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

高 辉[1],裴荣富[1],王安建[1],曹殿华[1],范世家[2],梅燕雄[1]
GAO Hui[1], PEI Rong-fu[1], WANG An-jian[1], CAO Dian-hua[1],
FAN Shi-jia[2], MEI Yan-xiong[1]

1. 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037; 2. 有色金属矿产地质调查中心,北京 100031
1. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*;
2. *China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100031, China*

摘要:从海相砂页岩型铜矿时空分布、经济特征、成矿地质背景与沉积环境入手,对中国云南东川-易门铜矿带和阿富汗安纳克铜矿床(带)等进行典型矿床分析与地质特征对比,从成矿物质来源、成矿机制(流体的性质、作用和动力学,金属元素迁移、富集、沉淀和就位机制)等方面对海相砂页岩型铜矿床成因进行探讨,系统分析各种"沉积-成岩-改造"成矿模式、成矿作用与过程,对阿富汗安纳克、云南东川落雪式铜矿床等沉积岩容矿的层状铜矿床成因模型进行总结;在此基础上,进一步深入阐述了海相砂页岩型铜矿成矿与超级古大陆事件的耦合性及衍生成矿作用。通过分析,对中国东川-易门铜矿带,以及与阿富汗安纳克铜矿床毗邻的新疆西昆仑成矿省的海相砂页岩型铜矿找矿前景进行评价和预测。

关键词:海相砂页岩型铜矿;成矿模式;地质对比;阿富汗安纳克铜矿;中国云南东川铜矿
中图分类号:P619.21+3;P612 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2252(2012)08-1332-20

Gao H, Pei R F, Wang A J, Cao D H, Fan S J, Mei Y X. Marine sand shale-hosted copper mineralization model and geological correlation: A case study of the Dongchuan copper mine in Yunnan and the Aynak copper mine in Afghanistan. *Geological Bulletin of China,* 2012,31(8):1332-1351

Abstract: According to the temporal and spatial distribution and the economic characteristics of the marine sand shale-hosted copper deposits and the geological background and sedimentary environment analysis of their mineralization, the authors made typical deposit analysis and geological characteristics correlation of the Dongchuan-Yimen copper mineralization belt in Yunnan Province of China and the Aynak copper orefield (belt)in Afghanistan. The origin of the marine sand shale-hosted copper deposit was analyzed and discussed in the aspects of metallogenic matter source and the ore-forming mechanisms such as the property, role and kinetics of the fluids and the migration, accumulation, sedimentation and emplacement mechanism of metal elements as well as other elements. Then all kinds of "Deposition-Diagenesis-Reformation" mineralization patterns and ore-forming processes related to marine sand shale-hosted copper deposits were analyzed systematically so as to discuss, summarize and review the genetic pattern of the Aynak copper deposit in Afghanistan and that of the Dongchuan snowfall-like sediment-hosted copper deposit. Based on those results, the authors further elaborated in depth the consistency of marine sand shale-hosted copper mineralization and the super ancient continental events as well as the derivative mineralization. Through systematical correlation, the prospecting potential of the Dongchuan-Yimen copper mineralization belt and the marine sand shale-hosted copper deposits in West Kunlun mineralization province of Xinjiang adjacent to the Aynak copper orefield in Afghanistan was evaluated and estimated.

Key words: marine sand shale-hosted copper deposit; metallogenic model; geological correlation; Aynak copper orefield in Afghanistan; Dongchuan copper deposit of Yunnan Province in China

收稿日期:2012-04-06;**修订日期**:2012-06-26
资助项目:国家科技支撑计划项目《"三江"中南段铜铅锌金多金属矿床综合勘察评价技术研究》(编号:2006BAB01A07)和中央地勘基金支撑计划课题《全球铜矿分布规律与找矿战略区划研究》(编号:2012B1111)
作者简介:高辉(1969-),男,博士,从事地质矿产资源勘查评价和资源战略研究。E-mail:gao.wayne@vip.163.com

砂页岩型铜矿在国外也称“沉积层控铜矿(Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits, SHSC)”,泛指不同时代沉积岩、沉积变质岩中的层状和层控的铜矿床[1-2],主要产于元古宙以来的沉积盆地中。矿床规模大(最大矿床的铜储量约 3500×10⁴t),矿体形态稳定,易于开采,矿石品位高(一般含铜为 1%~2%),往往受后期地质改造作用富集(含铜可达 4%~5%以上),主要伴生矿产为钴、镍、钼、铅、锌、金、银、铀,甚至铂族金属等,具有巨大的经济价值。Kirkham 等[3]分析此类矿床在全球的分布规律和资源量时指出, 砂页岩型铜矿是世界铜矿资源中仅次于斑岩铜矿的一种重要的矿床类型。

沉积层控铜矿有广义和狭义之分。广义的沉积层状矿床包含喷气沉积的 Sedex 矿床, 部分矿床含铜,成矿模式已有比较成熟的研究[4];狭义的层状铜矿床主要指产在碎屑岩和碳酸盐岩中的浸染状和条带状铜矿床,大致相当于 Cox 等[5]1986 年编写的《矿床模式》一书中的第 30b 类——沉积岩中的铜矿。一般指那些主要受沉积岩控制、具有一定层位并与围岩基本上呈整合产出的铜矿床, 矿体主要为层状、似层状和长透镜状。含铜岩石主要有砂岩、硬砂岩、页岩、泥岩、泥灰岩、白云岩等,辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿等金属硫化物以胶结物形式存在,并呈分带现象。

国内学者一般将砂页岩型铜矿床根据其形成环境分为两大类: 海相砂页岩型铜矿床和陆相砂页岩型铜矿床[6-7]。前者形成于古赤道 30°纬度范围内的大陆碎屑沉积物盆地及随后的陆缘浅海相或湖相盆地中,分布广泛,多为大型—超大型,成矿规模大,品位富,一般铜的平均品位为 2.4%,经济价值大;后者实例不多,成矿规模小,品位虽富,但经济意义不大,不再赘述。海相砂页岩型铜矿按容矿岩石类型不同可分为以下几种组合:含铜页岩组合、含铜砂岩(石英岩)组合、含铜砾岩组合、含铜灰岩-白云岩组合等,如以元古宙赞比亚铜矿带和刚果(金)沙巴铜矿带为代表的中非铜矿带几乎包括上述各类容矿岩石组合[5]。中国云南东川铜矿和阿富汗安纳克铜矿在中、新元古代先后成矿,主要产在灰岩和(或)白云岩中,同属海相砂页岩型铜矿,并共同经历了全球洋-陆转换中的特提斯演化。笔者在研究东川铜矿田等国内层状铜矿和考察阿富汗安纳克铜矿的基础上,结合全球砂页岩型铜矿成矿和分布, 分析对比国内外海相砂页岩型铜矿地质特征、成矿条件和矿化规律, 并以中国云南东川铜矿和阿富汗安纳克铜矿为例,归纳海相砂页岩型铜矿床成矿模式,以指导该类型矿床的找矿勘查工作。

1　海相砂页岩型铜矿时空分布及其经济特征

海相砂页岩型铜矿系指成矿受同生-成岩-后生作用控制并产于海相沉积岩或海相沉积变质岩中的层状铜矿床[2,7]。世界大型超大型砂页岩铜矿床均属于海相砂页岩型铜矿床,成矿时代以元古宙为主。地质年代资料证明, 海相砂页岩型铜矿成矿有 2 个高峰期:元古宙特别是新元古代时期(570~1700Ma)和泥盆纪到二叠纪(250~380Ma)[5]。元古宙砂页岩型铜矿成矿时空分布主要有古元古代俄罗斯乌多坎铜矿,中元古代中国东川-易门铜矿,新元古代有赞比亚恩查加、巴卢巴、恩卡纳、孔科拉、穆富里拉铜矿,刚果(金)科尔韦济、卢本巴希、坎博韦、基普希铜矿等,阿富汗安纳克铜矿,美国怀特潘、贝尔特铜矿等,新元古代岩层成矿潜力最大。石炭纪仅有哈萨克斯坦的杰兹卡兹甘铜矿; 二叠纪有中欧的曼斯菲尔德铜矿[5](图 1)。就世界前寒武纪成矿来讲,元古宙砂页岩型铜矿床是前寒武纪铜矿床最重要的类型, 占世界前寒武纪铜矿储量的 71.8% , 占中国前寒武纪铜矿储量的 34.4%(图 2); 占世界沉积岩型铜矿储量的 77%,占中国沉积岩型铜矿储量的 75.1%[8](图 3)。

海相砂页岩型铜矿具有规模大、品位高的特点,是世界主要铜矿工业类型之一。据戴自希等[9]统计,世界 60 个超大型(500 万吨)以上规模的铜矿床中有15 个为该类型矿床,矿床个数占 25%,储量占 24%。从世界铜资源来看,砂页岩型铜矿资源量仅次于斑岩铜矿,但其品位常比后者高得多(图 4)。该类矿床在 20 世纪 30 年代初居世界铜储量第一位,曾达 51.4%。由于 20 世纪 60 年代以来斑岩铜矿的大量发现和开发, 海相砂页岩型铜矿床已退居第二位,但仍占世界铜储量的 25%和铜产量的 1/4。该类矿床在中国大型铜矿储量中占有比例为 7.38%。矿床一般规模大、品位高,伴生组分多,因而经济价值巨大。

2　成矿地质背景、沉积环境

国外海相砂页岩大型铜矿特别是超大型铜矿多

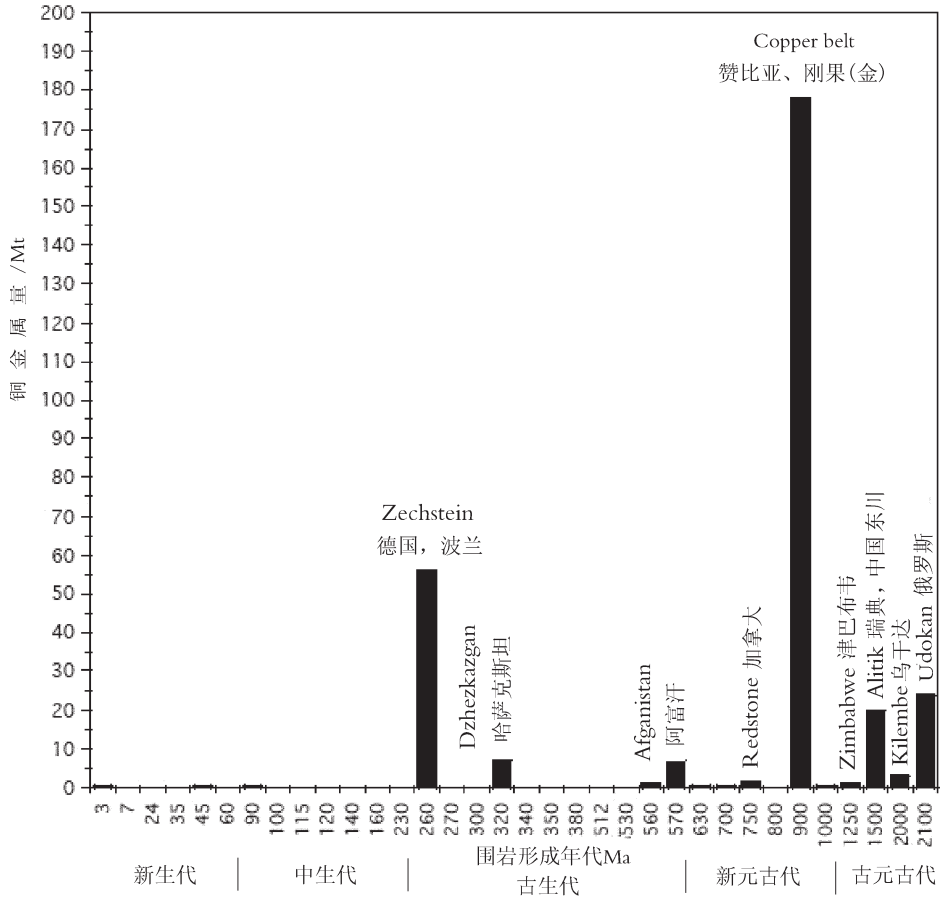


图 1 不同年代矿床中铜金属量分布[5]

Fig. 1 Metal distribution map of copper deposits in different geological epochs

形成于新元古代时期的裂谷盆地环境中，与新元古代各大陆裂谷活动活跃而强烈关系密切[8]。海相砂页岩型铜矿多发育在稳定大陆内部裂谷或类似张裂构造环境的早期阶段[6]。含矿岩系堆积期的古构造环境和古地理条件对构造-建造组合中含铜建造的位置和含矿量有决定性的影响。海相砂页岩型铜矿多出现在低纬度、干旱和半干旱环境中的古大陆边缘斜坡靠近大陆以陆壳为基底的冒地槽环境中，大都在长期隆起剥蚀区的边缘。含矿层集中在相当于陆海过渡带古构造环境中沉积旋回的海进或海退地区，大多数矿床产在红层沉积结束之后的首次海侵形成的地层里，即向海相过渡的粉砂岩、页岩、钙质页岩及碳酸盐岩建造中，或与红层互层，其上大都覆盖有蒸发岩。大型矿床多为海岸—浅海相、泻湖三角洲相[5,10]①。显然，该类矿床的理想沉积环境是浅边缘海区的还原性盆地。

