

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

科技述评

块状硫化物矿床研究进展评述

顾连兴

(南京大学内生金属矿床成矿作用国家重点实验室, 210093)

内容提要 最近十余年来,海底块状硫化物矿床的研究在如下方面有新的进展:矿床类型、矿化和蚀变特征、矿石结构-构造和变形-变质、矿床模式和成矿机制、金属和硫的来源、成矿流体的性质和来源,以及现代海盆地中的成矿作用等。本文综述了这些方面的主要研究成果。

关键词 金属 硫 流体 块状硫化物矿床 成矿机制

顾连兴和郑素娟^[1]曾发表过《块状硫化物矿床研究现状》一文。近十余年来,国内、外矿床学家在这方面又作了深入研究,今将其进展作一评述。

1 矿床类型

从70年代开始,人们从不同的角度,如成矿大地构造环境^[2]、容矿岩系岩性和沉积环境^[3],以及矿石成分^[4]等,对块状硫化物矿床(MSD)作了分类。这些分类迄今仍在广泛地被采用。近年来,矿床学家根据浅成热液矿床的矿石矿物成分和蚀变特征,将其分成低硫化态(low sulphidation)和高硫化态(high sulphidation),或酸性—硫酸盐和冰长石—绢云母两类。在此基础上,Sillitoe等^[5],将块状硫化物矿床也分成低硫化态和高硫化态两种类型。低硫化态矿床的特征性矿物是磁黄铁矿、黄铁矿和高铁闪锌矿,Cu主要以黄铜矿的形式赋存,典型的蚀变主要有绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化,反映了贫S、低氧逸度和弱酸性的形成条件;高硫化态矿床的特征性矿物是黄铁矿和高铁闪锌矿,Cu以斑铜矿、硫砷铜矿、砷黝铜矿和铜蓝等形式赋存,伴生的蚀变以前进性泥化蚀变(advanced argillic alteration)为特征,并有硅化、高岭石化、明矾石化和重晶石化等,反映了富S、高氧逸度和酸性的形成条件。在同一个矿床中,高氧化态的矿石往往比低氧化态的矿石形成较晚,产在层状矿体的较高部位。

Davidson等^[6]在研究澳大利亚Mount Isa地区Starra和Osborne等矿床的基础上,认为可以区分出一类火山成因含铜氧化物矿床,其主要矿物成分为磁铁矿、赤铁矿、黄铜矿和石英,有时含有Au。它们是氧化性的或低S的MSD成矿流体的产物。因为存在下盘矿化,所以这类矿床在成因上介于近源的MSD和Lahn-Dill型火山沉积铁矿之间。大陆裂谷是其最有利的形成环境。郭介人等^[7]认为,北祁连陈家庙矿床具有含铜磁铁矿型与含铜黄铁矿型矿床过渡复合的特征。叶庆同等^[8]研究了青海省赵卡隆银-多金属菱铁矿矿床,认为块状菱铁矿是晚三叠世岛弧环境下海底喷气—沉积的产物,而Ag、Cu、Pb、Zn等金属则反映了火山期后热液的叠加矿化。这类含多金属硫化物的菱铁矿矿床与海相碳酸盐地层相伴生,按笔者的意见,可以解释为还原性、贫S的MSD成矿流体注入富含CO₃²⁻的水盆地的产物。

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号49773194)的成果之一。

本文1998年5月收到,12月改回,章雨旭编辑。

中国地质学家^[7,9,10]研究了青海德尔尼铜-钴-(锌)矿床的特征和成因,认为它是一个与镁铁-超镁铁质火山岩有关的 MSD。郭介人等^[7]认为该矿床按其成因可归属塞浦路斯型。

2 围岩蚀变

对于下盘围岩蚀变的深入研究^[11,12]表明,直接产在块状硫化物矿层下方的典型筒状蚀变实际上十分少见,而普遍存在的却是半整合或层控的蚀变,后者可以在区域上大范围内分布。在高渗透率的下盘岩石中,层控蚀变尤其发育。有时,在同一个矿区的下盘岩石内,深部是层控蚀变,而浅部则是不整合蚀变^[11,13]。Brauhart 等^[14]把西澳大利亚 Panorama 地区区域性的半整合蚀变解释为海水下渗过程中的产物,而认为具体矿床下方的叠加蚀变代表流体向海底回流成矿的通道。

对于上盘围岩蚀变特征及其找矿意义的研究也是近年来 MSD 研究工作的重要进展之一^[11]。上盘蚀变的强度虽然比下盘蚀变弱,且分布较局限,但同下盘蚀变一样,上盘蚀变既可以是半整合的,也可以是岩筒状的。Jack 在塔斯马尼亚 Hellyer 矿区的上盘枕状熔岩中查明了一个羽状的(plume-shaped)铬云母-碳酸盐蚀变带,其范围可达矿层以上 200 m 处^[11];在澳大利亚的 Mount Chalmers、Scuddles、Wooklawn 和 Teutonic Bore 等矿区均存在以硅化、绢云母化、绿泥石化和黄铁矿化为特征的半整合型上盘蚀变^[15]。

3 矿石结构-构造和变形-变质

Vokes^[16]在早期的研究工作中曾提出,挪威加里东造山带 MSD 内的磁黄铁矿和磁铁矿,主要是同生沉积的黄铁矿在区域变质过程中转化的产物。此后,尽管 Scott 等^[17]及 Plimer 和 Finlow-Bates^[18]早已指出磁黄铁矿可以是同生沉积成因的,但迄今为止仍有众多的研究者引用 Vokes^[16]早已放弃的观点,来解释各地 MSD 矿床中的矿物共生顺序。然而,Craig 和 Vokes^[19]近年来的研究表明,阿巴拉契亚和斯塔的纳维亚加里东造山带 MSD 中的磁黄铁矿主要是同生沉积的,其中的大量黄铁矿是在退变质阶段由磁黄铁矿脱硫形成的变晶。顾连兴等^[20]研究了挪威 15 个 MSD,进一步证明这些矿区的磁黄铁矿绝大部分是同生沉积的,另有一部分是退变质过程的产物。笔者研究表明,辽宁红透山矿区的磁黄铁矿主要也是同生沉积的,而矿石中粗大的黄铁矿立方体则是一种斑状变晶。尽管如此,确实也有一部分矿床(如加拿大苏利文)^[21]中的磁黄铁矿主要是由同生沉积的黄铁矿转变而来的。

