

非洲中南部卢弗里安地区 Cu-Co 矿床研究进展

任军平, 王 杰, 刘晓阳, 何胜飞, 贺福清, 许康康

(天津地质矿产研究所, 天津 300170)

摘 要:对非洲中南部卢弗里安地区 Cu-Co 矿床的大量研究成果进行了总结, 概括了典型矿床的区域地质背景、岩石地层划分, 较为系统地分析了成矿带中矿床的地质特征和矿床成因。得到①罗安群成岩年龄为 765~735 Ma, 这也是同生沉积层状铜钴矿的形成年龄; ②后期多阶段改造的主要成矿年龄为 510~500 Ma, 主要受到卢弗里安时期复杂的逆冲推覆断裂和褶皱控制。

关键词:Cu-Co 矿床; 地质特征; 矿床成因; 卢弗里安地区; 非洲中南部

中图分类号:P618.2

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2013)05-0135-11

卢弗里安弧(Lufilian Arc)构造带主要位于非洲中南部的赞比亚北部和刚果(金)南部(图 1^[1]), 也称为加丹加带或中非铜钴成矿带或卢弗里安铜钴成矿带, 其名称最早由 Garlick 提出^[2], 是卢弗里安造山运动(5.03~6.56 Ga)即泛非运动时期的产物。一些学者^[3-5]在赞比亚卢弗里安弧地区实施了开拓性工作, 后期许多地质工作者^[1,6-12]也开展过研究工作。刚果克拉通(Congo Craton)和卡拉哈里克拉通(Kalahari Craton)的会聚挤压使得新元古代加丹加沉积盆地形成了卢弗里安弧, 其呈北东—南西走向, 通过赞比亚的 Mwinilunga 地区以及从安哥拉东部

进入刚果(金), 在刚果(金)南部的褶皱带向东弯曲并且转向南东向进入赞比亚北部的铜带省^[2], 区域挤压主应力方向为南西—北东向, 推覆方向为由南西向北东推覆, 褶皱—推覆构造带呈弧形, 舌形部位向北东突伸^[13]。

卢弗里安的弧形是内在的大量穹隆构造的反映, 其包括(从北部到南部)最外部的“外部褶皱—逆冲带”、“穹隆区域”、“复向斜带”、“加丹加高原”和“加丹加拗拉槽”区域(图 2)。其中穹隆区域的特征

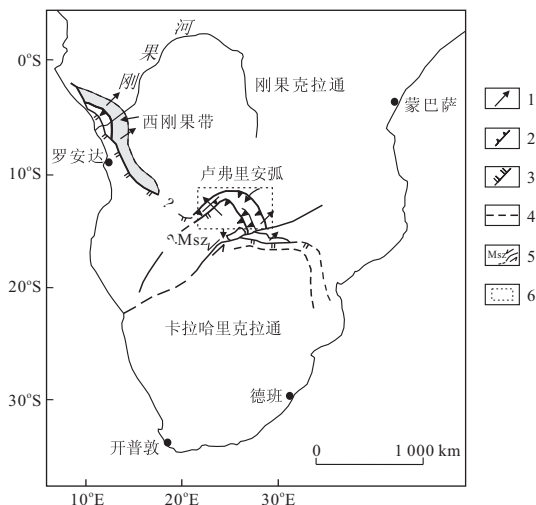


图 1 卢弗里安弧区域位置^[1]

Fig. 1 The location of Lufilian Arc

1. 构造迁移方向; 2. 逆冲断层; 3. 上冲板块边缘; 4. 上冲板块中强烈变形界限; 5. Mwembeshi 剪切带中推断平移断层; 6. 研究区范围。

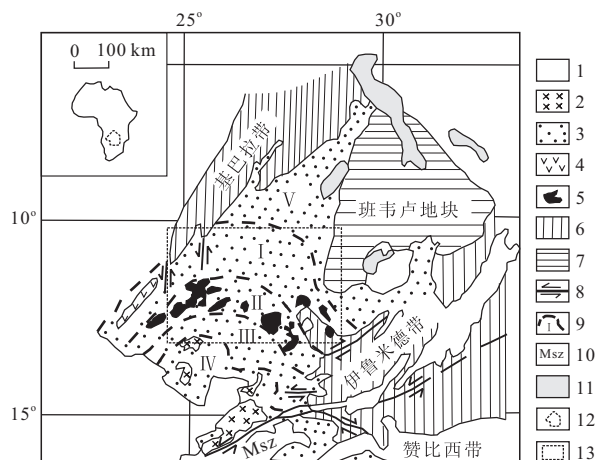


图 2 非洲加丹加和谦比西带地质简图^[13]

Fig. 2 Simplified geology map of Katanga and Chamnishi belt in African

1. 古生代至现在的岩石; 2. 花岗质岩石; 3. 加丹加超群; 4. 卢弗里安带内的镁铁质熔岩; 5. 卢弗里安带内的基底; 6. 受基巴拉构造热液旋回影响的地区; 7. 班韦卢地块的基底与沉积盖层; 8. 走滑断层; 9. 分带范围及编号; 10. Mwembeshi 剪切带; 11. 湖; 12. 图 2 范围; 13. 图 3 范围; I. 外部褶皱—逆冲带; II. 穹隆区域; III. 复向斜带; IV. 加丹加高原; V. 加丹加拗拉槽。

收稿日期: 2013-01-14

编辑: 刘江霞

基金项目: 中国地质调查局项目“全球巨型成矿带区域构造与成矿地质背景对比研究”(1212011220910)

作者简介: 任军平(1980—), 男, 助理研究员, 主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: rjp2333@126.com

通信作者: 王 杰(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事地质矿产勘查工作。E-mail: wangjie513046@163.com

表 1 卢弗里安弧 Cu-Co 成矿带中的地层^[23-24]
Table 1 Lithostratigraphy of Lufilian Arc Cu-Co belt