3 典型矿床成矿地质特征及对比

中国云南东川-易门铜矿带是一个研究程度比较高的海相砂页岩型铜矿床(田)[11-22]。阿富汗安纳克铜矿床(田)与中国东川-易门铜矿同属造山区海相砂页岩型铜矿床，二者与赞比亚铜矿带典型砂页岩型铜矿(穆富里拉铜矿)具有相似的成矿模式与地质特征①，具有可比性。

3.1 中国云南东川-易门铜矿(田)带

东川-易门铜矿(田)带，地处中国云南东川—易门地区，南北延长约 280km[6]。矿田分东、西 2 条矿带，由落雪、汤丹、因民、滥泥坪、石将军、白锡腊、新塘等一系列大中型和一些小型铜矿床组成，累计探明铜储量 391.4×10⁴t。东川-易门铜矿(田)带大地构造上位于康滇地轴南段扬子古大陆边缘裂谷环境，夹于绿汁江断裂带与小江断裂带之间，沉积环境属

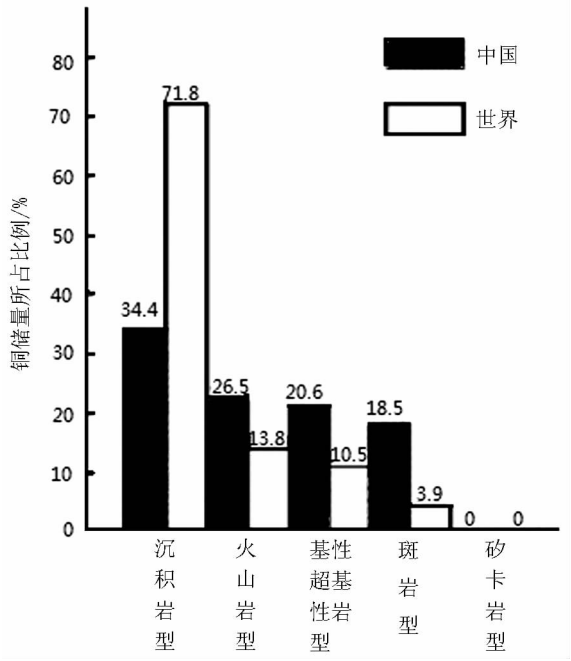


图 2　前寒武纪不同类型铜矿床储量比例[8]

Fig. 2　Reserves proportion histogram of different copper deposit types in Precambrian

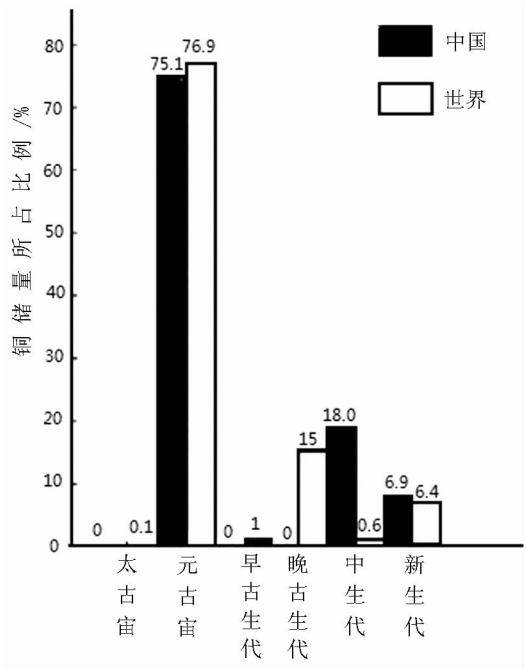


图 3　中国与世界沉积岩型铜矿床储量比例[8]

Fig. 3　Reserves proportion histogram of sedimentary copper deposits in China and in the whole world

昆阳古裂谷中段的断陷盆地[22]。矿田主要出露中元古界昆阳群,地层单位自上向下有:绿汁江组、黑山头组、落雪组、因民组,局部出露古元古界—太古宇大红山群底巴都组[8,11]。

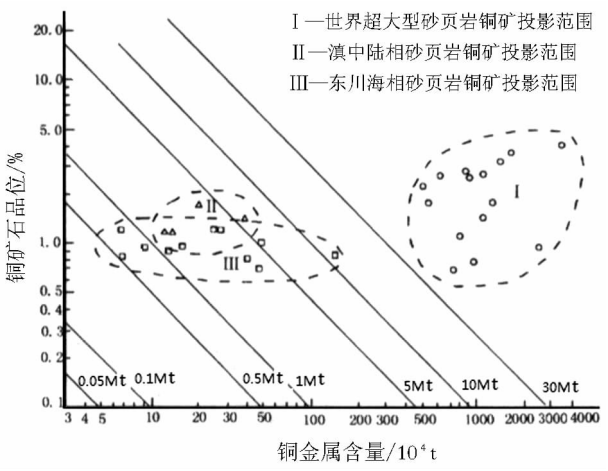


图 4　砂页岩型铜矿的吨位与品位[1]

Fig. 4　Tonnage and grade map of sandshale copper deposits

昆阳群由砂板岩、白云岩、灰岩组成,变质轻微,属低绿片岩相[6]。含矿层位主要是中元古界昆阳群因民组上部和落雪组下部;其次是黑山头组和绿汁江组。层状或似层状矿体主要赋存在因民组紫色层上部、落雪组下部青灰色含藻白云岩层、过渡层(泥砂质白云岩)和绿汁江组狮山段黑色层(炭泥质、砂质白云岩)、浅色层(凝灰质、泥砂质白云岩)等潮坪海湾泻湖相中。因民组和落雪组层状铜矿资源储量合计占整个矿田资源储量的 81%(表 1)。黑山头组下部(一段)为黑色炭质页岩夹蓝灰色炭质钙质板岩。绿汁江组为上部硅质条带白云岩(含藻叠层石),下部为炭泥质白云岩,是易门凤山和狮山铜矿赋矿层位。凤山铜矿以脉状矿体为特征,常分布于层状矿体上盘白云岩中,或在层状矿体上部地层中构成独立的脉状矿床,矿体主要受断裂控制[8,11]。

东川-易门铜矿(田)带由北至南分为 2 个矿带,即北部为因民落雪矿带,全长 28km;东南部为新塘-汤丹-滥泥坪矿带(简称汤新矿带),断续延长 17km。东川-易门铜矿田中,最为典型的以沉积岩为容矿岩石的层控铜矿床是落雪矿区,落雪矿区内铜矿化带长 7200m,大小 58 个矿体,较大的矿体有 15 个,呈层状、似层状、透镜状。走向长 100~1000m,延深 80~600m,厚 1~50m,平均含铜 0.81%~1.53%。在平面分布上因层位不同,分西、中、东 3 个矿段。含矿层受地层、岩相、岩性的控制。矿石构造呈层纹状、

表 1 东川–易门地区昆阳群含矿地层、沉积建造和铜矿(据参考文献[8,11]改编)

Table 1 Summary of Kunyang Group ore-bearing strata, sedimentary formation and copper deposits in Dongchuan – Yimen areat

界	群组		含矿层位	容矿岩石特征	含矿沉积建造	裂谷发育阶段	矿床实例	储量所占比例/%
中元古界	昆阳群	绿汁江组		上部硅质条带白云岩(含藻叠层石)、灰岩 下部炭泥质白云岩、炭质凝灰质板岩	白云质碳酸盐建造	断裂坳陷阶段	易门凤山脉型铜矿 狮山层状铜矿 罗茨大美厂	6
		黑山头组		上部青灰色薄层灰岩、黑色页岩 中部灰绿、黄绿色粉砂质条带板岩夹薄层白云岩 下部黑色页岩、炭质钙质板岩	黑色炭质页岩建造		东川汤丹西矿段、易门狮子山、大箐沟式居状铜矿	6
		落雪组		含藻白云岩、泥砂质白云岩和灰色长石石英砂岩	藻礁碳酸盐含铜建造		东川落雪、汤丹、因民、白锡腊、新塘、易门铜厂等落雪式层状铜矿	81
		因民组		紫色板岩、白云岩和砂板岩韵律层，底部有角砾石	杂色砂页岩建造	初始裂堑阶段	东川稀矿山、大乔地、易门万宝、罗蒋鹅头厂、迤纳厂层状铜铁矿	7
古元古界	大红山群			黑云钠长片岩、石榴角闪片岩、角闪片岩、黑云白云大理岩	钠质火山沉积岩建造(细碧角斑岩系含铜铁建造)		大红山式火山岩型铜铁矿床	

马尾丝状、条带状、浸染状、角砾状、脉状等。矿物种类简单，矿石矿物主要为辉铜矿、斑铜矿和黄铜矿，由紫色向浅色呈赤铁矿–辉铜矿–斑铜矿–黄铜矿–方铅矿–黄铁矿矿物分带，伴生银、金、钴、锗。脉石矿物为含藻白云岩中的矿物，成分简单，主要为白云石，少量石英①[6,23]。易门矿区铜矿床地质特征与东川落雪式铜矿床既有成矿的相似性，又有其特殊性[21]，不再赘述。

关于东川–易门铜矿田的成因众说纷纭，有同生沉积、火山–沉积、中温热液说[11]、沉积–变质说[24]、喷气–沉积说[13]、喷流–沉积说[15]、沉积–成岩–改造说[12]各种现点。有些学者[11-14,25]认为，东川–易门式铜矿为典型的沉积–成岩–改造矿床，并归纳出“红层汲取–藻控成岩成矿–构造富集”的成矿模式[12]。韩润生等[18]认为，易门式铜矿床为“裂谷成矿背景–火山热水沉积–构造改造富集–深源岩浆叠加–地下热水再造”型多因复成矿床。

3.2 阿富汗安纳克铜矿田(带)

沉积层控铜矿是阿富汗铜矿床主要的工业类型之一，在阿富汗各地均有发现。其中从喀布尔延伸到洛加尔(Logar)省的铜矿带，长达 110km，分布包括安纳克铜矿在内的几个沉积层控矿床，储量大，品位高，可以与赞比亚铜矿带相媲美②。

阿富汗境内规模最大也最有名的铜矿床是沉积层控型(SHSC)的安纳克(Aynak)铜矿，距喀布尔市南南东方向 30km。矿床位于喀布尔断块内，喀布尔断块为一复式背斜，被帕格桑和阿里基穆尔深大断裂切成 3 个区块③。安纳克铜矿矿田总面积 110km^2。该区地层由新元古代受区域变质的火山沉积岩、侵入杂岩和不同时期的沉积岩组成(图 5-a)。矿床产在新元古代地台中的一个上叠凹槽里，上叠凹槽的褶皱基底由新元古代含石榴子石角闪岩、片麻岩和结晶片岩组成①③。

铜矿赋存于受绿片岩相变质的前寒武纪–文德系(Vendian–Lower Cambrian，680Ma±20Ma~570Ma±10Ma)洛伊赫瓦尔组白云质大理岩和黑云母长石石英片岩中(图 5-b、图 6)③。洛伊赫瓦尔组厚 880m，分 3 个亚组：下亚组和上亚组以碳酸盐岩为主，中亚

