

· 区域矿产 ·

现代洋底成矿作用及它对石化矿床研究的启示

马文璞

(中国地质大学, 北京)

摘要 洋底大规模热水环流系和富金属堆积的存在是近年来人类重大发现之一, 它们沿快速扩展的东太平洋中脊分布。作为金属来源的新生玄武质洋壳、由地壳拉伸出现的裂隙系和驱动海水环流的热源是矿床生成的三个必要条件。但此类生成物能否存留下来还取决于洋流是否发育, 陆源沉积的补给程度等其他因素。综合起来, 像红海, 加利福尼亚湾等裂陷早期的伸展小洋盆和弧后盆地对此类矿床的寻找最为有利。现代洋底热液成矿作用的发现对陆上石化矿床研究的启示在于, 只要条件具备, 陆壳范围内也可以出现类似的成矿作用, 华南和秦岭中、晚泥盆世的层控矿床即其实例。

洋底大规模热液对流系, 即黑烟囱的发现是近十几年来重大科学发现之一。它彻底改变了原来认为的大洋底是一个黑暗、寂静、接近冰点的寒冷世界, 观察到那里实际上是热与金属的源泉, 洋底高温热水系不仅形成有工业价值的矿床堆积, 而且还深刻影响到全球的大洋水化学; 与热水场共生的奇特生物群落更揭示出除了光合作用以外, 还存在着化学合成机制形成的生物链。这些发现大大开阔了对成矿作用的了解, 促使人们重新考虑陆地上层控热液矿床的成因; 不同类型热水场在洋中脊上的分布, 还提供了板块扩展作用速度、海底地貌和洋脊下岩浆囊规模之间可能的相互关系。

1 洋底探测简史和黑烟囱的发现

洋底富金属堆积是1963年联邦德国对红海考察期间首次发现的, 那里仍然是迄今全世界已知海底扩展中心最大的金属矿床所在地^[9]。多金属硫化物沿红海轴部分布, 最大的一处矿床位于麦加正西的 Atlantis 二号深渊中。那里水深2000m, 底部为盐度120‰, 温度超过60℃的热卤水。矿体直径7km, 层状。金属储量约有一亿吨, 其中包括29%的铁、2~5%的锌、0.3~0.9%的铜、60ppm的银(共6000t)和0.5ppm的金(共50t)。1972年《发现者》号在执行横穿大西洋地质剖面计划(TAG)时, 在25°N大西洋中脊南部裂谷的东壁采到富氧化锰矿石, 其品位达50%。与此同时深海钻探也在印度洋和大西洋的其他地点发现了类似的网脉状铜铁硫化物, 证明这些富金属沉积也存在于其他各大洋中。

人类首次根据实地观察对洋底地形和构造进行制图, 是1973—1974年FAMOUS计划(法美联合洋底研究)期间实现的。当时第一次使用了深潜器对亚速尔群岛西南36°50'N

附近的大西洋中脊一小片地区作了详细的考察,结果发现了强烈的正断作用和熔岩喷发痕迹,岩墙和岩床的贯入也只限于海岭狭窄的中央轴带中,其宽度稍大于1 km。

七十年代中期以后,主要工作转移到快速扩展的东太平洋中脊。依据近底层水样温度增高和 ^3He 异常的测定,1977年 Corliss 等首次使用了新型深水检测装置 Deep Tow 和重达 1.5 t 的大视域水下摄影系统 ANGUS。前者配有摄像机、声纳、压力、水温和电导率探头,能识别 0.1℃ 的温差和 ^3He 浓度不同的热液成因水,并进行采样;后者配有声纳导航系,以每小时 4 km 的速度在海底以上 20 m 高度巡航,每 10 s 拍摄一张彩色照片,同时记录时间。在它们的帮助下,阿尔文号深潜器在加拉帕戈斯群岛东北 280 km 的赤道长 24 km 一段、水深 2500 m 的中脊顶部直接观察到了四组热泉,以及与之共生的生物群落和富铁锰堆积。但热水的温度较低,最高的不过 17℃。同年另一美国小组在加尼福利亚湾轴部 27°N 的瓜伊马斯 (Guaymas) 盆地底部发现了高达 20 m 的塔状金属硫化物丘。当热水流经富含有机质沉积的地方,有机质被裂解,生成的气体和石油浸渍着沉积物,并形成气泡和小液泡从海底袅袅上升。

1978 年法美墨西哥联合小组在 21°N 的东太平洋中脊上也发现了富金属沉积物丘并采了样,从而第一次证实了这种产状的块状硫化物矿体。第二年他们重返同一地区,在 Deep Tow 和 ANGUS 的帮助下终于发现了温度高达 350℃ 的含金属热泉。热液清冽、酸性,当它与周围的冷海水混合时,铜、铁、锌硫化物就成黑色微粒析出,并悬浮在不断上涌的液柱内,结果成为黑色流体,汹涌地从烟囱状的喷口中溢出。在深海底的巨大水压下,烟柱仍可高达 40~50 m。黑烟囱 (black smokers) 的名称由此而来 (图 1)。1982 年在 13°N, 1984 年在 10°56' N 的东太平洋中脊也分别发现了同样的产物,从而证明热水环流系在东