年龄/Ma	(超)群	亚群	组	岩性	
±500	Kundelungu Ku (原上 Kundelungu 群)	Plateaux Ku3 Kiubo Ku2	Kalahari	风成砂,砾岩、砂岩、碳酸盐岩和燧石	
				长石砂岩、砾岩、砂岩、页岩,局部有 Zn-Pb-Cu 和 Cu-Ag-Au 矿化	
				砂岩、碳酸盐化粉砂岩或页岩、灰岩	
		Kalule Ku1	Lusele Ku1. 3	碳酸盐化粉砂岩和页岩;底部为灰色—粉红色鲕粒灰岩(Calcaire Rose Oolitique)	
			KipushiKu1. 2	碳酸盐化粉砂岩和页岩;底部为粉红色—灰色白云岩(Calcaire Rose)	
			Kyandamu Ku1. 1	冰川混积岩(小砾岩)	
±620	Nguba Ng (原下 Kundelungu 群)	Monwezi Ng2		白云岩化砂岩、粉砂岩或页岩	
			Kakontwe Ng1. 3	碳酸盐化粉砂岩和页岩,局部有 Zn-Pb-Cu 和 Cu-Ag-Au 矿化	
		Likasi Ng1	Kaponda Ng1. 2	白云岩、灰岩、白云岩化页岩和粉砂岩	
			Mwale Ng1. 1	冰川混积岩(大砾岩)	
		Mwashya R4	Kamoya R4. 3	白云岩化泥质页岩、粉砂岩、砂岩,含有区域标志层(Mwashya 砾岩层或杂岩)	
			Kafubu R4. 2	细粒层状黑色碳质页岩	
Kanzadi R4. 1	长石质砂岩				
±750	Roan R	Dipeta R3	Kansuki R3. 3	白云岩,含碧玉层、火成碎屑岩和赤铁矿;局部层状 Cu-Co 矿化	
			Kanwangungu R3. 2	白云岩与泥质—白云岩化粉砂岩互层和长石类砂岩;侵入基性岩体	
			R. G. S. R3. 1	白云岩化粉砂岩	
		Mines R2	Kambove R2. 3	复纹理石、叠层石、滑石质粉砂岩;局部层状 Cu-Co 矿化	
			Dolomitic shale R2. 2	白云质页岩,碳质页岩,白云岩,偶尔为砂岩或长石砂岩、白云质页岩,顶部为砂质白云岩;层状 Cu-Co 矿体(上部矿体)	
			Kamoto R2. 1	R 2. 1. 3“Roches Siliceuses Cellulaires”为叠层石白云岩及粉砂岩夹层;Cu-Co 位于顶部和底部。R 2. 1. 2“白云岩与粉砂岩互层”为底部为粉砂质白云岩;层状 Cu-Co(下部矿体)。R 2. 1. 1“R. A. T. grises”:白云质粉砂岩;Cu-Co 位于顶部	
		R. A. T. R1	R1. 3	粉红色—淡紫色,赤铁矿化,绿泥石化-白云岩化块状粉砂岩	
			R1. 2	粉红色—紫色—灰色,赤铁矿化,绿泥石化粉砂岩;砂岩位于底部;叠层石白云岩位于顶部	
			R1. 1	紫色—红色,赤铁矿化,轻微白云岩化层状粉砂岩	
		<900 基底	Muva 超群		
Lufubu 超群				花岗片麻岩、片岩、片麻岩	

卡拉哈里组覆盖了卢弗里安弧中大部分的地层,其最早被划分在 Barotse 组沉积单元中,为一套中新世—全新世的岩层序列,主要岩性包括风成砂,也包括砾岩、砂岩、碳酸盐岩和燧石^[26]。

2.2 构造

卢弗里安弧构造带经历了复杂的地质构造演化,且构造运动及岩浆运动的多样性造就了其独特的地质构造:四周被刚果(Congo)克拉通、赞比亚的班韦卢(Bangweulu)地块、基巴拉(Kibaran)构造带、伊鲁米德(Irumide)构造带及赞比西(Zambezi)构造带所包围(图 4^[27])。该地区经历了长期构造演化过程,褶皱构造与断裂构造极其发育^[18,23-24]。

2.3 侵入岩

卢弗里安弧内岩浆岩不发育,局部有侵入到基底杂岩中的花岗岩岩基、斑状花岗岩以及侵位于加丹加超群中的辉长岩岩床和煌斑岩岩墙等。

目前对于基底穹隆中的花岗岩、混合岩和片岩的年龄争议较大。Armstrong 等^[28]通过混合岩锆石 U-Pb 年龄测得恩昌加矿床附近基底穹隆中花岗

岩的侵入年龄为(877±11) Ma。在刚果(金)境内, Luina 穹隆(孔科拉东部)斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为(1 880±20) Ma^[29],与班韦卢地块的花岗岩年龄相近。侵入加丹加群中的火成岩为基性岩,可分为两类:一类为产在罗安群和孔德龙古群中厚达 300 m 的辉长岩岩床(如基特韦西南部的奇布卢马矿),主要由透闪石和阳起石组成;另一类为煌斑岩(见于恩昌加等矿区)。见镁铁质侵入岩(765~735 Ma)侵位于迪佩特(Dipeta)亚群中^[18]。

2.4 区域矿产分布概况

卢弗里安弧地区以丰富的铜钴矿资源著称,是世界上著名的铜钴矿床富集区之一,铜钴矿资源主要集中在赞比亚北部铜带省和刚果(金)南部加丹加省及其周围的大穹隆边部。该铜钴矿带为层控砂页岩型矿床,矿体主要产于加丹加群下罗安群(新元古代)的沉积砂页岩中。在赞比亚境内的铜钴成矿带长 220~250 km,宽数十至上百公里,带内矿床总数达 200 个,典型矿床包括恩昌加(Nchanga)、谦比西(Chambishi)、孔科拉(Konkola)及坎桑希(Kansan-

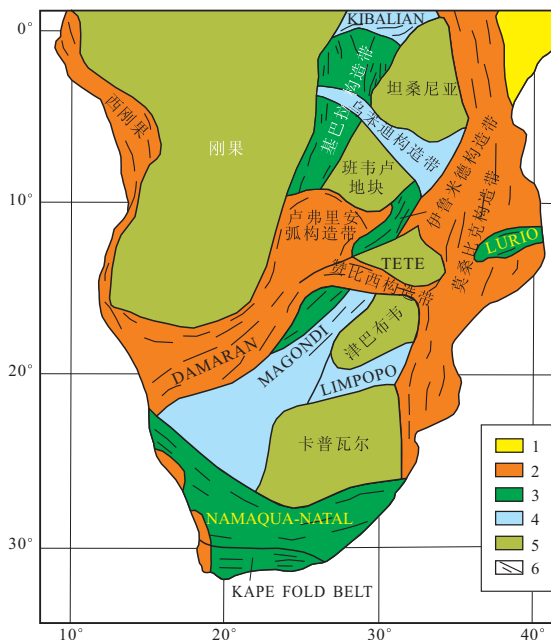
图4 卢弗里安弧大地构造位置图^[27]

Fig. 4 Tectonic location of the Lufilian Arc

1. 其他; 2. 泛非构造带; 3. 基巴拉/伊鲁米德构造带; 4. Eburnian 构造带; 5. 克拉通地块; 6. 构造走向。

shi)等铜钴矿床。在刚果(金)境内典型矿床包括科卢韦齐(Kolwezi)、卢斯维希(Luiswishi)和坎莫托(Kamoto)等铜钴矿床。另外,还伴有铅锌硫化矿、铀矿和贵金属矿产资源(图3)。

3 地质特征

3.1 矿体分布形态

赋存于卢弗里安弧成矿带上的铜钴矿床的岩性相对稳定,物质成分差异不大^[30],其主要控矿因素包括:①地层控制,大多数原生矿床和主要的原生铜矿化受砂页岩型地层控制。②构造控制,包括两种形式,第一种,褶皱控制罗安群地层,这些岩层的浅部或深部赋存有可采的层状矿体;第二种,断层控制了主要脉状矿体的产状^[31]。基于以上特征,矿体赋存形态有层状一似层状、脉状,局部褶皱的转折端呈透镜状^[32-33]。

3.2 矿石结构和构造

矿石结构以它形粒状结构为主,少量半自形粒状结构、包含结构、隐晶结构、纤维状结构、胶状结构、交代假象结构、变晶结构、变余结构等,其中纤维状结构、隐晶结构和胶状结构是氧化带矿石特有的结构^[13,30]。

