可是其硫化物的分带在垂直方向上与海进序列模式相反, “赤-辉-斑-黄-黄”的分带可能是卤水迁移过程中经历氧化-还原障形成的矿物沉淀分带。因此, 海相砂岩型铜矿“沉积-改造”模式存在一定的争议。

随着矿床地质学的深入研究, 海相砂岩型铜矿的后生成因越来越清晰, 铜矿化主要发生于沉积作用之后, 部分为成岩期的, 与盆地卤水循环作用有关^[1, 5, 7-8, 19]。Sillitoe 等^[30-31]对加丹加和赞比亚铜矿带的年代学数据统计分析表明, 大规模的成矿作用发生于 670±14~453±15 Ma, 明显晚于 Roan 群的沉积作用(880~735 Ma), 该数据与沉积-改造模式矛盾。邱华宁等^[50]在东川式层状矿石中石英脉测得

的⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄与李元龙^[60]在稀矿山式铁铜矿中测得的黄铜矿 Re-Os 同位素年龄均晚于落雪组的沉积年龄。目前对准确的成矿年龄仍存在争议, 但通过多个海相砂岩型铜矿的矿体特征、矿石矿物组合、成矿物质来源、成矿流体性质、矿床地球化学、成矿年代等的研究, 后生成矿的盆地卤水成矿模式逐渐替代了沉积-改造模式。

(2) 东川铜矿成因类型争议较大, 成矿地质特征与中非铜矿相似

东川铜矿的矿床类型一直以来存在较大争议, 近年的研究表明, 东川铜矿含矿建造、矿体特征、矿化组合、围岩蚀变、成矿温度均与中非铜矿的盆地卤水成矿模式一致^[6, 10-11, 23-24, 54]。

首先, 东川铜矿与中非加丹加铜矿带均为褶皱-构造控矿体系, 成矿作用受高角度断裂和特定层位制约。其次, 两者在含矿建造、矿体特征、矿石矿物、围岩蚀变等具有明显的相似性。

①所产出的盆地内都有完整的沉积旋回, 东川群形成于中元古代, 加丹加超群形成于新元古代, 均属于元古宙砂页岩-白云质碳酸盐岩-黑色炭质页岩海进式含铜建造, 矿体在各个岩性段中均有分布^[6], 具有明显的多层位成矿特征。

②两者典型矿体的赋矿岩性高度相似(图 11)。东川式铜矿体赋矿岩石为落雪组浅灰白色-白色砂质白云岩, 广泛发育叠层石; 加丹加铜矿带上、下部矿体赋存于矿山组中下部 BOMZ-D.Strat 层白色白云岩、泥质粉砂质白云岩中, 其中 RSC 层叠层石较发育。两者的赋矿岩性均以白云岩、砂质白云岩为主, 富含叠层石。桃园式铜矿体赋矿岩性主要为黑山组炭质板岩; Roan 群矿山组上部第三层铜矿体赋矿岩性为炭质白云质页岩。两者均产出于还原环境, 以富含有机炭质为特征。

③矿体都具有明显的层控特征, 呈层状、似层状、透镜状。受构造运动的影响, 东川群与铜矿体倾角较陡(70°~85°), 而加丹加盆地发生过大规模推覆构造运动, Roan 群与铜矿体产状不一, 总体较平缓, 局部较陡。矿石呈浸染状、细脉状、网脉状及角砾状构造, 矿石矿物主要为辉铜矿、斑铜矿和黄铜矿, 氧化物为孔雀石、蓝铜矿, 加丹加铜矿带共生有硫铜钴矿、水钴矿等钴化物。矿石矿物常形成“赤铁矿-辉铜矿-斑铜矿-黄铜矿(硫钴矿)-黄铁矿”的分带特征^[19, 34, 38, 41]。

