

现代海底热液活动与块状硫化物矿床成因研究进展

戴宝章, 赵葵东, 蒋少涌

南京大学 地球科学系 成矿作用国家重点实验室, 南京, 210093

摘 要:现代海底热液活动的发现及其分布特征和成矿机理的研究是近年来海洋地质学和矿床地质学的一大进展。对现代海底金属硫化物成矿作用的研究大大推动和促进了对古代块状硫化物矿床成因的认识。有关研究成果综合分析表明:(1)深部热液对流循环系统是块状硫化物成矿的核心,对流循环模式有简单的热液对流模式和双扩散对流模式。(2)块状硫化物矿床集中分布在大洋中张裂性活动板块边界,与大地构造活动紧密联系。(3)成矿流体与成矿物质均有多源性,在强调海水循环淋滤的同时,通过应用新的方法技术,岩浆来源物质(流体及成矿金属等)对一些块状硫化物矿床成矿的直接贡献得到初步确认。(4)在高温热液活动区及金属硫化物沉积中发现大量生命活动和生物群体,意义重大。

关 键 词:海底热液活动;块状硫化物矿床;成因模式;生命活动

中图分类号:P611 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2004)03-0246-09

块状硫化物矿床(MSD)是一类重要的金属矿床,通常产于海相火山岩系和沉积岩系中,主要由Fe、Cu、Zn和Pb的硫化物组成,伴有Au、Ag、Co等多种有益元素^[1,2]。这类矿床的研究很大程度上得益于对现代洋底热液活动与成矿作用的深化,后者已成为开创和发展成矿新理论的摇篮^[3,4]。本文基于海底热液活动和现代金属硫化物成矿作用的研究,试从构造背景、深部热液循环体系及流体和成矿物质来源等问题入手予以评述。

1 现代海底热液活动的发现及其意义

20世纪60年代红海发现高热卤水与Atlantis海渊热液多金属软泥,揭开了现代海底热液活动与金属硫化物沉积成矿研究的序幕。在随后的大洋调查中,首先在大洋中脊取得了一系列重要发现:70年代,在大西洋的TAG热液区发现了海底热泉和低温热液矿床,随之在加拉帕戈斯扩张中心发现了海底热泉和高温热液成矿活动与大规模生物群落;1979年,在EPR21°N洋底热液系统直接观察到正在喷发的烟囱状喷口和丘堤,顶部热液温度达到350℃,附近有大量的生物群。近年在印度洋中脊也

找到现代海底热液活动及金属硫化物沉积的实例^[5]。自此,海底热液活动的研究逐渐扩展到全球大洋构造活动带,如汇聚板块边界的沟弧盆构造活动带和板内热点或火山活动区,主要有Okinawa Trough、马里亚纳海沟、Lau Basin和Manus热液区等^[6]。

现代海底金属硫化物成矿作用与陆地上的块状硫化物矿床具有极强的相似性,是古老矿床的现代等同物,因此现代热液活动区是研究块状硫化物成矿理想的天然实验室。现代海底热液活动研究在理论上确立了深部热液对流循环体系,组构了成矿机制的核心;现代海底热液活动与古老块状硫化物矿床均集中分布在大洋张裂性的活动板块边界,矿床类型和特征的多样性与复杂性是不同构造背景或构造演化阶段的反映;充分认识到成矿流体与成矿物质的多源性和复杂性;块状硫化物矿床是洋壳深部热量和物质向外释放及与大洋交换作用的产物^[3],对全球的能量循环和化学循环等具有重要意义。现代海底热液活动区大量细菌活动与密集的生物群落与陆地上和海洋中常见的生物群落有着根本的区别,可能和古老的生命现象或生命起源有着重要的

联系^[7,8]。

2 成矿构造背景与矿床类型

通过近 30 年以深海钻探 (DSDP) 和大洋钻探 (ODP) 为主体的海洋地质调查,已发现 150 余处现代海底热液活动与金属硫化物沉积区^[4,9]。研究表明,海底热液活动在离散板块边界和汇聚板块边界均可出现,但都集中在拉张性构造带上,如快速扩张和慢速扩张的大洋中脊、沟弧盆构造活动带、轴向海山、火山及地幔热点区。古老块状硫化物产出的构造背景与之相似^[1,10]。P. M. Herzig 等^[4]将其产出的大地构造背景分为四类:大洋中脊 (EPR21°N 型)、洋内弧后 (Lau Basin 型)、陆内弧后 (Okinawa Trough 型) 及陆内裂谷 (红海 Atlantis 海渊型)。根据大洋中脊有无沉积物覆盖的情况还可以进一步区分;K. Lizasa 等^[11]在弧前环境的火山凹陷中还发现了黑矿型多金属硫化物矿床。

太平洋有三个重要成矿区,东部沿美洲大陆西侧的海域延伸一个很长的矿带:西太平洋成矿区和西南太平洋成矿区。大西洋的代表性矿床有大西洋中脊的 TAG 热液活动区和 Snake Pit 热液区。红海 Atlantis 深裂谷有几个规模最大的现代金属硫化物沉积区。印度洋中脊也已发现有海底热液活动和金属成矿作用^[5]。

现代海底金属硫化物矿床与古老的块状硫化物矿床间有着很好的对应性^[5,12~15] (表 1)。

表 1 现代与古代海底热液硫化物矿床的对应关系

Table 1 Comparison between modern and ancient sea-floor massive sulfide deposits

现代海底金属硫化物矿床	对应的古老的块状硫化物矿床
无沉积覆盖的洋中脊块状硫化物矿床	古代塞浦路斯型矿床
成熟度低的弧后或岛弧扩张环境 (如 Okinawa Trough) 中的块状硫化物矿床	古代黑矿型矿床
成熟度高的洋壳基底 (如北斐济和 马里亚纳海沟) 中的块状硫化物矿床	古代别子型矿床
现代红海海底卤水沉积成矿	古代大陆裂谷中的硫化物矿床

