

海底热液沉积成矿

——一种新近被认识的、普遍而重要的成矿作用

戴问天

(西安地质学院)

1948年,瑞典海洋考察船“信天翁号”(Albatross)在红海中部(21°10' N, 38°09' E)水深1937m的地方发现水温与含盐度异常,揭开了人类认识海底热液作用的序幕。六十年代中期,美国考察船“大西洲二号”(Atlantis II)、英国考察船“发现号”(Discovery)和联邦德国考察船“流星号”(Meteor)证实了瑞典人的上述发现,确定存在两个彼此隔离的热卤水洼地,并发现富含Fe, Mn及Zn, Cu, Cd, Pb和Ag的热卤水沉积物,是考察、研究海底热液成矿作用的开端。七十年代中后期,美国在东太平洋,法国与美国联合在大西洋(FAMOUS, Franco American Mid—Ocean Undersea Survey),采用潜水方法进行海底考察,不但发现了若干处富含重金属的沉积物,而且观察到了海底热液涌溢现象。海底热液作用的普遍性和重要性,开始被越来越多的人所认识。

海底富含重金属沉积及其分类

除砂矿(Placers)以外,海底富含重金属的沉积物大体可划分为三种类型:

1. 陆源沉积物中的局部金属富集层。见于大陆边缘地区(如非洲以东的印度洋马达加斯加海盆、大西洋西部的亚马孙河水下冲积锥),金属富集程度不高(Fe, Mn一般均低于25%,其他金属很少),层薄,其形成与陆源沉积物中金属的成岩活化(diagenetic remobilization)有关:沉积物中有机物的分解造成还原环境,使Mn, Fe等金属被还原、溶解、向上转移,在沉积物—水界面处被氧化而重新沉积。

2. 深海沉积物中的锰(或铁锰)结核与锰覆壳(manganese nodules and encrustations)。

对这类沉积物大家已相当熟悉,这里不再赘述。尽管其金属的最终来源(ultimate source)可能是复杂的,但直接来源无疑是海水,所以它们是典型的水生富含金属沉积物(hydrogenous metalliferous sediments)。

3. 海底热液富含金属沉积物(undersea hydrothermal metalliferous sediments)。红海热卤水沉积物是其典型代表,也见于太平洋、大西洋、印度洋若干海底扩张中心,以及太平洋西缘和地中海的火山岛弧区。和海底锰结核以富锰为主要特征不同,它主要富铁,并可见到锌、铜等有色金属的富集。矿物成分上海底锰结核基本上是氧化物(氢氧化物),热液沉积则除氧化物外还有硅酸盐(蒙脱石类)、硫化物以及硫酸盐和碳酸盐。这样,从分布、产出地质背景、地球化学特征到矿物学特征,热液沉积都明显不同于水生沉积。

下面,我们将先介绍几个海底热液成矿作用的实例,然后讨论海底热液成矿作用的基本特点及其对矿床成因理论的意义。

海底热液沉积成矿的实例

1. 红海热卤水及其富含重金属沉积 从笔者十年前主要根据西德(“流星号”1964/65)和美国(“链条号”1966)考察成果对它作综合介绍以来^①,美国(“链条号”)、英国(“Towatit”与“Nereus”)和联邦德国(“Wando River”与“Valdivia”)的进一步工作,大大扩充了我们对这一有重大意义地质现象的认识。在原来发现的“大西洲二号”等三个热卤水洼地附近,又发现四个较小的洼地。此外,沿红海轴心海槽大约

^①戴问天:国外地质,1974,第12期。

1000 km距离内, 还发现了“海洋学家号”(Oceanographer)、“魏玛号”(Vema)、“内罗斯号”(Nereus) 等九个洼地。这样, 总共已有 16 个热卤水洼地被发现, 说明海底热卤水活动在红海(特别是在其中、北段)不是一种罕见的地质现象。