以往对于磁黄铁矿各种变体的研究主要限于其成分、结构、物理性质、交生特征及其相平衡等方面,而结合成矿作用所作的研究甚少,致使有些研究者^[22]认为,由于 MSD 的成矿温度低,这类矿床的同生沉积磁黄铁矿中本来就缺乏单斜出溶体。顾连兴等^[20]的研究证明,挪威许多 MSD 中同生沉积的磁黄铁矿本来是有单斜出溶体的,不过这些出溶体在后期的变质和退火作用过程中受到了均匀化。在此基础上他们推论,世界上许多古老造山带中的 MSD 之所以缺乏单斜磁黄铁矿,主要是因为这些矿床多数经历过不同程度的变形、变质、重结晶和退火作用^[23]。Cook^[24]对挪威的磁黄铁矿也进行了研究,未发现与顾连兴和 Vokes 的结论相悖之处。不同类型矿床的闪锌矿中普遍地存在着大量微米级粒径的黄铜矿交生体(乳滴、棒条、蠕虫或叶片),这些交生体曾长期地被认为是闪锌矿在降温过程中固溶体出溶的产物。由于实验得出的 CuS 在闪锌矿中的溶解度十分有限,在 500~300 °C 时其值仅为 2.4% (mol 数)^[25],不能说明黄铜矿交生体的数量之多。因而,目前国际上基本一致地赞成 Barton^[26]提出的观点,认为这种

交生体主要是闪锌矿受含铜溶液交代的产物,并把这种交生体形象地称为闪锌矿的黄铜矿“疾病”^[27~31]。顾连兴等^[31]认为,闪锌矿中有一部分黄铜矿交生体可能是早期的出溶产物,这种出溶产物总量虽小,但高度分散,它为“病毒”状黄铜矿的生长提供了无数的晶芽,因而促进了交代作用的进行。与此同时,也有的研究者强调部分交生体是共沉淀的产物,并提供了实验依据^[32~34]。

矿石的变形和变质,尤其是其塑性变形,近年来仍是热门论题。许多学者开始了对矿石变形和变质的 $P-T-t$ 路径的研究^[35,36]。Sawkins^[37]认为,由于下伏岩浆房的热效应和由此引起的海水对流循环,MSD 在海底环境下就已受到热液变质作用。对各种硫化物在不同温度和压力下的脆—韧性特征,已获得了更准确的实验数据^[38]。对于韧性变形所造成的矿石结构、构造和矿体形态改变的研究已更加深入^[38,39]。Duckworth 和 Rickard^[40]对瑞典兰斯特洛姆矿区的矿石糜棱岩中矿物的结构特征作了研究。在深入研究辽宁红透山矿区强烈韧性变形和矿石糜棱岩的基础上,刘连登等^[41]提出该矿区的铜—金脉是块状硫化物高温塑性流动和差异性再活化的产物。Marshall 等^[42]对揉碾构造(Durchbewegung structure)和穿刺构造(Piercement structure)形成的动力学机制作了探讨。Skinner 和 Johnson^[43]认为,硫化物熔体这种形式是高级变质过程中硫化物活化转移的一种可能的机制,同时提出,由矿体与围岩的密度差所引起的重力下沉,是某些像形文字状或鱼钩状矿体的形成机制。McClay^[44]发现了硫化物矿石中的压溶结构,并提出压溶是低级变质阶段黄铁矿和其他硫化物塑性变形的重要机制。Gu Lianxing 和 McClay^[21,45]详细论述了加拿大科迪勒拉块状硫化物矿石中的各种压溶结构,提出压溶(包括剪切过程中的压溶)是矿石中成矿物质发生活化转移,形成新矿体的一种重要机制。矿石结构—构造的研究表明,矿床变质过程中应力和温度条件可以在同一矿床的不同部位^[46],甚至在同一块手标本的范围内^[23]发生明显的变异。Huston^[47,48]认为,变质和变形可使固定在硫化物中的 Au 发生活化转移,形成颗粒较粗的裂隙 Au 和粒间 Au,并趋于与韧性较强的矿物伴生。

4 矿床模式和成矿机制

多年来流行的 MSD 的矿床模式包括上部层控的、整合的块状硫化物矿石和下部不整合的脉状、角砾状和浸染状矿石,但实际情况要比这样的模式复杂得多。澳大利亚的研究者^[11]基于该国大约 30 个 MSD 的研究,根据矿床的形态、金属成分、矿化类型和下盘矿化蚀变等特征,将这类矿床分为 10 个“式(Style)”:丘堆式、不对称丘堆式、矿筒式、矿席式、周期性分带式、矿层加层控细脉式、透镜体叠置式、远源改造式、含铜网脉—浸染式和含金—银—铅—锌网脉—浸染式。层状矿体下盘的矿化,不仅可以形成黑矿矿中所见到的硅质黄矿,在硅质黄矿的外侧还可以形成脉状—浸染状的铅—锌矿,再往外侧还可出现富金的矿化^[13]。McGoldrick 和 Large^[13]认为,塔斯马尼亚 Que River 矿区富金的下盘脉状矿化实际上相当于 Lindgren 的浅成热液(epithermal)矿化。顾连兴和杨浩^[49]认为,华南晚古生代 MSD 的下盘矿化方式明显地受到围岩成分的控制。顾连兴等^[50]还提出,与 MSD 在区域上伴生的喷气成因的层状锰矿,其下盘岩石中往往伴有代表海底热液通道的脉状铅—锌矿。

长期以来的认识是:块状硫化物矿石的金属主要是从海水中直接沉淀的,而成矿流体进入水盆地后,各种金属的沉淀顺序以及由此造成的分带则取决于其溶解度的差异。自从 Barton^[26]发现黑矿矿石中黄铜矿交生体等大量交代现象以来,人们开始注意到了交代作用这种重要的成矿方式^[51,52],近年来已普遍地认识到某些近源(proximal)丘堆式矿床中的金属和矿物