块状硫化物矿床的类型和化学组成受构造的控制。在无沉积物覆盖的大洋中脊发现的矿床以 Cu 为主,产于玄武岩中;而弧后环境下形成的矿床以 Zr-Pb 为主,赋矿围岩多为双峰火山岩系中的长英质火山岩;但岛弧发育的不同阶段,矿床的金属类

型有所差别,年轻的弧后扩张系统 (如 Okinawa Trough) 为 Zr-Pb-Cu 型,而成熟的弧后系统 (如北斐济和马里亚纳海沟) 发育大量玄武岩,为 Cu-Zn 型。现代海底热液成矿系统的研究将地球化学、赋矿岩石组合等与构造环境相联系,构成完整的成矿谱系,使矿床类型的划分更趋合理^[13,16]。

3 热液对流循环系统

研究发现,洋壳内的热液流体活动非常普遍。热流值最高、热液活动最强烈的地区明显受大地构造与火山活动的控制,大洋中脊与地幔热点区是海底金属硫化物的沉淀场所。海水对流循环模式能有效地解释大洋中脊与洋壳生长等相伴的高热流异常及洋中脊的金属硫化物矿床,并逐渐成为各种构造背景下块状硫化物矿床成矿模式的基本内容^[1,13,17,18]。洋底的扩张中心由于张性裂隙和断裂发育,海水在高渗透性的岩石中下渗到较深的位置,受高热流或深部岩浆活动热驱动,在洋壳岩石中进行对流循环,从各种围岩中淋滤提取大量的成矿物质,形成高温并富含多种金属组分的成矿热液。它们在洋底喷发并与冷的海水相遇混合,析出金属硫化物,形成了“黑烟囱”。关于块状硫化物矿床成因还存在地层含水层等其他热液模式,DSDP 和 ODP 钻探证实了洋壳中的确有深部的含水地层或流体库存在^[17]。

简单的海水对流循环模式在解释矿床形成时还有许多问题,如沸腾将导致热液系统难以长期保持 350 左右的稳定高温条件^[19]。理论推算表明,已知岩浆侵入体驱动的热液系统所能导致的成矿规模要比实际情况小很多^[17]。实际上同一个热液活动区乃至同一热液喷口的热液流体的盐度都有很大的变化,热液体系深部的流体可能有蒸汽相和卤水相等不同的状态,活动方式也各有差异^[19~21]。J. L. Bischoff 等^[19]发展了简单海水对流循环模式,提出了双扩散对流循环模式:热液循环体系由两个垂向分离的对流循环胞组成,下部的高密度卤水层加热并驱动上部海水为主的热液流体对流循环;卤水层的形成与下渗到深部的流体的相分离有关,还可能岩浆流体的参与。氧同位素数据证明了纵向分布的上述两个单独的热液系统的存在^[22];Hou 等^[23]对我国呷村黑矿型块状硫化物矿床的研究也

为这一模式提供了证据。

只有对现代洋壳的构造、流体在其中的分布和活动规律进行深入的研究,才能对热液循环体系及其活动过程有更加深刻的认识。大洋钻探计划已积累了一些海水在洋壳中下渗深度与流体分布的资料^[24],通过地球化学和同位素方法建立了示踪流体运动过程的模型^[25]。流体在洋壳中对流循环必然造成洋壳岩石地球化学性质的变化和围岩蚀变,除典型的筒状蚀变外,块状硫化物矿床普遍发育半整合型或层控型的热液蚀变^[1,15,26,27],对它们的研究是近年来块状硫化物矿床中的一个热点问题。

4 流体来源与混合作用

流体来源是与热液循环系统密切相连的一个问题。由于块状硫化物矿床形成于海底环境,因此不论是简单的对流循环模式还是双扩散对流模式,海水都是流体最为重要的组分,但海水是否是唯一的流体来源却是争论的焦点。H. Ohmoto 等^[28]在研究日本黑矿时发现矿石的流体包裹体的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值和盐度与正常海水非常相近,因而认为成矿流体来自海水:海水在深部循环通过火山岩时获得了金属元素和硫等成分。后来的研究发现,成矿流体的 $\delta^{18}O$ 普遍是高正值,特别是前寒武纪的块状硫化物矿床成矿流体的 $\delta^{18}O$ 高达 5‰~9‰(如加拿大 Kidd Creek 矿床)^[29]。现代海底热液流体中也有类似情况,如 Okinawa Trough 成矿流体 $\delta^{18}O$ 为 8‰~9‰^[30]。对于这种高 $\delta^{18}O$ 值,有人^[29,31]认为是岩浆水的参与,但 H. Ohmoto 等^[32]认为用海水与火山岩间的反应也能解释。对现代海底热液流体的对比研究表明,太平洋、大西洋与印度洋各处热液喷口的流体组成与性质均非常一致^[5],再次证明了海水在流体组成中占据主导地位。

考虑到块状硫化物矿床与大地构造及深部岩浆活动的密切联系,岩浆来源的流体也可能对块状硫化物矿床成矿有所贡献^[30,33,34]。近年来,岩浆流体活动证据的找寻工作已取得某些进展。现代海底喷发热液中稀有气体组分的分析表明,热液流体的氦同位素组成 ($^3He/^4He$) 具有幔源特征,如印度洋中脊 R/R_0 值达 7.8~8.0^[5],Okinawa Trough 黑烟囱流体 R/R_0 值为 6.5。氦同位素组成在深部浸染状-脉状的硫化物中高达 12.3~29.3,并表现出从深

部向上逐渐降低的规律^[35]。Li 等^[36]指出,黑矿矿石的稀有气体 75%来自岩浆,并据此推断岩浆来源的流体参与了黑矿的成矿作用。Yang 等^[37~39]对与现代海底热液成矿紧密相关的容矿火山岩(玄武岩、枕状熔岩等)中的熔融包裹体的系列研究获取了岩浆挥发分形成独立流体相,并在其中富集多种金属元素的证据。V. S. Kamenetsky 等^[40,41]指出这些流体很可能参与到金属硫化物成矿过程之中。对黑烟囱流体的实地观测表明,火山活动对喷发流体的成分有明显影响,热液在深部很可能发生过蒸汽相和卤水相的分离,低盐度的蒸汽相将迅速喷发,而卤水相则会在热液体系保持较长时间^[20,21,42]。