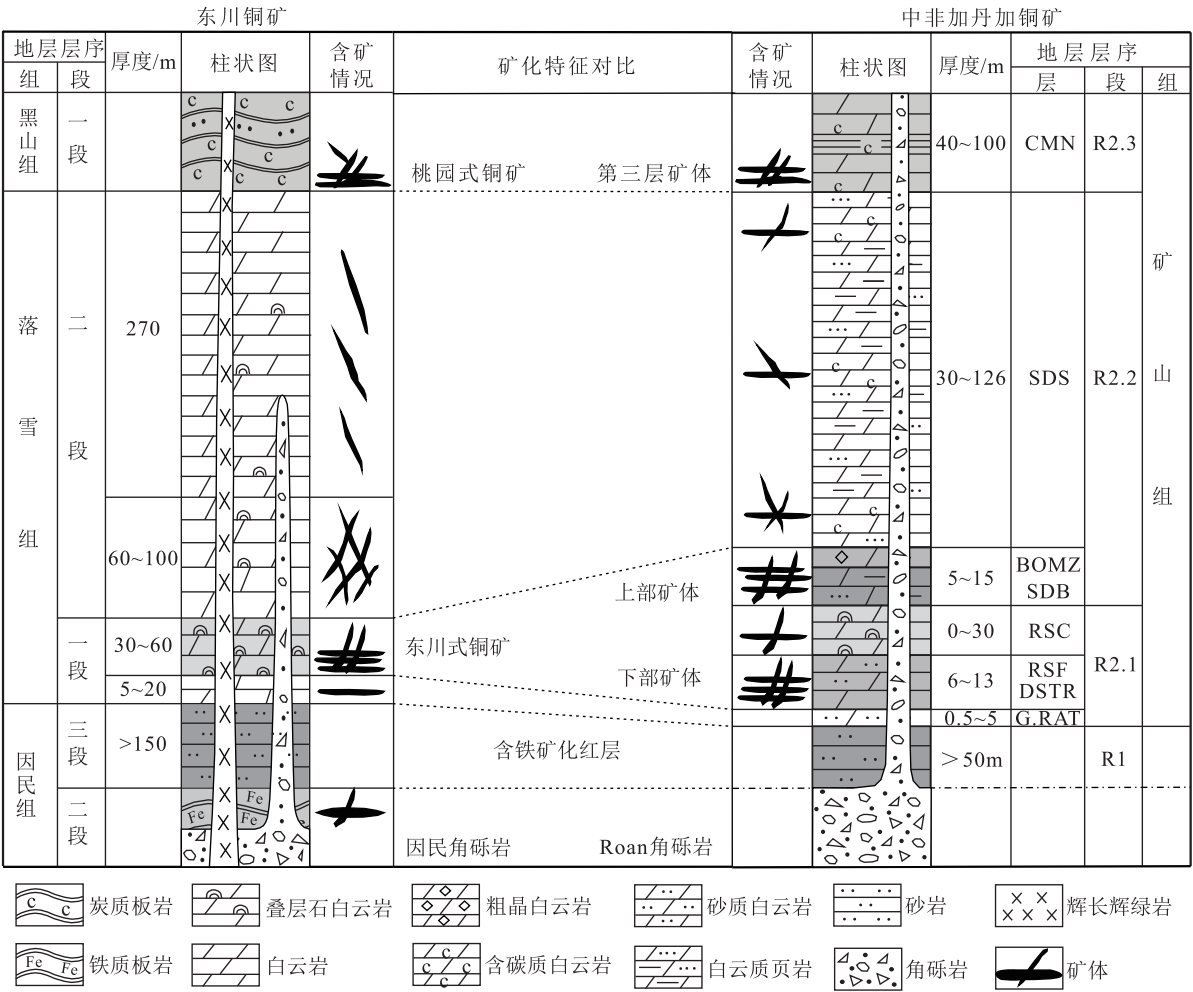


图 11 东川铜矿与加丹加铜矿赋矿层位及矿化特征对比图(图中代号注释同图 4)

Fig. 11 Comparison of ore-bearing strata and mineralization characteristics between Dongchuan and Katanga copper deposits

④铜矿床中都存在大范围的低温卤水蚀变带,主要包括碳酸盐化、褪色化、钠质、钾质蚀变等^[3, 7, 10],褪色化主要发育在红层顶部氧化还原界面附近。

⑤2个矿带中均发育一套区域性的角砾岩,加丹加铜矿带 Roan 角砾岩与蒸发岩层的变形溶解有关,因民角砾岩也具有相似的成因特征。东川地区受膏盐层规模制约,因民角砾岩在规模上远小于 Roan 角砾岩,未能形成中非铜矿带大规模的逆冲推覆构造和巨型角砾岩带。