分带,是较晚阶段海底上升流体对早阶段沉积的矿石进行交代淋滤和活化转移的产物,即矿层中的相当一部分金属是从下方注入的,而不是从上方沉积的^[11,53]。Large^[11]将丘堆式矿床的成矿过程分成4个阶段:喷流作用的起始阶段,热液温度较低(150~250℃),首先在海底沉积高孔隙度的方铅矿、闪锌矿、黄铁矿矿石;第二阶段热液温度升高(250~300℃),并富含Cu;该阶段上升的热液在经过第一阶段沉积的铅-锌矿石时,热液中的铜便在其孔隙中沉淀,或以交代方铅矿和闪锌矿的方式析出,交代过程中Pb、Zn向矿层的上部活化转移;第三阶段热液温度更高(300~400℃),不但使Pb、Zn进一步往矿层上部转移,也可能使Cu往上转移,从而在最下部形成了一个缺乏各种贱金属的黄铁矿核,这样,便造成了层状矿体中从下到上由黄铁矿矿石到铜矿石再到铅-锌矿石这样的垂直分带;在喷气活动减弱,热液温度降低的第四阶段,方铅矿、闪锌矿、重晶石和碳酸盐等叠加在早先形成的各个带之上。在分带形成过程中金属往上部迁移和富集的这种机制被称为带状提炼(zone refining)^[11]。Large^[11]还对带状提炼过程中Au和Ag的性状作了论述。然而,由于带状提炼机制难以解释矿床内周期性分带等特征,卤水池中分异沉淀等理论仍在被人采用^[11]。近年来,王登红等^[54]基于对阿舍勒矿床的研究,认为铁、铜、锌和铅等金属硫化物的垂直分带是由于这几种金属的原子量依次增大,因而向上运动的速度依次减小,到达海底和沉积成矿的时间也相应地依次滞后。韩发等^[55]在大厂矿区作了出色的研究。他们在条带状锡矿石中发现了Sedex矿床中特征性的冰长石,并发现层状矿体中的锡石在微量元素组合上不同于岩浆热液锡石,从而进一步确证了该锡矿床原先为海底喷流沉积的MSD。笔者等^[56,57]在对比南岭和长江中下游两个地区MSD特征差异的基础上,提出陆壳成熟度对于大陆内部MSD的成分和成矿作用有着显著影响,认为在成熟度较高的陆壳上形成的MSD,其W、Sn、Pb、Zn、Sb、U、Tl、Ag和Hg等元素以及放射成因Pb的含量较高。Gu Lianxing和Yang Hao^[58]提出,W和Sn是大陆地壳上形成的MSD的特征元素。胡文宣等^[59]研究了宁芜地区向山、向山南和庐枞地区大鲍庄等矿床,认为这些矿床是陆相盆地中喷气沉积成因的MSD,进而提出MSD并不只是海相环境下的产物,在陆相火山盆地中也可形成。

5 金属和硫的来源

迄今所提出的成矿金属的来源,大体上仍有两种:①下盘火山—沉积岩系和基底岩石的淋滤^[60~62];②深部岩浆房挥发份的直接释放^[31, 63, 64]。相当多的研究者认为,易溶解元素(如Pb、Zn和Ag等)主要来自淋滤,而难溶解元素(Cu、Sn、Bi和Mo等)主要直接来自岩浆^[11, 63, 64]。Russell等^[65]认为,参与对流的海水可以从深达10km的脆—韧性界面附近淋滤出金属。基于淋滤的机制,有些研究者强调下伏岩系和基底岩性的差异对成矿元素类型的控制意义^[57, 66]。通常认为与玄武岩有关的矿床富含Cu和Au,而与长英质火山岩和沉积岩有关的矿床则富含Pb和Ag,但是Large^[11]指出,澳大利亚的矿床,无论是铜型、铜-锌型还是铅-锌-铜型,均与流纹质火山岩有关,而以玄武岩为主的火山岩系则缺乏重要的MSD。关于矿床中的硫,目前较多的研究者认为,块状矿石和主成矿阶段形成的下盘脉状矿石中的硫可能主要来自下盘火山岩的淋滤,而较晚成矿阶段形成的层状矿的顶部和部份脉状矿石,其硫可能主要来自还原的海水硫酸盐^[67, 68]。Eldridge^[69]用离子探针测定了澳大利亚McArthur河流域H. Y. C.矿床中经过次生加大的大量黄铁矿颗粒的硫同位素组成,发现这些颗粒次生加大部分的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值比其核部高15%。这表明,硫化物的硫同位素系统十分复杂,即使同一个矿物颗粒的不同部位,也会具有不同的硫源。Whitfork和Korsch^[70]研究了Mount Read地区与MSD伴生的层

状重晶石,认为其较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值可能与古老陆壳岩石的淋滤有关。与之不同的是,叶庆同^[8]根据四川岷村矿区层状重晶石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值介于火山岩和灰岩之间,并更接近于灰岩,认为该矿区的重晶石属沉积成因,但受到了火山热水的影响。