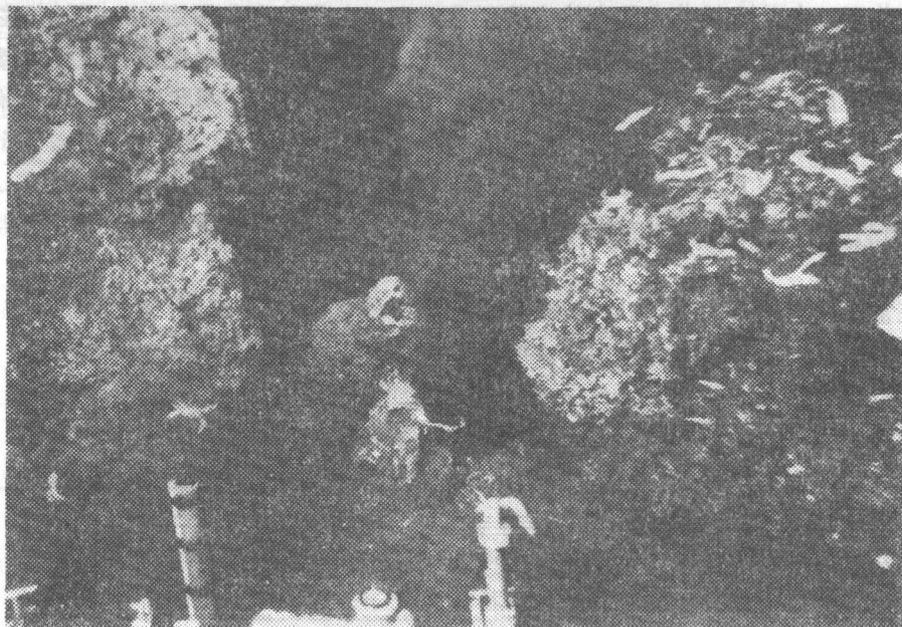


图 1 含矿的热水柱正从矿化的烟囱中涌出
(据 Press, 1982)

Fig. 1 Outpouring of the mineralizing thermal plume
from the mineralizing chimney.

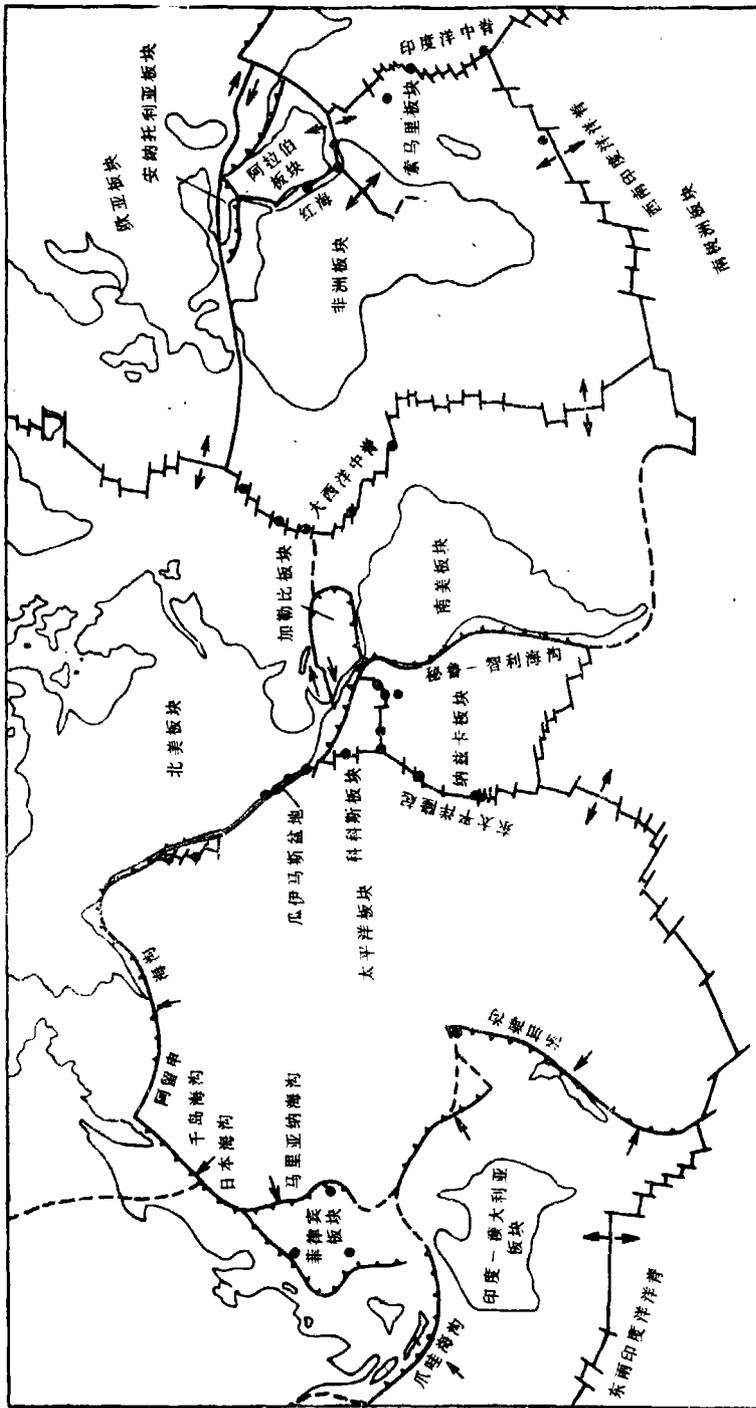


图 2 全球洋底热卤水形成的矿床分布示意图
 (据 Rona, 1986)
 Fig. 2 Diagram showing the distribution of the deposits formed
 by global submarine thermal brines.

太平洋中脊部位的普遍存在。图 2 是至 1986 年全世界已发现的洋底富金属堆积的分布。可以看出它们绝大多数与离散板块边界（包括弧后盆地）有关。

2 轴部裂谷的形态和结构

大洋中脊是新生洋壳诞生的场所，七十年代以前即已发现有两种类型：一种是以慢速扩展为代表的大西洋中脊，其地形起伏大，有明显的轴部裂谷，洋底可以见到各种镁铁质和超镁铁质岩的露头；另一种是快速扩展的东太平洋中脊，其洋底都是玄武质熔岩，地形起伏也较为平缓，被称为中隆。这两类洋脊顶部与上复沉积物之间都发育一层深褐色的非晶质铁锰沉积，由微米级胶状针铁矿、富铁蒙脱石和各种氧化锰组成，称为活动洋脊堆积，就是洋底热液活动的产物。迄今为止，黑烟囱只在快速扩展的东太平洋洋脊上被发现。