2个矿带也存在一些成矿时代、构造背景的差异,推测这是东川铜矿规模达不到超大型铜矿规模的主要原因^[6]。

(3)东川铜矿成矿机制不明确

东川铜矿成矿机制不明确,成矿规律研究不完善,对多层位成矿、主要控矿因素认识不足,以往成

矿流体包裹体的研究主要集中于稀矿山式铜铁矿,而对东川式铜矿及桃园式铜矿研究很少,未能对东川群稀矿山式、东川式、桃园式3种矿体类型成矿流体进行综合研究,缺乏对整套成矿流体演化特征规律的探索。海相砂岩型矿床成矿作用与两类流体的混合有关,一类是相对氧化的富铜流体,其来源与蒸发盐盆地有关,另一类是还原性质的富低价态硫的流体^[5, 64, 67]。东川地区以往的成矿流体研究集中在富铜流体的还原作用,对还原性流体或还原剂的研究较少。对于2套流体的混合作用还需要进一步研究,建立起成矿流体的演化过程,完善东川铜矿成矿机制。

(4)高盐度成矿流体主要来源于蒸发岩层溶解,但东川铜矿中蒸发岩指示性矿物较少

在海相砂岩型铜矿所产出的盆地中,深部卤水

的分布和蒸发岩关系密切^[2,64]。东川地区以往工作中也提出了古蒸发岩层的存在,但均未进行系统论述,尤其是蒸发岩层与因民角砾岩的成因关系,笔者根据近年的研究成果,结合中非蒸发岩层的重建模型,总结了几点证据。

①元古宙落雪组中含有层状藻白云岩,表明是沉积在潟湖环境,板块构造重建表明东川盆地处于热带到亚热带环境,有利于蒸发的纬度^[10]。

②元古宙地层中存在膏盐和硬石膏假晶:东川铜矿带角砾状铁矿石和因民组白云质碎屑岩与含碎屑白云岩中,都曾发现有石膏、石盐假晶^[38,49],虽然东川地区的蒸发岩假晶保存较少,但从岩矿石的结构构造看,可能存在膏盐层溶解的过程^[11]。

③富 SO_4^{2-} 、富 Cl^- 的成矿流体:根据研究显示,东川铜矿成矿流体具有中低温、中高盐度、高密度特征,包裹体中含有 CaCl_2 、 KCl 及硬石膏子晶和丰富的 NaCl 子晶^[11,39,56,60]。

④因民角砾岩成因:近年的研究表明,因民角砾岩与膏盐层或蒸发岩层关系密切,认为是蒸发盐底辟—溶解—坍塌而成^[11,23-24]。巨型角砾岩在其他富蒸发岩区域也有暴露^[36],如中非加丹加盆地、伊朗北部的 Kavir 和 Qum 盆地、南澳大利亚 Flinders 山脉、加拿大北极的 Sverdrup 盆地等地区,均发现与蒸发岩溶解、底辟相关的巨型角砾岩。

⑤钠化、钾化、泥化等低温热液蚀变:东川地区常发育钠长石化、绿泥石化和绿帘石化、黑云母化等蚀变,这些蚀变均与盆地卤水作用相关^[11,24]。

7 展 望

海相砂岩型铜矿的后生成因越来越清晰,成矿模式主要为盆地卤水成因模式。通过对东川铜矿与中非加丹加铜矿的成矿地质特征对比,发现 2 个铜矿带在含矿建造、矿石特征、矿物组合及矿物分带特征具有较高的相似性,东川铜矿为海相砂岩型铜矿。海相砂岩型铜矿是全球重要的铜矿床类型,成因类型一定程度上约束了矿山找矿勘查方向,对成矿作用、控矿因素的重新认识,在该类型铜矿的找矿工作中作为理论依据可以起到重要的指导作用。

致谢:野外调查期间得到了云南金沙矿业股份有限公司的大力帮助,在成文过程中色地科矿产勘查股份有限公司和北京中资环钻探有限公司

海外项目组提供了大量加丹加铜钴矿带相关资料,审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此致以诚挚的感谢。