6 成矿流体的性质和来源

据研究,火山成因矿床的典型流体特征为温度达 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=4.1$,盐度 $=1\text{ M NaCl}$, H_2S 逸度 $=10^{-3}$, $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{H}_2\text{S}]=10^{-1}$ ^[11]。也报道了一些高盐度的流体,如在危地马拉Oxec塞浦路斯型矿床中有些包裹体的盐度为 $11\text{ wt}\% \text{ NaCl}$ ^[71];Wilson和Petersen^[71]认为,Oxec矿床中的高盐度流体可能有4种成因:沸腾、高盐度孔隙水、岩浆水和流体与蒸发盐的反应。在爱尔兰的Tynagh铅-锌矿床中,存在着两种不同温度和盐度的流体:一种是高温($240\text{ }^{\circ}\text{C}$)低盐度($12\text{ wt}\% \text{ NaCl}$)的流体,另一种是低温($70\text{ }^{\circ}\text{C}$)高盐度($21\text{ wt}\% \text{ NaCl}$)的流体^[72]。Banks和Russell^[72]认为,第二种流体不是因为淋滤了蒸发盐而具有高盐度,而是因为这种流体来自近岸的蒸发盆地。两种流体的混合是矿石沉淀的机制。研究表明^[73,74],如果MSD形成后受到过高绿片岩相或更强的变质作用,则海底喷流成矿阶段形成的原生包体多数因主矿物重结晶或隆升过程中的减压爆裂而被破坏,保存至今的包体主要是退变质或隆升阶段的产物。沉积岩容矿的MSD的成矿流体多被解释为来自循环海水^[65,75]。对于火山岩容矿的MSD,虽仍有循环海水、岩浆水和混合水等多种意见^[37,76,77],但较为流行的假说似乎是,同一矿床中与铜矿化有关的流体主要来自岩浆,而与铅-锌矿化有关的流体主要来自海水,岩浆流体与海水的混合是金属析出的重要机制^[11,53,64]。Bin Lin和Manuel^[76]用 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值研究了黑矿的成因,认为75%的成矿流体来源于岩浆,而源于海水的不超过25%。关于地表水在地壳内部的循环可以达到的深度尚有分歧。大洋钻探的有些资料表明,某些地段洋壳的高渗透部分仅仅是上部 $100\sim 200\text{ m}$ ^[78,79]。然而,深海钻探计划在哥斯达黎加南侧钻探的B504孔的测井温度剖面表明,洋底水正在流入含水层,并表明地壳较深部位存在着一个巨大的低压“蓄水池”^[80]。科拉超深钻探发现地壳中存在大量近水平的破碎带以及在其中流动的流体^[81,82]。地球物理揭示,地壳内不同深度普遍存在多组反射层和高导低速层,这可能是由于地下存在多个连续的含水相带^[83]或流体库^[84]。莱茵地堑的深钻表明,在 3490 m 深处的花岗岩质基底内仍存在着透水层,同时发现基底花岗岩中有一股自流水(artesian flow),并广泛地存在着热液蚀变和石英脉^[85]。同位素研究表明,形成这些蚀变和石英脉的流体来自上覆的莱茵盆地沉积物的建造水^[85]。这些资料表明,地表或近地表流体可以下渗至相当的深度,Russell等^[65]认为可以达到 $12\sim 15\text{ km}$ 。

关于沸腾和海水深度在MSD成矿过程中所起的作用问题,尽管Bischoff和Pitzer^[86]早已提出,成矿流体在海水-岩石界面以下的沸腾不一定会使金属在进入海盆地之前就达到饱和而形成下盘矿化,但多数学者仍认为,沸腾作用可以造成流体中金属在下盘岩石中卸载,因而难以在海底形成MSD^[11]。然而,近年来对于古代矿床和现代洋脊热液系统的研究表明,流体在进入海底之前即使发生过沸腾,照样能够形成MSD^[87,88]。即使流体温度高达 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,MSD也能在水深不到 200 m 的海水中形成^[88]。新近的研究^[89]表明,伊比利亚黄铁矿带的MSD也形成于浅水环境。据报道^[90],阿舍勒矿区Ⅲ号矿化带细碧岩与灰岩互层,在I号矿体顶部的细碧岩层中亦见灰岩,因此,该矿床也可能形成于浅水环境。以成矿流体为中心的计算机模拟方兴未艾,其内容包括成矿流体对源区金属的淋滤^[59]、对流循环^[60]、水岩反应^[85]、金属沉淀^[91],以及后期叠加^[92]等机制。

普遍认为, Cu、Zn、Pb 和 Ag 在 MSD 成矿流体中主要以氯化物络合物的形式搬运, 而 Au 则存在 AuCl_2^- 和 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 两种不同的络合物形式^[66, 93, 94]。高温($>300\text{ }^\circ\text{C}$)、高盐度和高氧逸度的环境有利于 AuCl_2^- 的存在, 而低温($<300\text{ }^\circ\text{C}$)、低盐度和高硫逸度的环境有利于 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 的稳定^[6, 66, 95~98]。Leistel 等^[99]把伊比利亚黄铁矿带西班牙部分的矿床中的 Au 分为两类成矿元素组合: ① 产在下盘网脉带内和层状矿底部的 Au-Co(-Bi) 组合; ② 产在远源矿层内或网脉带顶部的 Au-Zn-Ag(-As-Tl-Hg) 组合。Leistel 等^[99]认为, 组合 ① 中的 Au 是以 AuCl_2^- 的形式迁移, 并在早阶段较高的温度($>300\text{ }^\circ\text{C}$)下沉淀的, 而组合 ② 中的 Au 则是以 $\text{Au}(\text{HS})_2^-$ 的形式迁移, 并在晚阶段较低的温度($<280\text{ }^\circ\text{C}$)下沉淀的。然而, Hayashi 和 Ohmoto^[100]根据他们在 $250\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$ 时所作的 Au 在 NaCl 和 H_2S 的水溶液中的溶解度的实验得出结论, AuCl_2^- 这种形式并不重要。

7 现代成矿作用

现代海底热液系统是研究 MSD 成矿作用的天然实验室。由于深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP)的实施^[101], 到 1993 年为止, 被发现的海底热液系统已达 135 个^[102]。这些成矿系统既出现在离散板块边缘, 也出现在汇聚板块边缘^[102], 其研究成果进一步证明了在岩浆热力的驱动下海水对流循环、淋滤围岩并成矿的机制^[102]。深海钻探近年来最重要的进展之一是在弧后盆地环境中发现了块状硫化物的矿化。冲绳海槽的 JADE 地热区的矿化特征可以和日本的黑矿相对比^[103]; Manus 弧后盆地中与英安质火山中心相伴的矿床可与加拿大东部的太古宙块状硫化物相对比^[104]。在汤加海沟西侧的 Lau 盆地中既有 Fe-Mn 氧化物, 又有块状硫化物的沉积^[105]。在 Lau 盆地的块状硫化物矿石中还首次发现了现代海底热液系统中形成的自然金^[98]。这些弧后盆地矿床的发现表明时代相近的 MSD、斑岩型铜-金矿床和浅成热液型金矿床可以在同一个活动陆缘环境中共存^[98]。

在对比形成于不同成熟度(拉张程度)的弧后盆地中的 MSD 成分特征的基础上, Fouquet 等^[105]提出, 在具有陆壳基底的、成熟度较低的盆地中形成的 MSD, 其成分与黑矿型矿床相接近, 而在缺乏陆壳基底, 成熟度较高的盆地中形成的矿床, 其成分更接近于洋中脊的矿化。与洋中脊的矿床相比, 弧后盆地的矿床更加富含 Ba、Zn、As、Pb、Ag、Au 和 Hg, 而贫 Mo、Se 和 Co^[105, 106]。弧后盆地 Au 的富集尤其显著, 如冲绳海槽块状硫化物 Au 含量平均值高达 5.1 g/t ^[95]。据推测, 西南太平洋 MSD 中的 Au 储量超过 5350 t ^[98]。海底热液矿床中的 Au 常与 Ba、As、Sb、Hg、Tl、Ag、Pb、Zn、Cd 和 SiO_2 密切伴生^[85, 103], 并可在海底氧化过程中被富集^[106]。