矿石构造主要有层状、浸染状、角砾状、网脉状、

致密块状、条带状、细脉状、斑杂状构造,少量皮壳状和稀疏浸染状构造^[13,30]。

3.3 矿物组合

矿石矿物主要有孔雀石、辉铜矿、黄铜矿、斑铜矿,少量硅孔雀石、自然铜、铜兰、赤铜矿、水钴矿、水钴铜矿、钴白云石、钴华、菱钴矿、钴土矿,微量硫铜钴矿、黑铜矿等,其他金属矿物主要有赤铁矿、针铁矿、镜铁矿、黄铁矿、褐铁矿等^[13,30]。

脉石矿物有白云石、石英、方解石、绢云母、白云母、绿泥石、磷灰石、石墨、电气石、绿帘石、钾长石、斜长石及黑云母等^[13,30]。

3.4 矿石类型

矿石自然类型主要有2种:氧化矿石和原生矿石(硫化矿石)^[13]。

氧化矿石分布于地表,铜钴品位较高。由于长期的物理和化学风化作用,地层中同生沉积富集的铜和后期热液成矿阶段富集的钴在地表氧化条件下淋滤迁移,有用金属元素多次搬运富集,形成了次生氧化富集带,氧化带深度一般50~100 m。原生矿石(硫化矿石)分布于氧化带下部,未经风化淋滤作用,保持或基本保持原始状态。

3.5 围岩蚀变

围岩蚀变类型比较复杂,主要有滑石化、褐铁矿化、赤(镜)铁矿化、高岭土化、碳酸盐化、硅化、白云母化、绢云母化、金云母化、绿泥石化、白云岩化,其中硅化、白云岩化、碳酸盐化、滑石化与铜钴矿化关系较密切,典型矿床的蚀变特征如表2^[34]。金红石是矿化蚀变岩石中的常见矿物,呈粒状或细粒针状集合体,其他重要蚀变矿物包括石英、金云母、白云石、绢云母、电气石和绿泥石等^[13,30]。

3.6 元素组合

为了了解矿石中铜和其他伴生元素的关系以及判断其他元素是否成矿,任超等^[35]采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法(DZ/T0223-2001)对谦比西矿床的47件钻孔矿化段样品进行了微量元素分析,根据分析结果,计算出铜与其余46个元素的相关系数(表3)。从表3中可看出,铜与银(Ag)、钒(V)、钴(Co)、锌(Zn)、砷(As)、硒(Se)、镉(Cd)、铟(In)等元素存在正相关关系,其中与铟(In)接近完全相关;铜与其他元素的相关性差。

3.7 矿物共生次序

在卢弗里安弧矿床中,矿物共生次序主要分为3个阶段:早期成岩阶段、同造山阶段以及后造山阶段,其中Cu-Co矿化主要与前两个阶段有关,代表性特征如图5^[36]。

表 2 典型矿床的蚀变作用及矿化特征对比(据文献[34]修改)

Table 2 Comparison of alteration and mineralization in representative deposits

矿床名称	地点	岩石学	矿化作用类型	成岩作用	蚀变类型	表生特征
曼比利马和堪萨维 (Mambilima and Kansalawile)	Katanga	碳酸盐岩和碎屑岩几乎相等	两个硫化物阶段	硬石膏,早期白云岩	白云岩化和硅化叠加	溶滤、氧化±运移、富集
坎莫托(Kamoto)	Katanga	碳酸盐岩>碎屑岩	两个硫化物阶段或一个硫化物阶段+硫化物再活化阶段	硬石膏,石膏,早期白云岩	白云岩化和硅化叠加	氧化和富集
穆索诺(Musonoi)	Katanga		多个硫化物阶段			
卢斯维希(Luiswishi)	Katanga	碳酸盐岩和碎屑岩几乎相等	两个硫化物阶段或一个硫化物阶段+硫化物再活化阶段	硬石膏,石膏,早期白云岩	白云岩化和硅化叠加	在裂隙和层理面中氧化
科卢韦齐(Kolwezi)	Katanga	碳酸盐岩>碎屑岩	一个硫化物阶段+硫化物再活化阶段	早期白云岩	硅化、白云岩化、碳酸盐化、绢云母化、滑石化、高岭土化等	氧化、溶滤、运移和富集
谦比西(Chambishi)	Zambia	碎屑岩>碳酸盐岩	一个硫化物阶段+硫化物再活化阶段	硬石膏,早期白云岩	碳酸盐化、钠长石化、绿泥石化、微斜长石化	氧化
孔科拉(Konkola)	Zambia	碎屑岩>碳酸盐岩	一个成岩作用的硫化物阶段	硬石膏,黏土,早期碳酸盐岩	碳酸盐化、硅化、长石化;少量锆石,电气石,金红石	氧化
穆富利拉(Mufulira)	Zambia	碎屑岩>碳酸盐岩	两个硫化物阶段	硬石膏	碳酸盐化、方解石化、硅化	氧化
恩昌加(Nchanga)	Zambia	碎屑岩>碳酸盐岩	两个硫化物阶段,同一后卢弗里安时期	蒸发岩	碳酸盐化、硅化、绢云母化、绿泥石化	氧化、溶滤、局部富集
坎桑希(Kansanshi)	Zambia	碎屑岩>碳酸盐岩	多个硫化物阶段	早期白云岩	铁白云岩化、钠长石化	

表 3 铜与 46 个元素相关系数^[35]

Table 3 Correlation coefficient of copper and 46 elements

元素	相关系数	元素	相关系数	元素	相关系数
锂(Li)	-0.012	铍(Be)	-0.236	钪(Sc)	-0.393
钒(V)	0.464	铬(Cr)	-0.321	钴(Co)	0.521
镍(Ni)	-0.103	锌(Zn)	0.660	镓(Ga)	-0.425
砷(As)	0.470	硒(Se)	0.475	铷(Rb)	-0.365
锶(Sr)	-0.109	钇(Y)	-0.258	锆(Zr)	-0.391
铌(Nb)	-0.390	钼(Mo)	0.174	镉(Cd)	0.660
铟(In)	0.924	锡(Sn)	-0.243	锑(Sb)	0.023
铯(Cs)	-0.167	钡(Ba)	-0.295	镧(La)	-0.226
铈(Ce)	-0.270	镨(Pr)	-0.234	钕(Nd)	-0.238
钐(Sm)	-0.254	铕(Eu)	-0.440	钆(Ga)	-0.261
铽(Tb)	-0.273	镝(Dy)	-0.271	铥(Ho)	-0.271
铒(Er)	-0.256	铪(Hf)	-0.267	铀(Yb)	-0.275
镱(Lu)	-0.297	铕(Eu)	-0.328	铽(Ta)	-0.397
钨(W)	-0.071	铼(Re)	0.214	铊(Tl)	-0.080
铅(Pb)	-0.059	铋(Bi)	0.297	钍(Th)	-0.362
铀(U)	-0.013	金(Au)	0.128	银(Ag)	0.587

4 矿床成因

4.1 碳酸盐的 REE 特征

在赞比亚铜带省恩昌加矿床中,Roberts 等^[37]对上盘含有白云石地层的白云石片岩样品、上部矿体的矿化样品以及下部矿体的孔雀石样品进行了 REE 配分模式研究。结果表明,这些样品的 REE 模式不是典型的海相起源的碳酸盐岩,特别是它们不能显示出显著的负 Ce/Ce_{SN}^{*} 异常或重 REE 富集