以研究得最好的“大西洲二号”洼地下层卤水为代表, 红海热卤水有三个主要特点: (1) 含盐度(近26%)大大高于普通海水(约3.5%)而接近死海海水(约27%), 但离子组成却与后者迥然不同(表1), 说明它不可能像死海海水那样由强烈蒸发形成; (2) 若干重金属高度富集, 如与普通海水相比, Fe高150~4000倍, Mn高500~8000倍, Zn高160~1000倍; (3) 温度明显高于100~400m以下不受季节影响的红海深层海水(约21.7℃), 1964~1966年间测得“大西洲二号”洼地下层卤水平均温度约56.5℃, 上层卤水约44.3℃。1971年“链条号”和“Valdivia”进行的重复观测, 发现二者分别上升了2.7℃和5.5℃, 说明热卤水活动仍在继续并有加强的趋势。

红海其他洼地中的卤水有的含盐度也很高, 但重金属富集不明显, 其沉积物富含Fe, Zn, Cu等只说明卤水过去曾富集过这些金属。水温异常也不明显, 如“Kebrit”洼地只23.3℃, “Nereus”

红海热卤水的离子组成(以离子/K比值表示)表1

	普通海水	死海海水	红海热卤水	与普通海水相比较	
				死海海水	红海热卤水
Na/K	25.64	5.23	49.50	0.20	1.93
Ca/K	1.05	2.26	2.75	2.15	2.52
Mg/K	3.31	5.58	0.41	1.69	0.12
Cl/K	49.60	28.85	83.50	0.58	1.68
Br/K	0.17	0.69	0.07	4.06	0.41

洼地只30.2℃, “Sudan”洼地只36.2℃。看来, 这些洼地的热卤水活动已经进入尾声, 行将停止。一个值得注意的特点是某些洼地的卤水含有丰富的H₂S, 有的还伴以CO₂, N₂以及甲烷和乙烷, 显然和洼地沉积物中含大量有机物有关(“Kebrit”洼地, “Oceanographer”洼地等)。

在红海富含重金属沉积中, 分布最广的是铁的氧化物与氢氧化物(褐铁矿、针铁矿、纤铁矿及磁铁矿), 见于“Atlantis II”、“Kabrit”、“Vema”、“Gypsum”、“Nereus”、“Thetis”等洼地中, 以富Fe(30.80~67.75%)、贫Mn(0.05~2.00%)为特征, 并富含Zn(790~6650ppm), 有时还略富于Cu, Hg和Pb。锰的氧化物(水锰矿)见于“Atlantis II”、“Thetis”、“Nereus”、“Shagara”和“Chain”等五个洼地中, 数量比铁的氧化物少得多, 以Fe, Mn均富为特征(Fe3.89~32.00%, Mn15.48~35.37%), 并富含Zn(0.02~1.35%), 另外略富于Cu, Hg和Pb。硫化物分布也很广泛, 见于“Kebrit”、“Gypsum”、“Nereus”、“Thetis”、“Atlantis II”、“Albatross”、“Shagara”、“Erba”、“Sudan”和“Suakin”等十个洼地中。硫化物沉积有两种类型, 一种以闪锌矿为主共生以黄铁矿、黄铜矿和白铁矿, Zn可达10%, Cu可达2%或更高, 并含较高Pb, Cd, Co, Hg和Ag, 另一种以黄铁矿为主, 除偶尔稍富Cu外, 其他微量金属均不富集。显然在红海热卤水沉积物中硫化物是最有科学价值和潜在经济意义的。硫酸盐见于“Atlantis II”、“Gypsum”等四个洼地中, 为硬石膏或石膏, 局部尚有少量重晶石。矿物很纯, 几乎不含其他重金属。碳酸盐见于“Atlantis II”(菱锰矿与锰菱铁矿)和“Gypsum”(菱铁矿)两个洼地, 有时也略富Zn, Cu, Hg和Pb。硅酸盐虽仅见于“Atlantis II”、“Thetis”和“Erba”三个洼地, 但数量甚多且在“Atlantis II”洼地还在继续形成, 它可分为蒙脱石(富Fe, 略富Zn, Pb, Hg, Cu和Ag)、鲕绿泥石(富Fe, Mg和Al, 略富Zn, Cu, Ni, Ti, Sr和Hg)以及“非晶质”硅酸盐三种类型。