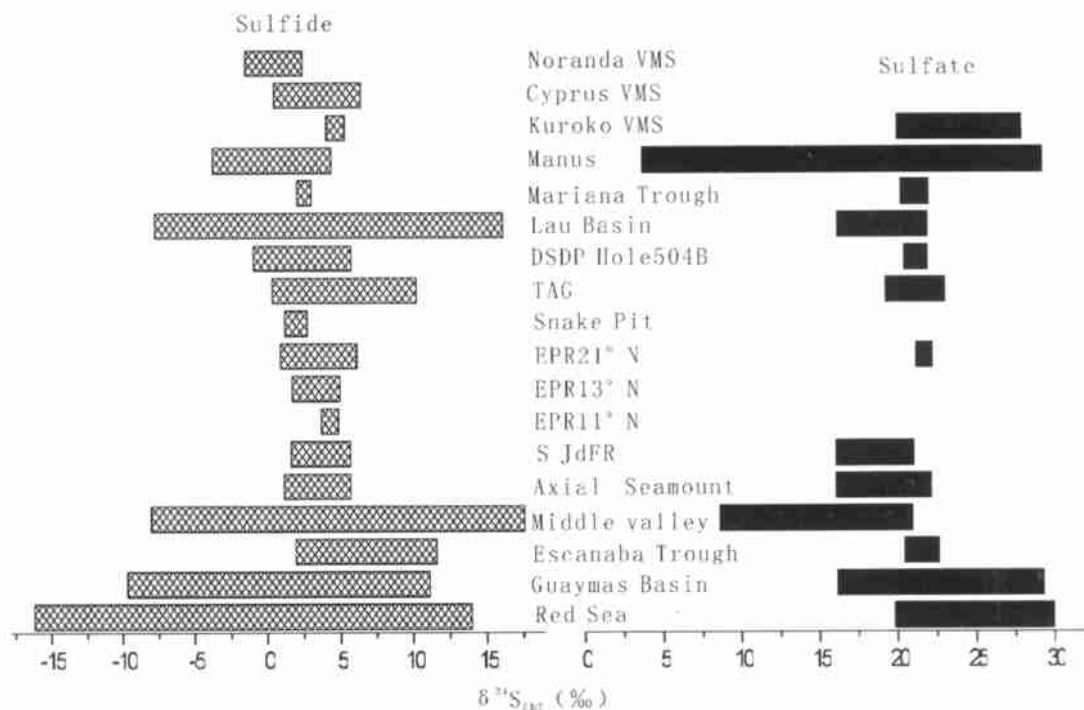
黑烟囱流体是一种高温(200~350℃)、酸性、富含多种金属元素(如 Cu、Zn、Pb、Mn、Ba、K、Fe 等)的还原流体,其盐度和溶解的气体组分通常与海水有明显的差别^[5]。对古代块状硫化物矿床成矿流体的研究表明其性质与现代海底黑烟囱流体非常相似,它与海水一同构成了硫化物堆积成矿过程中最主要的两种流体端员^[15]。流体混合作用对金属硫化物的沉积和堆积成矿有着重要作用。热液流体在洋底喷出时,与周围的海水发生混合,造成热液流体温度骤降而析出大量金属硫化物。由于从喷口喷溢的热液流体温度盐度和化学组成的差异,它们在喷出后会产生多种形态,黑烟囱、白烟囱最为常见。对现代海底热液矿床矿体内部和深部的研究^[43,44]显示,现代海底硫化物堆积过程实际上就是烟囱生长、倒塌堆积和热液流体在其开放空间充填和交代的过程。总之,流体混合是硫化物堆积理论的基础,海底界面之上悬浮热柱中硫化物的沉积和海底界面及下方的烟囱-丘堤生长共同促成了块状硫化物矿床的形成,而成矿热液温度的演化、不同矿物相的交代置换等过程对块状硫化物矿床的矿体构成与化学分带起着关键作用^[13,32,43~45]。

5 成矿物质来源

这是块状硫化物矿床研究中的一个长期争议的问题。H. Ohmoto 等^[46]认为还原海水硫酸盐和岩浆硫是硫的两种主要来源;岩浆硫可以直接来源于岩浆喷气或从火山岩中淋滤出来。对比不同海底热液区硫化物和硫酸盐的硫同位素组成(图 1)可以看出,各热液活动区硫酸盐矿物的硫同位素组成主要

为 19‰~24‰,海水在其中起主导作用;而硫化物的硫同位素组成多集中于 1‰~9‰,不同热液区乃至同一热液矿床中有较大的差异^[47,48],且硫化物与硫酸盐间的同位素分馏程度也不同,可见各矿床中硫源各异,获取方式也根据具体地质条件而异,如沉积物较多有机质丰富的地层应多考虑生物还原作用,而有膏盐层的地区应考虑其物质溶解对硫源的贡献^[49]。现代海底热液沉积物中硫化物的硫源可

大致分三种类型^[48,50]:1) 以火成岩来源硫为主,并有海水来源硫部分的加入(以 EPR21°N,大西洋中脊 Snake Pit, Axial Seamount 和北胡安德富卡洋脊为代表);2) 以沉积物来源硫为主,并有海水来源硫和有机还原硫的加入(以 Guaymas Basin 为代表);3) 以火山岩来源硫和沉积物来源硫的混合硫为主,并有海水来源硫的部分加入(以 Okinawa Trough 和 Jade 热液活动区为代表)。