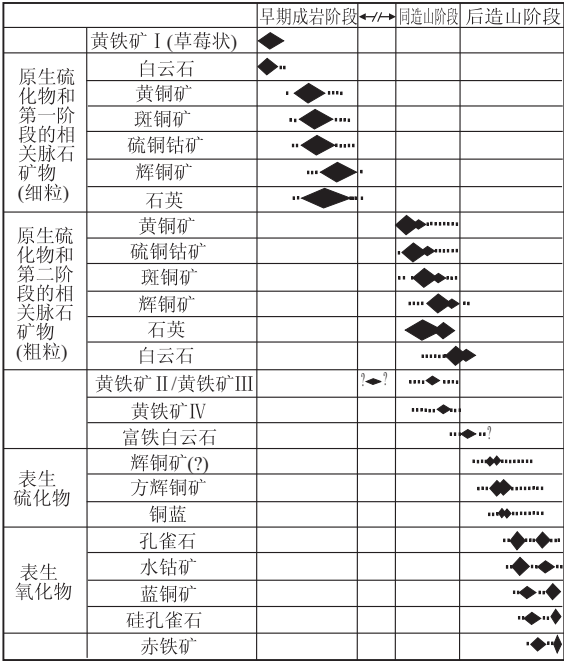


图 5 卢斯维希和坎莫托矿床中 Cu-Co 矿化的一般共生次序^[36]

Fig. 5 Generalized paragenetic sequence for the Cu-Co mineralization at Luiswishi and Kamoto ore deposit

特征^[38-39],这可能是由于裂谷演化的时间和宽度的影响所致。

4.2 流体包裹体特征

赞比亚的恩昌加矿床中主要发育的 3 种产状的

石英脉的原生和次生包裹体的均一温度变化于 100~250℃ 间,比该地区的变质温度还要低^[22]。3 种产状石英脉中原生包裹体的盐度变化于 31%~38% 间,这说明当时各种产状石英脉中包裹体盐度变化不大^[40]。

对刚果(金)境内加丹加省堪苏祁矿中的流体包裹体测试结果显示,包裹体的均一温度最低为 153.2℃,最高为 324.2℃,平均为 241.45℃,说明该矿床的成矿温度为中温;激光拉曼光谱表明包裹体的气相成分以 N_2 、 CO_2 、 SO_2 、 F_2 、 NH_3 等为主,液相以 H_2O 为主,个别样品见有石盐子晶,表明流体的盐度较高,成矿流体具有变质热液的特征^[41]。

坎博韦—卡莫亚矿床内脉石矿物(白云石、菱镁矿、石英)中的流体包裹体可分为 2 种类型:①两相(液—气),白云石或石英内的小颗粒包裹体,含自由 CO_2 ,形成温度约为 70℃,盐度为 7%~10%;②三相(固—液—气),蜂窝状硅质白云岩中白云石晶粒内的包裹体有 3 种固相子矿物($NaCl$ 、 KCl 和 $CaSO_4$),并含有 CO_2 ,其形成温度 $\geq 200^\circ C$,盐度约为 40%。低温低盐度流体(可能是盆地沉积特征)可能是早期成岩卤水,而高温高盐度流体则可能来源于后期区域变质事件^[20]。

以上研究表明成矿带矿床中流体包裹体均一温度的可能区间在 70~324.2℃ 之间,并且这些流体包裹体被封闭后可能经历了退变质作用。

4.3 稳定同位素特征

4.3.1 硫同位素

Cailteux 等^[20]测定了成矿带中刚果(金)境内铜钴矿床中金属硫化物的 $\delta^{34}S$ 值,其变化范围为 -9.8‰~+18.7‰。McGowan 等^[40]测得恩昌加矿床中黄铁矿、斑铜矿、黄铜矿、硫铜钴矿和辉铜矿的 $\delta^{34}S_{CDT}$ 变化于 -17‰~+23‰ 之间(图 6)。硫同位素值的宽幅变化表明,硫为成岩硫化物与海水硫

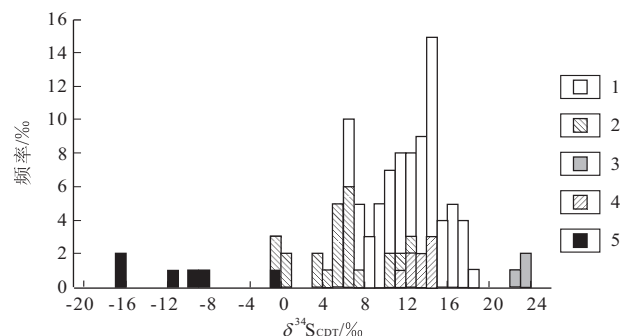


图 6 恩昌加矿床各种背景硫化物 $\delta^{34}S_{CDT}$ 组成^[40]

Fig. 6 $\delta^{34}S$ data of sulphides from various settings within the Nchanga deposit

1. 上部矿体 Cu 和 Co 硫化物;2. 早期矿体 Cu 硫化物;3. 晚期黄铁矿;4. 上部矿体黄铁矿;5. 成岩期黄铁矿。

酸盐的混合硫,其中成矿最晚期石英脉中黄铁矿的 $\delta^{34}S_{CDT}$ 值变化于 +22‰~+23‰ 之间,也许由封闭系统中分馏作用所引起,在成矿作用最晚期,可利用的海水硫酸盐实际上是重硫物质。

4.3.2 氧、碳同位素

对刚果(金)加丹加省堪苏祁矿区围岩样品的氧同位素测定结果表明, $\delta^{18}O$ 最低为 22.3‰,最高为 26.45‰,落在沉积岩区^[41]。

McGowan 等^[40]对恩昌加矿床的氧同位素进行了研究,发现其基底花岗岩和下部长石砂岩单元中张性构造和相关石英脉的 $\delta^{18}O$ 值为 +11.3‰~+12.5‰;下部矿体石英脉的 $\delta^{18}O$ 值为 +12.3‰~+21.2‰;上部矿体中低角度硫化物和石英脉的 $\delta^{18}O$ 值为 +13.7‰~+14.5‰,平均值为 +14.0‰;长石砂岩和页岩混和单元中石英脉的 $\delta^{18}O$ 值为 +15.1‰~+19.2‰, $\delta^{18}O$ 值较重(+19.2‰)的样品为晚期脉。由于恩昌加地区在矿石沉积时位于赤道附近,大气降水和海水是无法区分的,可能是同一性质的流体。海相成因上罗安群白云岩中白云石的 $\delta^{18}O$ 值为 +22.4‰~+23.0‰, $\delta^{13}C$ 值为 +1.4‰~+2.5‰,其 C、O 同位素组成与谦比西矿床的白云岩组成基本一致,落入元古宙海相石灰岩区内^[40](图 7)。