除热卤水沉积外, 各洼地自然都混有一定数量正常沉积物, 主要是碳酸盐质生物碎屑及少量陆源碎屑(石英、长石和粘土)。由于正常沉积物的沉积速率(约10cm/1000年)比热卤水沉积物(大于40cm/1000年)低得多, 所以沉积物中二者所占比例主要取决于热卤水活动强度。在“Atlantis II”洼地中红海正常沉积物所占比例不超过5%, 整个沉积作用可以认为完全受热卤

水活动控制。

2. 东太平洋隆起(East Pacific Rise, 以下简称EPR) 1964年И. С. Скорнякова根据苏联考察船“勇士号”、“鄂毕号”和美国考察船“顺风号”的资料, 首次提出东太平洋隆起沉积物中的铁锰异常与热液活动有关。1966年K. Boström与M. N. A. Peterson发现沿东太平洋隆起在6°N至12~16°S之间沉积物含多量褐色、X射线非晶质的金属氧化物, 化学分析表明有明显的Fe, Mn, Cu, Cr, Pb和Ni异常, 且与热流异常相对应。在隆起侧翼, 沉积物中有Ba和Sr的富集。接着, 在执行深海钻探计划(DSDP)过程中, 多次发现东太平洋隆起存在富铁锰沉积(C. C. Von der Borch和R. W. Rex, 1970)。

1978年2~3月, 法国科学家利用潜水器“Cyana”在东太平洋隆起北纬21°处发现金属硫化物沉积, 主要由闪锌矿、黄铜矿、白铁矿和黄铁矿组成, 沉积物全岩样品含Zn高达29%, 含Cu高达6%, 这是首次在洋底发现“矿石级”富含有色金属沉积物, 其意义可以和红海热卤水沉积物的发现相比拟。沉积物产在一个近代熔岩喷发带西侧约200m处, 在一个20~30m深的拗陷的侧翼上, 有四种产出形式: (1) 由块状硫化物组成的烟囱状小丘(small hills)或墩(mounds), 平均高约10m, 直径约5m。有时可见到小的孔穴或管道, 据认为可能是热液释出的通道。通道壁除硫化物外还有白色透明氧化硅物质; (2) 物质成分与(1)相同的覆壳(flattish encrustations); (3) 浅黄或桔黄色的10~20cm宽的小锥, 围绕前述硫化物“墩”排列, 含自然硫; (4) 黄和红褐色泉华状“岩流”(flows)。

1979年3~5月进行的潜水考察证实了富金属沉积的存在并发现其展布远比头一年所见到的要广泛, 它构成一个长约7km, 宽约100m的带, 沿东太平洋隆起的脊顶分布, 更有意义的是观察到温度高达350℃的热液从深2610~2650m的海底释出。单个硫化物小丘或“墩”可具有多到六个“喷管”, 主要由锌的硫化物组成的黑色沉淀呈粉末状散布在小丘底部及周围海域, 喷口上约5m处可见到羽毛状的硫化物悬浮物。喷口内热

液是清澈的, 喷出以后则呈黑色, 显然与热液冷却和海水混合时形成大量分散的硫化物质点有关。除闪锌矿、黄铜矿(晶体可达4~5mm)、纤锌矿、黄铁矿等硫化物外, 还存在一定数量硬石膏。热液喷发速度相当快(每秒几米), 常常将通道破坏, 最终可使硫化物小丘或“墩”消失而使破碎的硫化物沉积在海底上。这种被称为“黑烟囱”(black chimneys)的硫化物“墩”不伴以海底生物, 另一种“白烟囱”(white chimneys)则常覆以软体动物介壳, 其附近繁殖了大量软体动物和蝦蟹。喷出的热液温度较低(32~330℃), 喷溢较宁静, 水质清澈或呈乳白色, 后者与含黄铁矿、重晶石、非晶质氧化硅成分的白色质点有关。