21°N 东太平洋中隆轴部裂谷的海底正以每年 6 cm 的速度扩展，大致与人指甲的生长速度相仿。轴部裂谷为一线状地堑，中央宽约 1 km，由非常年青的枕状玄武岩组成，几乎没有沉积覆盖层。向两侧出现大量的裂隙，显示地壳受到了拉伸，裂隙走向总体与裂谷平行，宽度从几厘米到 10 m 以上。再向外侧为轴部裂谷的边界断崖，近直立状，高 20~40 m。热液活动集中在地堑中央的窄带内，成线状分布，总的与地形上的高地一致。从图上可以看出，350℃ 的黑烟囱只出现在该段中脊的中部。沿走向向两侧分别为白烟囱（约 300℃）和温水喷口（约 20℃）所取代。

Ballard (1983)^[10] 用如图 3 所示的模式来解释热液场在中脊上的分布规律：大洋扩展脊的每一段都被转换断层截切而与邻段隔开。由于中脊轴部的新生地壳在与转换断层交切部位沿走向与老得多、也冷得多的洋壳直接接触，所以那里以低凹地形为特征。任何扩

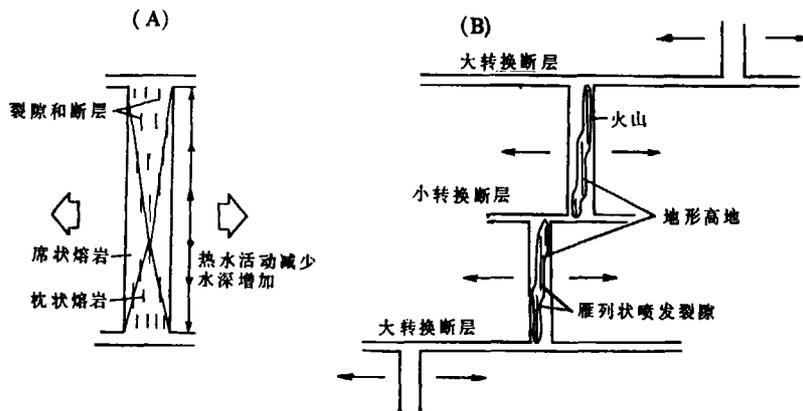


图 3 为转换带所隔开的各中脊段上地形高、火山岩类型和热液活动部位的图解示意，说明见正文

(据 Francheteau 等, 1983)

Fig. 3. Diagram showing the topographic highs, types of volcanics and sites of hydrothermal activities at various segments of the mid-ocean ridge separated by the transform zones.

展脊两端的这种冷却都会引起热梯度沿走向发生变化,并导致在近中部出现热隆起产生高的地形。由于那里的海水与下伏岩浆囊之间的垂直热梯度最大,即盖层最薄、熔岩流溢出的距离也最短,所以那里出现席状岩流。随着远离高地后者就逐渐为枕状岩流所取代。席状和枕状熔岩在这里分别与陆地上地表供应和管道供应的绳状熔岩相对应。这样两种基本熔岩流类型的比值沿走向就发生了变化(图3-A)。热流梯度在地形高处最大,从而决定了热水活动在那里也最强烈,沉淀块状硫化物的黑烟囱主要也出现在那里,沿走向向两端热液温度逐渐变低。按照这一模式,高地的位置并不正好位于该扩展脊段的中点,而是偏于两端转换带中规模较小的一端(图3-B)。21°N与10°56'N中脊上热液场与席状岩流、塌坍的熔岩湖共生以及裂谷轴部缺乏裂隙等,都反映出浅位岩浆源的高热通量补充,从而证明了这个模式。

不仅洋中脊的地貌形态,不同类型洋脊的火山旋回周期和脊下岩浆囊的规模等,都与扩展速度有着密切的关系。快速扩展脊的转换带间距大,脊的构造和火山线性也好,裂谷阶地高差小,一般为100~200m,火山喷发周期50~500a,岩浆囊深度也小,大约2km,顶部平坦且规模较大;与此成为对照,慢扩展脊在密集转换带之间成短雁行状排列,裂谷阶地高差可大到2~3km。火山喷发周期可能长到1000~10000a,所以在空间上彼此远离。脊下岩浆囊深度大而规模小,所以罕见高温热水,如有也可能只位于地壳深处。从现有资料看,地壳在洋中脊处的产生并不是连续的,而是脉动式的。生命活动在慢扩展脊处的缺失看来,反映了那里岩浆活动的频度和持续时间还不足以维持化学合成的底栖动物群落的长期存在。

3 洋底块状硫化物堆积

洋底的热液活动有高温黑烟囱、白烟囱和低温喷泉等三种类型(图4)。富金属沉积主要与前者有关。现以13°N东太平洋中隆处的情况说明它的产状、组分和产率。这是Hekinian等^[10]1982年用赛纳号下潜32次,详细研究了600km²中脊本身及轴外海底山的成果。

10°56'N到13°N之间的东太平洋中隆线性极好,至少连续400km,区域水深2600m,脊宽1.5km,表面起伏平缓。中央轴部裂谷为一线状地堑,走向345°,宽度超过300m,深20~40m,两侧以直立状陡崖为界。组成脊轴的熔岩为橄榄玄武岩,橄榄石富镁,MgO 48.81%。轴部地堑是最新火山活动的场所,也是热液最活跃的地方,它们大多数位于地堑中央附近不到100m宽的窄带内。在20km长、500m宽的范围内共发现了80个以上的热液堆积。总起来说,单个场地成圆锥柱状或不规则的突起,最大的可高达26m,平均直径约5m。上面长满了活动的和不活动的小烟囱,后者高度一般不足2m。这些烟囱有的流出白色流体,有的为黑色流体,流速也不一样。白色流体在喷口上方即迅速散开;可是黑色流体却可上升到喷口上方40~50m处,测算其流速从3.5~14L/s。基底四周堆砌着棱角状的硫化物碎块,它来自坍塌的烟囱,其中有的已被细粒硫化物所胶结,而成0.5m厚的似层状体。