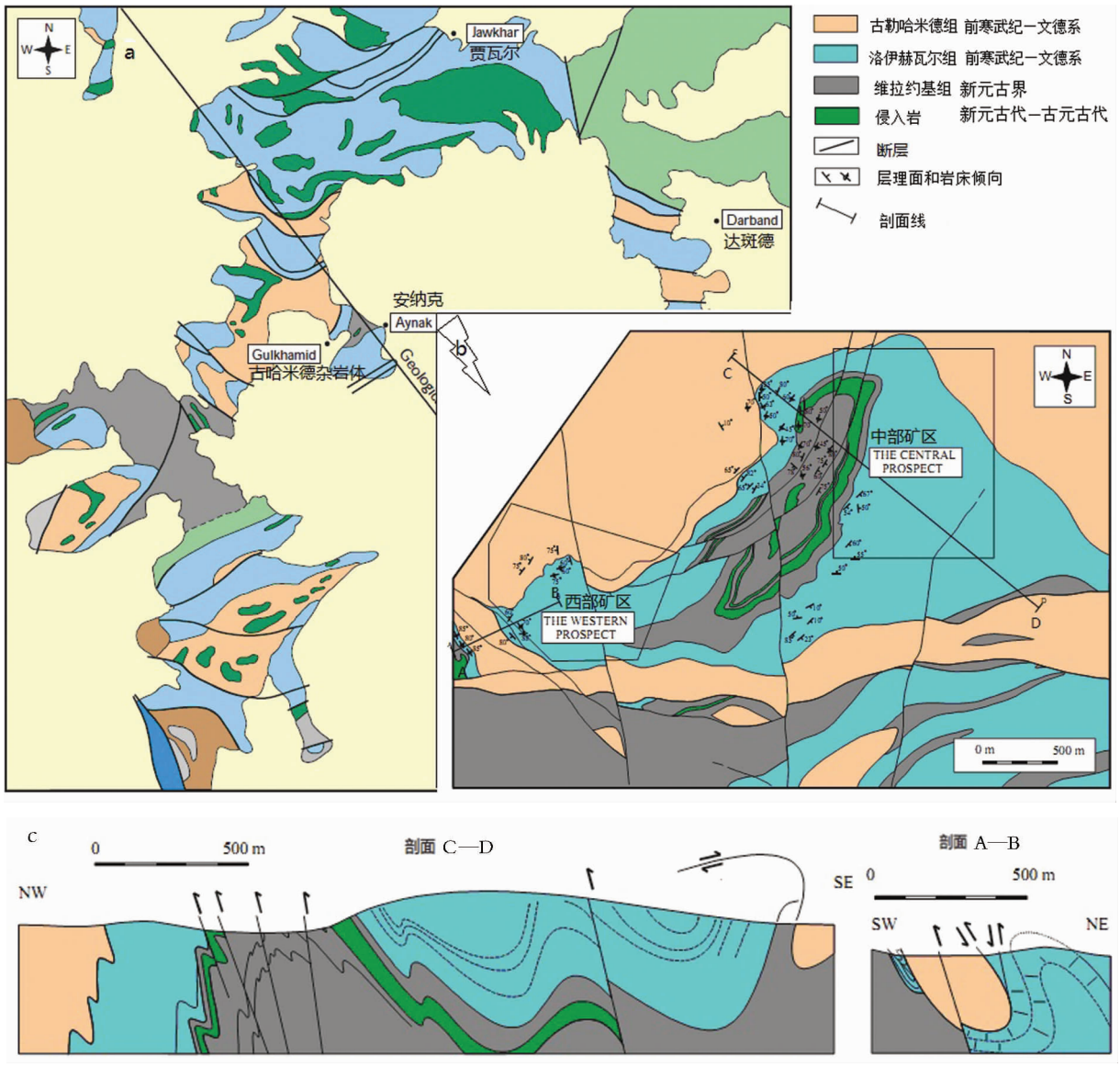


图 5　安纳克铜矿区域地质图(a)、矿区地质略图(b)和矿区剖面(c)(据参考文献③修编)

Fig. 5　Regional geological map (a), geological sketch map (b) and geological section (c) of the Aynak copper deposit

组含矿,以陆源物质为主。中亚组岩相变化大,从上到下依次为:含炭质碳酸盐黑云母石英片岩、白云石石英长石岩交互层及碎屑岩。中亚组集中了该矿床铜矿资源储量的 80%左右①。铜矿物主要为斑铜矿和黄铜矿,而且含碳酸盐较多的粗粒岩富含铜,矿化以斑铜矿为主(图 6、图 7)。

洛伊赫瓦尔组含铜沉积物上覆古勒哈米德组火成岩杂岩。矿区侵入岩有普通角闪石辉长岩,切穿基底结晶岩系①③。矿区整体呈向斜构造,被一系列纵断层切割而变得复杂化(图 5-c)。

矿化产在一定层位,在剖面上呈多层分布。铜矿层主要集中在洛伊赫瓦尔组中亚组的下部和下亚组的上部。

矿床分中部、西部和南部 3 个矿区(图 5-b)。探明储量的大部分位于中部矿区, 中部矿区矿化层与围岩整合产出, 总共 44 个矿体中 42 个赋存于 7 个岩层段,呈层状、似层状、脉状,平行雁行分布。主矿体走向长度达 3000m,宽 70~1000m,厚 60~200m,矿化最大延深达 600m。从地表以下至 10~20m 深处为氧化带,含铜 0.71%~2.85%,平均 1.2%[26]。西部矿区

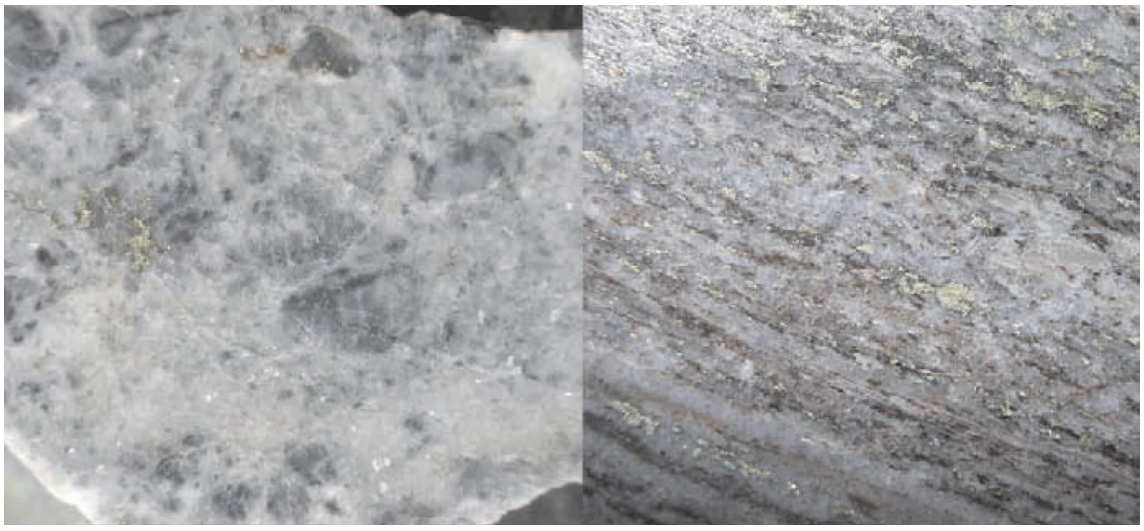


图 6 含黄铜矿的斑状变晶白云石大理岩(左)和含浸染、细脉状黄铜矿的黑云母-长石-石英片岩(右)③

Fig. 6 Porphyroblastic dolomite marble containing chalcopyrite (left) and biotite -feldspar-quartz schist containing disseminated and veinlet-like chalcopyrite (right)



图 7 安纳克铜矿地表矿化露头③

Fig. 7 Mineralized outcrop of the Aynak copper deposit

矿化性质、结构构造特征、铜矿石矿物成分等都与中部矿区相似，铜矿化带长 2000m，厚 4~94m，含铜 0.62%~2.05%。铜矿大部分被新生代地层覆盖；南矿区未发现氧化带，仅有几个矿化点，含铜 0.9%~1.6%，平均 1.3%①。整个安纳克铜矿最新评估的资源量超过 5×10^8t，含铜平均品位 1.67%~2.33%，金属量接近 1120×10^4t。其中氧化带占 5%，混合带占 7%，硫化物带占 87%[26]。主矿体核部矿石矿物以斑铜矿为主，周围为黄铜矿，此外还有黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、辉钴矿、镍黄铁矿等，氧化物有辉铜矿、铜蓝、自然铜及孔雀石、硅孔雀石等。矿化在剖面上呈带状分布①。

除安纳克(Aynak)铜矿外，在安纳克铜矿以北和东北方向不远处同一地层中还发现达斑德(Darband)、贾瓦尔(Jawkhar)铜矿[27-28](图 5-a)。达斑德铜矿矿化呈雁列式细脉或浸染状赋存于硅化含云母大理岩中。矿化带长 7000m，宽 1000m，厚度 18~120m，查明资源量超过 8000×10^4t，含铜 0.6%~2.06%②。贾瓦尔(Jawkhar)铜矿矿化产在变质的钠长石化、硅化钙质沉积岩层、角闪岩层和石英岩层中，矿化带长约 2000m，厚达 300m，包括有 22 个铜矿透镜体，长 150~100m，厚 1.5~32m，铜品位为 0.33%~2.56%，推断为大型铜矿[28]。

安纳克铜矿田 3 个层状铜矿床周围还有数十个铜矿点，成矿环境相似，时代均属前寒武纪新元古代[29]。安纳克铜矿被认为是循环海水从下伏火山岩中浸出和萃取金属而形成的①③。

3.3 典型矿床分析与地质特征对比

将阿富汗安纳克铜矿床、中国云南东川铜矿床与赞比亚铜矿带穆富里拉矿床成矿主要地质特征归纳如下(表 2)。

从表 2 可以看出，中国云南东川铜矿带、阿富汗安纳克铜矿床和赞比亚铜矿带典型矿床穆富里拉铜矿相比较，3 个大型、超大型海相砂页岩型铜矿床地质特征和成矿特征非常相似：都产于陆内裂谷盆地或古大陆边缘裂谷的沉积岩系中；盆地内的沉积序

表 2　东川铜矿与安纳克沉积层控铜矿床及其它典型层控矿床特征对比

Table 2　Comparison of characteristics between Dongchuan, Aynak and other typical sedimentary stratabound copper deposits

矿床名称	阿富汗安纳克铜矿田 (洛伊赫瓦尔组)[26-29]①②③	中国云南东川铜矿田 (落雪组)[11-22]①	赞比亚铜矿带 (穆富里拉)[30-36] ①
成矿时代	新元古代 (前寒武纪文德期)	中元古代(658~1805Ma)	新元古代
构造背景 和沉积相	陆内裂谷 泻湖三角洲沉积相	古大陆边缘裂谷环境 浅水碳酸盐湖坪和台地沉积	陆内裂谷 浅水三角洲和泻湖沉积相
成矿元素	Cu-Co- (Ni-Pb-Zn-Mo-Ag-Au)	Cu-Co(Ni-Pb-Zn-Mo) -Ag-Au-Ge	Cu-Co(Ni-Pb-Zn-Mo) -Ge-Ag-Au
储量、品位	铜金属量 1120×10^4t① Cu 品位 1.67%~2.33%	391.4×10^4t 0.9%~1.5%	980×10^4t 3.47%
矿体形态	44 个矿体中 42 个赋存于 7 个岩层段，呈层状、似层状、脉状，平行雁行分布。主矿体走向长 3000m,宽 70~1000m,厚 60~200m,矿化最大延深 600m	不同层位，多层分布，铜矿带长 7200m,大小 58 个矿体，主矿体 15 个，层状、似层状、脉状，厚 1~50m,延深 80~600m,走向延长 100~1000m	3 个以上矿化岩层叠置产出，矿化层多达 21 层，层状、脉状矿化，厚 10~15m, 走向延长 5800m
矿石组构	铜矿石以浸染状、条带状、层纹状构造为主，角砾状和脉状金属硫化物以胶结物形式存在。从主矿体中心向两侧，由斑铜矿石→黄铜矿石→黄铁矿→磁黄铁矿石为主，似对称分带	层纹状、马尾丝状、条带状、浸染状、角砾状、脉状等。 一般矿体由下至上或由边缘到中心,金属矿物分带依次: 赤铁矿、自然铜带→辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿带→黄铜矿、黄铁矿带→黄铁矿带	矿石为浸染状和条带状，硫化物条带方位与岩石层理一致，层面(细纹理或交错纹层)更富集沿古滨海线分布，从滨海线向缺氧深水方向，矿床呈现从辉铜矿→斑铜矿→黄铜矿→黄铁矿的分带
赋矿围岩	洛伊赫瓦尔组 (Loy Khwar)白云质大理岩和石英黑云母白云质片岩	落雪组砂泥质白云岩、含炭页岩、砂岩、砾岩，夹变质砂岩、板岩，白云岩夹硅质细纹条带，绢云母化	灰色绢云母石英岩、长石质石英岩、炭质岩相和硬砂岩
金属矿物 组合	斑铜矿为主，周围为黄铜矿，还有黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、辉钴矿、镍黄铁矿等，氧化物有辉铜矿、铜蓝、自然铜及孔雀石、硅孔雀石等	主要为辉铜矿、斑铜矿和黄铜矿,由紫色向浅色呈赤铁矿辉铜矿斑铜矿黄铜矿方铅矿黄铁矿矿物分带	主要矿石矿物是黄铜矿，其次是斑铜矿，局部出现辉铜矿，氧化物有孔雀石等
蚀　变	近矿围岩蚀变 硅化、碳酸盐化	弱蚀变强蚀变 褪色化、硅化、碳酸盐化	K-Na 强蚀变
金属物质来源	下伏陆相火山岩	下伏因民组砂岩	底部 Mindola 组红层
S 来源	蒸发岩	因民组上部含藻叠层石	蒸发岩、泥岩
$\delta^{34}S$	资料暂缺	-8.37‰~23.2‰	-18.4‰~23‰
成矿流体 性质	变质脱水反应析出，除 H_2O 外，还含有 CO_2、S、O、F、Cl 等多种挥发组分的高热气液共存体	70℃、盐度 w(NaCl)7%~10% 和 >200℃, 盐度 w (NaCl) 40%, 氧化性	200℃、高盐度
流体驱动机制	断裂活动	深断裂	加丹加造山运动
沉淀机理	循环海水和卤水中和发生还原反应	还原反应 2 种流体中和反应	还原反应油气、Kitwe 组泥岩