由于硫化物暴露在海底氧化环境下, 所以常常见到它与红褐色赭石(Fe_2O_3 , 80~90%)共生。洋底沉积速率很慢, 除非有随后喷出的熔岩覆盖, 这种热液硫化物将很快被氧化而转变成富含氧化铁的沉积, Zn, Cu等重金属则溶解而分散到海水中。

3. 加拉帕戈斯裂谷(Galapagos Rift)

位于太平洋东部, 是一个大致沿赤道呈东西方向延伸的海底扩张中心。在详细海洋地质与海洋地球物理研究的基础上, 潜水考察(“Alvin” dives, 1977)发现了“墩”状的热液沉积物(00°36'N, 86°06'W), “墩”高5~20m, 直径20~50m, 排列成行, 但略与扩张轴斜交。热液沉积物分布区正好在Von Herzen等(1977)确定的热流异常带内, 热流值可达30HFU(Heat Flow Unit, $10^{-6}\text{calcm}^{-2}\text{s}^{-1}$)或更高。海底摄影显示这些沉积物由暗色物质组成并含一些浅黄色斑点与条带。沉积物分为三种类型: (1) 由钡镁锰矿和钠水锰矿组成的锰壳, 厚度有时可达6cm以上; (2) 蒙脱石; (3) 非晶质氧化铁, 有时覆在锰壳上。沉积物中Fe, Mn显示明显的分离趋势, 七个锰壳样含Mn46.7~51.1%, Fe只0.03~0.57%, 三个蒙脱石样含Fe23.2~27.4%, Mn只0.18~0.35%。

在“Alvin”潜水考察时曾采集了五个“温泉”水样, 乳白色水流在喷口处温度约10~11℃(洋底正常水温约2℃), 不含溶解氧, 除一个样

品外均含 H_2S ,说明其还原性质。所有热水都含Mn,但只一个不含 H_2S 的水样含显著数量的Fe。热水中未发现Cd,Cu或Ni,看来它们与Fe一样,由于热液含 H_2S ,在释出海底之前可能已经形成硫化物而沉淀了。用 0.4μ 滤纸,在喷口处检测到细小的自然硫质点、硫化铁晶体,可能还有皂石。温泉附近有大量活着的生物,包括巨大的蛤类(Clams),还有许多死亡生物的遗骸。

4. 鲍尔洼地(Bauer Deep) 位于东太平洋隆起和加拉帕戈斯隆起之间。70年代初发现有富含铁锰沉积物,1973年Sayles和Bischoff认为这种沉积物可能遍覆 $5\sim 22^\circ S$ 之间的整个海底。富Fe蒙脱石是沉积物中最主要的矿物,其次为钡镁锰矿、铁锰氧化物与氢氧化物、生物成因的氧化硅,以及碳酸钙、磷酸盐、火山玻璃和陆源矿物。富铁相中有Ni,Zn,Cu,Co富集,富锰相中有Cu,Ni富集,磷酸盐中有镧系元素富集。

鲍尔洼地中重金属的富集型式与东太平洋隆起热液沉积物很类似,主要区别有二:(1)由于鲍尔洼地位于碳酸钙补偿深度以下,所以碳酸钙含量要比东太平洋隆起少得多;(2)由于铁蒙脱石占沉积物70~90%,铁锰氧化物只占10~20%,鲍尔洼地沉积物 SiO_2 含量很高(35~60%,平均约44%),东太平洋隆起沉积物在除去碳酸盐以后, SiO_2 含量只有9~18%(平均约13%)。这样,使Fe,Mn等重金属在沉积物中富集程度降低的“稀释剂”在东太平洋隆起主要是碳酸钙,在鲍尔洼地主要是氧化硅。此外,在微量元素富集程度上,两个地区也有差别,鲍尔洼地沉积物的Ni/Mn,Co/Mn和Cu/Mn比值都大致是东太平洋隆起的两倍,Zn/Mn比值也略高。