研究小组对两处高温热液场作了定位观察,其中的一处位于席状岩流的顶部,水深

2635~2637m。为一高7~8m的不规则丘状体，基座顶部有几个不到50cm高的活动烟囱，喷出黑色流体。1982，2，19，用每节10cm长的不锈钢链对这座烟囱作了标记，五天以后第二次下潜观察时，发现在原记处上面又长出高约40cm、直径10cm的新的圆柱状管道。与此同时邻近几个原来拆断了的烟囱也全部再生长了。3月4日最后一次去时，烟囱还在长高和变粗，原来单孔口的烟囱现在出现了三个喷口在冒黑色流体，不锈钢链却由于流体的酸性而在短短半个月完全腐蚀了。因此所有轴部地壁及毗邻边缘高地中的硫化物看来都是相当快速，也许是在一、二十天内生成的。在一处烟囱口测得的喷出流体温度为329℃。

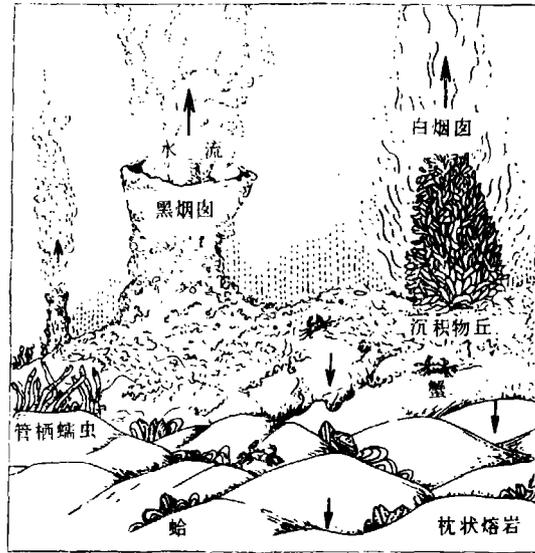


图4 黑烟囱、白烟囱及与之共生的生物群落示意图

(据 Seibold, 1984)

Fig. 4. Diagram showing the black chimney, white chimney and associated biotas.

这些热液堆积都是多金属硫化物。用机械臂对烟囱的采样表明，成分呈同心状分带：内带3~8mm，由黄铜矿组成；中带3~15mm，黄铜矿、黄铁矿共生，以及黄铁矿和硬石膏等；外带不到2mm，为铁硅氢氧化物和硬石膏。各带矿物成分是渐变的，如铜由内向外，从5.34%减到0.30%；锌从烟囱中部40.3%的峰值降到外部的3.95%，反映了热液温度的持续

下降。这里硬石膏最先生成，然后被后继的热液交代而沉淀出金属硫化物。McConachy (1986)发现，活动的黑烟囱几乎全由硬石膏组成，金属含量很少。不活动的黑烟囱则主要由闪锌矿、纤维锌矿、黄铁矿、白铁矿和黄铜矿组成。

一个热液场的平均直径约为50m。沿上述不到100m宽的带内，平均每一到两百米观察到一个。在80多个热液堆积中有24个已不活动。按观测到的五天生长40cm的速度，烟囱的内、外径分别为3和10cm，平均密度2.9g/cm³计，每天可生成约1.6kg金属硫化物。这样一个平均高6m，直径3m，重41吨的大锥状硫化物可望在七十年内形成。这是一个相当高的建造速度。但是正如下节中提到的，这一过程并不连续而且往往是短暂的。这种烟囱状金属矿的品位与陆地上许多古老的块状硫化物矿床相近。太平洋这一部分的一个典型小丘含31%的锌，14%的铁，1%的铜，每吨含五盎司的银，以及痕量的金。总金属含量可达几千吨。

洋底热液堆积并不只限于中脊的轴部裂谷和紧邻裂谷的高地边缘，少数轴外大海底火山上也含有块状硫化物堆积。Bonatti等1982年在东太平洋中隆扩展轴外两座海山顶部的破火口中除见到各种热液堆积外，还惊异地发现闪烁的热液离开喷口后实际上是在向坡下流动，表明这些涌出的流体密度要比周围的冷海水为大。

洋底热液堆积并不只限于中脊的轴部裂谷和紧邻裂谷的高地边缘，少数轴外大海底火山上也含有块状硫化物堆积。Bonatti等1982年在东太平洋中隆扩展轴外两座海山顶部的破火口中除见到各种热液堆积外，还惊异地发现闪烁的热液离开喷口后实际上是在向坡下流动，表明这些涌出的流体密度要比周围的冷海水为大。

4 成矿机制和类型

洋壳富金属沉积是海水与新生洋壳相互作用的产物。海水通过轴部地堑的裂隙下渗,与高温玄武岩相接触,两者间不仅发生热交换,使受热的海水膨胀上涌,形成环流;而且还发生双向的化学交换。镁和硫酸盐从海水中析出,而钙、钡等碱土元素和铜、铁、锌、锰等过渡元素则从地壳中溶解出来,转移到循环的海水中。由于作为金属来源的新生地壳和作为载体的海水都“取之不尽”,这种成矿作用的规模应该是极大的。深海钻探计划在大洋沉积剖面底部,普遍发现有含金属沉积物的存在证明了这一点。

对洋底环境下(500Pa, 200℃)海水与玄武岩作用的实验室模拟揭示出两者间的反应过程。海水中的 Mg^{2+} 与玄武岩中的硅酸盐结合成羟基硅酸盐 $Mg(OH)SiO_3$,同时留下 H^+ 而使溶液变成高度的酸性。海水中的 SO_4^{2-} 由于同火山岩中的 Fe^{2+} 反应而被还原成硫并进一步生成 H_2S 。这些酸性溶液在高温下腐蚀大洋壳,释放出来的Ca与 SO_4 结合生成 $CaSO_4$,以硬石膏形式沉淀下来。硫酸盐与玄武岩中的铁反应还同时生成黄铁矿。由玄武岩中释放出来的呈极低浓度(PPb级)的金属,连同少量从岩浆流体中直接带来的挥发性组分(Sb、As、Hg、Se)与海水中的氯络合物形式被迁移。东太平洋中隆的所有热液中都有高含量的 H_2S ,黑烟囱喷出的高温热液经测定含100PPm的Fe, $n \times 1$ PPm的Zn、Cu、Ni, 210PPm H_2S , 1290PPm SiO_2 ,而不含Mg和 SO_4 ,从而证明了上述反应。由于正常海水中不含 H_2S , Fe、Zn、Cu、Ni的浓度仅为 1×10^{-12} 级,所以上述金属含量表明已富集了 10^8 倍:

