

海底喷流矿床矿床特征与研究现状综述

闵雅

桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林, 541004;

摘要: 海底喷流矿床是近代矿产勘察所发现的很重要的一类矿床, 该类型矿床矿体通常呈层状、似层状, 具有规模大、储量富, 延伸稳定的特征, 为世界主要的 Zn、Pb 来源, 包括众多金属及少量非金属。本文在前人研究成果的基础上, 参考大量相关文献, 对海底喷流沉积 (SEDEX 型) 矿床的研究进行总结归纳, 阐述了海底喷流沉积矿床的构造背景、地质特点以及研究进展, 存在问题与发展趋势, 目的是为今后此类矿床的研究提供帮助。

关键词: SEDEX 型矿床; 地球化学特征; 成矿机制; 研究趋势

DOI: 10.64216/3080-1508.26.03.090

引言

海底喷流矿床是近代矿产勘察发现的重要矿床, 矿体规模大、储量多、延伸稳定, 是世界铅、锌、银铜矿产主要来源。学者研究该类型矿床已百年, 1925 年首次提出, 1986 年 M.J. Russell 将其命名为喷流沉积矿床

(SEDEX 型矿床)^[1]。前期国内学者多称其为“页岩型”矿床或层控矿床, 后来涂光炽教授综合各方观点对其 SEDEX 型矿床下了详细定义^[2], 总的来说海底喷流沉积型矿床可简单概括为即中低温成矿热水以喷流沉积方式在海底形成层状、似层状矿体, 底部可能有筒状矿化。

现代海底热液作用的发现推动了板块构造研究, 为揭开以页岩为容矿岩石的层状硫化物矿床形成之谜提供关键。本人在前人研究基础上, 研读国内外文献、梳理资料, 依据成矿背景与地质特征, 对该类型矿床的成矿特征和机制进行了研究, 并分析其成矿模式, 总结了其成因与研究趋势及问题。

1 成矿构造背景

SEDEX 型矿床形成受控于拉张性构造环境, 其构造动力学背景认知从“离散板块环境”拓展至“汇聚板块远端环境”, 分为两类核心构造场景:

早期研究认为, SEDEX 矿床多形成于离散板块动力学背景下的陆内裂谷、被动大陆边缘或坳拉槽裂谷^[3], 如厂坝、内蒙古狼山等矿床。此类环境优势是: 地壳伸展裂隙为热液循环提供通道, 沉积柱厚易海水渗透, 地温梯度可驱动热液淋滤金属元素。但是通过对澳大利亚北部元古代 SEDEX 矿床的进一步研究发现, 其成矿构造环境是汇聚板块远离弧后的陆内拉张盆地^[4]。该环境

独特性有三: 一是板块俯冲引发软流圈热扰动形成高热流区, 地温梯度高, 为热液对流提供热源; 二是硅铝质地壳与超厚沉积柱叠加, 热液淋滤壳源金属高效, 幔源流体可混入提升成矿潜力; 三是盆地稳定性强, 利于热液循环与矿体保存。

2 矿床地质特征

SEDEX 型矿床的地质特征具有显著的标志性, 从地层围岩、矿体形态到矿化蚀变均呈现规律性分布, 是矿床识别与勘探的核心依据。

2.1 地层围岩特征

SEDEX 矿床容矿岩石以碎屑沉积岩为主, 根据围岩差异可分两类。一类是在氧化环境下, 容矿岩石以碳酸盐岩为主, 含重晶石、钠长石等, 以澳大利亚 Mount Isa 矿床典型, 其容矿碳酸盐岩提供成矿空间、调节流体化学性质; 一类是在还原环境下, 赋矿围岩以碎屑岩 (页岩、粉砂岩等) 为主, 矿体中有机质与磁黄铁矿含量高, 例如加拿大 Sullivan 矿床典型, 其容矿页岩为金属元素还原沉淀提供物质^[5]。

2.2 矿体及矿石特征

池三川^[6]提出 SEDEX 矿床矿体具“双层结构”: 上部为海底沉积系统, 多为层状, 似层状的矿体组成, 与围岩整合接触、延伸范围较大; 下部为喷口下部的热液通道系统, 产出筒状和网脉状矿化带, 发育于热液通道或同生断裂, 是成矿流体交代围岩产物, 但由于后期的构造改造, 常缺失下部结构。SEDEX 型矿床主要的矿物组成以硫化物为主, 包括方铅矿、闪锌矿、黄铁矿