参考文献

- [1] Hayes T S, Cox D P, Piatak N M, et al. Sediment-Hosted Stratabound Copper Deposit Model: Chapter M of Mineral Deposit Models for Resource Assessment [M]. Reston, Virginia: United States Geological Survey, 2015: 1-148.
- [2] 刘玄, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 沉积岩型层状铜矿床研究进展[J]. 地质论评, 2015, 61(1): 45-63.
- [3] Taylor C D, Causey J D, Denning P D, et al. Descriptive models, grade-tonnage relationships, and databases for the assessment of sediment hosted copper deposits - With emphasis on deposits in the Central African Copperbelt, Democratic Republic of the Congo and Zambia [M]. U.S. Geological Survey, 2013, 2010-5090-J: 1-154.
- [4] Kirkham R V. Distribution, settings, and genesis of sediment-hosted stratiform copper deposits [J]. Geological Association of Canada Special Paper, 1989, 36: 3-38.
- [5] Cox D P, Lindsey D A, Singer D P, et al. Sediment-hosted copper deposits of the world: Deposit models and database [M]. Reston, Virginia: United States Geological Survey, 2003: 1-53.
- [6] 高辉, 裴荣富, 王安建, 等. 海相砂页岩型铜矿成矿模式与地质对比——以中国云南东川铜矿和阿富汗安纳克铜矿为例[J]. 地质通报, 2012, 31(8): 1332-1351.
- [7] Hitzman M W, Kirkham R, Broughton D, et al. The Sediment-Hosted Stratiform Copper Ore System [J]. Economic Geology, 2005: 609-642.
- [8] Hitzman M W, Selley D, Bull S. Formation of Sedimentary Rock-Hosted Stratiform Copper Deposits through Earth History [J]. Economic Geology, 2010, 105: 627-639.
- [9] Selley D, Broughton D, Scott R, et al. A new look at the geology of the Zambian Copperbelt [J]. Economic Geology, 2005: 965-1000.
- [10] Zhao X F, Zhou M F, Li J W, et al. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block [J]. Precambrian Research, 2010, 182(1): 57-69.
- [11] Zhao X F, Zhou M F, Hitzman M W, et al. Late Paleoproterozoic to Early Mesoproterozoic Tangdan Sedimentary Rock-Hosted Stratabound Copper Deposit, Yunnan Province, Southwest China [J]. Economic Geology, 2012, 107(2): 357-375.
- [12] Brown A C. World-class sediment-hosted stratiform copper deposits: Characteristics, genetic concepts and metalotects [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1997, 44 (3): 317-328.
- [13] Zhao X F, Zhou M F, Li J W, et al. Late Paleoproterozoic sedimentary rock-hosted stratiform copper deposits in South China—their possible link to the supercontinent cycle [J]. Mineralium Deposita, 2013, 48 (1): 129-136.
- [14] Aurélien E, Anne-Sylvie A M, Olivier V, et al. Geochemical signatures of uranium oxides in the Lufilian belt: From unconformity-related to