使金属从热液中沉淀下来的两种主要机制是混合和沸腾。在水温为350℃水深超过2000m时,由于上复海水的围压阻止了沸腾作用,热液是通过与正常海水混合而温度降低,性质由酸性变成碱性而导致金属迅速沉淀的。在缺氧的还原条件下,金属与硫相结合,生成多金属硫化物;在氧化条件下则与氧、氢氧化物、硅硫酸盐或碳酸盐等结合成相应的金属化合物。在水深小于2000m的情况下,高温热液则通过沸腾作用使含NaCl的液相与保持 H_2S 的气相分离,导致多金属硫化物在海底沉淀。

这种反应的规模可以从下述两个方面估算出来。新生洋壳在海底扩展中心释放出来的热通量可以通过计算得出。这个理论值与在海底实测得出的平均热流值之间存在差额,这个差额被认为是通过对流海水的冷却带出去的。为了携带这一部分热量,通过洋中脊系的流量与整个大洋水每10Ma循环一次所需要的量相当,其规模可与亚马逊河相比。另一方面,有人计算冷却 $350km^3$ 的岩浆可以使 $1000km^3$ 的环流海水(相当于长江的年迳流量)加热到300℃,岩浆中被淋滤出的金属含量若以1PPm计,就意味着一百万吨金属的产出。用这种方式,洋底可以提供比大陆风化作用带来的多5~10倍的锂和铷,1/3到一半的钾、钙、钡和二氧化硅,以及全部铺盖在洋底的锰。从这个角度说,大洋底不仅是热和金属的源泉,洋底热水环流还深刻影响大洋水的化学性质,并完成从 HCO_3^- 逆转为二氧化碳的后一半循环。

洋底热液成矿的三个必要条件是:作为金属来源的围岩,提供运移通道的裂隙系统和驱动海水环流的热源。热有三个来源:(1)正常的地温梯度(对于大洋底而言,其热

流值与洋壳的年龄呈反比关系， $>125\text{Ma}$ 的老洋壳小于 45.86mW/m^2 ， $50\sim 150\text{Ma}$ 的洋壳约 58.34mW/m^2 ， $< 5\text{Ma}$ 的中脊部分大于 125.05mW/m^2 ；（2）浅岩浆囊；和（3）海水与洋壳相互作用产生的某些化学反应。显然这三个条件在大洋中脊处符合得最好。那里的拉张应力场和新生玄武岩由熔融状态冷却收缩还促进了裂隙系在轴部地堑两侧生成，使海水可以渗透过一般厚 6km 的大洋壳而达到下伏地幔。致密的冷海水下渗，加热膨胀后的海水上涌就产生了对流循环（图5）。因此海底扩展中心，如洋中脊或弧后盆地，以及像夏威夷那样的热点中心就成为洋底热液成矿的主要场所。

像夏威夷那样的热点中心就成为洋底热液成矿的主要场所。

Rona (1986) [9] 指出，要使上述成矿作用持续进行下去，需要如下条件的配合：（1）高的地热梯度以有力地驱动环流系。岩浆囊不断为新的贯入岩浆所补充是保持高热源的主要机制；（2）热交换带内的低渗透性与排出带的高流通性相结合，前者可使溶液保持几百摄氏度的温度与围岩充分反应；后者沟通上升流使之通过上复非渗透性的顶板，使富金属沉积集中排放而不是流散；（3）适当的地壳运动，它使环流系能不断地作用于新的围岩；（4）持续的火山活动或沉积作用，把新生成的热液堆积被埋藏起来，以避免它们氧化分解。以上这些条件中的大部分，对大洋扩展脊对成矿是有利的，特别是快速扩展脊。因为随着扩展速度加快，裂谷轴带与两侧边缘断崖之间的高差也从公里级减少到几百米；下伏岩浆囊也随之变宽（ 20km

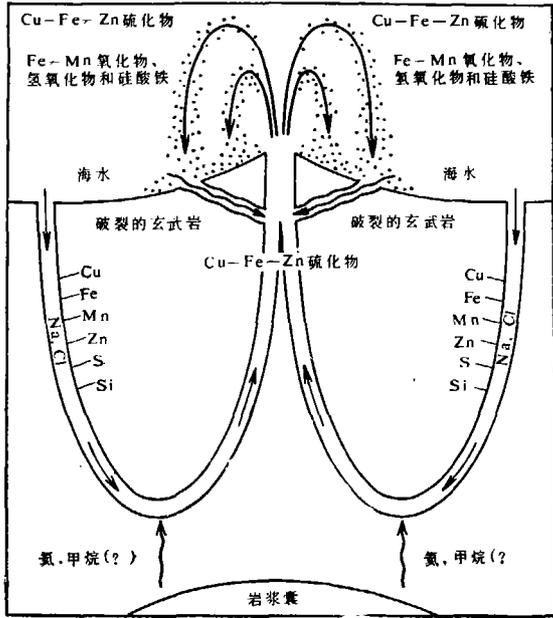


图 5 洋底热水环流系的图解式剖面 (据 Rona, 1986)

Fig. 5. Diagrammatic section of the submarine thermal water circulation system.