迄今为止, 尚未发现可以与砂岩和页岩容矿的铅-锌-钡-银矿床进行对比的现代沉积物^[102]。虽然在东太平洋洋脊的 Escanaba 海槽和 Middle 谷地等处存在沉积岩容矿的现代硫化物堆积体, 然而这两个矿床赋矿岩系都以洋壳为基底, 而且其金属都以 Cu 和 Zn 为主, 仅含少量的 Pb^[107, 108]。

多数洋脊成矿流体的条件是: $t < 350\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} > 3.5$, 盐度 = $3.5\sim 6.4\text{ wt}\%$ NaCl^[95], 但也有些流体的盐度低于正常海水, 并有相当一部分高达 $15\sim 32\text{ wt}\%$ NaCl^[95, 109]。基于同一地段的洋底热液系统中可以同时存在两种不同盐度的流体, Bischoff and Rosenbauer^[110]提出了流体的双扩散对流(Double-diffusive convection)模式。他们认为海底有两个对流圈, 上方是低温、低盐度的海水的对流, 形成位于上部的不整合的下盘矿化; 下方是高温、高盐度的卤水, 顺层分布并对流, 主要形成位于下部的层状的下盘矿化, 往上排泄时也可形成部分不整合矿化; 再往下

是一个隐伏的岩浆房。下方对流圈中的卤水一部分来自岩浆,另一部分来自海水。近年来观察到,同一个洋脊喷口早期喷出的是汽相,而几年后则喷出高盐度的卤水。Von Damm 等^[109]认为,这是流体在深部卤水库中发生相分离的结果,即由于汽相的逸出使卤水的盐度升高。

参 考 文 献

- 1 顾连兴,郑素娟.块状硫化物矿床的研究现状.地质科技情报,1989,(2):67~73.
- 2 Sawkins F J. Massive sulphide deposits in relation to geotectonics. In: Strong K F. ed. Metallogeny and Plate Tectonics. Geol. Assoc. Canada Spec. Publ., 1976, 14: 221~242.
- 3 Sangster D F, Scott S D. Precambrian stratabound, massive Cu-Zn-Pb sulfide ores of North America. In: Wolf K H. ed. Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. Amsterdam. Elsevier, 1976, 6: 129~222.
- 4 Hutchinson R W. Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. Econ. Geol., 1973, 68: 1223~1246.
- 5 Sillitoe B H, Hannington M H, Thompson J F H. High sulfidation deposits in the volcanogenic massive sulfide environment. Econ. Geol., 1996, 91: 204~212.
- 6 Davidson G J. Hydrothermal geochemistry and ore genesis of sea-floor volcanogenic copper-bearing oxide ores. Econ. Geol., 1992, 87: 889~912.
- 7 郭介人,任秉琛,黄玉春.西北海相火山岩地区块状硫化物矿床.武汉:中国地质大学出版社,1994. 1~271.
- 8 叶庆同,胡云中,杨岳清.三江地区区域地球化学背景和金银铅锌成矿作用.北京:地质出版社,1992. 1~279.
- 9 章午生.块状硫化物矿床的一个特殊类型德尔尼铜矿.甘肃地质学报,1995,4(2):22~31.
- 10 王玉往,秦克章.VAMSD 矿床系列最基性端员青海省德尔尼大型铜钴矿床的地质特征和成因类型.矿床地质,1997,16(1):1~10.
- 11 Large R R. Australian volcanic-hosted massive sulphide deposits: features, styles, and genetic models. Econ. Geol., 1992, 87: 471~510.
- 12 Morton R L, Franklin J M. Two-fold classification of Archean volcanic-associated massive sulfide deposits. Econ. Geol., 1987, 82: 1057~1063.
- 13 McGoldrick P J, Large R R. Geologic and geochemical controls on gold-rich stringer mineralization in the Que River deposits, Tasmania. Econ. Geol., 1992, 87: 667~685.
- 14 Brauhart C W, Groves D L, Morant P. Regional alteration systems associated with volcanogenic massive sulfide mineralization at Panorama, Pilbara, western Australia. Econ. Geol., 1998, 93: 292~302.
- 15 Ashley P M, Dudley R J, Lesh R H, Marr J M, Ryall A W. The Scuddles Cu-Zn prospect, an Archean volcanogenic massive sulfide deposit, Golden Grove district. Western Australia. Econ. Geol., 1988, 83: 918~951.
- 16 Vokes F M. Regional metamorphism of the Paleozoic geosynclinal sulphide ore deposits of Norway. Trans. Inst. Mining. Metall., Sec. B. Appl. Earth Sci. 1968: 53~59.
- 17 Scott S D, Both R A, Kissin S A. Sulphide petrology in the Broken Hill region, New South Wales. Econ. Geol., 1977, 72: 1410~1425.
- 18 Plimer I R, Finlow-Bates T. Relation between primary iron sulphide species, sulphur source, depth of formation and age of submarine exhalative deposits. Mineral. Deposita, 1978, 13: 399~410.
- 19 Craig J R, Vokes F M. The metamorphism of pyrite and pyritic ores; an overview. Mineral. Mag., 1993, 57: 3~18.
- 20 顾连兴,尹琳, Vokes F M. 挪威块状硫化物矿床中单斜与六方磁黄铁矿的共生及其成因.高校地质学报,1995,1(1): 80~92.
- 21 Gu Lianxing, McClay K R. Pyrite deformation in stratiform lead-zinc deposits of the Canadian Cordillera. Mineralium Deposita, 1992, 27: 169~181.
- 22 Lusk J, Scott S D, Ford C E. Phase relations in the Fe-S system to 5 Kbars and temperatures between 325°C and 155°C. Econ. Geol., 1993, 88: 1880~1903.
- 23 Gu Lianxing, Vokes F M. Intergrowth of hexagonal and monoclinic pyrrhotites in some sulphide ores from Norway. Mineralogical Magazine, 1996, 60: 304~316.
- 24 Cook N J. Mineralogy of the sulphide deposits at Sulitjelma, northern Norway. Ore Geology Reviews, 1996, 11: 303~338.
- 25 Kojima S, Sugaki A. Phase relations in the Cu-Fe-Zn-S system between 500°C and 300°C under hydrothermal conditions. Econ. Geol., 1985, 80: 158~171.
- 26 Barton P B Jr. Some ore textures involving sphalerite from the Furutobe mine, Akita Prefecture, Japan. Mining Geology,