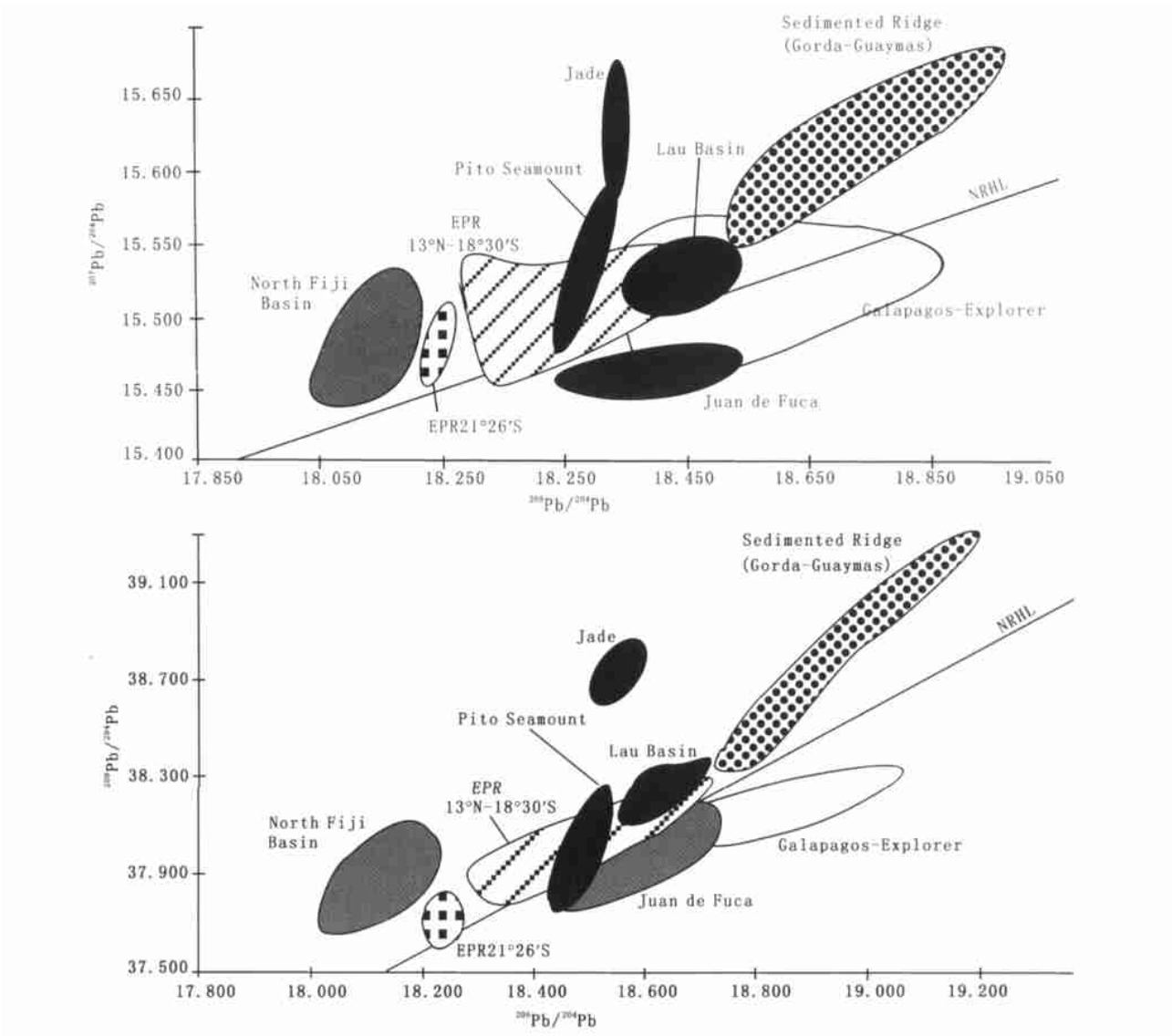
根据文献[28,32,47,48,51~57]中的数据编绘

图1 现代海底热液金属硫化物矿床硫同位素组成对比

Fig. 1 Comparison of sulfide isotopic compositions of modern seafloor massive sulfide deposits

对于成矿金属的来源主要有两种看法:含矿围岩及其下伏基底物质的淋滤^[31,50,58],以及深部岩浆房挥发分的直接释放^[35,59]。一般认为,在有沉积物覆盖的洋中脊,热液沉积物的形成除了与深部岩浆活动有关外,沉积物也为海底热液成矿提供了部分甚至是主要的物质来源;而在无沉积物覆盖的洋中脊,洋脊玄武岩是成矿金属的主要供应者;在弧后盆地环境,有关热液沉积物来源的问题可能更为复杂。对比不同热液活动区硫化物的铅同位素组成(图2)可以看出,铅同位素组成与成矿构造背景、围岩组成和沉积物发育程度等有很好的相关性,具有高放射成因铅的金属成矿作用主要发生在以长英质火山岩为围岩或有沉积物覆盖的区域。基于对各种金属的

热液活动性及不同热液相携运金属能力的研究,许多人认为较易溶元素(如 Pb、Zn、Ag 等)主要来自淋滤,而较难溶元素(如 Cu、Sn、Bi、Mo 等)主要直接来自岩浆^[60]。但是,岩浆体系直接向块状硫化物热液成矿体系提供成矿物质的观点一直缺乏有力的直接证据,只能通过块状硫化物矿床与岩浆热液矿床的相似性推测^[38,61,62]。近年来已有许多研究者利用熔融包裹体进行了一系列精细的研究工作,初步确定了岩浆去气和流体-熔体不混溶过程中各种金属的活动性及分配情况^[37~41]。研究表明,岩浆演化过程中能够形成富含各种成矿金属的独立流体相,因而岩浆体系对成矿在物质方面的直接贡献越来越被研究者所重视。



根据文献[54,63~67]中的数据编绘

图 2 现代海底热液金属硫化物矿床铅同位素组成对比

Fig. 2 Comparison of lead isotopic compositions of modern seafloor massive sulfide deposits