- syn-metamorphic uranium deposits during the Pan-African orogenic cycle[J]. *Ore Geology Reviews*, 2013, 54: 197-213.
- [15] Sweeney M A, Binda P L. Sediment-hosted stratiform copper deposits [J]. *Geology of Africa*, 1993, (1): 365-369.
- [16] Lerouge C, Cailteux J L H, Kampunzu A B, et al. Sulphur isotope constraints on formation conditions of the Luiswishi ore deposit, Democratic Republic of Congo (DRC) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 42: 173-182.
- [17] Rainaud C, Mister S, Amstong R A, et al. Monazite U-Pb dating and ^{40}Ar - ^{39}Ar the imochonology of metamorphic events in the Central African Coppei belt during the Pan-African Lufilian Orogeny [J]. *Journal of Afican Earth Sciences*, 2005, 42: 183-199.
- [18] ElDesouky H A, Muchez P, Boyce A J, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt mineralization at Luiswishi and Kamoto, Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo) [J]. *Miner Deposota*, 2010, 45: 735-763.
- [19] Michael L Z, James D B, Broughton D, et al. Sediment-Hosted Stratabound Copper Assessment of the Neoproterozoic Roan Group, Central African Copperbelt, Katanga Basin, Democratic Republic of the Congo and Zambia [M]. Reston, Virginia: United States Geological Survey, 2014: 1-148.
- [20] Sośnicka M, Gigler G M, Kinnaird J A, et al. Mineralizing fluids of the supergene-enriched Mashitu South Cu-Co deposit, Katanga Copperbelt, DRC [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 109: 201-228.
- [21] Oszczepalski S, Nowak G J, Bechtel A, et al. Evidence of oxidation of the Kupferschiefer in the Lubin-Sieroszowice deposit, Poland: implications for Cu-Ag and Au-Pt-Pd mineralization [J]. *Geological Quarterly*, 2002, 46: 1-23.
- [22] Michael L Z, Oszczepalski S, Heather LP, et al. Assessment of undiscovered copper resources associated with the Permian Kupferschiefer, Southern Permian Basin, Europe [M]. Reston, Virginia: United States Geological Survey, 2010: 1-94.
- [23] Ruan H C, Hua R M. Copper deposition in deformed strata adjacent to a salt diapir, Dongchuan Area, Yunnan Province, China [J]. *Economic Geology*, 1991, 86(7): 1539-1545.
- [24] 祝新友, 张雄, 蒋策鸿, 等. 云南东川铜矿的后生成因与勘查意义 [J]. *矿物学报*, 2017, 增刊: 154-155.
- [25] Shubhabrata M, Vineet K, Monika S. Sediment Hosted Stratiform Copper (SSC) Mineralization in Bhudoli-Basari Area, North Delhi Fold Belt, Mesoproterozoic Delhi Supergroup, Rajasthan [J]. *Geological Society of India*, 2019, 93(6): 663-674.
- [26] Hayes T S, Landis G P, Whelan J F, et al. The Spar Lake strata-bound Cu-Ag deposit formed across a mixing zone between trapped natural gas and metals-bearing brine [J]. *Economic Geology*, 2012, 7: 1223-1249.
- [27] Volodin R N, Chechetkin V S, Bogdanov Y V, et al. The Udokancupriferous sandstones deposit [J]. *Geology of Ore Deposits*, 1994, 36(1): 1-25.
- [28] Chechetkin V S, Yurgenson G A, Narkelyun L F, et al. Geology and ores of the Udokan copper deposit [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2000, 41(5): 710-722.
- [29] 祝新友, 王京彬, 王玉杰, 等. 新疆萨热克铜矿——与盆地卤水作用有关的大型矿床 [J]. *矿产勘查*, 2010, 2(1): 28-35.
- [30] Sillitoe R H, Perelló J, Creaser R A, et al. Two ages of copper mineralization in the Mwombezhi dome, northwestern Zambia: Metallogenic implications for the Central African Copper belt [J]. *Economic Geology*, 2015, 110: 1917-1923.
- [31] Sillitoe R H, Perelló J, Creaser R A, et al. Age of the Zambian Copper belt [J]. *Miner Deposita*, 2017, 52: 1245-1268.
- [32] Cailteux J L H, Muchez P, Cuyper J D, et al. Origin of the megabreccias in the Katanga Copperbelt (D.R.Congo) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 140: 76-93.
- [33] McGowan R R, Roberts S, Boyce A J. Boyce Origin of the Nchanga copper-cobalt deposits of the Zambian Copper belt [J]. *Mineralium Deposota*, 2006, 40: 617-638.
- [34] Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, Central African Copper belt [J]. *Journal African Earth Sciences*, 2005, 42(1): 134-158.
- [35] Kampunzu A B, Cailteux J L H, Moine B, et al. Geochemical characterisation, provenance, source and depositional environment of Roches Argilo-Talqueuses (RAT) and Mines Subgroups sedimentary rocks in the Neoproterozoic Katanga Belt (Congo): lithostratigraphic implications [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 42: 119-133.
- [36] Jackson M P A, Warin O N, Woad G M, et al. Neoproterozoic allochthonous salt tectonics during the Lufilian Orogeny in the Katangan Copperbelt, central Africa [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115: 314-330.
- [37] Dewaele S, Muchez P, Vets J, et al. Multiphase origin of the Cu-Co ore deposits in the western part of the Lufilian fold-and-thrust belt, Katanga (Democratic Republic of Congo) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 46: 455-469.
- [38] 龚琳, 何毅特, 陈天佑, 等. 云南东川元古宙裂谷型铜矿 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 1-252.
- [39] 蒋策鸿. 云南东川铜矿床成矿流体与成因研究 [D]. 中国地质大学(北京) 硕士学位论文, 2019: 1-61.
- [40] 冉崇英. 东川式层控铜矿的成矿模式 [J]. *中国科学*, 1983, (3): 249-257.
- [41] 华仁民. 东川式层状铜矿的沉积-改造成因 [J]. *矿床地质*, 1989, 8(2): 3-13.
- [42] Huang X W, Zhao X F, Qi L, et al. Re-Os and S isotopic constraints on the origins of two mineralization events at the Tangdan sedimentary rock-hosted stratiform Cu deposit, SW China [J]. *Chemical Geology*, 2013, 347: 9-19.
- [43] 代鸿章, 刘家军, 朱文兵. 云南因民铜矿床构造沉积环境及成矿机制研究 [J]. *地学前缘*, 2018, 25(1): 108-123.
- [44] ElDesouky H A, Muchez P, Cailteux J L H. Two Cu-Co sulfide phases and contrasting fluid systems in the Katanga Copperbelt, Democratic Republic of Congo [J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 36: 315-332.
- [45] 施林道, 姜福芝, 卢海亚, 等. 云南易门铜矿成因新见及其找矿意义 [J]. *矿床地质*, 1988, 7(2): 12-20.
- [46] 李志群. 中元古界昆阳群因民组铁铜矿的成矿地球化学研究 [J].