- 1978, 28: 293~300.
- 27 Barton P B Jr, Philip M, Bethke P M. Chalcopyrite disease in sphalerite; Pathology and epidemiology. *Am. Mineral.*, 1987, 72: 451~467.
- 28 Craig J R, Vokes F M. Ore mineralogy of the appalachian-Caledonian stratabound sulfide deposits. *Ore Geology Review*, 1992, 7:77~123.
- 29 Kojima S. The nature of chalcopyrite inclusions in sphalerite; exsolution, coprecipitation or "disease"? — a discussion. *Econ. Geol.*, 1992, 87(4): 1191~1192
- 30 周兵, 顾连兴, 张文兰, 段芸. 福建尤溪梅仙矿床闪锌矿中黄铜矿交生体的交代成因. *地质论评*, 1999, 45(1): 15~18.
- 31 Gu Lianxing, Zhou Bing, Zhang Wenlan. Chalcopyrite Intergrowths in Sphalerite in the Meixian Lead-zinc deposit, Fujian Province. and Their Metallogenic Significance. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1998, 17(4): 311~319.
- 32 Kojima S. A coprecipitation experiment on intimate association of sphalerite and chalcopyrite and its bearings on the genesis of Kuroko ores. *Mining Geology*, 1990, 40(3): 147~158.
- 33 Bortnikov N S, Genkin A D, Dobrovol'skaya M G, Muravitskaya G N, Filimonova A A. The nature of chalcopyrite inclusions in sphalerite; exsolution, coprecipitation, or "disease"? *Econ. Geol.*, 1991, 86: 1070~1082.
- 34 Nagase T, Kojima S. An SEM examination of the chalcopyrite disease texture and its genetic implications. *Mineralogical Magazine*, 1997, 61: 89~97.
- 35 Tiwary A, Deb M, Cook N J. Use of pyrite microfabric as a key to tectono-thermal evolution of massive sulphide deposits — an example from Deri, southern Rajasthan India. *Mineral. Mag.*, 1998, 62(2): 197~212.
- 36 Cook N J, Halls C, Boyle A P. Deformation and Metamorphism of massive sulphides at Sulitjelma, Norway. *Mineral. Magazine*, 1993, 57, 67~82.
- 37 Sawkins F J. Integrated tectonic-genetic model for volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Geology*. 1990, 18: 1061~1064.
- 38 Marshall B, Gilligan L B. An introduction to remobilization; information from ore-body geometry and experimental considerations. *Ore Geology Review*, 1987, 2: 87~131.
- 39 Cox S F. Flow mechanisms in sulphide minerals. *Ore Geology Review*, 1987, 2: 133~171.
- 40 Duckworth R C, Richard D. Sulphide mylonites from the Renstrom VMS. *Mineral. Mag.*, 1993, 57: 83~92.
- 41 刘连登, 朱永正, 戴仕炳. 金矿与韧性剪切带及叠加构造. 见: 张贻侠, 刘连登主编. 中国前寒武纪矿床和构造. 北京: 地震出版社, 1994. 39~78.
- 42 Marshall B, Gilligan L B. Durchbewegung structures, piercement cusps, and piercement veins in massive sulphide deposits; formation and interpretation. *Econ. Geol.*, 1989, 84: 2311~2319.
- 43 Skinner B J, Johnson C A. Evidence for movement of ore materials during high-grade metamorphism. *Ore Geology Reviews*. 1987, 2(1~3): 191~204.
- 44 McClay K R. Deformation of stratiform Pb-Zn (barite) deposits in their northern Canadian Cordillera. In: Vokes F M ed. *Ores and Metamorphism*, *Ore Geology Review*; Amsterdam; Elsevier. 1991. 435~462.
- 45 Gu Lianxing, McClay K R. Pressure solution of sulphides in some massive sulphide deposits of western Canada; its significance to mobilization of ore-forming materials. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1994, 13(2): 132~139.
- 46 Drown C G, Downs R C. Deformational style and strain partitioning at the Hellyer volcanogenic massive sulphide deposit. *Geol. Soc. Australia Spec. Pub.*, 1990, 25: 176~177.
- 47 Huston D L, Bottrill R S, Creelman R A, Zaw K, Ramsden T R, Rand S W, Gemmell J B, Jablonski W, Sie S H, Large R R. Geologic and geochemical controls on the mineralogy and grain size of gold-bearing phases, eastern Australian volcanic-hosted massive sulphide deposits. *Econ. Geol.*, 1992, 87: 542~563.
- 48 Huston D L, Jablonski W, Sie S H. The distribution and mineral hosts of silver in eastern Australian volcanogenic massive sulphide deposits. *Can. Minerl.*, 1996, 34: 529~543.
- 49 顾连兴, 杨浩. 华南型块状硫化物矿床的下盘矿化. *地质论评*, 1989, 35(4): 308~313.
- 50 Gu Lianxin, Hu Wenxuan, He Jinxiang, Xu Yaotong. Geology and genesis of the Upper Paleozoic massive sulphide deposits in South China. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section B: Applied earth science*, 1993. 83~96.
- 51 Pisutha-Arnond V, Ohmoto H. Thermal history, and chemical and isotopic compositions of the ore-forming fluids responsible for the Kuroko Massive sulphide deposits in the Hokuroku district of Japan. *Econ. Geol.*, 1983, Monograph 5: 523~558.
- 52 Eldridge C S, Barton P B, Ohmoto H. Mineral textures and Their bearing on formation of the Kuroko orebodies. *Econ.*