6 热液活动与海底生物圈

现代海洋地质调查取得的另一个重大突破是海底生物圈的发现。通过洋底观测和大洋钻探,在洋底沉积物、洋壳玄武岩中陆续发现了大量细菌活动的证据^[8,48]。而直接在海底喷发的高温黑烟囱流体及其周围的化能自养细菌与生物群落的发现无疑具更深远的意义。1977 年,首次在加拉帕戈斯隆起 2500 m 水深处发现了热液喷口附近密集的生物群体,随后又在 TAG 和 EPR 等现代海底热液活动区发现了与热液喷口对应的“热液生物”群体^[69~72]。

嗜热硫还原性细菌与生物群落的存在可能对金属硫化物矿床的形成有一定的作用,生命活动可能会促进海水硫酸盐还原与热液流体中金属元素的积聚。研究证实低温条件下的细菌作用能使硫化物很大程度的富集^[73,74]。尽管高温热液条件下细菌作用可能会有差异,微生物成矿作用仍然可能发生,如 Okinawa Trough 中重晶石相对比海水富集重硫,表明海水硫酸盐发生过部分还原,很可能与硫杆菌属细菌的作用有关^[57];C. Verati 等^[75]报道了黑烟囱中细菌活动的证据,黑烟囱表面附着一层不足 20 μm 厚、表面和内部都密集分布着微生物印痕的薄

层;有的研究者^[76]报道澳大利亚皮尔巴拉克拉通太古代块状硫化物矿床中发现黄铁矿化的丝状结构,认为这很可能是古老的线形微生物的遗迹。

“黑烟囱”中的生命群落与陆地-浅海光合作为基础的生命体系有根本区别,它们形成以嗜热硫还原细菌为基础生产力的食物链,构成一个自养自给的共生系统,目前认为海底热液是其营养物质的初始来源。DNA 研究表明,这些在热液活动的极端条件(通常为高温、高压及一定酸性条件)下生存的微生物很可能是已知最古老生命的子遗,有助于了解地球生命的演化与起源^[7,71]。“生命起源于黑烟囱”是一个很有吸引力也极具挑战性的假说。

7 结 论

(1) 块状硫化物矿床主要产于大洋中张裂性的构造活动边界,矿床类型和特征受到构造背景和演化程度的控制。

(2) 流体在洋壳内的对流循环是块状硫化物成矿过程的核心,流体体系可能具有复杂的双层结构。

(3) 成矿流体和成矿物质具多源性,岩浆来源的物质可能对部分块状硫化物矿床的成矿有重要作用。

(4) 块状硫化物矿床与大洋底最为强烈的热液活动紧密相关,它们可能是大洋地壳深部乃至地幔的热量和化学物质外释的产物,因此对块状硫化物矿床深部流体系统、物质与流体来源等问题的深入研究具有重要意义。大洋底的现代热液活动与金属硫化物矿床是探索上述问题最为理想的窗口。

(5) 在大洋底热液活动区发现的大量生命活动与生物群体为我们提供了了解古老生命起源和演化发展的一条可能的途径。

参考文献 (Reference):

- [1] Franklin J M, Sangster D F, Lydon J W. Volcanic-associated massive sulfide deposits [J]. *Economic Geology*, 1981, (75th Anniv.): 485 - 627.
- [2] Lydon J W. Volcanogenic massive sulfide deposits, Part 1: a descriptive model [J]. *Geoscience Canada*. 1984, 11: 195 - 202.
- [3] Rona P A, Scott S D. A special issue on seafloor hydrothermal mineralization: New perspectives [J]. *Economic Geology*, 1993, 88: 1935 - 1976.
- [4] Herzig P M, Hannington M D. Polymetallic massive sulfide at the modern seafloor: a review [J]. *Ore Geology Review*, 1995, 10: 95 - 115.
- [5] Gamo T, Chiba H, Yamanaka T, Okudaira T, Hashimoto J, Tsuchida S, Ishibashi J, Kataoka S, Tsunogai U, Okamura K, Sano Y, Shinjo R. Chemical characteristics of newly discovered black smoker fluids and associated hydrothermal plumes at the Rodriguez Triple Junction, Central Indian Ridge [J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2001, 193: 371 - 379.
- [6] 吴世迎. 世界海底热液硫化物资源 [M]. 北京: 海洋出版社, 2000.
- Wu Shiyang. The hydrothermal sulphide resource at sea floor of the world [M]. Beijing: Oceanic Press, 2000. (in Chinese)
- [7] Tunncliffe V, Fowler C M R, McArthur A G. Plate tectonic history and hot vent biogeography. In: Macleod C J, Tayler P A and Walker C L (eds.). *Tectonic, magmatic, hydrothermal and biological segmentation of mid-ocean ridges* [J]. *Geological Society Special Publication*, 1996, 118: 225 - 238.
- [8] Parkes R J, Cragg B A, Wellsbury P. Recent studies on bacterial populations and processes in subseafloor sediments: A review [J]. *Hydrogeological Journal*, 2000, 8: 160.
- [9] Rona P A. Marine minerals for the 21st century [J]. *Episodes*, 2002, 25: 2 - 12.
- [10] Krivtsov A I. Ore-forming environment and condition of massive sulfide deposit on ancient and modern [J]. *International Geology Review*, 1987, 29(11 - 12): 1425 - 1437.
- [11] Lizasa K, Fiske R S, Ishizuka O, Yuasa M, Hashimoto J, Ishibashi J, Naka J, Horii Y, Fujiwara Y, Imai A, Koyama S. A kuroko-type polymetallic sulfide deposit in a submarine silicic caldera [J]. *Sci.*, 1999, 283: 975 - 977.
- [12] Fouquet Y, Stackberg U V, Charlou J L, Erzinger J, Herzig P M, Muhe R, Wiedicke M. Metallogenesis in back-arc environments: The Lau Basin example [J]. *Econ. Geol.*, 1993, 88: 2154 - 2181.
- [13] 侯增谦, 莫宣学. 现代海底热液成矿作用研究现状及发展方向 [J]. *地学前缘*, 1996, 3(3 - 4): 263 - 273.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue. The present and future investigation of the modern seafloor hydrothermal processes and mineralization [J]. *Earth Science Frontier*, 1996, 3(3 - 4): 263 - 273. (in Chinese with English abstract).
- [14] 侯增谦, 浦边澈郎. 古代与现代海底黑矿型块状硫化物矿床矿石地球化学比较研究 [J]. *地球化学*, 1999, 25(3): 228 - 241.
- Hou Zengqian, Urabe T. A comparative study on geochemistry of sulfide ores from Kuroko-type deposits on ancient and modern seafloor [J]. *Geochimica*, 1999, 25(3): 228 - 241. (in Chinese with English Abstract)
- [15] 顾连兴. 块状硫化物矿床研究进展评述 [J]. *地质论评*, 1999, 45(3): 265 - 275.
- Gu Lianxing. Advances in research on massive sulfide deposits: A review [J]. *Geology Review*, 1999, 45(3): 265 - 275. (in Chinese with English abstract)
- [16] Sawkins F J. Integrated tectonic-genetic model for volcanic-hosted massive sulfide deposits [J]. *Geology*, 1990, 18: 1061 - 1064.