等,伴生少量黄铜矿等,部分含Ag、Sb、Ba等多种金属元素的硫酸盐矿物。

2.3 矿化蚀变分带

SEDEX型矿床矿化与蚀变具空间分带特征,分布规律受控于热液通道周边物理化学条件梯度变化。水平上,以热液通道为中心,由近及远依次为“硫化物相-重晶石相-氧化物相”矿化相分带。层状矿体外围发育重晶石岩、燧石岩等,形成“中心硫化物富集-外围酸盐岩环绕”环状结构,这是热液与海水混合时不同金属因溶解度差异先后沉淀的产物;垂向上,从热液通道下部至海底表层,下部以黄铜矿等高温矿物为主,上部富集方铅矿等中低温矿物^[7]。

矿床中蚀变现象普遍且范围广,主要的有硅化、绿泥石化、白云岩化等,蚀变矿物组合大多围绕热液流体溢出中心呈辐射状排布^[8]。针对“双层结构”矿体的围岩蚀变差异,不同学者观点不同,其差异源于不同矿床构造背景与热液活动强度区别,反映了SEDEX型矿床蚀变的复杂性。

3 同位素地球化学特征

同位素地球化学是揭示SEDEX型矿床成矿物质与流体来源的重要手段,目前已形成Pb、S、H-O、B多同位素联合示踪体系,为矿床成因分析提供直接证据。

3.1 铅同位素:成矿物质来源示踪

SEDEX型矿床的铅同位素具有“壳幔混合”特征,通过分析Zartman全球沉积喷流矿床铅构造演化模式图^[11]可知:多数矿床铅同位素落在地壳与造山带演化曲线附近,少数靠近上地幔端元。例如,青海锡铁山矿床的铅同位素比值与赋矿岩石一致,显示原始铅来自地壳深部或上地幔,后期受造山带改造^[9];秦岭凤太矿集区的铅同位素在 $\delta\beta$ - $\delta\gamma$ 图解中集中于“上地壳-地幔混合俯冲带铅”区域^[10],进一步印证壳幔物质的混合。

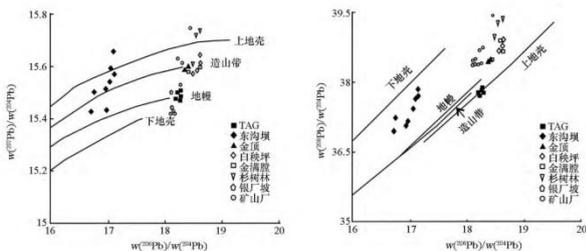


图1 沉积喷流矿床铅同位素构造模式(底图据文献^[11]修改,数据据文献^{[12][13]})

3.2 硫同位素:流体环境与硫源识别

SEDEX型矿床的硫同位素具有两大核心特征:一是 $\delta^{34}\text{S}$ 值比同期海水硫酸盐低约15%,表明硫主要来源于海水硫酸盐的还原;二是区域尺度上 $\delta^{34}\text{S}$ 变化范围大,但单个矿体或地层单元内同位素组成稳定。例如,内蒙古霍各矿床^[14] $\delta^{34}\text{S}$ 为-3.1%~23.5%;而西秦岭厂坝-李家沟矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 与泥盆系海水硫酸盐平均值接近,直接指向海水硫源^{[15][16]}。

此外,硫同位素分馏还可反映成矿环境:还原环境下(如有机质富集区),硫酸盐还原菌活动增强, $\delta^{34}\text{S}$ 值偏低;氧化环境下则以热化学还原为主, $\delta^{34}\text{S}$ 值偏高。

3.3 硼同位素:热液系统环境佐证

硼同位素($\delta^{11}\text{B}$)是识别海底热液环境的独特标志。自然界中,海水、海相沉积物的硼含量远高于地幔,且¹¹B与¹⁰B分馏显著。Palmer and Slack^[17]研究发现全球SEDEX型矿床电气石的 $\delta^{11}\text{B}$ 多为-1.7%~15.4%,平均值(-9.8±4.0)%,与Guaymas海盆热液蚀变沉积物的 $\delta^{11}\text{B}$ (-9%)一致,直接印证海底热液成因。