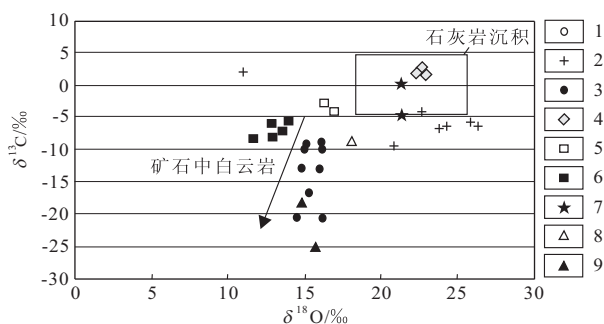


图 7 白云石 $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ 图解(据文献^[40]修改)

Fig. 7 $\delta^{13}C$ - $\delta^{18}O$ diagram of dolomites

1. 孔科拉下盘方解石;2. 孔科拉下盘白云岩;3. 孔科拉矿石页岩;4. 恩昌加上部罗安群;5. 恩昌加剪切带;6. 恩昌加矿石;7. 谦比西白云岩礁;8. 谦比西较一致的脉;9. 谦比西白云岩结核。

在恩昌加矿床中,如果硬石膏的小结核被石英、碳酸盐、黑云母、白云母和硫化物所充填,说明其具有变质成因。在小结核中, $\delta^{18}O$ 值为 -15.5‰,碳酸盐的 $\delta^{13}C$ 值为 -25‰~-15‰,这个区间可能是受到了有机物质或甲烷氧化作用的影响所致^[40]。

综上所述,在氧化流体发生热化学还原作用期间,流体携带足够的成矿物质 Cu 和 Co,有机碳和局部围岩中再活化的碳也加入到成矿系统中。

4.4 微生物垫参与成矿的证据

在 Mindola 露天矿中,演化的各种沉积构造存

在于矿石建造中,一些结构如微生物的干缩裂缝、皱纹结构、垫变形结构,米级同心的微断层和微生物垫芯片。在所有的矿石建造单元中,这些微结构的出现暗示微生物垫生长通过了含铜继承性矿床的古沉积面,这些生物垫可能属于蓝藻类和异养的硫酸盐还原菌(SRB)。在成矿带的主要矿床中,出现一个典型的硫化物分带演化,即辉铜矿(潮上带—较低的潮上带)—黄铜矿和斑铜矿(潮间带)—黄铁矿(潮下带和厌氧泻湖中心)^[42](图8)。

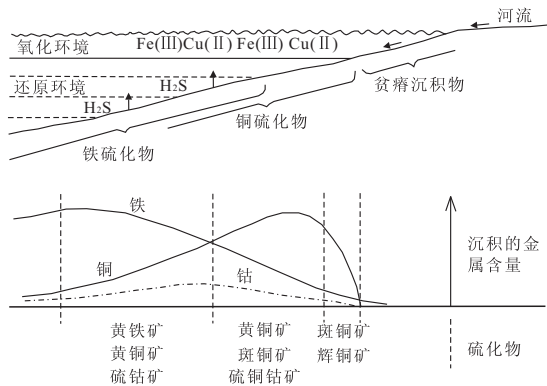


图8 同生硫化物矿带如赞比亚铜带的“矿石建造”的演化^[42]

Fig. 8 Diagrammatic section and graph illustrating the syngenetic sulfide mineral zonation, such as the evolution of “ore construction” in copper belt of Zambia

4.5 锶同位素特征

Muchez 等^[22]整理了来源于恩昌加矿床中加丹加超群岩石和基底的小结核和脉中的碳酸盐锶同位素资料,其中 Barra 等^[43]整理了脉状硫化物资料并且重新计算其年龄是 583 Ma,但是由于其中 Rb 含量低,所以这些 Sr 同位素资料对于其他的小结核和脉的影响不是很明显。同时,Muchez 等^[22]也整理了恩昌加矿床中加丹加超群岩石和基底中大脉的碳酸盐资料,其中 Barra 等^[43]整理了大量含黄铜矿和辉钼矿的脉体资料并重新计算得到的年龄是 525 Ma。这些 Sr 同位素资料显示基岩或者是源于它的沉积岩和促使不同脉体形成的流体之间存在相互作用^[22](图9)。

Roberts 等^[37]对恩昌加矿床中白云石片岩、矿化样品以及孔雀石样品中的 Sr 同位素也进行了分析(图10),发现白云石片岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值在0.711 1~0.711 6之间,与源于矿化样品的碳酸盐的0.713 6~0.746 9相比,越深部的样品越具放射性。

4.6 同位素年代学

卢弗里安成矿带经历了一段漫长而复杂的变形和变质史,众多学者对于含矿的罗安群成岩年龄和其中的成矿年龄研究较多。

Armstrong 等^[28]的定年数据对加丹加盖层沉

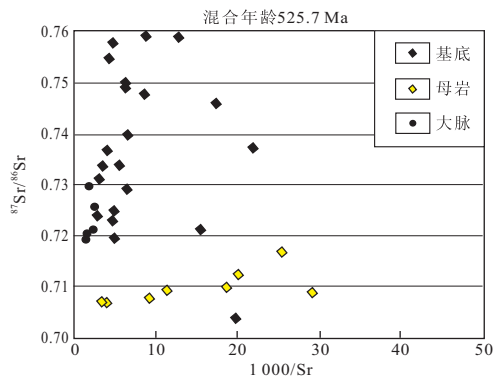


图9 恩昌加大脉中的碳酸盐⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比率与 1 000/Sr 含量关系图^[22]

Fig. 9 Plot of the ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratio versus 1 000/Sr content of carbonates from massive veins in Nchanga

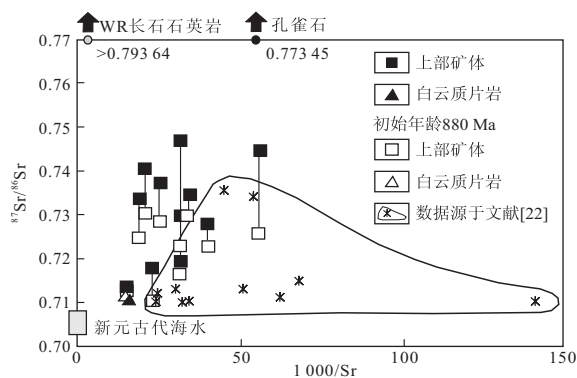


图10 从伴有长石石英岩基底的恩昌加矿全岩样品到矿化作用的碳酸盐样品 1 000/Sr 与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 关系图^[37]

Fig. 10 1 000/Sr—⁸⁷Sr/⁸⁶Sr correlation diagram between mineralized carbonate samples and whole-rock Nchanga mine samples along with quarto-feldspathic basement

积年代的界定起了很大作用。对接近罗安群底部的长石砂岩测定的碎屑锆石年龄有两个分布(880 Ma 和 2 000~1 800 Ma)。对罗安群中安山质玄武岩所做的锆石 U-Pb 定年,与赞比亚西北的 Mwashia 组对比,得出的年龄约为 765 Ma,在更上面的 Kundelungu 组中斑状玄武岩的年龄为 735 Ma^[1]。

对赞比亚境内的 Konkla 矿床内含铜矿物黄铜矿 Re-Os 同位素年龄的研究表明,矿床的成矿年龄为(816±62) Ma^[44]。Rainaud 等^[45]对罗安群中锆石 U-Pb 年龄数据的研究表明,罗安群沉积于 880~735 Ma 间,这也可能是同生沉积层状铜钴矿的形成年龄。