- [17] Lydon J W. Volcanogenic massive sulfide deposits, Part 1: Genetic model[J]. *Geoscience Canada*, 1988, 15: 43 - 65.
- [18] Cathles L M. A capless 350 °C flow zone model to explain megaplumes, salinity variations, and high-temperature veins in Ridge Axial hydrothermal system [J]. *Econ. Geol.*, 1993, 88: 1977 - 1988.
- [19] Bischoff J L, Rosenbauer R J. Salinity variation in submarine hydrothermal systems by layered double-diffusive convection [J]. *Journal of Geology*, 1989, 97: 613 - 623.
- [20] Cowan J, Cann J. R. Supercritical two-phase separation of hydrothermal fluids in the Troodos ophiolite [J]. *Nature*, 1988, 333: 259 - 261.
- [21] Von Damm K L, Buttermore L G, Oosting S E, Bray A M, Fornari D J, Lilley M D, Shanks W C, et al. Direct observation of the evolution of a seafloor "black smoker" from vapor to brine [J]. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 1997, 149: 101 - 111.
- [22] Gregory R T, Taylor H P Jr. An oxygen isotope profile in a section of Cretaceous oceanic crust, Samail Ophiolite, Oman: Evidence for $\delta^{18}\text{O}$ buffering of the oceans by deep (> 5 km) seawater-hydrothermal circulation at mid-ocean ridges [J]. *Geophys. Res.*, 1981, 86: 2737 - 2755.
- [23] Hou Z, Mo X, Urabe T. Double convective hydrothermal system beneath massive sulfide orebody of Gacun deposit, southwestern China [J]. *Geoscience*, 1995, 6(2): 230 - 246.
- [24] Villinger H, Geryemeyer I, Kaul N, Hauschild J, Pfender M. Hydrothermal heat flux through aged ocean crust: Where does the heat escape? [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, 202: 159 - 170.
- [25] James R H, Rudnicki M D, Palmer M R. The alkali element and boron geochemistry of the Escanaba trough sediment-hosted hydrothermal system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171: 157 - 169.
- [26] Galley A G. Characteristics of semiconformable alteration zones associated with volcanogenic massive sulfide districts [J]. *J. Geochemical Exploration*, 1993, 48: 175 - 200.
- [27] Skirrow R G, Franklin J M. Silification and metal leaching in semiconformable alteration beneath the Chisel Lake massive sulfide deposit, Snow Lake, Manitoba [J]. *Economic Geology*, 1994, 89: 31 - 50.
- [28] Ohmoto H, Skinner B J. The Kuroko and related volcanogenic massive sulfide deposit [J]. *Economic Geology (Monograph)*, 1983, (5): 604.
- [29] Beatty D W, Taylor H P. Some petrologic and oxygen isotopic relationships in the Amulet mine, Noranda, Quebec, and their bearing on the origin of Archean massive sulfide deposits [J]. *Econ. Geol.*, 1982, 77: 95 - 108.
- [30] 侯增谦, 艾永德, 曲晓明, 张琦玲, 唐绍华. 岩浆流体对冲绳海槽海底成矿热水系统的可能贡献 [J]. *地质学报*, 1999, 73(1): 57 - 65.
- Hou Zengqian, Ai Yongde, Qu Xiaoming, Zhang Qiling, Tang Shaohua. Possible contribution of magmatic fluids to seafloor ore-forming hydrothermal system in the Okinawa Trough [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(1): 57 - 65. (in Chinese with English Abstract).
- [31] Manha J, Barriga F, Jas, Kerrich R. High O ore-forming fluids in volcanic-hosted base metal massive sulfide deposits: geologic, O , ^{16}O and D/H evidence from the Iberian pyrite belt, Crandon, Wisconsin and Blue Hill, Maine [J]. *Econ. Geol.*, 1986, 81: 543 - 552.
- [32] Ohmoto H. Formation of volcanogenic massive sulfide deposits: The Kuroko perspective [J]. *Ore Geology Review*, 1996, 10: 135 - 177.
- [33] Urabe T. Kuroko deposit modeling based on magmatic hydrothermal theory [J]. *Mining Geology*, 1987, 37: 159 - 175.
- [34] Hedenquist J W, Lowenstern J B. The role of magma in the formation of hydrothermal deposits [J]. *Nature*, 1994, 370: 519 - 527.
- [35] 侯增谦, 李延河, 艾永德, 唐绍华, 张琦玲. 冲绳海槽活动热水成矿系统的氦同位素组成: 幔源氦证据 [J]. *中国科学(D 辑)*, 1999, 29(2): 155 - 162.
- Hou Zengqian, Li Yanhe, Ai Yongde, Tang Shaohua, Zhang Qiling. He isotopic composition of the active hydrothermal system in Okinawa trough: Evidence for magmatic helium [J]. *Science in China(D)*, 1999, 29(2): 155 - 162. (in Chinese).
- [36] Li B, Manuel O K. A noble gas technique for the identification of mantle and crustal material and its application to the Kuroko deposits [J]. *Geochem*, 1994, 28: 47 - 69.
- [37] Yang K, Scott S D. Possible contribution of a metal-rich magmatic fluid to a seafloor hydrothermal system [J]. *Nature*, 1996, 383: 420 - 423.
- [38] Yang Kaihui. Magmatic fluids and mineralization-observations of subaerial volcanic-hydrothermal processes, black smokers on modern seafloor and melt inclusion studies [J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(3): 7 - 30.
- [39] Yang K, Scott S D. Magmatic degassing of volatiles and metals into a hydrothermal systems on the modern seafloor of the eastern Manus back-arc basin, western Pacific [J]. *Econ. Geol.*, 2002, 97: 1079 - 1100.
- [40] Kamenetsky V S, Binns R A, Gemmell J B, et al. Parental basaltic melts and fluids in eastern Manus back-arc basin: implications for hydrothermal mineralization [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, 184: 685 - 702.
- [41] Kamenetsky V S, Davidson P, Mernagh T P, Crawford A J, Gemmell J B, Portnyagin M V, Shinjo R. Fluid bubbles in melt inclusions and Pillow-rim glasses: high-temperature precursors to hydrothermal fluid? [J]. *Chemical Geology*, 2002, 183: 349 - 364.