韩发^[18]对国内大厂锡多金属矿床的硼同位素研究发现,其数据极具代表性:纹层状电气石岩的 $\delta^{11}\text{B}$ 为-17.5%~-15.1%,成矿热液硼同位素-5%~-4%;而花岗岩脉状电气石的 $\delta^{11}\text{B}$ 为-16.5%~-14.7%,热液硼同位素-11%~-10%,两者差异清晰区分了海底喷流热液与岩浆热液系统。

4 成矿机制

4.1 成矿物质和流体来源

SEDEX型矿床成矿流体温度呈现中低温特征(主要集中于140~280°C区间),盐度范围为10%~20%,pH值表现为酸性至弱酸性,属于富含金属元素的还原性流体。此外,流体中氯和H₂S的含量高于正常海水水平,这为金属元素以氯和硫的络合物形式迁移创造了有利条件。

赵葵东^[19]通过对大厂锡矿床成矿流体中硅同位素、氮-氩同位素的示踪分析表明,成矿流体主要以海水和地幔流体混合形成;锡铁山铅锌矿床^[20]的成矿流体来自于深层地幔,并混合少量海水,成矿物质以壳源为主,或含有少量幔源物质;粤西大隆坪矿床的成矿流体中同

样存在海水与地幔流体混入现象；云南金顶和白秧坪矿床的氩、氦、氡同位素数据显示其成矿流体以壳幔混合流体为主导^[21]。总的来说，SEDEX 型矿床成矿物质和流体的来源存在多样性，包含了地壳、地幔和沉积盆地中的早期赋矿沉积物。

4.2 成矿模式

目前大部分学者研究对 SEDEX 型矿床的成矿模式主要有两种认识，一是盆地压实卤水成因（也称含水层模式），二是海底热液对流成因（也称为对流圈模式），而后的沉积成矿模式近年来更为认可和流行。

盆地压实卤水模式认为，盆地中的沉积物在成岩压实作用中释放出相对高压高温的成矿物质和成矿流体，并且成矿流体受到地热增温影响，盐度上升，通过萃取作用将盆地内的金属成矿物质转化至这些流体中，最后随流体的运移在相变和物化条件下于赋矿层位沉淀析出，这也是 SEDEX 型矿床的矿体主要受控于层位的主要原因。但近些年来，随着对 SEDEX 型矿床的认识深入，越来越多的学者认为盆地卤水模式并不能很好的解释形成矿床的形成温度问题，主要原因在于盆地卤水在压实作用中形成的温度在 95℃~130℃之间，而目前针对典型的 SEDEX 型矿床研究结果表明，其成矿温度为 140~280℃（最高可达 330℃）。盆地卤水温度远低于该类型矿床成矿温度，使得该成因模式的受到了学者们的质疑。

海底热液对流模式认为，成矿热液主要来源于地壳深部，而地壳深部的热液往往具有较高的温度（50℃~400℃）。以 Russell^[22]为代表的海底热液对流圈模式认为，位于地壳深部的成矿热液在地壳拉张环境中，通过裂隙（或塌陷、同生断裂等）发生渗透型上涌，与海水混合后在搬运、沉积作用下沉积成矿。目前对该模式阶段的划分三个阶段：早期对流热液来源深度较浅，主要发生 Fe、Mn、Zn 等元素的溶解；中期在对流作用增强下，温度也随着增高（200℃），热卤水萃取出更多金属物质，但低氧逸度的 Cu 元素未溶解至流体，金属络合物在流体与围岩交代作用下与围岩发生斜绿泥石化；后期热液对流规模进一步扩大，对流热液的温度、氧逸度持续升高（加大），此时早期相对较难溶解的 Pb、Zn、Cu 等元素发生溶解，并在海底沉积成矿。通

过该模式可以看出，矿体的规模主要受控于对流深度和对流规模，这也解释了 SEDEX 型矿床中网脉状矿体与层状矿体共存且具有规律性的分带现象的主要原因^{[2][3]}。