列都有完整的沉积旋回，属元古宙杂色砂页岩→白云质碳酸盐岩→黑色炭质页岩海进式含铜建造，矿化产于灰岩、白云岩、白云质大理岩、石英岩、黑色炭质页岩的底部，矿体对岩层段中岩性无明显的选择性，各岩性段中都有矿体分布，表现出岩性组合控矿的特征；矿体呈层状、似层状、透镜状产出，产状稳定，厚度几十米，走向延长几百米至几千米；矿石既有明显的同生沉积特征，矿化又有规律的分带现象；但构造带中存在不规则的脉状矿体，反映出这些矿床不同程度地经历过后期变质的改造。总体而言，层状、似层状、透镜状铜矿体形成于成岩阶段，属沉积-变质（热液交代）作用成矿，构造带中的形态不规则状脉状铜矿体为后期构造改造的产物，属变质热液充填成矿。3 个矿床成矿元素组合和金属矿物组合也反映出海相砂页岩型铜矿成矿作用非常相似，矿床具有砂页岩型铜矿的共性特征。

东川-易门铜矿与其它二者主要的差异在于成矿时代、构造背景和沉积相。长期以来，东川易门铜矿成岩成矿时代被测定为中元古代[22]；而赞比亚铜矿带穆富里拉铜矿和阿富汗安纳克铜矿于新元古代成矿①[5]；此外，东川易门铜矿成矿环境为古大陆边缘裂谷[22]，与另外 2 个铜矿产于陆内裂谷相区别；最后，东川铜矿田沉积相为浅水碳酸盐湖坪沉积①，与另外 2 个特大型铜矿为泻湖—三角洲沉积相相区别。这种差异是否成为东川-易门铜矿（田）规模远未达到国外著名铜带或铜矿床的规模，铜金属量和品位不及国外同类矿床的原因，有必要从海相砂页岩型铜矿成矿模式和成矿因素深入探讨。

4 海相砂页岩型铜矿床成因探讨

沉积岩容矿的层状铜矿床成矿系统必须具备金属源、金属运移流体、硫源和硫运移流体，另外，还必须具备适当的化学和物理条件，这样才能有效地将金属以硫化物的形式沉淀于地层中的某个特定部位[37]。

4.1 成矿物质来源

目前，对海相砂页岩型铜矿床的铜金属主要来源大多数人认为来自陆源剥蚀的产物（碎屑）。一般是指在下伏岩石与赋矿岩石之间的古风化壳或不整合面上，由各种富铜（高背景值）岩石，尤其是花岗岩类、玄武岩类、（变质）火山岩类在氧化干旱的条件下风化的产物——红层和磨拉石建造[37-38]。赋矿层与矿源层往往不是同一层位，最常见的情形是：矿源层是位于海进顺序底部的粗碎屑岩、红层或火山碎屑岩等，而赋矿层是具有较还原地球化学性质的泥质粉砂质岩石或生物碳酸盐岩岩石[38-39]。表 2 列出了 3 个层状铜矿的矿源层和赋矿岩层以便对比。赞比亚铜矿带的沉积岩系与下伏基岩呈不整合接触。沉积岩系底部为下罗安组岩层，其下部为粗粒红层，上部为不同渗透性和氧化状态的海相岩系。赞比亚铜矿带大型矿体产于下罗安组中的碎屑岩岩系顶部或海相层段基底中，下部红层厚度一般 200~300m，局部大于 1000m；安纳克铜矿主要赋存在洛伊赫瓦尔组（Loy Khwar）中亚组，中亚组下部下亚组总厚度达 300m；云南东川铜矿因民组砂岩铜背景值高，最大厚度 1300m；下伏大红山富铁铜火山岩或紫色层等矿源层。

关于该类矿床中 S 的来源，据 Hitzman 等[37,39]对海相砂页岩型铜矿床产出的几大沉积盆地总结，主要有 4 个来源：①直接来源于海水、泻湖和蒸发演化卤水中的硫酸盐；②有机质和生物降解促使 S 的还原态 H_2S 的生成；③先前存在的硫化物；④流动性烃类和油气藏中含 H_2S。阿富汗安纳克铜矿存在蒸发岩和变质脱水反应析出 S，东川矿田因民组上部落雪组含藻白云岩和绿汁江组含藻叠层石，可能促使蒸发演化卤水中的硫酸根生成还原态 H_2S，参与成矿过程。

4.2 成矿机制

4.2.1 流体源、性质、作用和驱动机制

在沉积岩中能够形成层状铜矿床，源岩层的金属必须运移至硫化物沉淀部位。已有大量的研究表明[37-44]，流体是海相砂页岩型铜矿床形成过程中起非常重要作用的成矿因素。沉积岩系中的孔隙流体可能包括：从海水演化来的卤水；残留的苦卤水；蒸发岩溶解形成的卤水；在烃类物质成熟、石膏脱水、蒙皂石向伊利石转化时和在低级的埋藏变质脱水反应时产生的水溶液流体；液态烃类物质和气体（甲烷和 CO_2）。此外，大气降水沿盆地边缘渗入（地形重力驱动流体流动）时也可能提供了大量的流体，这些流体在淋滤蒸发岩时可能达到了高的盐度。

流体的作用是使金属从矿源层活化转移、到赋矿层富集成矿，被称为“改造热液”。它们由于地热增温、裂谷高热流值等原因而被加热，并因溶解了蒸发岩类而增高了盐度，成为一种热卤水，一般以富 Cl

贫S 为特征,在流经红层过程中,有利于以络合物方式淋滤、萃取和运移铜等成矿金属。沉积过程中的压实作用、地貌高差、地温梯度、异常高压、地下水补给、放射性衰变放热、构造运动、盐丘底辟、岩浆活动等都可以导致地下流体大规模地运移，沉积岩层因孔隙率和渗透率的差异，驱动流体在沉积层序内循环运移[37-44]。以上 3 个矿床实例均反映出,从富含多种挥发组分的高热、中温到低温高盐度流体,在地应力和构造热力驱动下，在盆地内形成对流或者通过其它途径流出盆地，引起盆地内金属运移区域广泛的蚀变，显示对沉积-成岩-成矿的广泛参与和改造。Hayes 等[43-44]针对 Spar Lake 矿床内及附近的沉积岩进行了研究,研究数据表明,盆地中的中等盐度热液在流过沉积层序时淋滤金属，同时产生了大范围(数十千米)的钠长石化蚀变。安纳克铜矿被认为是循环海水从下伏火山岩中浸出和萃取金属形成的,流体除了从红层中的羟基氧化铁淋滤金属外,很少产生其它明显的蚀变①③[26-29]。大范围的钾蚀变、钠蚀变及其它类型的蚀变却影响了赞比亚铜矿带 Katangan 地层的整个下部岩层，并且在局部影响了基岩。在该段地层底部的下罗安组岩层内,以钾长石蚀变为主,赋存了大型矿体[37]。东川铜矿的研究数据表明，流体是在低温和中等盐度条件下引起不同程度的褪色、硅化、碳酸盐化蚀变的改造[15,17,24]。

4.2.2　金属元素迁移、富集、沉淀和就位机制

沉积岩容矿型层状铜矿床的形成，从早期成岩到盆地反转和岩石变质，成矿作用可以发生于这一过程的各个时期。成矿流体一般处于氧化环境,含多种化学成分，包括主要的金属阳离子(Na、Ca、K、Mg)。Cu 元素溶解状态下主要是以 Cu、Cl 络合物方式迁移的，或呈矿物微粒被悬浮状态的粘土矿物等所吸附,在沉积层-海水界面附近,这些氧化性流体与还原剂相互作用,生成 Cu 的硫化物沉淀。流体中的金属发生还原反应是贱金属硫化物沉淀的主要原因[37,41-45]。在一个水文开放式盆地有外部源补给流体时,也可以形成早期的成岩矿床。 在水文封闭式盆地内，圈闭在红层岩系内的孔隙流体能够在盆地内对流,在这样的盆地内,可能尤其有利于形成大型沉积岩容矿的层状铜矿床。流体的对流可以在更长时间内淋滤红层岩系，从而有可能在矿石沉积位置连续地、分期次地沉淀出硫化物 。许多研究者指出,从红层顶部的接触带直至还原环境中的含矿沉积层，通常存在赤铁矿-辉铜矿-斑铜矿-黄铜矿-黄铁矿的矿物分带。Fe^{3+}-Cu-Pb-Zn-Fe^{2+}分带、氧化矿物与硫化矿物分带和矿物共生序列的存在表明,在Cu-(Pb-Zn)的运移流体中,一开始就存在稳定的赤铁矿，流体中的金属发生还原反应是贱金属硫化物沉淀的主要原因[49-50]。

因此,在一般情况下,海相砂页岩型铜矿床金属硫化物呈现出一定的带状分布。表 2 所示的 3 个矿床矿石组构的分带现象即矿物组合分带，也反映不同沉积相从浅水区到较深水环境所存在的物理化学条件的变化。从大区域上来看,海相砂页岩型铜矿床的矿化层位往往位于氧化与还原、陆相与海相的界面附近。如阿富汗安纳克铜矿和赞比亚穆富利拉铜矿赋矿地层沉积相主要为泻湖—三角洲相和浅海相，代表海侵系列中位于陆相层序之上出现的第一个海相沉积,而东川落雪铜矿落雪组下部第一段,则为因民组上部最大海浸的饥饿期沉积后的退积型,以碳酸盐湖坪沉积相为主。此外,铜矿物亦可富集于低能沉积环境下形成的细碎屑相和泥质相中，富含有机质的黑色泥质岩石成为这类铜矿最佳的产出层位[51],如产于东川铜矿黑色炭质页岩建造中的层状铜矿体。

5　成矿模式讨论与总结

对沉积岩系中层状铜矿床的研究由来已久,因其成因复杂,争议很大,长期存在“同生”和“后生”2 种观点的争论[13-14,25,52-53]。“沉积-成岩”和“沉积-改造”2 种模式是目前该类型矿床广为接受的最基本的成因模式。涂光炽[24]对“沉积-改造”型矿床有明确的定义,并对成矿物质来源、流体性质、容矿岩石的多样性等进行了详细阐述，尤其强调了断裂构造在流体运移中的重要性。冉崇英等[25]在对滇中大姚-牟定式砂岩铜矿研究的基础上,除强调“沉积-改造”型矿床的基本特征外,还明确了“改造成矿作用” 的上、下时限。但对 2 种模式的内涵及其所反映的究竟是“同生”还是“后生”的观点,则仁者见仁、智者见智。地下卤水成矿模式和萨布哈成矿模式,则是通过对流体参与成矿、改造过程的系统和深入研究,进一步揭示了砂页岩型铜矿“沉积-成岩(成矿)-改造”的过程和机理。

5.1　沉积-成岩模式

“沉积-成岩”模式以往被认为是层状铜矿床形

成的主要模式。该模式是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。该模式也被认为是同沉积的或"同生"成因[14]。从元古宙海相砂页岩型铜矿地质对比来看,实际上几乎所有层状铜矿床,特别是著名的中非赞比亚-刚果(金)或中欧曼斯菲尔德铜矿带中,大多数早期沉积的以粉砂岩和页岩为容矿岩石的铜矿床就是通过沉积-成岩作用形成的[37],而且是沉积岩容矿的层状铜矿床必然经历的一个阶段,伴生于铜矿床形成的整个过程。

5.2 沉积-改造模式

涂光炽[24]、华仁民[12]研究层状铜矿床,提出"沉积-改造"成矿模式,专指矿床或矿化地层于沉积形成后在另一次或多次地质作用中处于不到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、重新沉淀和富集成矿",与文献中曾经常出现的"沉积-变质"类型相一致。但从赋矿围岩性质及其蚀变来看,实际上绝大多数层状铜矿赋矿岩石是砂岩、粉砂岩、页岩(或板岩)、泥灰岩、白云岩等,在断裂活动等伸张构造运动下,一般未遭受明显的变质或仅受到较弱的变质,如褪色、硅化、碳酸盐化;但在造山运动导致构造、热和水文活动活跃时期,流体活动性加大,金属活化,交代作用加剧,发生 K-Na 强蚀变,如赞比亚铜矿带矿床[31]。因此,变质过程仅对赞比亚铜矿带和安纳克铜矿这样很少数的大型超大型沉积层控铜矿床的形成起主要作用,而更多的"沉积-改造"发生在流体参与成矿的过程中,对沉积矿床成矿和后期进行改造。