- Geol., 1983, Monograph 5: 241~281.
- 53 Huston D L, Sie S H, Suter C F, Cooke D R, Both R A. Trace elements in sulphide minerals from eastern Australian volcanic-hosted massive sulphide deposit. *Econ. Geol.*, 1995, 90: 1167~1196.
- 54 Denghong Wang, Yuchuan Chen, Jingwen Mao. The Ashele deposit: A recently discovered volcanogenic massive sulphide Cu-Zn deposit in Xinjiang, China. *Resource Geology*, 1998, 48(1): 31~42.
- 55 韩发、赵汝松、Hutchinson. 大厂锡多金属矿床地质及成因. 北京:地质出版社, 1997. 213.
- 56 何金祥,徐克勤,顾连兴,胡文宣. 南岭与下扬子区块状硫化物矿床特征的对比. *南京大学学报(自然科学版)*, 1995, 31(4): 625~634.
- 57 顾连兴,何金祥,胡文宣,徐克勤. 陆壳成熟度对于华南型块状硫化物矿床的成分效应. *地质学报*, 1997, 71(2): 161~169.
- 58 Gu Lianxing, Yang Hao. Tungsten enrichment in the South China-type massive sulphide deposits. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1992, 11(4): 344~351.
- 59 胡文宣,徐克勤,胡受奚,任启江. 宁芜和庐枞地区陆相火山喷气沉积-热液叠加改造型铁硫矿床. 北京:地质出版社, 1991. 1~142.
- 60 Stoltz A J, Large R R. Evaluation of the source control on precious metal grades in volcanic-hosted massive sulfide deposits from western Tasmania. *Econ. Geol.*, 1992, 87: 720~738.
- 61 Lewis H, Couples G D, Russell M J. Characterization of fluid-flow systems for Irish lead-zinc deposits——contributions from mass balance. *Trans. Instn Min. Metall. (Sect. B: Appl. earth sci.)*, 1995, 104: B145~155.
- 62 叶庆同,傅旭杰,张晓华. 阿舍勒铜锌块状硫化物矿床地质特征和成因. *矿床地质*, 1997, 16(2): 100~106.
- 63 Stanton R L. Magmatic evolution and the ore type-lava type affiliations of volcanic exhalative ores. *Australasian Inst. Mining Metallurgy*, 1990, 15: 101~107.
- 64 Urabe T, Marumo K. A new model for Kuroko-type deposits of Japan. *Episodes*, 1991, 14(3): 246~251.
- 65 Russell M J, Couples G D, Lewis H. SEDEX genesis and super-deep boreholes: Can hydrostatic pore pressures exist down to the brittle-ductile boundary? In: Pasava, Kribek and Zak eds. *Mineral Deposits*. Balkema Rotterdam, 1995. 315~318.
- 66 Hutchinson R W. Precious metals in massive base metal sulfide deposits. *Geologische Rundschau*, 1990, 79(2): 241~263.
- 67 Graf J L. Rare earth elements as hydrothermal tracers during the formation of massive sulphide deposits in volcanic rocks. *Econ. Geol.*, 1977, 72(4): 527~548.
- 68 Gemmell J B, Large R R. Stringer system and alteration zones underlying the Hellyer volcanogenic massive sulfide deposit, Tasmania. *Econ. Geol.* 1992, 87: 620~649.
- 69 Eldridge C S, Williams N, Walshe J L. Sulphur isotope variability in sediment-hosted massive sulphide deposits as determined using the iron microprobe SHRIMP: I. A study of the H. Y. C. deposit at McArthur river, Northern Territory, Australia. *Econ. Geol.*, 1993, 88(1): 1~26.
- 70 Whitfork D J, Korsch M J. Strontium isotope studies of barites: implications for the origin of base metal mineralization in Tasmania. *Econ. Geol.*, 1992, 87: 953~959.
- 71 Wilson P N, Petersen E U. Fluid inclusion evidence for fluid mixing in the Oxec Cyprus-type copper deposit, Guatemala. *Econ. Geol.*, 1989, 84: 444~449.
- 72 Banks D A, Russell M J. Fluid mixing during ore deposition at the Tynagh base-metal deposits, Ireland. *Eur. J. Mineral.*, 1992, 4: 921~931
- 73 Heller W, Touret J L R, Stumpf E F. Retrograde fluid evolution at the Rampura Agucha Pb-Zn-(Ag-)deposit, Rajasthan, India. *Mineral. Deposita*, 1996, 31: 163~171.
- 74 Giles A D, Marshall B. Fluid inclusion Studies on a multiply deformed, metamorphosed volcanic associated massive sulphide deposit, Joma mine, Norway. *Economic Geology*, 1994, 89: 803~819.
- 75 Russell M J. The generation at hot springs of sedimentary ore deposits microbialites and life. *Ore Geology Reviews*, 1996, 10: 199~214.
- 76 Bin Lin, Manuel O K. A noble gas technique for the identification of mantle and crustal materials and its application to the kuroko deposits. *Geochemical Journal*, 1994, 28(1): 47~69.
- 77 Lydon J W. Ore deposit model #14. Volcanogenic massive sulphide deposit, Part 2: Genetic models. *Geoscience Canada*, 1988, 15: 43~65.
- 78 翟世奎,秦蕴珊. 大洋钻探与大洋地壳研究. *地球科学进展*, 1995, 10(3): 215~222.