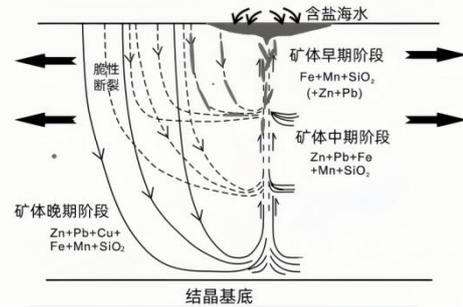


图 2 海底热液对流系统成矿模式图（据文献^[24]修改）

4.3 成矿作用及过程

通常而言，SEDEX 型矿床的主要金属物源来自于下盘的底岩或是容矿围岩。在成矿过程中，受到沉积压实作用的影响，沉积物被压实脱水，析出孔隙水。并且孔隙水受到地热增温影响，盐度上升，使得向外运移的过程中不断萃取成矿物质，从而形成初始的成矿流体^[25]。初始成矿流体在碳酸盐岩或碎屑岩内形成一个高温高压的热液流体。当构造活动出现时，大断层使沉积盖层出现裂隙，使得低温海水沿着裂隙进入沉积盆地并于初始流体混合形成对流。在混合流体向上运移过程中，会二次淋滤容矿围岩和火山岩中的金属成矿物质，形成最终的成矿流体从断裂面喷出海底，随后热液中的金属硫化物与上覆还原性海水中的 H₂S 发生反应并沉淀成矿^[18]。

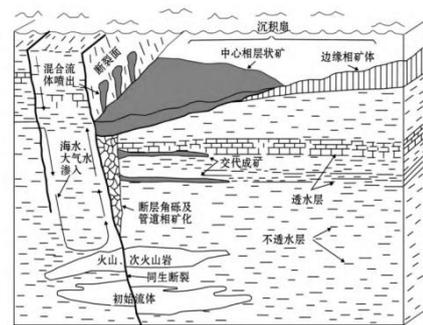


图 3 喷流沉积矿床成矿过程（据文献^[26]修改）

5 存在问题及研究趋势

随着各项研究手段的开发与精进，在过去的七十多年中，科研工作者们对 SEDEX 型矿床的研究取得了许多显著的成果，但目前仍有许多理论与勘查问题尚未得到合理解释，亟待进一步深化研究。

成矿物质及流体来源的研究。成矿物质与流体是研究矿床成因的关键内容。SEDEX型矿床成矿物质和流体的来源多样,不同环境下具有不同的物质来源。目前主要的研究方法包括流体包裹体、硫、铅、氢氧同位素分析等,新兴的硅、硼、氦、氩同位素在解释流体来源方面具有相对优势,但实际应用范围较窄,理论体系尚不完善。因此,今后流体的相关研究还需要更先进完善的同位素测试技术。

成矿动力来源的研究。成矿动力对于含矿热液运移、沉淀至关重要,理论上SEDEX型矿床成矿动力主要由地热梯度增温、地壳深部热源或地幔热柱,以及流体受到的沉积压实作用与区域地下水的中等作用等因素驱动。然而,正常地热梯度难以充分提供所需热源,沉积建造中缺乏直接的火山活动证据,这些都阻碍了热动力来源问题的深入研究。近期研究发现,海底深部的热液活动可能为喷流沉积成矿提供一定的动力来源。因此,研究构造岩浆演化轨迹,分析成矿作用热事件,将为喷流沉积动力来源提供重要信息。

成矿作用研究中,火山活动及岩浆作用的成因耦合关系长期存在学术分歧。虽多数矿床未识别出火山活动遗迹或岩体证据,但有学者指出,海底深部岩浆活动对成矿流体的形成与演化有关键调控作用:一是携带成矿物质,提供物源;二是构建动力来源,满足运移需求。从控矿机制看,SEDEX型矿床成矿中同生沉积作用起主要控性,虽未识别出直接火山活动记录,但深部岩浆活动仍有间接调控效应;喷流沉积成矿期后,随大地构造体制转换,矿床物理化学场剧烈扰动,有外源热流体输入进行后期叠加改造,后期构造活动对矿体的改造作用,对矿床勘探靶区优选、资源量估算及勘探部署有重要指导价值。

此外,如何依托硼、硅、氦-氯等同位素示踪体系,揭示深部岩浆活动在SEDEX矿床成矿过程中的物源与动力贡献、喷流沉积期后矿床演化对其最终成矿的制约效应及矿床动态演化过程,仍有待开展系统性深入研究。

参考文献

[1]田毓龙,秦德先,林幼斌,等.喷流热水沉积矿床研究的现状与进展[J].昆明理工大学学报,1999,(01):156-162. DOI:10.16112/j.cnki.53-1223/n.1999.01.0

26.