5.3 地下卤水成矿模式

20 世纪中后期,随着砂页岩型铜矿勘探开发热潮所推动的矿床成因研究的深入,由横穿盆地的地热梯度驱动的盆地卤水对流循环就位的成矿模式,成为多数人接受的地下卤水成矿模式。该模式认为,世界已知海相砂页岩型超大型以上规模铜矿发育的环境大多是代表稳定大陆内部裂谷发育的早期阶段,矿床多产于裂谷、地堑或坳拉谷环境,受同生断裂构造的控制。裂谷环境可以提供较高的热流值使流体加热,断裂成为流体循环对流的主要驱动机制和上升通道[6]。地下卤水成矿模式概括起来,即成岩期的地下卤水(可能来源于蒸发岩)从基岩或沉积岩中汲取铜,运移经过氧化层,并在缺氧沉积物中通过还原作用将铜沉淀下来。成岩早期的黄铁矿是常见的还原剂[37,54-55]。地下水成因模式是该类矿床最流行的反映后生成矿观点的成因模式。该模式下,成矿元素和其它元素是从周围的陆源岩石中淋滤出来的,并且以 Cu、Cl 络合物、硫酸盐和其它被溶解的化合物的形式被流体带到聚矿地段[55-57]。此后的成矿作用按沉积-(成岩)-改造模式进行。

5.4 萨布哈成矿模式

萨布哈成矿模式也是地下水成矿模式的一种。该模式特别强调与蒸发岩有关的层状金属矿床的形成是海岸萨布哈的同生作用和成岩作用的结果[6]。Renfro[54]用在萨布哈条件下膏盐被交代而使铜沉淀下来的模式解释了赞比亚铜矿床的成因。Warren[55]研究发现"蒸发泵作用"将硫酸根带入萨布哈环境。该理论认为,如果在盆地内存在厚的蒸发岩沉积层,那么孔隙流体盐度的差异导致流体的密度存在差异,这也有助于在盆地内形成流体对流区。其它一些研究结果[56-57]也表明,在裂谷盆地内,盐度差异促进流体自由对流最有效的情形是,在基底裂谷阶段的碎屑岩上面生成了蒸发岩岩层。在许多矿化的盆地内,例如 Kupferschiefer 矿床和赞比亚铜矿带,存在这样的岩相建造[31]。萨布哈环境对成矿有利是因那里存在着 2 种不同类型流体的混合。该模式成矿发展顺序如图 8 所示。

由于因民组上部含藻叠层石,刘宝珺[58]认为中国东川铜矿的形成与"萨布哈"有关。根据这个模式,干旱环境下陆上蒸发岩层即萨布哈盖在富含有机质的岩层上面,藻席成为有利的成矿地段,丰富的有机质对硫酸盐还原成 H_2S 有利,而 H_2S 是成矿金属的沉淀剂。

6 成矿模式总结

通过以上对海相砂页岩型铜矿床成因的认识与探讨,以及成矿模式的总结与评述,笔者认为,"沉积-成岩"和"沉积-改造"2 种模式仍然是目前该类型矿床被广为接受的最基本的成矿模式。"沉积-变质"成矿模式是"沉积-改造"模式的一种特定形式,是对"沉积-改造"模式外延和内涵的不断扩展和延伸。地下卤水成矿模式和萨布哈成矿模式,则揭示了流体参与沉积-成岩(矿)-改造作用过程的机理,是对流体参与成矿和改造过程的系统总结和具体化,进一步丰富了砂页岩型铜矿成因研究中对流体参与"沉积-(成岩)-改造"过程的认识。

赞比亚铜矿带的许多矿床与在下罗安组早期(最底部)地层中活跃的同沉积分段断裂带相关。容矿岩石形成初期就开始成矿的细砂岩、页岩矿床主要归属于“沉积-成岩”模式。赞比亚铜矿带许多大型—超大型矿床成矿分布范围广，可能兼有一种以上的成因模式,只是以其中之一为主。例如,赞比亚铜矿带赋存于下罗安组的页岩、石英岩、砂砾岩层中,以页岩为主,砂岩次之,砾岩和白云岩也有铜矿产出,从矿床尺度会有多种成因模式和不同认识。而且，同一种模式的矿床之间在不同成矿地质构造背景和沉积环境下，具体特征也会有较大的差异。例如,对波兰Kupferschiefer 铜矿带和赞比亚铜矿带含铜页岩来说,由于分布范围很广,所以不同地方产出的矿床地质特征方面也有差别。本文进行对比的赞比亚穆富里拉矿床、阿富汗安纳克铜矿和云南东川-易门铜矿,赋矿岩石均为砂岩、石英岩、白云岩等碳酸盐岩，有明显的流体运移再富集和参与改造的特征,可归入 2 类不同的“沉积-(成岩)-改造”模式。

6.1　安纳克铜矿床成因模型

安纳克铜矿床在大地构造上位于阿富汗中部偏东的喀布尔地块内，古元古代该区为地槽区的一部分,接受陆相火山岩堆积,并经受强变质,形成古老的变质岩结晶基底。在地台沉积形成前构造活化,结晶基底上产生一些局部坳陷,被含铜的陆相碳酸盐沉积物(文德系洛伊赫瓦尔组)充填,后被碱性玄武岩类火山作用产物充填，最后被碳酸盐硬砂岩系充填[③]。

安纳克铜矿床主矿层产在矿田中心的陆相碳酸盐岩段,矿体与围岩整合接触。含铜硫化物顺层分布表明矿化明显受地层的控制。含矿岩石层理、结构构造、伴生元素少、近矿围岩蚀变分散晕的存在,说明安纳克铜矿属沉积变质成因，而且矿体是在泻湖—三角洲相沉积条件下，通过化学沉积作用,Cu 以硫化物的形式直接沉淀并经后期变质形成的[①③]。图 9 表示流经下伏火山岩的卤水循环，从下伏火山岩中浸出、萃取金属,形成沉积层控矿床的过程。从成矿流体的性质及其参与成矿的过程来看，安纳克铜矿更多地体现了“沉积-变质”矿床的特点。

6.2　东川落雪式沉积岩型铜矿床成因模型

东川落雪铜矿是滇中中元古代时期裂陷作用明显减弱,盆地深度逐渐变小,盆地边缘变缓,盆地沉积由因民组的快速风暴堆积、水下冲积扇、火山喷流沉积等过渡为浅水碳酸盐湖坪和台地沉积的产物。落雪铜矿从沉积盆地沉积到沉积形态演化，总体上是在热力高梯度的背景下发展的，表现为同生断裂的控盆控岩作用及与火山有联系的超浅成脉贯入等。硫化物常以胶结物的方式出现在白云岩的间隙中,变质程度不深,但硅质、白云质普遍结晶,含矿带广泛的褪色作用，说明东川落雪铜矿在同生沉积之后,长期经历了深渊环流的热水作用。后期出现脉状矿体，属于后生改造的另一独立阶段的产物。落雪铜矿主要分为同生成岩和后生改造两大阶段。同生成岩过程比较复杂,既有陆源沉积又有热水沉积的矿质来源；被埋藏压实固结的过程中,围岩静压力和升温形成低浓度的热水,继承性同生断裂和深源火山余热所驱动的区域性环流起主要作用,导致地下热卤水对铜质的迁移与富集；除正常化学沉积作用外，生物化学和萨布哈的沉积机理也起重要作用[①](图 10)。

目前关于东川铜矿成因模式,无论是“红层汲取-藻控成岩成矿-构造富集”的成矿模式,还是“裂谷成矿背景-火山热水沉积-构造改造富集-深源岩浆叠加-地下热水再造”型多因复成模式,都是从矿床尺度对其成因较为清楚的认识,实质上是对“沉积-改造”模式认识的深化,特别是对流体参与成矿和改造过程认识的不断深化、丰富和完善,在成矿机理与过程方面却存在多种成矿方式过渡的性质,总体还属“沉积-(成岩)-改造”成因模式。

6.3　一般成因模型和成矿条件

由典型海相砂页岩型铜矿床阿富汗安纳克铜矿和东川铜矿成矿模式对比可知，沉积岩容矿的层状铜矿的形成可能受多种盆地建造和盆地演化作用的控制。“沉积-(成岩)-改造”模式成矿作用复杂,从盆地演化角度,对海相砂页岩型铜矿的成矿环境、成矿作用和成矿过程进行归纳总结，可形成下述 3 类“沉积-改造”成矿模式,形成一般成因模型如图 11 所示。

图 11-A 表示含厚层陆相红层岩系的盆地,红层的下伏岩层为渗透性差的基岩。该盆地经历了一次大规模的海侵,现在正在沉积炭质沉积层。流体的流动主要由压实作用驱动(但也可能由地形重力驱动),生成了低温的中盐度卤水。这些卤水能够在红层岩系内形成浸染状的铜硫化物和铜铁硫化物矿带

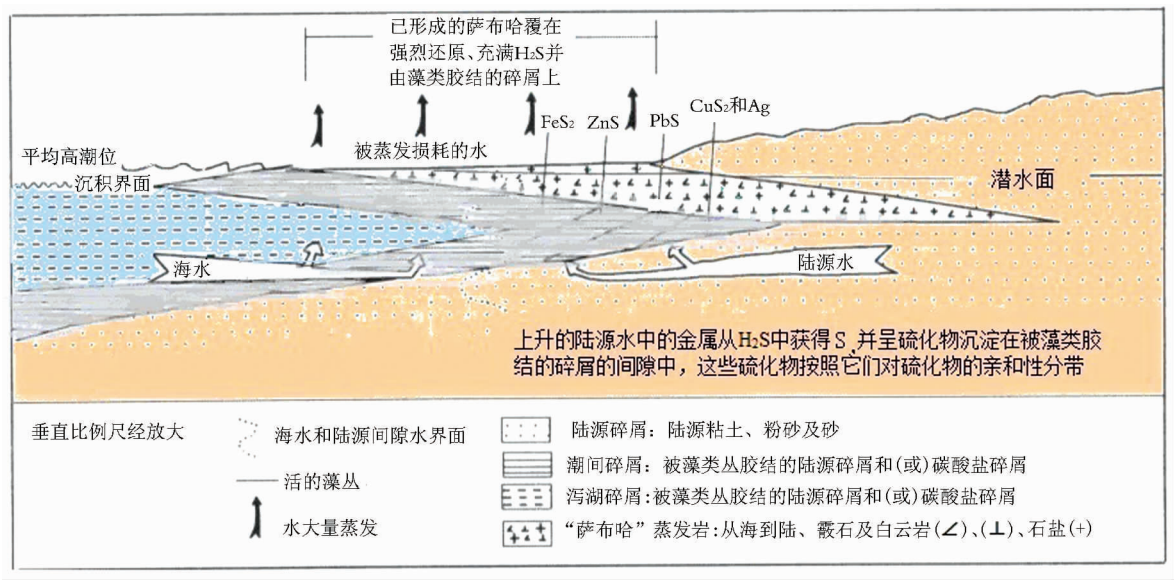


图 8 萨布哈成矿模式①

Fig. 8 Sabkha metallogenic model

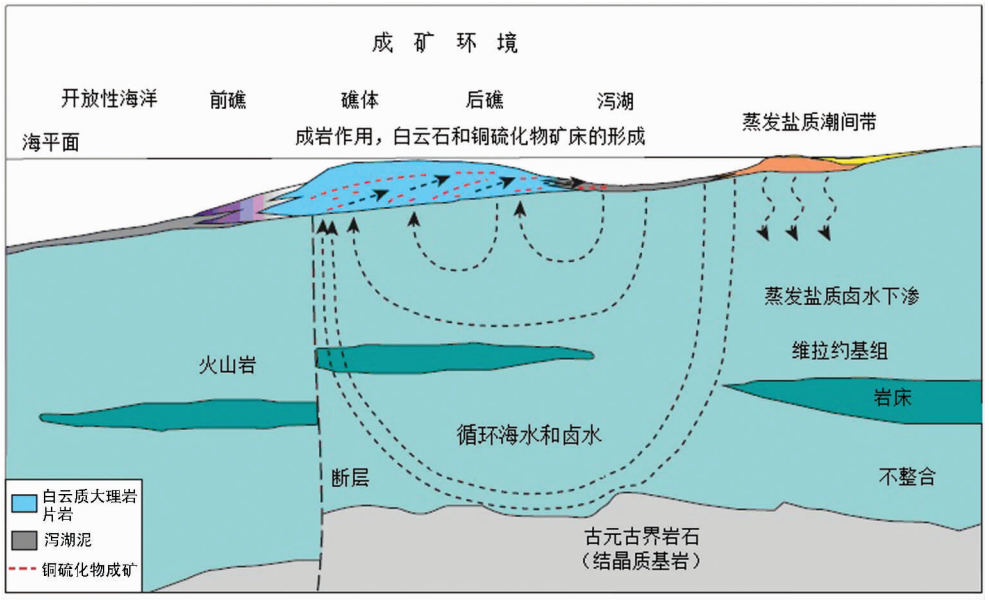


图 9 安纳克矿床成矿模型(据参考文献③修改)