- [42] Butterfield D A, Massoth G J. Geochemistry of north Cleft segment vent fluids: temporal changes in chlorinity and their possible relation to recent volcanism [J]. *J. Geophys. Res.*, 1994, 99: 4951 - 4968.
- [43] Humphris S E, Herzig P M, Miller D J, *et al.* The internal structure of an active seafloor massive sulphide deposit [J]. *Nature*, 1995, 377: 713 - 716.
- [44] Zierenberg R A, Fouquet Y, Miller D J, Bahr J M, Baker P A, Bjerkgaard T, Brunner C A, Duckworth R C, Gable R, Gieskes J, Goodfellow W D, Groschel-Becker H M, Guerin G, Ishibashi J, Iturrino G, James R H, Lackschewitz K S, Marquez L L, Nehlig P, Peter J M, Rigsby C A, Schultheiss P, Shanks W C, Simoneit B R T, Summit M, Teagle D A H, Urabe M, Zuffa G G. The deep structure of a sea-floor hydrothermal deposit [J]. *Nature*, 1998, 392: 485 - 488.
- [45] Teagle A H, Ati J C, Chiba H, Humphris S E, Halliday A N. Strontium and oxygen isotopic constrains on fluid mixing, alteration and mineralization in the TAG hydrothermal deposit [J]. *Chemical Geology*, 1998, 149: 1 - 24.
- [46] Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits [J]. *Review of Mineralogy*, 1983, 16: 491 - 560.
- [47] Herzig P M, Hannington M D, Amba A Jr. Sulfur isotopic composition of hydrothermal precipitates from the Lau back-arc: implication for magmatic contributions to seafloor hydrothermal systems [J]. *Miner Deposita*, 1998, 33: 226 - 237.
- [48] 曾志刚, 蒋富清, 秦蕴珊, 翟世奎. 现代海底热液沉积物的硫同位素组成及其地质意义[J]. *海洋学报*, 2001, 23(3): 48 - 56.
- Zeng Zhigang, Jiang Fuqing, Qin Yunshan, Zhai Shikui. Sulfide isotopic composition of modern seafloor hydrothermal sediment and its geologic significance [J]. *Acta Oceanol. Sinica*, 2001, 23(3): 48 - 56. (in Chinese with English abstract)
- [49] Huston D L. Stable isotopes and their significance for understanding the genesis of volcanic-hosted massive sulfide deposits: a review [J]. *Review in Econ. Geol.*, 1999, 8: 157 - 179.
- [50] 曾志刚, 秦蕴珊, 翟世奎. 现代海底热液多金属硫化物的成矿物源: 同位素证据 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2000, 19(4): 428 - 430.
- Zeng Zhigang, Qin Yunshan, Zhai Shikui. Sources of ore-forming materials of modern seafloor hydrothermal sulfides: isotopic evidence [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2000, 19(4): 428 - 430 (in Chinese with English abstract).
- [51] Collinson T B. Hydrothermal mineralization and basalt alteration in stockwork zones of the ayda and Lasail massive sulfide deposits, Oman ophiolite [D]. Santa Barbara: University of California, 1986.
- [52] Kusakabe M, Mayeda S, Nakamara E. S, O and Sr isotope systematics of active vent materials from the Mariana backarc basin spreading axis at 18°N [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, 100: 275 - 282.
- [53] Peter J M, Shanks W C. Sulfur, carbon and oxygen isotope variations in submarine hydrothermal deposits of Guaymas Basin, Gulf of California [J]. *Geochimica Cosmochimica et Acta*, 1992, 56: 2025 - 2040.
- [54] Zierenberg R A, Koshi R A, Morton J L, Bouse R M. Genesis of massive sulfide deposits on a sediment-covered spreading center, Escanaba Trough, southern Gorda Ridge [J]. *Econ Geol*, 1993, 88: 2069 - 2098.
- [55] Shanks W C, Seyfried W E Jr. Stable isotope studies of vent fluids and chimney minerals, Southern Juan de Fuca Ridge: Sodium metasomatism and seawater sulfate reduction [J]. *Geophysical Research*, 1994, 139: 387 - 392.
- [56] Hannington M D, Galley A G, Herzig P M, Petersen S. Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposit [J]. *Proceeding of ODP Scientific Result*, 1998, 158: 394 - 415.
- [57] Luders V, Pracejus B, Halbach P. Fluid inclusion and sulfur isotope studies in probable modern analogue Kuroko-type ores from the JADE hydrothermal field (central Okinawa Through, Japan) [J]. *Chemical Geology*, 2001, 173: 45 - 58.
- [58] Stoltz A J, Large R R. Evaluation of the source control on precious metal grade in volcanic-hosted massive sulfide deposits from western Tasmania [J]. *Economic Geology*, 1992, 87: 720 - 738.
- [59] Urabe T, Mamumo K. A new model for Kuroko-type deposits of Japan [J]. *Episode*, 1991, 14(3): 246 - 251.
- [60] Large R R. Australian volcanic-hosted massive sulfide deposits: features, styles and genetic models [J]. *Econ Geo*, 1992, 187: 471 - 510.
- [61] Rye R O. The evolution of magmatic fluids in the epithermal environment: the stable isotope perspective [J]. *Econ. Geol.*, 1993, 88: 733 - 753.
- [62] Rubin K. Degassing of metals and metalloids from erupting seamount and mid-ocean ridge volcanoes: observations and predictions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(17): 3525 - 3542.
- [63] Le Huray A P, Church S E, Koshi R A, Bouse R M. Pb isotopes in sulphides from mid-ocean ridge hydrothermal sites [J]. *Geology*, 1988, 16: 362 - 365.
- [64] Fouquet Y, Marcoux E. Lead isotope systematics in pacific hydrothermal sulfide deposits [J]. *Geophys. Res.*, 1995, 100: 6025 - 6040.