- [2]颜文.喷流矿床(Exhalative deposits)研究综述[J].地质地球化学,1993,(06):15-20.
- [3]罗俊杰,张建芳.Sedex型矿床地质特征及成矿物质来源示踪[J].资源环境与工程,2010,24(01):36-40. DOI:10.16536/j.cnki.issn.1671-1211.2010.01.011.
- [4]韩发,孙海田.Sedex型矿床成矿系统[J].地学前缘,1999,(01):140-163.
- [5]Cooke D R, Bull S W, Large R R, et al. The importance of oxidized brines for the formation of Australian proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (sedex) deposits [J]. Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists, 2000, 95(1):1-17.
- [6]池三川.非火山环境海底沉积—喷流(“SEDEX”)矿床[J].地学前缘,1994,(04):183.
- [7]薛春纪,祁思敬,隗合明,等.基础矿床学[M].北京:地质出版社,2007.
- [8]Goodfellow W D, Lydon J W. Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits [G] // Goodfellow W D. Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication. 2007:163-183.
- [9]坚润堂,李峰,徐国端.锡铁山SEDEX型铅锌矿床成矿物质来源综述[J].矿产与地质,2007,(06):642-648.
- [10]任鹏,梁婷,刘扩龙,等.秦岭凤太矿集区喷流沉积型铅锌矿床S、Pb同位素地球化学特征[J].西北地质,2014,47(01):137-149.
- [11]Zartman R E, Doe B R. Plumbotectonics—the model [J]. Tectono-physics, 1981, 75(1): 135-162.
- [12]蒋少涌,杨涛,李亮,等.大西洋洋中脊TAG热液区硫化物铅和硫同位素研究[J].岩石学报,2006,(10):2597-2602.

- [13]王彦斌,曾普胜,李延河,等.云南金顶和白秧坪矿床 He, Ar 同位素组成及其意义[J].矿物岩石, 2005, 24(4): 76-80.
- [14]余金杰,杨海明,叶会寿.霍各乞铜多金属矿床的地质—地球化学特征及矿质来源[J].矿床地质, 1993, 12(1): 67-76.
- [15]匡文龙,陈年生,张万虎,等.厂坝-李家沟SEDEX型铅锌矿床成矿作用研究[J].大地构造与成矿学, 2009, 33(04): 542-547. DOI:10.16539/j.dggzyckx.2009.04.015.
- [16]俞中辉,祝新友,童随友,等.西成地区铅-锌矿、金矿硫铅同位素特征及成矿关系的研究[J].矿产与地质, 2008, (03): 196-203.
- [17]Palmer M R, Slack J F. Boron Isotopic Composition of Tourmaline from Massive Sulfide Deposits and Tourmalinites [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1989, 103(4): 434-451.
- [18]韩发, R. W. 哈钦森. 大厂锡-多金属矿床喷气沉积成因的证据—矿床地质、地球化学特征[J]. 矿床地质, 1990, (04): 309-324. DOI:10.16111/j.0258-7106.1990.04.003.
- [19]赵葵东,蒋少涌,肖红权,等.大厂锡-多金属矿床成矿流体来源的He同位素证据[J].科学通报, 2002, (08): 632-635.
- [20]祝新友,邓吉牛,王京彬,等.锡铁山矿床两类喷流沉积成因的铅锌矿体研究[J].矿床地质, 2006, (03): 252-262. DOI:10.16111/j.0258-7106.2006.03.004
- [21]薛春纪,陈毓川,王登红,等.滇西北金顶和白秧坪矿床:地质和 He, Ne, Xe 同位素组成及成矿时代[J].中国科学(D辑:地球科学), 2003, (04): 315-322.
- [22] Russell M J, Solomon M, Walshe J L. The Genesis of Sediment [J]. Mineralium Deposita 1981, 16(1): 113-127.
- [23]王炜,鲍征宇,李璇,等. SEDEX 型矿床地质地球化学特征及研究趋势[J].物探与化探, 2010, 34(04): 415-421+434.
- [24]翟裕生,姚书振,蔡克勤.矿床学(第三版)[M].北京:地质出版社, 2011, 151~157.
- [25]詹胜强,杨伟.盆地流体运移与成矿浅谈—以 SEDEX 矿床为例[J].四川有色金属, 2010, (04): 11-14+10.
- [26]Holland H D. 100th anniversary special paper: Sedimentary mineral deposits and the evolution of earth's near-surface environments [J]. Economic Geology, 2005, 100(8): 1489-1509.