对鲍尔洼地富Fe,Mn沉积物的成因有两种不同看法。一种看法是它和洼地本身的热流异常有关,在洼地内存在局部热液活动,从而提供成矿金属。另一种看法,它是从东太平洋隆起的热液里沉淀的,以细小质点形式搬运到鲍尔洼地里来,在此过程中金属(主要是铁)氧化物与生物成因的氧化硅发生反应而形成蒙脱石,同时从海水中吸附Ni,Co,Cu等微量元素而使它们进一步富集。另外,由于鲍尔洼地只略深于当地碳酸

钙补偿深度,Oldnall(1975)认为相当数量Ba,Zn,Pb和Sr可能是由于生物残骸下沉时被溶解而补充到沉积物中去的。G. R. Heath和J. Dymond(1977)探讨了鲍尔洼地沉积物中金属四种来源所占的比例,认为Fe主要来源于热液(平均占84%),其余16%来自碎屑;Mn约70%来自热液,29%来自海水;Al绝大部分(97%)来自碎屑;硅主要来自碎屑(56%)和生物(36%);Ba主要来自海水(62%)和生物(31%);Ni大部分来自海水(76%),少部分来自热液(20%);Cu与Zn类似,主要部分(Zn58%,Cu53%)来自热液,少量(Cu34%,Zn27%)来自海水,还有约10%(Cu,Zn相同)来自生物。这样,鲍尔洼地沉积物中的重金属可以认为是多源的,但除Ni外均以热液为主。

鲍尔洼地沉积物中金属的来源(各占%) 表2

元 素	热 液	碎 屑	海 水	生 物
Fe	84(69~88)	16	—	—
Mn	70(54~81)	1(1~2)	29	—
Si	8(4~12)	56(38~70)	—	36
Al	3(1~3)	97	—	—
Ba	6(5~9)	1(1~2)	62(36~87)	31
Cu	53(31~59)	3(2~4)	34(29~38)	10
Ni	20(11~27)	4(3~5)	76	—
Zn	58(37~73)	5(4~9)	27(18~35)	10

括号内是变化范围

5. 大西洋TAG区(Trans- Atlantic Geotraverse) TAG 区位于大西洋中脊(Mid-Atlantic Ridge) $26^\circ N$ 处,在水深3000~4500m的地方,从70年代初以来即有富铁锰沉积物发现,由于其沉积速度很快(130~250mm/百万年),被认为应该和海底热液作用有关。稍后观测到底层水温度异常(Rona, 1978),为这一推论提供了佐证。富铁锰沉积物明显分为两类,一类富Mn(38.5~39.4%)、贫Fe(0.01~0.11%),除Ni稍有富集外(可达790ppm),Cu,Co含量均微;另一类含Fe较多(16.1~18.6%),Mn较少(9.8~14.1%),富含Co(2720~9480ppm),Ni(900~2200ppm)和Cu(300~880ppm)。这些沉积物总产在推

测断层附近,据认为热液是沿这些断层释出的。

6. 大西洋FAMOUS区 (Franco American Mid — Ocean Undersea Survey, 1971 — 1974年间法美合作大西洋中脊裂谷系及其邻区海底考察) 在1974年潜水考察期间,沿转换断层“A”(近 37°N)在水深2670~2690m处发现两个热液区(hydrothermal fields),面积各约 600m^2 ,相距约200m。区内发现一系列不对称的由热液沉积物组成的长形丘,长约40m,宽约15m,厚约3m,呈东西向分布。裂隙状喷口不在丘顶端,而在顶端北侧,喷口侧下方分布具豆状构造的沉积物,再往下(往北)沉积物具泉华状构造;丘顶端和南坡分布黑色多角形结核。黑色结核主要由锰的氧化物、氢氧化物组成(Mn_2O_3 37.2~40.3%, Fe_2O_3 13.7~16.3%),并稍富Ba, V, Ni, Co和Cu;豆状、泉华状沉积物主要由蒙脱石、水云母组成,也含少量Fe—Mn结核,化学成分以富铁(Fe_2O_3 20.8~38.6%)贫锰(1.07~6.68%)为特征,微量元素含量普遍比黑色结核低。此外,沉积物中还发现有少量黄铁矿颗粒。