Fig. 9 Metallogenic model for the Aynak copper deposit

(红色细线条区域)，并在烃类物质圈闭带的下面或在炭质海相沉积层内形成以辉铜矿为主的矿带。

图 11-B 中盆地下部的沉积构造与图 11-A 中盆地大体相同,但是,红层岩系的上覆岩体中存在一个非常厚的含蒸发岩岩层的海相沉积层序。在这种情况下，流入红层岩系的流体为上覆海相岩系中溶解蒸发岩形成的卤水。在红层岩系内出现了流体对流。这些对流的流体基本上集中于盆地内构造的边缘。在填充了烃类物质的圈闭带附近和沿海侵海相层序的底部,形成铜铁硫化物矿床,成矿期与成岩期同步或晚于成岩期。

图 11-C 与图 11-B 中的盆地相同，但该盆地

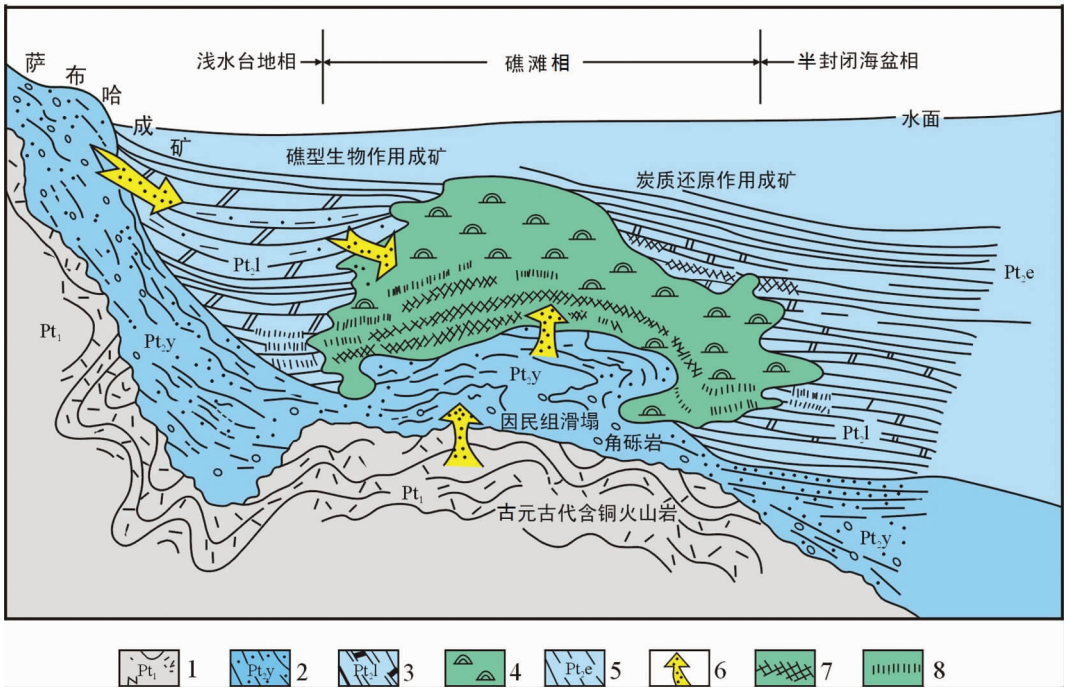


图 10　东川落雪式铜矿成矿模式(据参考文献①修编)

Fig. 10　Metallogenic model for the Dongchuan Luoxue type copper deposit

1—古元古代含铜火山岩;2—因民组红色建造及滑塌角砾岩;3—落雪组不纯白云岩;4—落雪组藻礁;5—鹅头厂组炭质板岩夹白云岩;6—铜质运移方向;7—铜矿体;8—铜矿化体

此时正在经历挤压和局部反转。一个页岩和粉砂岩层序正在沿蒸发岩原来所在的位置与下伏的沉积层序脱离。由于盐底辟构造作用和溶解,这些蒸发岩基本上消失了。在这个模式中,卤水持续生成,并沿大断裂带进入盆地。红层岩系内的孔隙水正在对流。在这个盆地内,流体的温度和盐度应该更高,因此,与前面的 2 种模式(A、B)相比,这种模式中流体淋滤和运移金属的能力更强。流体在多个地层层位上与圈闭的烃类反应,形成沉积岩容矿型层状铜矿床。当流体与炭质页岩中的还原剂反应时, 或者当流体在该层段更高层位流过炭质、沥青质碳酸盐岩时,或者当流体在更高层位岩层内沿裂隙带遇到还原剂时,这些流体也会形成矿床[37]。

所有砂页岩型铜矿床矿源层岩性并不一定都相似,因为只要体积足够大,几乎任何岩性都能提供所需的金属量。但最有可能的矿质来源似乎是同大陆裂谷盆地环境有关的岩石, 即通常位于沉积层状矿床下面的红层。金属(主要是铜及多少不等的银、铅、锌、钴、钼等)是在温热、氧化、富氯化物贫硫的卤水中以金属铜的氯络合物的形式被带入的[41-42]。在沉

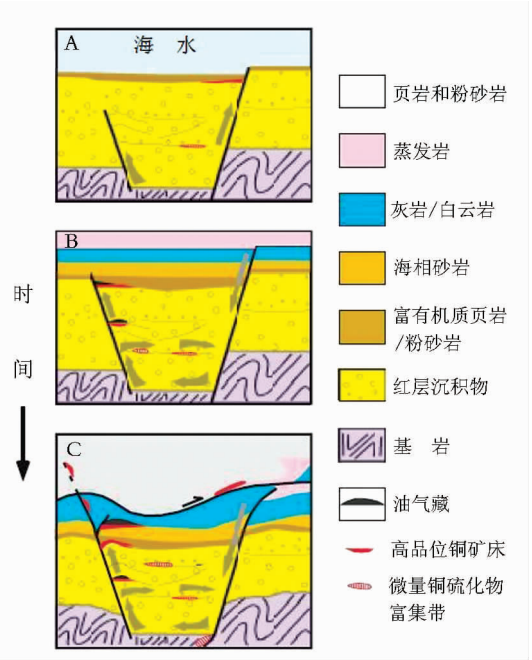


图 11　在演化盆地内沉积岩容矿型层状铜矿床成矿模式示意图[37]

Fig. 11　Metallogenic model for sedimentary stratiform copper deposit during the basin evolution

积场所，容矿岩石必须在物理化学条件上适合金属就位。首先，容矿沉积岩应当是含矿流体可渗透的，即含矿流体能够得以渗滤和(或)局部扩散；其次，容矿岩石应当原来就含大量的还原硫，足以在较厚的地层内形成矿石级的浸染状矿化。最后，多数海相砂页岩性铜矿床具有萨布哈成矿模式的特征，说明砂页岩型铜矿床同在炎热干旱气候下形成的沉积岩具有明显的亲缘关系[37,45,54-57]。

某些矿床中存在钴、银、铅、锌，而另一些矿床则没有，表明沉积喷流过程可能比较重要[15]。通过盆地边缘断层流入的高温深盆地流体可能会与富铜卤水叠加或混合，生成具有经济价值的副产品铜矿床[56]。

Vaughan 等[59]对中欧曼斯菲尔德铜矿成矿模式进行了对比和综合研究，总结出 4 种不同情况：第 1 种是与早蔡希斯坦海沉积作用相伴随的同沉积弱矿化，以英国中部泥灰质板岩中的矿化为代表；第 2 种是盆地型矿化，即含铜页岩中的金属含量已受到盆地中巨厚红层的明显影响；第 3 种是最重要的红层盆地边缘的矿化，贱金属平均含量可达 3%，主要发生于红层盆地的边缘，在晚期成岩阶段由富铜卤水的环流上升而成矿；第 4 种是由后来的构造活动控制的矿体。可见这 4 种情况至少已跨越了沉积-成岩和沉积-改造这 2 种成因模式的范畴。

海相砂页岩型铜矿大多不是简单的沉积同生成因，而是在成岩、后生多阶段多次发生物质活化迁移再富集的总结果。许多事实说明，含铜沉积形成后，较长时间里可能有上升流体对含矿沉积物的改造和叠加。有些矿床含矿层中的富钠长石、富铁镁碳酸盐、富硅质的岩石也有可能是热水沉积岩。阿富汗安纳克铜矿床与东川汤丹铜矿床容矿岩层岩石类型组合、形成条件基本相同，但矿化富集的规模、程度有显著差别，除了成矿时代、构造背景和沉积相的差异外，受到的后生改造的种类、强度不同也可能是主要原因。

7 海相砂页岩型铜矿成矿与超级古大陆事件的耦合性

多方面研究表明，地史中矿床形成的峰期与超级古大陆事件在时间上有很好的耦合性[8]。Baley 等[60]在研究陆内环境和汇聚造山环境金属的成矿时，发现其峰期与超级古大陆事件有密切关系。以铜矿为例，迄今为止，从各类铜矿成矿作用、成矿规律和时空分布来看，海相砂页岩型铜矿直接或间接与超级古陆的裂解作用及其伴生的陆内盆地、非造山岩浆作用有关，主要形成期分别对应于中元古代和新元古代；而斑岩型铜矿、矽卡岩铜矿则与汇聚边缘或造山环境有关，成矿高峰期主要在中新生代。特别是斑岩铜矿与汇聚造山环境板块碰撞挤压、俯冲引致的钙碱性系列浅成、超浅成中酸性侵入体有关，主要产于环太平洋(中新生代)、特提斯喜马拉雅(以中新生代为主)和中亚蒙古(古生代)成矿带中。

裴荣富等[61-62]在研究超大型矿床成矿规律时指出，一定地史演化过程中的特殊地质事件激发正常成矿发生异常才可能导致超巨量金属工业堆积，类似拉尼娜、厄尔尼诺事件造成的异常天气暴雨成灾。太古宙出现的氧大气变态(oxyat maversion)，即过氧事件，元古宙—古生代出现的还原大气变态(redoxyatmaversion)，即缺氧事件，中—新生代构造圈热侵蚀(tectonosphere thermal erosion)出现的大规模构造岩浆事件，是引发异常成矿的重大事件。这些事件是激发正常成矿“引潮共振”发生异常而导致超巨量金属堆积的根本原因。

超大陆的汇聚和裂解是全球规模的构造事件，广泛的岩浆活动和剧烈的造山作用影响着化学元素和同位素地球化学成分的变化，不仅直接控制着成矿作用，而且还控制着全球海平面的升降、气候变化、海水化学成分变化、生物演化等，并可引起沉积物和生物圈演化过程中的某些“爆炸”事件，如冰川事件和埃迪卡拉动物群的产生，同时对成矿起到了重要的控制作用。

从前述海相砂页岩型铜矿成矿模式与地质对比研究可知，在超大陆裂解时，地壳拉张减薄，软流圈物质上涌，向岩石圈的浅部和地表运移和汇集，同时陆源长期的风化产物也在大幅度沉降的大陆边缘裂谷、裂陷槽和坳拉谷等处堆积，造成深源物质和表生物质大规模汇集的构造环境。正如翟裕生等[63-64]所指出的，在这些构造中，有丰富的成矿物质；有很高的地热流，促进成矿物质的溶解运移；有多种来源和性质的流体(包括热卤水)；有火山喷出物和蒸发岩层，可提供 S、F 等矿化剂，有利于在还原条件下金属硫化物的堆积；有不同规模、不同级别的同生断层等构造作为流体运移的良好通道；封闭好的局部坳陷则可保持矿质的不被流失和持续堆积；裂谷盆地

后期的沉积层又可覆盖已成的矿层，起到屏蔽保护作用[52]。上述观点特别适用于对直接或间接与超级古陆的裂解作用有关及其伴生的海相砂页岩型铜矿成矿的解释，是陆内盆地在全球海平面上升引起大规模海侵时沉积成岩成矿模式的系统总结和概括。在成矿模式框架中,除成矿背景、物源条件、成矿流体作用、成矿机制等要素外,元古宙—古生代出现的还原大气变态(redoxyatmaversion)即缺氧事件,反映了海相砂页岩型铜矿形成的峰期与超级古大陆事件在时间上有很好的耦合性。