而不是 7km) 和变浅 (1km 而不是 6km)，从而提供了强有力的热源。不断向两侧移开的大洋壳更保证热水环流系始终在新生成的未蚀变玄武岩中运行。

但是由此生成的富金属热液堆积能否最终保留下来，还取决于后来在洋底上的遭遇。影响因素涉及到陆源物质的补给程度和洋流是否发育等，从而与洋盆的演化阶段联系起来。

红海代表与慢扩展中心有关的大洋盆地张开的早期阶段。这里海盆狭窄，又处于干旱气候条件下，四周陆地的围限使得本区实质上没有洋流运动，这一地区第三纪时有巨厚的盐类堆积，因而海水下渗首先通过这些盐层而使盐度大为增高，一方面增强了溶液富集金属的能力（金属与盐中的氯形成络合物），另一方面也使得溶液密度加大，使海水按密度垂直分层，聚集在红海轴部深水洼地的底部。金属成微粒从热卤水中沉淀出来，就成为上述 Atlantis 二号深渊中的层状多金属硫化物矿体。

加利福尼亚湾内的瓜伊马斯盆地代表着中到快速扩展作用有关的大洋盆地拉张的早期阶段。这里的海底同样没有洋流，但是相距很近的陆上河流却带来丰富的陆源物质，连同

表层水中的大量浮游生物，使盆地底部堆积了数百米厚的钙质粉砂和泥质堆积。20m高的塔状硫化物丘就被埋在这些沉积物当中。上升的含矿热液同富含碳酸钙的沉积物反应而变为碱性，使金属硫化物沉淀出来，保存在离玄武岩顶部上百米的沉积岩中。据认为日本别子型块状硫化物矿就代表这种离陆地很近的中脊产物。

随着大洋进一步增宽，由红海型向大西洋型转化，水对流循环也从受限制到不受限制，从还原环境转化成氧化环境，任何出露在洋底的硫化物堆积都将被氧化分解，除非被熔岩或沉积物保护下来。因此在像太平洋中隆这样开阔大洋盆地中的无限制环流下，尽管有大规模的成矿热水环流系存在，但是其成矿效率却是极低的。因为几乎所有的金属都成烟雾状随黑烟囱逸出并被洋流分散开了，留下来的只是烟囱残体组成的硫化物小丘。如无保护，这些小丘最终也会被破坏掉。La Lou (1983) 认为，大洋底的锰结核与海底热液活动有关，是在有利的外生条件下铁锰重新聚集的结果。

洋底热液除形成块状硫化物矿床堆积外，各种温度的热水及其中普遍含有的硫化氢还造就了一片海底绿洲。由贻贝礁、大蛤、管栖蠕虫及蟹等组成的生物群落围绕热液喷口分布，并往往充塞着较低温的喷口通道，从而成为寻找热液场的指示。深海底生物群落的发现在生命科学上具有重要意义，它表明除光合作用以外，依靠从环流的硫化氢、二氧化碳中吸取能量的细菌也能构成一个繁茂的生物社会。

寻找洋底热液活动的另一实用的标志是氦同位素异常。自然界中的氦有两种同位素 ^3He 和 ^4He 。后者是铀系放射性衰变产物，前者则来自地幔。在大洋表面，由于与大气可自由交换，两者成平衡状态。随着深度加大， ^3He 浓度也不断增加，到2600m，即洋中脊的平均深度时，异常达最大值。 ^3He 对 ^4He 比大气中约高8倍。所以对大洋水柱氦浓度的测量已成为大面积普查洋底热泉的最主要手段。

5 对陆地热液矿床成因的再认识

由于陆地上的热液矿床常与岩浆岩共生，或者它的矿物组分与火山岩中或接触变质带中所发现的相同，所以传统上认为其成因也受母岩控制，并按照这一思路去布置找矿工作。发现洋底多金属硫化物成矿作用的巨大意义就在于证明矿床可以在地表(海底)生成，矿源层就是一定类型的围岩，而不一定需要某种特殊的含矿母岩。但是有工业价值矿床的最终生成却需要非常不同的诸因素的配合，这就大大开阔了找矿的思路。

按照洋底热液堆积的产状，像塞浦路斯岛上那种产生蛇绿岩中的块状铜-铁-锌硫化物矿床，被认为是海底成矿的直接对应物。这些矿床成浅碟状，直径约100m，重量可达1500万吨、位于玄武质熔岩的洼地中。类似的矿床还出现在阿曼、菲律宾、北美西海岸等不同时代的蛇绿岩带里。我国秦岭褶皱带中的桐柏大河铜锌矿床看来也属于这一类型。

由于底流不发育及后期的覆盖对于硫化物的保存具有重要作用，这就决定像红海那样的早期洋盆、弧后扩展形成的边缘海、火山弧前区，甚至大陆裂隙中心这样一些地球动力学环境为成矿的潜在有利部位。日本本州北部的多金属硫化物黑矿，就代表弧前部位的这类堆积，在其中已发现类似于在东太平洋中隆上观察到的硫化物烟囱残余，日本本州南部的别子型铜、铁、铅、锌硫化物堆积产在与火山岩互层的沉积岩中、与瓜伊马斯盆地的

环境相当。对于这类矿床来说,它们的成矿时代大多与全球或局部的裂隙事件有关,现在可能已埋藏在巨厚的后期沉积物之下。有一种意见甚至认为,目前在消减一碰撞边界上发现的与火山或深成活动共生的热液成因硫化物矿床只代表成矿作用的第二阶段。它们最早在海底扩展中心聚积,随着板块运动而迁移到俯冲带,再通过局部重熔与岩浆同时上升而形成。这种两阶段的成矿模式被称为 Geostill。

这个问题还可以从更广泛的意义上考虑。由于实验科学家们已在密封容器中成功地使不同类型的火山岩以及某些类型的沉积物,与海水在升高了的温度和压力条件下发生反应,并产生了与在大洋底观察到的相类似的酸性、还原、富含金属的溶液。这意味着只要具备热源、裂隙通道和有利围岩组合的任何部位,都可能产生类似的富金属堆积。这就为陆地上许多矿床的成因解释提供了新的线索。