7. 太平洋西缘和地中海的火山岛弧 1963年苏联和印尼联合考察了桑吉群岛的Bany Byxy水下火山(Banoea Woehoe, $3^{\circ}08'16''\text{N}$, $125^{\circ}29'26''\text{E}$)。这个火山在历史上曾多次喷发过,仅19世纪有文字记载以来,即喷发过五次(1835, 1889, 1895, 1904, 1918~1919),喷发后常形成熔岩岛,但不久就被海浪破坏而消失,现在只剩下一个暗礁,最浅处水深只5m,退潮时甚至局部露出海面。海底温泉($40\sim 50^{\circ}\text{C}$)以每秒1m或更快的速度喷出热水流,往下温度迅速升高,在沉积物(软泥)内深20cm处徒手已不能忍受。热水含盐度与周围正常海水相近,但含丰富的重碳酸、硅酸以及铁、锰等重金属。在离喷口约1m处,水流开始变黄、变浑浊。热水流过的火山岩碎块表面都覆了一层“铁锈”。所取热水样冷却时,每升沉淀出100~140mg铁锰氢氧化物,据此估计每年析出的铁锰物质当在900~9000吨之间。沉积物以铁为主(氢氧化铁最高可达62%),锰较少(氢氧化锰约7%),另含较多V与Sr(千分之几),还有Mo, Cr, Zn, Ba(万分之几)。除温泉外,海

底还有强烈喷气活动,其成分96.97%为 CO_2 , 2.86%为 N_2 ,另有少量 CH_4 (0.17%)以及He和Ar,但完全不含氧。在喷气区海面常见到白色、非常细小的自然硫悬浮物。К. К. Зеленов(1964)认为它们是由火山成因 H_2S 氧化形成的;考虑到喷气中实际上不含 H_2S ,它们也可能是由海水硫酸离子被喷气还原形成的。

类似的富含铁锰火山热水还见于新不列颠岛Matupi港(Ferguson, Lambert, 1972),以及太平洋西南部的Lau盆地、南非吉盆地等处。Matupi港热水含Fe, Mn, Zn,与红海热卤水类似,但由于水浅, pH值、Eh值变化急剧,又有大量火山碎屑物掺杂,所以在沉积物中除Fe有时有所富集外,未出现与红海类似的其他重金属的富集。

在地中海,火山热液和富含重金属沉积(包括氧化物与硫化物)见于桑托林群岛和武尔坎诺岛,后者沉积物中还产出少量黄铜矿与毒砂,但总的说来远未达到红海的富集程度与规模。

海底热液沉积成矿的几个基本问题

1. 海底热液沉积成矿的普遍性 当60年代红海热卤水及其富含重金属沉积物被发现的时候,人们曾为这一独特的地质现象而惊叹。但仅仅过了十几年,海底热液活动就已经成为地质学家、地球化学家经常议论的话题。除上面介绍的实例以外,海底热液富含重金属沉积还见于 8°S 的东太平洋隆起、 $27^{\circ}18'\text{N}$ 的加利福尼亚湾裂谷、印度洋西部($01^{\circ}40.62'\text{S}$, $57^{\circ}38.85'\text{E}$)以及亚丁湾($12^{\circ}35'\text{N}$, $47^{\circ}39.9'\text{E}$)等许多地方。考虑到这些沉积物所分布的海底扩张中心海水深度较大,因而发现它们比较困难,应该认为截至目前为止被发现的还只是它们中很少的一部分。J. R. Cann(1979)曾估计沿洋脊金属硫化物沉积的出现频度是每百公里一处,这个估计无论如何不能认为是过高的。事实证明,沿海底扩张中心和火山岛弧区的断裂带,海底热液活动是一种相当普遍的地质现象。