在全球范围内,前寒武纪超大陆旋回和成矿作用的耦合性是十分明显的。中元古代的超大陆旋回(1800~1000Ma),是以古元古代超大陆裂解开始的,然后是陆内和陆缘裂谷带的产生和发育，后期主要是陆缘增生、陆陆碰撞、汇聚和洋盆的消亡,罗迪尼亚超大陆形成。在古元古代末期至中元古代早期,全球超大陆有较长的稳定时期，高的海平面导致广泛的陆表海和陆内盆地,形成了不整合铀矿。中期在全球范围内广泛发育大陆边缘裂谷盆地，其中形成砂页岩型铜矿床、Sedex 型铜铅锌矿床、层控不整合铀矿床等。在中元古代的超大陆旋回期间形成较著名的矿床有:澳大利亚奥林匹克坝型铁氧化铜金(铀银)矿床(IOCG),中国白云鄂博稀土铌铁矿床,加拿大西加湖、麦克阿瑟河和澳大利亚贾比卢卡(Ⅱ)、兰杰(Ⅰ)等不整合型铀矿,澳大利亚布罗肯希尔和芒特艾萨铅锌矿床,中国金川、加拿大汤普森铜镍硫化物矿床等,中国东川、易门铜矿带等。中元古代青白口纪砂页岩型铜矿床也是中元古代超大陆旋回中大陆边缘盆地的产物,其中以赞比亚恩昌加、康戈拉和扎伊尔科尔韦济、卢布巴希等铜矿床规模较大。新元古代超大陆旋回(1000~543Ma),大约在 1000Ma 裂陷作用就开始了,世界著名的赞比亚、扎伊尔砂页岩型铜矿带(成矿时代在 1055(或 938)~788Ma 之间)形成在罗迪尼亚的早期裂陷槽内。在 720Ma 左右,罗迪尼亚超大陆裂解,裂解是通过裂谷、沉积盆地、陆内活动带、被动大陆边缘和岩浆弧的形式实现的[8]。元古宙超大陆旋回演化过程中,包括中非赞比亚铜矿所处的班韦乌卢(Bangweulu)地块(克拉通)、阿富汗安纳克铜矿所处的喀布尔断块和构成中国大陆扬子古陆块的康滇古陆，共同经历了超大陆旋回演化。成矿构造背景包括具有局限海循环的大陆内部裂谷或坳拉槽，以及随后大范围出现的封闭海沉积。盐底辟作用、大型生长断层、沉积岩单元变薄和不整合可能会使流体集中成矿，并对矿床位置产生影响。

8　东川-易门铜矿(床)带海相砂页岩型铜矿衍生成矿(作用)

裴荣富④近年来研究发现,在澳大利亚的 Ernest Henry,智利的 Cande laria、Salobo、Alemao、Sossego、Cristalino 和巴西卡拉加斯地区产出的一些类似奥林匹克坝式矿床(铁氧化铜金矿床,IOCG),均显示其金属组分与沉积岩容矿型铜矿(SSC,或 SHSC)、火山红层型铜矿(VRC)矿床类似。Kirkham[65]进行大量研究后认为，奥林匹克坝矿床的形成可能是由深成岩侵吞了 SSC 和 VRC 之后，爆发岩浆蒸气作用(phratomagmatism)，至少有 3 期花岗岩同角砾岩基(Synbraceia batholith)的同时,释放出大量岩浆热流体，形成既有岩浆源也容纳了沉积岩容矿源的多种金属的超巨量堆积。裴荣富④据此确信 SSC 和 VRC 型矿床可能是寻找 Olympic Dam 矿床的标志,或称它们是互为衍生的矿床组合。

裴荣富④认为,前中新元古代矿源地体和铁燧岩建造,通过岩浆作用衍生和侵蚀-沉积/成岩-化学/机械再造/热液喷流/表生等多种衍生作用而与奥林匹克坝矿床形成互为找矿标志的矿床组合(图 12)。裴荣富等④曾指出,衍生成矿(作用)(Derivative processes)系指一种类型的矿床受另一种成矿热事件作用而派生出另一类型矿床，并与前者形成互为衍生的组合关系;它们可以形影相随,但两者之中一个类型不发育，另一类型才能形成特大型矿床。由此看来，对前寒武纪中新元古代形成的沉积岩容矿的铜矿床的深入研究亦有利于指导奥林匹克坝式铁氧化铜金矿床(IOCG)的找矿勘查。实际上,在 Olympic 坝地区调查评价的最初目标也是寻找 SSC 型矿床,但勘查结果却在该区厚达 300m 盖层的深部发现了隐伏的 Olympic 坝矿床，从而鉴证了这 2 类矿床之间互为衍生的关系④。

在元古宙东川-易门铜矿(床)带形成的过程中,昆阳裂谷形成与发展的初始裂堑阶段,沉积了昆阳群底部的因民组,伴有强烈水下火山喷发、喷溢和生长断层的活动,形成稀矿山式含铜磁铁矿;断裂坳陷阶段沉积了昆阳群落雪组、黑山组、青龙山组。因民晚期和落雪早期的潮坪泻湖环境相对宁静,喷

流热卤水带来的铜质沉积形成了著名的东川式铜矿[22]。近年来,方维萱等[66]研究稀矿山式含铜磁铁矿时指出,与东川铜矿同处于一个成矿带的稀矿山式含铜磁铁矿和四川拉拉铜矿,可能就是类似奥林匹克坝的铁氧化铜金(IOCG)矿床。

目前,无论对元古宙东川-易门铜矿(床)带的形成和演化,还是对东川铜矿田外围找矿成果的认识,都尚待进一步的深化研究和总结。但"稀矿山式"火山沉积喷流含铜赤(磁)铁矿床的发现,为稀矿山式含铜磁铁矿和东川式铜矿存在互为衍生的矿床组合关系提供了很好的例证,为云南省寻找超大型奥林匹克坝式铁氧化铜金(IOCG)矿资源,确保国内铜产业可持续发展,提出了新的思路,指明了找矿勘查的方向。

9 结论与启示

基于上述对国内外海相砂页岩型铜矿成矿地质环境、条件和成因模式的分析比较,以及海相砂页岩型铜矿成矿与超级古大陆事件耦合性、衍生成矿作用的研究,形成如下几点认识和结论。

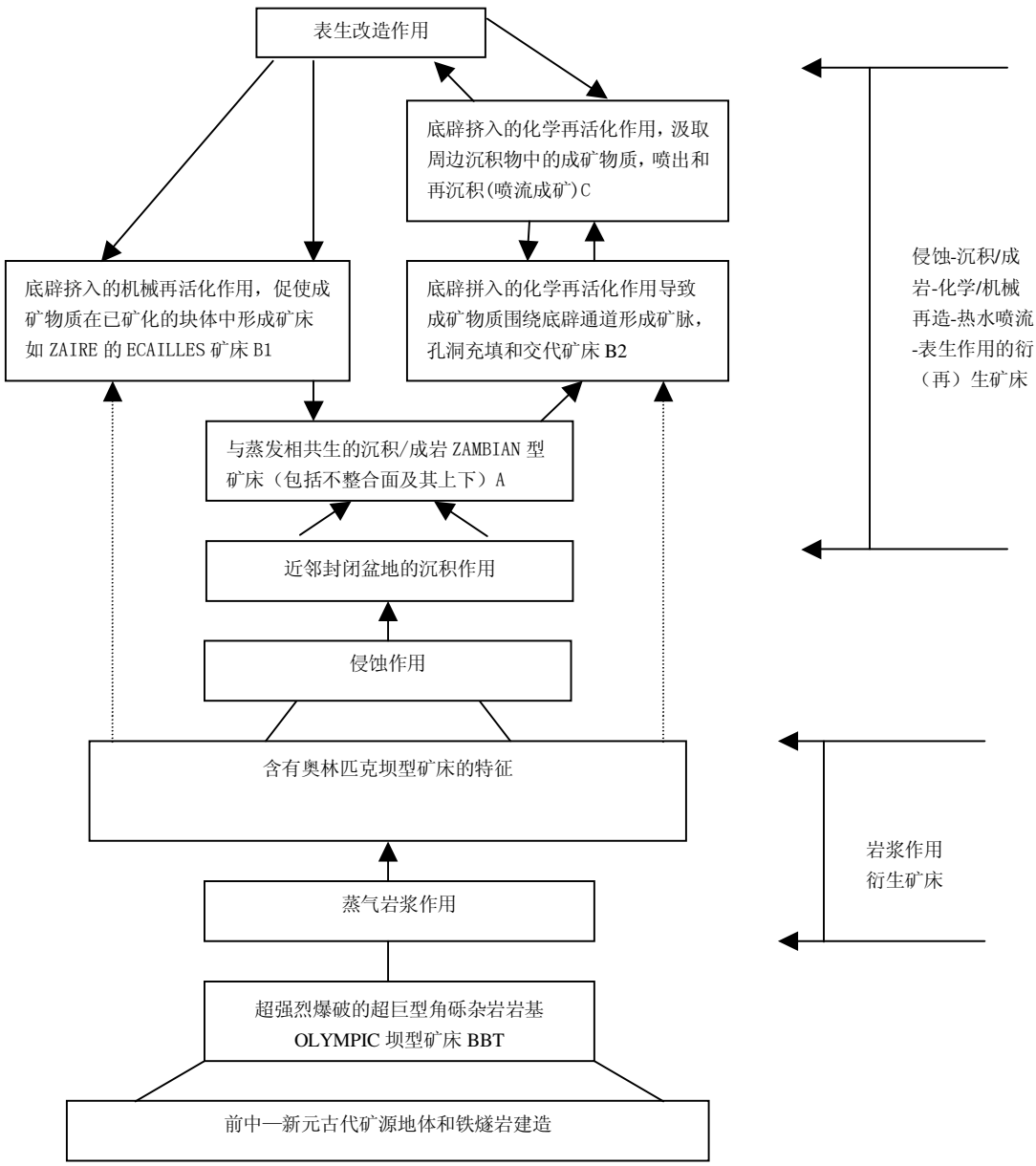


图 12 衍(再)生矿床变异相和成矿演化[2]

Fig. 12 Heteromorphic phase of the derivative deposit and its evolution

(1)云南东川铜矿带与阿富汗安纳克铜矿床、赞比亚铜矿带典型矿床穆富里拉铜矿成矿地质特征相似,成因类型相同,但东川-易门铜矿在中元古代古大陆边缘裂谷成矿,属浅水碳酸盐湖坪沉积相沉积环境,与另外 2 个矿床新元古代陆内裂谷成矿,属泻湖—三角洲沉积相沉积环境有区别。此外,东川铜矿带受到后生改造的种类和强度不同,可能是导致东川-易门铜矿矿床成矿规模、品位与后者有较大差异的主要原因。

(2)赞比亚铜矿带许多大型—超大型矿床成矿分布范围广,可能兼有"沉积-成岩-改造"多种模式,只是以其中之一为主。砂页岩型铜矿同一种成因类型矿床之间在具体特征上也会有较大的差异,安纳克铜矿更多体现"沉积-变质"矿床的特点,东川铜矿属"沉积-改造"成因,但其成矿机理与过程却有着多种成矿方式过渡的性质。

(3)研究表明,砂页岩型铜矿形成的峰期与超级古大陆事件在时间上有很好的耦合性。元古宙—古生代出现的还原大气变态(redoxyatmaversion)即缺氧事件,激发正常成矿发生异常可能导致超巨量金属工业堆积,对海相砂页岩型铜矿床成矿起到了重要的控制作用。

(4)元古宙超大陆旋回演化过程中,包括中非赞比亚铜矿所处的班韦乌卢(Bangweulu)地块(克拉通)、阿富汗安纳克铜矿所处的喀布尔断块和构成中国大陆扬子古陆块的康滇古陆共同经历了超大陆旋回演化,形成前中新元古代矿源地体和铁燧岩建造,通过岩浆作用衍生和侵蚀-沉积/成岩-化学/机械再造/热液喷流/表生等多种衍生作用,形成前寒武纪中新元古代沉积岩容矿的层状铜矿床,与奥林匹克坝式铁氧化铜金矿床形成互为找矿标志的矿床组合。"稀矿山式"火山沉积喷流含铜赤(磁)铁矿床的发现,为稀矿山式含铜磁铁矿和东川式铜矿存在互为衍生的矿床组合关系提供了很好的例证,稀矿山式含铜磁铁矿可能就是类似奥林匹克坝的铁氧化铜金(IOCG)矿床。

上述结论与认识,对中国海相砂页岩型铜矿和铁氧化铜金(IOCG)矿床找矿勘查具有一定的启示意义。元古宙既是世界海相砂页岩型矿床,也是奥林匹克坝铁氧化铜金(IOCG)矿床的重要成矿时代。通过对东川铜矿床(田)的深入研究及其与阿富汗安纳克铜矿(田)、赞比亚铜矿带等海相砂页岩型铜矿进行成矿模式、地质特征对比,可以预见中国东川-易门铜矿带仍有较大潜力,尤其是"沉积-改造型"的东川汤丹铜矿具有发展到特大型的可见潜力,而东川地区有可能进一步发现新的矿床类型,"稀矿山式"火山沉积喷流含铜赤(磁)铁矿有可能是奥林匹克坝式铁氧化铜金矿,进而发展到超大型规模。山西中条山和内蒙古狼山地区都已查明也属于中—新元古代的海相砂页岩型铜矿床,不同的是这些矿床有更显著的喷流沉积特点,中条山地区的胡家峪-蓖子沟铜矿和狼山地区的霍各乞铜矿、炭窑口铜铅锌矿等海相砂页岩型铜矿仍然有找矿潜力和发现铁氧化铜金矿(IOCG)类型的前景。此外,中国新疆西昆仑成矿省与阿富汗接壤,西昆仑成矿省亦发现元古宙层控碳酸盐岩型铁铜金矿床和类似的层控砂岩型铜矿床,如卡拉玛铜矿床和特格里曼苏铜矿床⑤。因此,西昆仑成矿省元古宙层控碳酸盐岩型铁铜金矿床和北昆仑成矿带西段中巴公路以东的特格里曼苏成矿亚带,应引起格外的重视。

参考文献

[1]Brown A C.Sedimenthosted stratiform copper deposits:deposittype name and related terminology[C]//Boyle R W ,Brown A C,Jefferson C W,et al.SedimentHosted Stratiform Copper Deposits.1989:39-51.