早在五十年代末,泽列诺夫^[12]根据对自阿留申群岛到印度民西亚西的太平洋范围内大量活火山的调查,发现火山喷气溶于地表水体中会产生非常酸性的火口湖和河流,使得铁和铝可以大规模迁移到海盆中,并在那里沉积下来。元素的行为取决于火山喷气的成分和当地的气候,特别是降水量(稀释程度)所决定的溶液的PH值。例如北千岛群岛的帕腊木施尔岛北部有一条流入鄂霍茨克海的小河,湧水量只有 $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$,但却非常酸性, $\text{pH}=1.72$,每昼夜可以把 65 t 铝和 35 t 铁成溶解状态带到海里去。随着河水往下游方向被稀释,当PH值上升到超过3时,铁就与铝分离,成多孔状褐铁矿在河床沉淀下来。爪哇东端的伊德日火口湖,容积4000万立方米,水的PH值只有0.02,其中 Al_2O_3 的浓度为 8.79g/l , Fe_2O_3 2.3g/l 。这一类矿床当时统称为喷气-沉积矿床。德国产在上泥盆系中,与辉绿质凝灰岩共生的 Lahn-Dill 型铁矿就属于这一成因。

1974年丘赫洛夫^[13]提出存在着非岩浆成因的含矿热水系,因为含矿地层中的原生液态包体和硫同位素组分都指示为沉积成因。氢、氧稳定同位素也表明水源自海水或大气降水,他把这称之为渗流溶液成矿机制。成矿物质来自渗流系所流经的岩石,各种元素从岩石中析出的程度取决于热液的温度、pH值,硫酸盐在溶液中的初始含量等一系列因素。自流盆地(用现在的观点理解即环流系)的存在,对于高浓度金属的聚积最为有利。含矿热液的迁移可以是与区域变质作用幕或异常地热梯度有关的局部热源,也可以是压力梯度或浓度梯度驱动。按照这种成矿机制,矿体的产状必然都是层状,当热液在地表或海底卸载时就形成层状矿体;当它们在地下填充或交代裂隙时就成为脉状矿床。

姜齐节等(1980)^[1]根据我国的资料,把富金属热液总的分成两类:一类与火山作用有关,热液属硫酸盐型,强酸性,矿化度 $1\sim 1.7\%$,金属组分主要富集铁;另一类油田水等深地层水属于氯化物型,硫酸根和重碳酸根与氯的比值都小于0.01,阳离子中 $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$,矿化度可高达 $20\sim 30\%$, $\text{pH} 4.6\sim 6.5$,温度 $44^\circ\sim 370^\circ\text{C}$ 。可富集多种金属和亲石元素,后者中钡含量可达 5367ppm (四川盆地)。较海水 0.03ppm 富集了 10^5 倍;锶 5000ppm (海水中 8ppm); SiO_2 1745ppm (海水中 6.4ppm)等。根据北美823个油田水样的分析,钡含量较海水要浓集 $10^2\sim 10^3$ 量级,所以沉积重晶石是这种类型成矿作用的一种重要成因标志。

八十年代后期, Wilfred Elders^[11]在索次顿海南面推测地壳正在伸展裂隙,把岩浆引向浅处,从而形成热田的地方,打了一个深3200m的科学钻。钻探结果却揭示出一个

热驱动铜、铅、锌沉淀下来的系统。还原状态的高盐度热卤水把上述金属从下伏沉积物中淋滤出来,以复杂氯化物的形式外移,由于与上层较低盐度、氧化卤水混合而导致金属以硫化物形式在两层卤水的界面上析出。按观测到的反应速度,Elders 预测五十万年后,此地将以金属矿床取代目前有经济价值的地热田。值得注意的是,上述成矿作用完全是在陆壳内进行的。

我国东部古生界含有不止一个层位的层控多金属矿床,对它们成因的研究不仅有助于扩大远景,还能提供当时的地球动力学环境和所处的构造演化阶段,从而具有重要的理论意义。如根据陈先沛等(1987)^[2]的资料,广西中部来宾、武宣地区的多金属-重晶石矿床,只限于上泥盆统南丹型深水纹层状硅质岩和条带状灰岩中。四周为同时代象州型浅水台地碳酸盐岩所围绕。矿床的矿物组合具有明显的分带性,平面上从内向外由铜硫化物到铅、锌硫化物,外围是重晶石;剖面上从深处向上由铜、铅、锌、重晶石,到铀、钼氧化物和锰碳酸盐。与红海的矿物分带模式大体相同,层状重晶石位于硅质岩中,两者都是还原条件下的深水堆积。它们在垂向上具对称性:块状重晶石往上和往下都通过条纹状重晶石,含放射状重晶石团粒的硅质岩过渡到正常的硅质岩,说明是突发性的富 BaSO_4 热液叠加在硅质沉积之上的结果。而在大范围内,硅质岩又是叠加在盆地泥灰岩之上。层状重晶石中的包体爆裂测定温度为 $180^\circ\sim 230^\circ\text{C}$,均一法温度为 140°C , δS^{34} 落在海水成因范围内。显然它与华南克拉通化早期的大陆裂隙作用有关(马文璞,1992),并位于当时的裂隙槽范围内。著名的广西大厂锡-多金属成矿带,也具有类似的特征(洗柏琪,1986)^[4]。

西秦岭西成、凤太和镇旬等地的大型铅锌矿,产于中泥盆统古道岭组灰岩顶部的不连续面以上 $5\sim 20\text{m}$ 范围内的洼地中,有固定层位。可以见到古道岭组灰岩角砾为 Fe-Mn 氧化物所胶结。矿体围岩为铁白云石硅质岩,与黄铁矿、毒砂、电气石共生,鲕粒构造表明为沉积成因。铅锌矿石与硅质岩的稀土元素配分图式一致,并都与海相火山沉积的特征相似。矿石成分在空间上有变化,接近控制盆地的断裂时,黄铜矿相对集中。矿床成因被认为是裂谷环境产物(张复新,1988)^[5]。