在赞比亚 Kansanshi 地区,利用 K-Ar、Rb-Sr 和 U-Pb 等多种测年方法确定的变质作用高峰期大约发生在 700 Ma,岩石冷却到低于云母中 K-Ar 和 Rb-Sr 体系的封闭温度时间约为 500 Ma。根据 Kansanshi 铜矿床中近平行的 3 期脉体,使用 Re-Os 法对采自每组脉体中的辉钼矿进行年龄测定,获得

两个特征年龄: (512.4 ± 1.2) Ma 和 (502.4 ± 1.2) Ma。对采自最后形成的脉体中的独居石进行了离子探针 U-Pb 年龄分析,测得 U-Pb 年龄为 (511 ± 11) Ma,测得刚果(金)南部变质后的 Kipushi 角砾岩筒中方铅矿的 Pb-Pb 年龄为 (456 ± 18) Ma,以及赞比亚铜矿带北缘切穿 Musoshi 铜矿床的同构造和构造期后脉体中金红石的 U-Pb 年龄为 513~496 Ma。这些数据表明,Kansanshi 地区经历了长期的变质史,该历史起始于 700 Ma 以前,终结于 540~500 Ma 之间^[46]。

通过以上同位素测年资料,我们可以推测含矿的罗安群成岩年龄为 765~735 Ma,这也是同生沉积层状铜钴矿的形成年龄,后期多阶段改造的主要成矿年龄为 510~500 Ma。

4.7 矿床成因

对于 Cu-Co 矿床成因主要有热液—成岩假说和同生—成岩假说,根据现有资料笔者赞同后一种观点。早期 Garlick 根据矿化层沿走向和倾向稳定

延伸等特征提出了同沉积观点,认为铜、铁、钴等金属是由碎屑或化学沉积形成的^[1]。20 世纪 80 年代,以 Unrug^[47]为代表的裂谷成矿模式论者认为,金属的来源既可以是上部地层中的火山物质,也可来自和基性侵入岩同源的地壳深处,由同沉积断层沟通,造成盆地矿化卤水循环并交代成矿^[25,35,48]。

由于各种学术观点所持角度和倾向性不同,对于元素的迁移和矿质来源有不同的认识,结合层状铜钴矿石的放射性铅同位素类似于约 700 Ma 的钙碱性岩石的铅同位素,即 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 约为 18.1, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 约为 15.6, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 约为 37.9,属于典型的壳源^[49]。综合来看,该矿带 Cu-Co 矿床是由同生沉积作用形成的,但受到了后期活动的改造,属沉积变质—(多阶段热液)改造型铜钴矿床^[13,30-32,40,45]。

综合以上各种资料显示,成矿带中的大部分矿床经历了以下 4 个连续的矿化或再活化演化阶段(图 11):①在起初的裂谷中,早期成岩的黄铁矿和可能的 Cu-Co 硫化物的沉淀阶段(图 11-A);②盆地

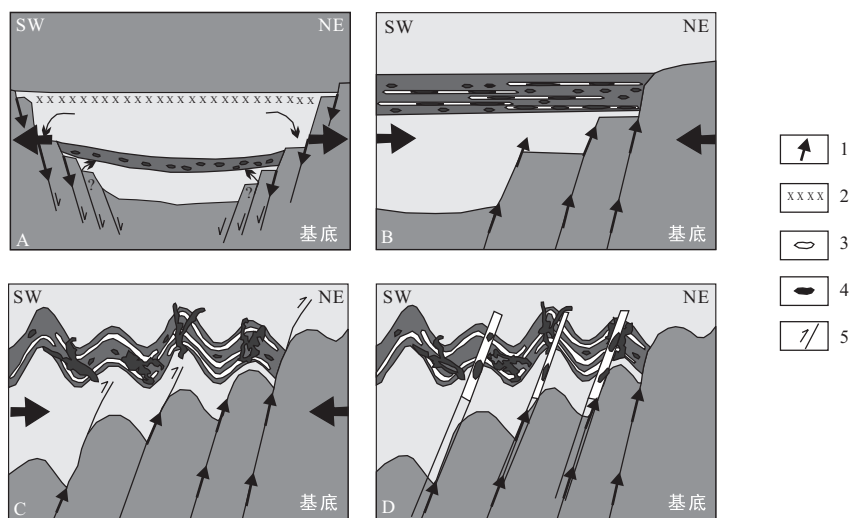


图 11 卢弗里安地区 Cu-Co 矿床成矿模式^[22]

Fig. 11 Metallogenic model of Lufilian Arc Cu-Co ore deposit

1. 流体运移方向;2. 蒸发岩;3. 脉;4. 矿化体;5. 断层。

反转和层状平行脉中矿化作用的开始阶段(图 11-B);③在进一步增压下,岩石和层状平行脉发生褶皱,并且在褶皱枢纽区域有一个矿化中心以及硫化物可能经历再活化或矿化作用阶段(图 11-C);④在大量的褶皱演化后期,在高流体压力条件下大量极不规则的脉剪切所有前期阶段形成的岩层和脉体(图 11-D)^[22]。

5 找矿技术方法及经验总结

5.1 矿床发现过程中所采用的技术方法

(1)高精度磁法 在成矿带中,由于其森林繁

茂,杂草丛生,风化层厚,基岩露头少,传统的“追踪法”和“穿越法”地质填图很难迅速圈定地层界线,考虑到含矿地层罗安群中硫化物极其发育,因此高精度磁法扫面能够快速确定地层走向和地层界线^[31]。

(2)瞬变电磁法(TEM) 瞬变电磁法是基于电性差异,主要用来研究浅层至中层的地电结构,寻找低阻体。带中矿体多为致密块状硫化矿,其显示浅层和中深层的低阻异常有可能就是该地区的矿化异常;进而综合地质填图等资料,即可确定深部低阻体的赋存状态^[31]。

(3)地球化学 地球化学调查能够利用土壤和

水系沉积物快速锁定异常范围,过去利用这种方法在 Kundelungu 地层露头区发现了 12 个大的铜-钴异常,其中 4 个异常与事先知道的金属远景区一致(含 Luamata 远景区),其他 8 个新发现异常区位于 Mwashia 群火山岩附近^[1]。

(4)遥感解译 利用遥感影像图来解译研究区的地质概况是一种非常有效的方法,近年来,在国内多光谱遥感技术在金属矿产勘查中已得到广泛应用并取得了显著成效^[50],填绘编制岩性—构造—蚀变带遥感地质图,从而确定有利含矿地层的空间展布及隐伏延展,判别有利构造类型等^[31]。

5.2 找矿经验与教训

前期有的地质工作者以“铁帽”为主要找矿标志,试图利用“铁帽”来对应深部的原生矿体,但经钴探验证后效果很不理想,后又通过仔细填图和岩性鉴定,认识到所谓的“铁帽”实际是新生代的铁质聚块岩,进而调整了找矿思路,总结矿床特征,利用地、物、化、遥等多种手段寻找到含矿层罗安群^[31]。