在研究较详尽的红海中,北段约1000km距离内,已发现热卤水洼地16个。如果把这沿轴心裂谷分布的整个热卤水活动范围看作是一个“成

矿带”，把单个洼地（面积常达几十平方公里或更大）看作“矿田”，洼地内的小凹陷看作“矿床”的话，其规模和相互关系完全可以和人们熟知的大陆上的成矿带相比拟。

2. 热源与水循环 海底热液沉积成矿的普遍性，和这种地质作用有强大的动力来源有关。1974年D. L. Williams与R. P. Von Herzen对地球的热散失(heat loss)作过一次新的估计，认为其总量达 10.2×10^{12} cal/s，比早先估计的数值约大32%。其中， 2.16×10^{12} cal/s是在大陆地区，包括陆棚和大陆斜坡散失的， 4.06×10^{12} cal/s是按照海洋面积 3.62×10^{18} cm²（包括边缘海）、海洋热流平均值 1.12 ± 0.06 HFU计算出来的“海洋背景值”(oceanic background)，另约 3.9×10^{12} cal/s在海底扩张中散失；在海扩张散失的热量里，约40%和岩石圈冷却有关，其余的通过海底热液循环。这样，在海底扩张中心由于热液对流(hydrothermal convection)而散失的热量当在 2.0×10^{12} cal/s以上，约与大陆地区散失的热量相当，占地球散失的总热量的20%。如果这个估计是正确的，那么海底热液作用的规模和强度将是相当惊人的。——作为比较，大陆上由于火山喷发及其伴随热活动（温泉、喷泉等）而散失的热量仅为其1/40，即 5×10^{10} cal/s。

根据T. J. Wolery和N. H. Sleep(1976)的研究，在海底扩张中心通过岩石的海水流量是 $1.3 \sim 9 \times 10^{17}$ 克/年，这足以使所有海水在5~11年里全部循环一次，也足以有效地控制若干元素在海水中的化学平衡。在海底扩张中心海洋地壳的生长速率，据Deffeyes(1970)估计为 5×10^6 克/年，仅为通过岩石海水流量的1/2~1/20，这个水/岩比在探讨玄武岩—海水反应时是必须考虑到的。

长期以来，人们只是把海洋看作一个被动地接受大陆风化产物的场所，现在，随着上述对热源与水循环的新认识，人们开始觉察到海底扩张中心的热液系统是一个在数量上可以和大陆风化产物相比的重要的物质来源。这在海洋地球化学平衡的研究上是一次重大革命，对研究海洋沉积作用和沉积矿床的形成也将产生巨大影响。遗憾的是

的是我们近年来出版的一些矿床学、岩石学和地球化学教科书，几乎完全忽略了这个不该忽略的科学动向。

3. 成矿物质来源 沿海底扩张中心和转换断层发生的海水—玄武岩反应，无疑是海底热液中成矿物质，特别是Fe, Mn, Zn, Cu等重金属的主要来源。考虑到这种反应的广泛和普遍，通过这种方式形成海底热液在数量关系上是毫无问题的。例如，按Hekinian等(1980)估计，为了形成一个含Zn50%的3 m³的沉积物“墩”，所需淋滤的玄武岩（以含Zn100ppm计）约为15000 m³，即0.000015 km³；换句话说，如果淋滤1 km³玄武岩，将能产生200000 m³含Zn50%的沉积物。近年来，在洋底发现若干富含硫化物的玄武岩样品，许多人认为它们代表岩浆分熔产物；如果在玄武岩内循环的海水与这种富含硫化物的岩浆分熔产物反应，将更有利于富含重金属热液的形成。

除热液带至海底的重金属外，视各地局部环境的不同，沉积物中的重金属还可以有其他来源，如在鲍尔洼地所见。另外，硫也可以有多种来源，如来自热液（加拉帕戈斯），来自富含有机质的沉积物（红海“海洋学家号”洼地），还可来自海水（海水SO₄²⁻被还原性热液还原）。