- 矿产与地质,1996,10(52): 100-107.
- [47] 冉崇英,吴鹏.东川-易门式铜矿床成矿作用研究的几个问题[J].大地构造与成矿学,2014,38(4): 848-854.
- [48] 华仁民,阮惠础,倪培.东川式层控铜矿中非层状矿体的形成机制初议[J].地质找矿论丛,1993,8(4): 1-8.
- [49] 阮惠础,华仁民,倪培.东川式铜矿的成因再探[J].地质找矿论丛,1988,3(1): 9-22.
- [50] 邱华宁,Wijbrans J R,李献华,等.东川式层状铜矿 ^{40}Ar - ^{39}Ar 成矿年龄研究: 华南地区晋宁-澄江期成矿作用新证据[J].矿床地质,2002,21(2): 129-136.
- [51] 薛步高.东川矿区火山岩-侵入岩的改造-成矿作用[J].云南地质,2009,28(4): 351-366.
- [52] 蒋家申,李天福,陈贤胜.滇中元古宙昆阳裂谷系铜矿成矿系列[J].云南地质,1996,15(2): 205-218.
- [53] 涂光炽.中国层控矿床地球化学[M].北京: 科学出版社,1984: 376-380.
- [54] 高坪仙.东非铜矿带与中国东川铜矿带某些地质特征对比[J].国外前寒武纪地质,1996,(2): 49-53.
- [55] 冉崇英.论东川-易门式铜矿的矿源与成矿流体[J].昆明工学院学报,1989,14(4): 12-20.
- [56] 叶霖.东川稀矿山式铜矿地球化学研究[D].中国科学院地球化学研究所博士学位论文,2004: 1-117.
- [57] 华仁民.试论层状铜矿的三种主要成因模式[J].地质论评,1995,41(2): 112-120.
- [58] 衣成利.云南东川铜矿构造演化与辉长岩地球化学特征[D].昆明理工大学硕士学位论文,2010: 1-82.
- [59] 朱文兵.云南因民铜矿床地质地球化学特征与成因研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2017: 1-79.
- [60] 李元龙.东川稀矿山式铜铁矿床地质地球化学特征及构造控矿模式分析[D].昆明理工大学硕士学位论文,2013: 1-102.
- [61] Richards J P,Krogh T E,Spooner E T C.Fluid inclusion characteristics and U-Pb rutile age of late hydrothermal alteration and veining at the Musoshi stratiform copper deposit,Central African Copper Belt,Zaire[J].Economic Geology,1988,83(1): 118-139.
- [62] Greyling L N,Robb L J,Master S,et al.The nature of early basinal fluids in the Zambian Copperbelt: a case study from the Chambishi deposit[J].Journal of African Earth Sciences,2005,42: 159-172.
- [63] Annels A E.Ore genesis in the Zambian Copperbelt with particular reference to the northern sector of the Chambishi Basin [J]. Geological Association of Canada,Special Paper,1989,36: 427-452.
- [64] Davidson C F.A possible mode of origin of strata-bound copper ores[J].Economic Geology,1965: 942-954.
- [65] Rose A W.The Effect of Cuprous Chloride complexes in the origin of Red-bed copper and related deposits [J].Economic Geology,1976,71: 036-1048.
- [66] Barra F.Applications of the Re-Os isotopic system in the study of mineral deposits: Geochronology and source of metals[D].University of Arizona,Tucson,2005: 1-211.
- [67] 华仁民.成矿过程中由流体混合而导致金属沉淀的研究[J].地球科学进展,1994,9(4): 15-22.
- [68] Haynes D W.Stratiform copper deposits hosted by low-energy sediments: Timing of sulfide precipitation an hypothesis[J].Economic Geology,1986,81: 250-265.
- [69] Muchez P,André Mayer A S,ElDesouky H A,et al.Diagenetic origin of the stratiform Cu-Co deposit at Kamoto in the Central African Copperbelt[J].Mineral Deposita,2015,50: 437-447.
- [70] Decrée S,Derloule E,DePutter T,et al.SIMS U-Pb dating of uranium mineralization in theKatanga Copperbelt: constraints for the geodynamic context[J].Ore Geology Reviews,2011,40: 81-89.
- [71] 方维萱,杨新雨,郭茂华,等.云南白锡腊碱性钛铁质辉长岩类与铁氧化物铜金型矿床关系研究[J].大地构造与成矿学,2013,7(2): 242-261.