6 结 论

(1)裂谷成矿模式已经得到众多学者的支持,加丹加超群巨厚层沉积岩建造属典型的裂谷盆地深海相至边缘台地相沉积,铜钴矿床早期受罗安群砂页岩地层控制。

(2)Cu-Co 矿床主要有两个成矿期:①同生沉积层状铜钴矿的形成年龄为 765~735 Ma,这也是罗安群的成岩年龄;②后期多阶段改造的主要成矿年龄为 510~500 Ma,其主要受到卢弗里安弧复杂的逆冲断裂和褶皱体系所改造。

(3)矿床经历了早期沉积成岩成矿阶段—后期(多期热液构造叠加)改造富集多个阶段,为复合成因的层控改造型矿床。

参考文献:

- [1] Key R M, Liyungu A K, Njamu F M, et al. The western arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and its potential for copper mineralization[J]. *African Earth Sciences*, 2001, 33: 503-528.
- [2] Mendelsohn F. The geology of the northern Rhodesia copper belt[M]. London: Mac Donald, 1961.
- [3] de Swardt A M J. Deformation of the basement complex associated with Lufilian folding south of Mapanza mission, northern Rhodesia[J]. *Transactions Geological Society of South Africa*, 1963, 66: 75-92.
- [4] de Swardt A M J, Garrard P, Simpson J G. Major zones of transcurrent dislocation and superposition of orogenic belts in parts of central Africa[J]. *Bulletin Geological Society of America*, 1965, 76: 89-102.
- [5] Stillman C J, de Swardt A M J. The response to Lufilian folding of the basement complex around the northern edge of the Mpande dome, northern Rhodesia[J]. *Journal of Geology*, 1965, 73: 131-141.
- [6] Edwards R A. The geology of the west Lunga river area. Explanation of degree sheet 1224, NW quarter, and part of degree sheet 1223, NE quarter[R]. [S. l.]: Report Geological Survey of Zambia, 1974, 43: 86.
- [7] Klinck B A. The geology of the Kabompo dome area. Explanation of degree sheet 1224, NE quarter[R]. [S. l.]: Report Geological Survey of Zambia, 1977, 44: 27.
- [8] Thieme F, Johnson R L. 1: 1 000 000 geological map of Zambia[M]. [S. l.]: Geological Survey Department of Zambia, 1981.
- [9] Kampunzu A B, Kapenda D, Manteka B. Basic magmatism and geotectonic evolution of the Pan African belt in Central Africa: Evidence from the Katangan and West Congolian segments[J]. *Tectonophysics*, 1991, 190: 363-371.
- [10] Mulela D, Seifert A V. The geology of the Mwombeshi some area and Jiwundu swamp area: Explanation of degree sheet 1225, NE quarter and 1125, SE quarter[R]. [S. l.]: Report Geological Survey of Zambia, 1998, 83: 26.
- [11] Katongo C, Koller F, Kloetzli U, et al. Petrography, geochemistry, and geochronology of granitoid rocks in the Neoproterozoic-Paleozoic Lufilian-Zambezi belt, Zambia: Implications for tectonic setting and regional correlation[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2004, 40: 219-244.
- [12] Kampunzu A B, Cailteux J L H, Kamona A F, et al. Sediment-hosted Zn-Pb-Cu deposits in the Central African Copperbelt[J]. *Ore Geology Reviews*, 2009, 35: 263-297.
- [13] 赵英福. 刚果(金)科卢韦齐铜矿地质特征及成矿机理浅析[J]. *矿产与地质*, 2011, 25(3): 203-207.
- [14] Cosi M, De Bonis A, Gosso G, et al. Late Proterozoic thrust tectonics, high-pressure metamorphism and uranium mineralization in the Domes area, Lufilian Arc, northwestern Zambia[J]. *Precambrian Research*, 1992, 58: 215-240.
- [15] Kampunzu A B. Geochemical characterisation, provenance, source and depositional environment of Roches Argilo-Talqueuses-(RAT) and Mines Subgroups sedimentary rocks in the Neoproterozoic Katangan Belt (Congo): Lithostratigraphic implications[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 42: 119-133.
- [16] Chartrand F M, Brown A C. Preliminary comparison of diagenetic stratiform copper mineralization from Redstone, NW Territories, Canada, and Kamoto, Shaban copperbelt, Zaire[J]. *Geol. Soc.*, 1984, 141: 291-297.
- [17] Batumike M J, Kampunzu A B, Cailteux J H. Petrology and geochemistry of the Neoproterozoic Nguha and Kuudeluugu Groups, Katangan Supergroup, southeast Congo: Implications for provenance, paleoweathering and geotectonic setting[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2006, 44: 97-115.
- [18] Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C. The Neoproterozoic Mwashia-Kansuki sedimentary rock succession in the central African Copperbelt, its Cu-Co mineralisation, and regional correlations[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11: 414-431.
- [19] Hamdy A, Desouky E L, Muchez P, et al. The sandstone-hosted stratiform copper mineralization at Mwitapile and its relation to the mineralization at Lufukwe, Lufilian foreland, Democratic Republic of Congo[J]. *Ore Geology Reviews*, 2008, 34 :