[2]Kirkham R V. Distribution, settings, and genesis of sedimenthosted stratiform copper deposits[J]. Geological Association of Canada Special Paper, 1989,36: 3-38.

[3]Kirkham R V, Carriere J J, Garson D F, et al.Global distribution of sedimenthosted stratiform copper deposits and occurrences[C]//Geological Survey of Canada Open File.1994,2915b: 256.

[4]肖新建,倪培.论喷流沉积(SEDEX)成矿与沉积改造成矿之对比[J].地质找矿论丛,2000,15(3):238-245.

[5]Cox D P. Descriptive model of sediment-hosted copper[C]//Cox D P,Singer D A. Mineral deposit models. U.S. Geological Survey Bulletin 1693,1986: 205.

[6]王之田,等.大型铜矿地质与找矿[M].北京:冶金工业出版社,1994:1-162.

[7]李朝阳,等.中国铜矿主要类型特征及其成矿远景[M].北京:地质出版社,2000:1-10.

[8]沈保丰,等.中国前寒武纪成矿作用[M].北京: 地质出版社,2006.

[9]戴自希,王家枢,等.矿产勘查百年[M].北京:地震出版社,2004:1-65.

[10]Kirkham R V.Distribution,setting and genesis of sedimentary-hosted stratiform copper deposits[C]//Geological Survey of Canada Open File. 1994,2915b:256.

[11]冉崇英.东川式层控铜矿的成矿模式[J].中国科学(B 辑),1983,(3):

249-257.

[12]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.

[13]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.

[14]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.

[15]刘继顺,吴延之,段嘉瑞.东川矿田喷流沉积成矿机制[J].中南工业大学学报,1996,27(1):8-12.

[16]汪劲草,尹意求,肖龙. 东川矿区几个关键构造问题与铜矿远景评估[J]. 矿床地质, 1996, 15(1):34-40.

[17]黄永平,吴健民,王滋平. 东川铜矿田因民组热水沉积岩地质地球化学[J]. 地质与勘探, 1999, 35(4): 15-18.

[18]韩润生,刘丛强,孙克祥,等. 易门式铜矿床的多因复成成因[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2):146-154.

[19]李志伟,钟维敷,田敏. 滇中昆阳群刺穿构造形成机制研究[J]. 云南地质, 2002, 21(3): 230-249.

[20]韩润生,刘丛强,马德云,等. 易门式大型铜矿床构造成矿动力学模型[J]. 地质科学, 2003,38(2):200-213.

[21]韩润生,邹海俊,刘丛强,等.中国云南易门式铜矿床的主要类型及成因[J].地质通报,2007,12: 1549-1563.

[22]龚琳,何毅特,陈天佑,等.云南东川元古代裂谷型铜矿[M].北京:冶金工业出版社,1996:1-24.

[23]黄崇轲,白冶,朱裕生,等. 中国铜矿床(下册)[M]. 北京:地质出版社, 2001.

[24]涂光炽.中国层控矿床地球化学[M].北京:科学出版社,1988:134,376-380.

[25]冉崇英,胡煜昭,吴鹏,等.学习实践"改造成矿作用"理论——以滇中砂岩铜矿为例兼论改造作用的上、下限问题[J].地学前缘,2010,17(2):35-44.

[26]张蕾.阿富汗安娜克铜矿矿床地质特征及成因分析[J].资源环境与工程,2011,25(6):582-589.

[27]ESCAP. Atlas of Mineral Resources of the ESCAP Region. Geology and Mineral Resources of Afghanistan[R]. Volume Ⅱ, Vnited Nations, 1995.

[28]卢兰英,高鹏,黄启锋,等.阿富汗安纳克铜矿成矿带主要矿床特征[J].新疆地质,2008,26(2);198-200.

[29]Abdullah S, Chmyrev V M. Geologiya I poleznye iskopaemye Afganistana, Kniga 1, Geologiy[M]. Translated Title: Geology and Mineral Resources of Afghanistan, Book 1, Geology, Moscow, Nedra, 1980:535.

[30]Fleischer V D, Garlick W D, Haldane R. Geology of the Zambian Copper belt[C]//Wolf K H. Handbook of Stratabound and Stratiform Ore Deposits. 1976:223-352.

[31]Selley D,Broughton D,Scott R,et al.A new look at the geology of the Zambian copper belt[C]//Hedenquist W ,Thompson F H, Goldfarb J,et al.Economic Geology:One Hundredth Anniversary Volume.2005: 965-1000.

[32]Van Eden J G. Deposition and diagenetic environment related to sulfide mineralisation, Mufulira, Zambia[J]. Econnomic Geology,1974, 69: 59-79.

[33]Garlick. Genetic interpretation from ore relations to algal reefs in Zambia and Zaire[C]//Boyle R W, Brown A C, Jefferson C W, et al. Sediment-hosted Stratiform Copper Deposits.Geological Association of Canada Special Paper,1989, 36: 471-498.

[34]Caiheux J L H,Kampunzu A B,Lerouge C,et al.Genesis of sedimenthosted stratiform coppercobalt deposits,Central African copper belt[C]//Robb L,Caiheux J L H,Sutton S.Recent advances in the geology and mineralization of the Central African copper belt. Journal of African Earth Sciences,2005,42:134-158.

[35]Brown A C.Worldclass sedimenthosted stratiform copper deposits: characteristics,genetic concepts and metalloteets[J].Australian Journal of Earth Sciences,1997,44: 317-328.

[36]李向前,毛景文,闰艳玲,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.

[37]Hitzman M W ,Kirkham R,Broughton D,et al.The sediment-hosted stratiform copper ore system[C]//Jeffrey H W ,Thompson F H,Goldfarb J,et al.Economic Geology, One Hundredth Anniversary Volume.2005:609-642.

[38]Brown A C. Alternative sources of metals for stratiform copper deposits[J].Precambrian Research, 1984, 25: 61-74.

[39]Hitzman M W.Source basins for sediment-hosted stratiform copper deposits-implications for the structure of the Zambian copper belt [J]. Journal of African Earth Sciences,2000,30:855-863.

[40]Koziy L, Bull S,Large R,et al.Salt as a fluid driver,and basement as a metal source,for stratiform sediment-hosted copper deposits[J]. Geology,2009,37(12):1107-1110.

[41]刘建明.沉积盆地动力学与盆地流体成矿[J].矿物岩石地球化学通报,2000,19(2):76-84.

[42]刘家军,柳振江,杨艳,等.盐类在金属、非金属成矿过程中的作用[J].地质找矿论丛,2007,22(3):161-171.

[43]Hayes T S. A preliminary study of thermometry and metal sources of the Spar Lake stratabound coppersilver deposit, Belt Supergroup, Montana[R]. U.S. Geological Survey OpenFile Report, 1990: 30.

[44]Hayes T A, Rye R O , Whelan J F , et al. A review of the geology and genesis of the Spar Lake stratabound Cu-Ag deposit, Belt Supergroup, Montana: Mineral Deposits of the Western Belt Basin [R]. Northwest Mining Association Annual Meeting, 109th, Exposition and Short Course, 2003: 3.

[45]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):1522.

[46]Bechtel A, Sun Y, Püttmann W, et al. Isotopic evidence for multistage base metal enrichment in the Kupferschiefer from the Sangerhausen basin, Germany[J]. Chemical Geology, 2001, 176:31-49.

[47]Michalik M, Sawlowicz Z.Multistage and longterm origin of the Kupferschiefer copper deposits in Poland[C]//Piestrzynski A. Mineral deposits at the beginning of the 21st century. Rotterdam, Balkema, 2001:235-238.

[48]Sawlowicz Z, Kosacz R. On the origin of highgrade copper ores in the Weissliegendes elevations from the Polish Kupferschiefer deposits

[C]//Pasava J, Kribek B, Zak K. Mineral deposits: From their origin to their environmental impacts. Rotterdam, Balkema, 1995: 977−980.

[49]Sawlowicz Z. On the origin of copper mineralization in the Kupferschiefer: A sulphur isotope study[J]. Terra Nova,1989, 1:339−343.

[50]Chartrand F M, Brown A C, Kirkham R V. Diagenesis, sulphides, and metal zoning in the Redstone copper deposit, Northwest Territories, in Boyle[M]. R.W., 1989.

[51]Haynes D W. Stratiform copper deposits hosted by low−energy sediments: II.Nature of source rocks and composition of metal−transporting water[J].Economic Geology, 1986,81:266−295.

[52]高坪仙.沉积型铜矿研究中的几个问题[J].国外前寒武纪地质, 1994,65:5561.

[53]Davidson C F. A possible mode of origin of strata−bound copper ores[J]. Economic Geology,1965, 60:942−954.

[54]Renfro A R. Genesis of evaporate−associated stratiform metalliferous deposits−a sabkha process[J]. Economic Geology,1974,69:33−45.

[55]Warren J K. Evaporites—their evolution and economics[M].Oxford, Blackwell, 1998:438.

[56]Brown A C.World−class sediment−hosted stratiform copper deposits:characteristics,genetic concepts and metalloteets[J].Australian Journal of Earth Sciences,1997,44: 317−328.

[57]Barnes H L. Solubilities of ore minerals[C]//Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd. New York:John Wiley & Sons,1979:404−410.

[58]刘宝珺.沉积岩石学[M].北京:地质出版社,1980:224.

[59]Vaughan D J, Sweeney M, Friedrich G,et al. The Kupferschiefer: An overview with an appraisal of the different types of mineralization[J]. Economic Geology, 1989, 84:1003−1027.

[60]Barley M E, Groves D I. Supercontinent cycles and the distribution of metal deposits through time[J].Geology, 1991, 19 :645−648.

[61]裴荣富,熊群尧,沈保丰.难识别及隐伏大矿、富矿资源潜力的地质评价[M].北京:地质出版社,2001:72−75.

[62]裴荣富,吴良士,熊群尧,等.中国特大型矿床成矿偏在性与异常成矿构造聚敛场[M].北京:地质出版社,1998:262−284,312−364.

[63]翟裕生,等.区域成矿学[M].北京: 地质出版社,1999.

[64]翟裕生.关于构造流体成矿作用研究的几个问题[J].地学前缘, 1996, 3(4): 230−236.

[65]Kirkham R V. Sediment hosted stratiform copper (SSC), other stratabound base metal deposits and the importance of basinal brines and /or evaporites, halo tectonics and halo kinesis[C]//Proceedings of the Joint Sixth SGA−SEG. Swets & Zeitlinger Publishers, Lisse, ISBN,2001, 90:15−18.

[66]方维萱,柳玉龙,郭茂华,等.全球铁氧化铜金−IOCG−矿床的三类大陆动力学背景和成矿模式[J].西北大学学报(自然科学版), 2009,39(3):404−413.

① 中国地质调查局.国外砂页岩型铜矿研究进展.2002.

② Benham Antony John,Coats Stan. Minerals in Afghanistan: the potential for copper. Afghanistan Geological Survey, 2006:6.

③ Coats Stan, Benham Antony John. Minerals in Afghanistan : The Aynak Copper Deposit. Afghanistan Geological Survey, 2006:6.

④ 裴荣富. 21 世纪矿业应向后工业发展势态倾斜——适者生存和可持续发展.2011.

⑤ 孙海田.西昆仑贵金属、有色金属大型矿床成矿远景及靶区预测. 中国地质科学院“九五”科技成果汇编,2001.