我国南方寒武系底部大面积分布着以石煤层著称的含铀、钒、镍、钼等多种金属的黑色碳质岩系。它在黔东南及桂北等地普遍含有重晶石矿层,层位在震旦系陡山沱组与早寒武系的牛蹄塘组之间,与硅质岩共生。孙枢等(1987)^[6]提出石煤层中的有机碳来自浮游生物所形成的藻类,代表一种远海或半远海相的腐泥煤。曾明果(1987)^[7]测定了重晶石矿层的 REE,认为其配分与大洋型沉积层相当。重晶石的 δS^{34} 也指示为海相沉积,所以可能代表另一次与裂隙作用有关的海底热液活动。

涂光炽(1987)提出,国内有不少矿床由于一些独特的现象,看来也有可能属于此种类型的热液沉积矿床。如以大新县下雷锰矿为代表的广西南部伸向云南的大型锰矿带,含矿层位在上泥盆统的碳酸盐岩内,原生矿物为细粒锰碳酸盐,并伴有大量锰硅酸盐,如蔷薇辉石、锰橄榄石、含锰辉石、锰蛇纹石等。这些矿物一般情况下是变质作用的产物,但矿区围岩并未显示出任何变质作用迹象,也未发现交代现象。矿区附近无深成岩,所以硅的来源也难于解释。闽西南早三叠世溪口组中,在正常的沉积岩中出现几层“角岩”,由石榴石、透闪石、阳起石、绿帘石等组成,含有铅锌矿,分布范围可达十几个县。类似的现象还有湘桂一带中晚泥盆系中的层控黄铁矿和铅锌矿,川、黔、鄂二叠系茅口组中的

滑石矿床、铈矿床,内蒙四子王旗早二叠统中的萤石矿床等。这些矿床大部分与地台早期的裂隙作用有关。因此分析类似的构造演化阶段和构造部位对于寻找同类矿床可能是有意义的。

目前国际上正注意超大型矿床的研究,“超大型矿床的全球背景”是国际地科联建议开展的多学科综合研究的课题之一。Laznika 认为,超大型矿床是形成许多较小矿床作用和条件达到顶峰的产物。例如,白云鄂博是在稀土和铁沉积以后再受到岩浆热液的叠加;兰坪金顶铅锌矿是形成于中生代含盐建造等(涂光炽,1989)^[8]。热卤水环流机制可以提供极有潜力的成矿物质基础。

6 参考文献

- [1] 姜齐节等,论渗流热卤水成矿作用的意义与成因标志。1980,地质与勘探1,1-6; 2, 1-7。
- [2] 陈先沛等,广西中部泥盆系的多金属-重晶石矿床和热水沉积作用。1987,沉积学报5(3) 149~158。
- [3] 马文璞,区域构造解析——方法,理论和中國板块构造。1992,地质出版社。
- [4] 冼柏琪,广西南丹、河池锡-多金属成矿带的特征。地质科学 2, 170~178
- [5] 张复新,陕西风太铅锌矿田海底火山喷流沉积成因探讨。1988,地质论评 34(2), 157~167。
- [6] 孙枢等,中国地台区张裂盆地沉积。1987,沉积学报 5(3)、6-18。
- [7] 曾明果,黔东早寒武世重晶石矿床特征。1987,岩相古地理通讯 2(28), 44~47。
- [8] 涂光炽,关于超大型矿床的寻找和理论研究。1989,矿物岩石地球化学通讯, 3, 163~168。
- [9] Rona, P. A. Mineral Deposits from sea-floor hot springs, 1986, Scientific American, 254(1), 66~75。
- [10] Rona, P. A. Hydrothermal Processes at Seafloor Spreading Centers, 1983, Plenum Press
- [11] Wilfred Elders, Drilling Has its Rewards, 1989, Science, 245, 4917, 468~470
- [12] Зеленев, К. К. 1960, Изв. Ан-сср сер. геол. 8, 58~74
- [13] Чухров, Ф. В. О рудообразования из вадозных растворов, геология рудных месторождений, 3, 3~14

MODERN SUBMARINE MINERALIZATION AND ITS ENLIGHTENMENT FOR THE STUDY OF LITHIFIED ORE DEPOSITS

Ma Wenpu

Abstract

The existence of the large-scale submarine hydrothermal water circulation system and metal-rich accumulation is one of the recent important discoveries of the mankind. They are distributed along the rapidly developing Eastern Pacific mid-ocean ridge. The newly formed basaltic oceanic crust as the metal source, the fissure system produced by crustal extension

(下转第72页)

火山岩双重填图法改变了单一研究火山地层层序、时代的传统方法,采取在研究喷发堆积物层序、时代的同时,详细划分并认真研究各类火山岩石的岩性,产状形态特征及其纵横变化情况;火山地质图上既表示了喷发堆积物的时代、层序,又标绘了各种火山岩石及其成份,结构,以及其它如火口等有关重要的火山地质要素。通过这种方法填制的火山地质图,可以醒目地显示火山喷发物的发源地,进而可以分析、判别出火山机构的存在及其类别归属;从而有效地揭示了该火山岩区的地质特征与规律。

火山岩双重填图法并不排除沉积岩与侵入岩石学的原理和方法的运用。相反,火山岩双重填图法之所以取得成功,其中一个重要的因素就在于它从火山岩区共有的基本地质特征出发,把层状火山岩与非层状火山岩当作火山岩的有机整体,综合运用了与之有关的沉积岩石学与侵入岩石学的原理和方法。

(上接第84页)

and the heat source driving the seawater circulation are three necessary conditions for the formation of ore deposits. But whether this kind of product can be preserved also depends on other factors such as the development of ocean currents and the amount supplement of terrigenous sediments. To sum up, early-stage small oceanic basins and back-arc basins such as the Red Sea, the California Gul and other taphrogenies are most favorable for looking for such kind of mineral deposit. The enlightenment of the discovery of modern submarine hydrothermal mineralization from the study of subaerial lithified ore deposits is that so long as conditions are available similar mineralization may occur within the realm of continental crust. The examples are the Middle and Late Devonian stratabound deposits in South China and the Qinling Mountains.