- 561-579.
- [20] Cailteux J L H, Kampunzu A B, Lerouge C, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt deposits, central African copper belts[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 42:134-158.
- [21] Milesi J P, Toteu S F, Deschamps Y. An overview of the geology and major ore deposits of Central Africa; Explanatory note for the 1 : 4 000 000 map "geology and major ore deposits of Central Africa"[J]. *Journal of Africa Earth Sciences*, 2006, 44: 571-591.
- [22] Muchez P, Brems D, Clara E, et al. Evolution of Cu-Co mineralizing fluids at Nkana Mine, Central African Copperbelt, Zambia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2010, 58:457-474.
- [23] Kampunzu A B, Cailteux J. Tectonic evolution of the Lufilian Arc (central African copper belt) during Neoproterozoic Pan African orogenesis[J]. *Gondwana Research*, 1999, 3:401-421.
- [24] Drysdall A R, Johnson R L, Moore T A, et al. Outline of the geology of Zambia[J]. *Geol. Mijnbouw*, 1972, 51:265-276.
- [25] Cailteux J L H, Kampunzu A B H, Batumike M J. Lithostratigraphic position and petrographic characteristics of R. A. T. ("Roches Argilo-Talqueuses") Subgroup, Neoproterozoic Katangan Belt (Congo) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 42:82-94.
- [26] Batumike J M, O'Reilly S Y, Griffin W L, et al. Up-Pb and Hf-isotope analyses of zircon from the Kundelungu Kimberlites, D. R. Congo; Implications for crustal evolution[J]. *Precambrian Research*, 2007, 156:195-225.
- [27] 连长云, 邱瑞照, 刘大文, 等. 应对全球化: 全球矿产资源信息系统数据库建设之八(非洲卷); 南非、赞比亚[R]. 北京: 中国地质调查局发展研究中心境外矿产资源战略研究室, 2007.
- [28] Armstrong R A, Robb L J, Masters S, et al. New U-Pb age constraints on the Katangan sequence, Central African copper-belt[J]. *Journal of African Earth Sciences*, 1999, 28:6-7.
- [29] Dejonghe L. The copper deposit of Kisenda (SE Shaba, Zaire): A sirala-bound mineralization hosted in siliciclastic formations of the Roan (Upper Proterozoic), Roy Mus central Africa (Belg)[J]. *Sci. Geol.*, 1995, 101:87-94.
- [30] 李向前, 毛景文, 闫艳玲, 等. 中非刚果(金)加丹加铜钴矿带主要矿化类型及特征[J]. *矿床地质*, 2009, 28(3):366-380.
- [31] 徐春宏, 范良伍. 刚果民主共和国卡尔维矿区快速锁定找矿靶区的成功要素[J]. *矿产勘查*, 2010, 1(5):488-494.
- [32] Dewaele S, Muchez Ph, Vest J, et al. Multiphaes 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.
- [33] 闫艳玲, 李向前, 姜玉平, 等. 中非铜带残坡积钴矿床地质特征及找矿方向[J]. *地质与勘探*, 2011, 47(3):512-517.
- [34] Fay I, Barton M D. Alteration and ore distribution in the Proterozoic Mines Series, Tenke-Fungurume Cu-Co district, Democratic Republic of Congo [J]. *Miner. Deposita*, 2011 (Published online).
- [35] 任超, 张昊, 李文光. 赞比亚谦比西铜矿矿床成因研究及其找矿意义[J]. *矿产勘查*, 2011, 2(1):84-88.
- [36] Hamdy A, Desouky E, Muchez P, et al. Genesis of sediment-hosted stratiform copper-cobalt mineralization at Luiswishi and Kamoto, Katanga Copperbelt (Democratic Republic of Congo) [J]. *Miner. Deposita*, 2010, 45:735-763.
- [37] Roberts S, Palmer M R, Cooper M J, et al. REE and Sr isotope characteristics of carbonate within the Cu-Co mineralized sedimentary sequence of the Nchanga Mine, Zambian Copperbelt [J]. *Miner. Deposita*, 2009, 44:881-891.
- [38] Webb G E, Kamber B S. Rare earth elements in Holocene reefal microbialites: A new shallow seawater proxy [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2000, 64:1557-1565.
- [39] Shields G A, Webb G E. Has the REE composition of seawater changed over geological time? [J]. *Chem. Geol.*, 2004, 204: 103-107.
- [40] McGowan R R, Roberts S, Adrian J, et al. Origin of the Nchanga copper-cobalt deposits of the Zambian Copperbelt [J]. *Miner. Deposita*, 2006, 40:617-638.
- [41] 李继宏, 姜根有. 刚果(金)加丹加省堪苏祁矿区堪苏祁1-齐汤巴矿段铜钴矿详查报告[R]. 北京: 中国冶金地质总局第一地质勘查院, 2008.
- [42] Porada H, Druschel G. Evidence for participation of microbial mats in the deposition of the siliciclastic 'ore formation' in the copperbelt of Zambia [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2010, 58:427-444.
- [43] Barra F, Broughton D, Ruiz J, et al. Multi-stage mineralization in the Zambian copperbelt based on Re-Os isotope constraints [C]// Anon. The Geological Society of America Abstracts with Program 36, Denver Annual Meeting. [S. l.]: [s. n.], 2004:7-10.
- [44] Selley D, Broughton D, Scott R. A new look at the geology of the Zambia copperbelt [J]. *Economic Geology*, 2005, 100:965-1000.
- [45] Rainaud C, Master S, Armstrong R A, et al. Monazite dating and ^{40}Ar - ^{39}Ar thermochronology of metamorphic events in the central African copperbelt during the Pan-African Lufilian Orogeny [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2005, 42:183-199.
- [46] Torrealday H L, Hitzman M W, Stein H J, et al. Re-Os and U-Pb dating of the vein-hosted mineralization at the Kansanshi copper deposit, northern Zambia [J]. *Economic Geology*, 2000, 95:1165-1170.
- [47] Unrug R. Mineralization controls and source of metals in the Lufilian fold belt, Shaba (Zaire), Zambia and Angola [J]. *Economic Geology*, 1988, 83:1247-1258.
- [48] 李志锋. 中非铜矿带地质勘查新进展[J]. *矿产与地质*, 1992, 6(6):448-453.
- [49] Kamona A F, Lévêque J, Friedrich G, et al. Lead isotopes of the carbonate-hosted Kabwe, Tsumeb' and Kipushi Pb-Zn-Cu sulphide deposits in relation to Pan African orogenesis in the Damaran-Lufilian fold belt of Central Africa [J]. *Miner. Deposita*, 1999, 34:273-283.
- [50] 余健, 董玉森, 张志, 等. 基于 ASTER 影像的蚀变异常提取方法研究: 以赞比亚谦比西铜矿床地区为例 [J]. *国土资源遥感*, 2011(3):54-60.

Research Progresses on the Cu-Co Deposits of Lufilian Area in the Mid-Southern Africa

REN Jun-ping, WANG Jie, LIU Xiao-yang, HE Sheng-fei, HE Fu-qing, XU Kang-kang

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China)

Abstract: The authors summarize previous research results of Lufilian area Cu-Co metallogenic belt in south-central Africa including its regional geological background, lithostratigraphic classification, and systematically analyzed the geological characteristics and deposit genesis. A lot of evidence support the following understanding on this ore deposit: 1) Roan Group diagenetic age is 765—735 Ma and this age also belongs to the formation age of syngenetic sedimentary bedded Cu-Co deposits; 2) the main mineralization age of the later multi phase transformations is 510—500 Ma and the main transformations were controlled by complex overthrust faults and folds of Lufilian period. The aim of the discussion in this paper is to supply important reference for deeper level study of this type of deposits and Chinese enterprises which will invest abroad.

Key words: Cu-Co deposits; geological characteristics; deposit genesis; Lufilian area; mid-southern Africa

.....

(上接第 134 页)

The Study of Ore-Controlling Factors in the Zambian Copper Belt

ZHANG Ke, LIU Shao-you

(SinoMine Resource Exploration Co. Ltd., Beijing 100089, China)

Abstract: Zambia-Congo copper belt (Central Africa copper belt) is a world famous sedimentary copper ore-deposit concentration area, and many world-class copper deposits are distributed there. This copper belt is composed of Congo copper belt and Zambia copper belt which is 150 km in length and 50 km in width, and lies in Copper Belt Province and North-Western Province of Zambia which is located in the southeast end of regional Lufilian Arc. Katanga Supergroup is the major sedimentary basin in Zambia copper belt and the Roan Group, especially the Lower Roan Formation is the main ore-bearing horizon for most of copper deposits. Specific oxidation-reduction zoning and litho-facies zoning in the sedimentary basin lead to the sequence of the mineral phase being iron oxide belt → copper-sulphide belt → pyrite belt from the edge to the center of the basin. Consequently, it is considered that most copper deposits occur within the range approximate 10 km away from the margin of sedimentary basin. Therefore, the nearer it gets to the basin center, the less it receives the metallogenic minerals (provenance). Also, the ore-forming environment tends to be reducing environment, mostly forming producing pyrite, as is unfavorable for copper mineralization. In this article, the ore-controlling factors are summed up as "basin", "horizon", "phase" and "position", respectively means sedimentary basin, metallization horizon, sedimentary facies and spatial location. Hopefully this will be helpful in the aspects of metallogenic regularity research and exploration work in Zambia copper belt.

Key words: Zambia copper belt; sedimentary basin; Roan Formation; basement dome; sedimentary type copper deposit