- 79 王登红,毛景文. 氮同位素地质研究进展. 地质科技情报, 1996, 15(2): 51~56.
- 80 吴世迎. 大洋钻探与深海热液作用. 地球科学进展, 1995, 10(3): 223~228.
- 81 Kerr R A. German super-deep hits bottom. Science, 1994, 266: 545.
- 82 Person M, Garvan A. A sensitivity of the driving forces on fluid flow during continental-rift basin evolution. Geol. Soc. Am. Bull., 1994, 106: 461~475.
- 83 Bailey R C. Trapping of aqueous fluids in the deep crust. Geophys. Res. Lett., 1990, 17(8): 1129~1132.
- 84 王安建,金巍,孙月丰,银剑钊. 流体研究与找矿预测. 矿床地质, 1997, 16(3): 278~288.
- 85 Komninou A, Yardley B W. Fluid-rock interactions in the Rhine Graben; A thermodynamic model of the hydrothermal alteration observed in deep drilling. Geochim. et Cosmochim. Acta, 1997, 61(3): 515~531.
- 86 Bischoff J L, Pitzer K S. Phase relations and adiabats in boiling seafloor geothermal systems. Earth Planet. Sci. Letters, 1985, 75: 327~338.
- 87 Kappel E S, Franklin J M. Relationships between geologic development of ridge crests and sulphide deposits in the north-east Pacific Ocean. Econ. Geol., 1989, 84: 485~505.
- 88 Santy R A. Shallow-water stratigraphy at the Mount Chalmers volcanic-hosted massive sulfide deposit, Queensland. Econ. Geol., 1992, 87: 812~814.
- 89 Leistel J M, Marcoux E, Thieblemont D, Quesada C, Sanchez A, Almodovar G R, Pascual E, Saez R. The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian pyrite belt; Review and preface to the Thematic issue. Mineralium Deposita, 1998, 33(1~2): 2~30.
- 90 陈毓川,叶庆同,冯京. 阿舍勒铜锌成矿带成矿条件和成矿预测. 北京:地质出版社, 1996. 1~330.
- 91 Drummond S E, Ohmoto H. Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems. Econ. Geol., 1985, 80: 126~147.
- 92 Heinrich C A, Bain J H C, Mernagh T P, Wyborn L A I. Fluid and Mass Transfer during metabasalt alteration and copper mineralization at Mount Isa, Australia. Econ. Geol., 1995, 90(4): 705~728.
- 93 Hemley J J, Cygan G L, d'Angero W M. Effect of pressure on ore mineral solubilities under hydrothermal conditions. Geology, 1986, 14(5): 377~379.
- 94 Wood S A, Creerar D A, Borcsik M P. Solubility of the assemblage pyrite-magnetite-sphalerite-galena-gold-stibnite-bismuthinite-argentite-molybdenite in H₂O-NaCl-CO₂ solution from 200 ° to 350 °C. Econ. Geol., 1987, 82: 1864~1887.
- 95 Hannington M D, Herzig P M, Scott S D. Auriferous hydrothermal precipitates on modern sea floor. In: Foster R P. ed. Gold Metallogeny and Exploration. Blackie and Son, 1993. 249~282.
- 96 Huston D L, Taylor T, Fabray J, Patterson D J. Comparison of the geology and mineralization of the Balcooma and Dry River South volcanogenic massive sulfide deposits, northern Queensland. Econ. Geol., 1992, 87: 542~563.
- 97 Huston D L, Large R R. A chemical model for the concentration of gold in volcanogenic massive sulfide deposits. Ore Geology Rev., 1989, 4(3): 171~200.
- 98 Herzig P M, Hannington M F, Fouquet Y, Stackelberg U V, Petersen S. Gold-rich polymetallic sulphides from the Lau back-arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific. Econ. Geol., 1993, 88: 2182~2209.
- 99 Leistel J M, Marcoux E, Deschamps Y, Joubert M. Antithetic behaviour of gold in the volcanogenic massive sulphide deposits of the Iberian pyrite belt. Mineralium Deposita, 1998, 33(1~2): 82~97.
- 100 Hayashi K, Ohmoto H. Solubility of gold in NaCl- and H₂S aqueous solutions at 250~350 °C. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55: 2111~2126.
- 101 孙枢. 大洋钻探与中国地球科学. 地球科学进展. 1995, 10(3): 213~214.
- 102 Rona P A, Scott S D. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization; new perspectives. Econ. Geol., 1993, 88: 1935~1976.
- 103 Halbach P, Pracejus B, Marten A. Geology and mineralogy of massive sulphide ores from central Okinawa trough, Japan. Econ. Geol., 1993, 88: 2210~2225.
- 104 Binns R A, Scott S D. Actively-forming polymetallic sulfide deposits associated with felsic volcanic rocks in the eastern Manus back-arc basin, Papua New Guinea. Econ. Geol., 1993, 88: 2226~2236.
- 105 Fouquet Y, Stackelberg U V, Charlou J L, Erzinger J, Herzig P M, Muhe R, Wiedicke M. Metallogenesis in back-arc environments; the Lau basin example. Econ. Geol., 1993, 88: 2154~2181.
- 106 Fouquet Y, Wafik A, Cambon P, Mevel C, Meyer G, Gente P. Tectonic setting and mineralogical and Geochemical zonation in the Snake pit sulphide deposit (Mid-Atlantic ridge at 23° N). Econ. Geol., 1993, 88: 2018~2036.

- 107 Zierenberg R A, Koski R A, Morton J L, Bouse R M, Shanks W C. Genesis of massive sulphide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba trough, southern Gorda ridge. *Econ. Geol.*, 1993, 88: 2069~2098.
- 108 Goodfellow W K, Franklin J M. Geology, mineralogy, and chemistry of sediment-hosted clastic massive sulfides in shallow cores, Middle Valley, northern Juan de Fuca ridge. *Econ. Geol.*, 1993, 88: 2037~2068.
- 109 Von Damm K L, Buttermore L G, Oosting S E, Bray A M. Direct observation of the evolution of a seafloor 'black smoker' from vapor to brine. *Earth Plan. Sci. Lett.*, 1997, 149: 101~111.
- 110 Bischoff J L, Rosenbauer R J. Salinity variation in submarine hydrothermal system by layered double-diffusive convection. *J. Geol.*, 1989, 97: 613~623.

Advances in Research on Massive Sulfide Deposits: A Review

Gu Lianxing

(State Key Laboratory of Metallogenesis of Endogenic Metallic Deposits, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093)

Abstract

Research on massive sulfide deposits in the past ten years has made great much advances in deposit classification, mineralization and alteration features, ore textures and structures, ore deformation and metamorphism, deposit models and formation mechanisms, sources of metals and sulfur, properties and sources of mineralizing fluids, and mineralizations on modern seafloors. A review is given on these advances in this paper.

Key words: metal; sulfur; fluid; massive sulfide deposit; ore-formation mechanism

作者简介

顾连兴,男,1944年生。1967年毕业于北京大学地质地理系,1968~1978于江苏省冶金地质勘探公司814队从事野外地质工作。1985年于南京大学地质学系矿床学专业获理学博士学位。现为南京大学地球科学系教授,博士生导师,主要从事矿床学、岩石学的教学和科研工作。通讯地址:210093,江苏省南京市南京大学地球科学系。