- [65] Halbach P, Hansmann W, Koppel V, Pracejus B. Whole-rock and sulfide lead-isotope data from the hydrothermal JADE field in the Okinawa back-arc trough [J]. *Mineral Deposit*, 1997, 32: 70 - 78.
- [66] Verati C, Lancelot J, Hekinian R. Pb isotope study of black-smokers and basalts from Pito Seamount Site (easter microplate) [J]. *Chemical Geology*, 1999, 155: 45 - 63.
- [67] 曾志刚, 蒋富清, 翟世奎, 秦蕴珊. 冲绳海槽 Jade 热液活动区块状硫化物的铅同位素组成及其地质意义 [J]. *地球化学*, 2000, 29(3): 239 - 245.
Zeng Zhigang, Jiang Fuqing, Zhai Shikui, Qin Yunshan. Lead isotope composition of massive sulfides from the Jade hydrothermal field in the Okinawa trough and its geological implications [J]. *Geochimica*, 2000, 29(3): 239 - 245 (in Chinese).
- [68] Fisk M R, Giovannoni S J, Thorseth I H. Alteration of oceanic volcanic glass: textural evidence of microbial activity [J]. *Science*, 1998, 281: 978 - 980.
- [69] GYAMA Scientific Team. Massive deep-sea sulfide ore deposits discovered on the East Pacific Rise [J]. *Nature*, 1979, 277: 523 - 528.
- [70] Karl D M, Wirsén C O, Jannasch H W. Deep-sea primary production at the Galapagos hydrothermal vents. *Science*, 1980, 207: 1345 - 1347.
- [71] Tunncliffe V. The biology of hydrothermal vents: ecology and evolution [J]. *Oceanogr. Mar. Bio. Annu. Rev.*, 1991, 29: 319 - 407.
- [72] Murton B J, Klinkhammer G, Becker K, Briaux A, Edge D, Hayward N, Millard N, Mitchell J, Rouse I, Rudnicki M, Sayanagi K, Sloan H, Parson L M. Direct evidence for the distribution and occurrence of hydrothermal activity between 27° - 30° N on the Mid-Atlantic Ridge [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1994, 125: 119 - 128.
- [73] Labrenz M, Druschel G K, Thomsen-Ebert T, Gilbert B, Welch S A, Stasio G D, Bond P L, Lai B, Kelley S D, Banfield J F. Formation of sphalerite (ZnS) deposits in natural biofilms of sulfate-reducing bacteria [J]. *Science*, 2000, 290: 1744 - 1747.
- [74] Druschel G K, Labrenz M, Thomsen-Ebert T, Fowle D A, Banfield J F. Geochemical modeling of ZnS in biofilm: An example of ore depositional progresses [J]. *Econ. Geol.*, 2002, 97: 1319 - 1329.
- [75] Verati C, Donato P, Prieur D, Lancelot J. Evidence of bacterial activity from micrometer-scale layer analyses of black-smoker sulfide structures (Pito Seamount Site, Easter micro-plate) [J]. *Chemical Geology*, 1999, 158: 257 - 269.
- [76] Rasmussen B. Filamentous microfossils in a 3235-million-year-old volcanogenic massive sulphide deposit [J]. *Nature*, 2000, 405: 676 - 679.

Modern Sea-floor Hydrothermal Activity and Genesis of Massive Sulfide Deposits: An Overview

DAI Bao-zhang, ZHAO Kui-dong, JIAN G Shao-yong

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research,

Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract: The discovery of modern sea-floor hydrothermal activity and the study on their distribution and genetic models represent a major achievement in marine geology and economic geology. The study on modern sea-floor metallic sulfide deposits promoted and advanced the theory on genesis of ancient massive sulfide deposits. In summary, the major advances in this field include: (1) a hydrothermal convective system beneath the deposit is essential for massive sulfide deposition, and simple convection and double-diffusive convection are the two main models; (2) massive sulfide deposits mainly occur near margin of active plates, and their formation is closely related to tectonic movement; (3) both the ore-forming fluid and the metals show various sources, although the major fluid source is seawater that recycled in and leached metals from the sedimentary and volcanic host rocks, direct contributions of magmatic materials (fluid and metals) to massive sulfide deposit are recently proposed with the application of new technology and method such as melt-inclusion study; (4) life activity and biological populations have been found recently in areas of hydrothermal vent and metallic sulfide deposits, which is of great significance in science.

Key words: sea-floor hydrothermal activity; massive sulfide deposits; ore-genesis; life activity