4. 沉积分异和与基岩中硫化物矿化的关系

海底热液沉积物和铁锰结核等其他富含重金属沉积的一个明显差别，是它们清楚的沉积分异，按照从还原到氧化的顺序，依次是硫化物—硅酸盐（蒙脱石）和铁锰氧化物，而且氧化物相铁锰有明显分离趋势。Zn, Cu, Fe硫化物大量出现在铁锰结核和其他富含重金属沉积物中是从未见到的，它们形成在还原条件下，如果热液含H₂S（如加拉帕戈斯所见），很可能在释出海底之前，在基岩中就已沉淀出去了，在这种情况下将会形成基岩中的脉状、浸染状矿化；只有当海底能局部保持还原条件的情况下，它们才能形成沉积物，如在红海和东太平洋隆起（21°N）所见。蒙脱石代表热液不完全氧化的产物，它们在铁锰结核中也很少见到。铁锰氧化物在铁锰结核中是唯一的主要成分，但在海底热液沉积物中不同，不显

分离趋势 (三大洋和南极海域平均含Mn变化在11.69%到19.78%之间, 含Fe11.96~20.78%, 所有海洋平均, Mn为16.02%, Fe为15.55%)。铁锰氧化物沉积速率, 铁锰结核也明显慢于热液沉积物。最后, 热液沉积物中的一部分铁锰氧化物还可能是硫化物的氧化 (海底风化) 产物。

结 束 语

板块构造的研究是从海洋开始然后延引到大陆上来的。海底热液作用的研究, 是和板块构造有关的矿床成因研究的一个重要方面。对于这个问题, 海洋里的考察研究已取得一些有意义的成果, 现在也到了“登陆”的时候了, 希望本文能引起国内研究矿床成因和矿床与构造关系的同志的注意, 成为一块引玉之砖。

主 要 参 考 文 献

- [1] Bäcker, H., Schoell, M.: 1972, Nature Phys. Sci., 240

- [2] Bignell, R. D. et al.: 1976, in "Metallogeny and Plate Tectonics"

- [3] Bostrom, K., Peterson, M. N. A.: 1966, Econ. Geol., 61

- [4] Corliss, J. B.: 1971, Jour. Geophys. Res., 76

- [5] Degens, E. T., Ross, D. A.: 1969, Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea

- [6] Heath, G. R., Dymond, J.: 1977, Geol. Soc. Am. Bul., 88

- [7] Rona, P. A.: 1978, Econ. Geol., 73

- [8] Sayles, F. L. et al.: 1976, Geol. Soc. Am. Bul., 86

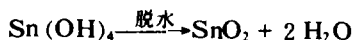
- [9] Schoell, M., Hartmann, M.: 1973, Marine Geology, 14

- [10] Von der Borch, C. C., Rex, R. W.: 1970, Initial Reports of DSDP. Vol. V

- [11] Williams, D. L., Von Herzen, R. P.: 1974, Geology, 2

- [2] Wolery, T. J., Sleep, N. H.: 1976, Jour. Geol., 84

(上接第21页)



平桂地区的石榴石夕卡岩风化壳常可形成一定规模的砂锡矿, 可能与此有关。

由于晚氧化物阶段可生成大量锡石, 酸性淋滤可使分散锡活化转移, 结合各类锡矿床的空间分布关系, 推断在夕卡岩锡矿外围可能有具工业意义的锡石—硫化物型和锡石—磁铁矿型矿床。

本文引用的分析资料由我院分析室、矿床室、岩矿室有关组提供, 初稿承蒙许文渊同志审阅, 在此一

并致谢。

主 要 参 考 文 献

- [1] Butler, B. C. M.: Mineral Mag., 1978, Vol. 42, No. 24, p. 487

- [2] 吴厚泽等: 地质与勘探, 1982, 第12期

- [3] 武汉地质学院: 《地球化学中的基础理论》, 1975年

- [4] Patterson, D. J., et al.: Econ. Geol., 1981, Vol. 76, No. 2, p. 393