SEDEX 型和 VHMS 型矿床及其成矿地球动力学背景的对比*

Comprehensive Comparison of SEDEX and VHMS Deposits

刘建明[1] 叶 杰[1] 刘家军[2] 顾雪祥[2] 谭 骏[1] 朱和平[1]

（1 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室，北京 100101；
2 中国科学院地球化学研究所，贵州 贵阳 550002）

Liu Jianming[1], Ye Jie[1], Liu Jiajun[2], Gu Xuexiang[2], Tan Jun [1], Zhu Heping[1]

(1 Key Laboratory on Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics CAS, Beijing 100101, China; 2 Institute of Geochemistry CAS, Guiyang 550002, Guizhou, China)

摘 要 尽管 SEDEX 型和 VHMS 型矿床都是成矿热液在海底喷出形成的矿床，但二者的成矿大地构造背景、成矿盆地类型、成矿金属和成矿流体的来源、成矿金属元素共生组合、控矿地质因素、成矿地球化学和物理化学条件、以及成矿地质时代和矿床空间分布等方面都存在很大的差异。

关键词 SEDEX 型矿床 VHMS 型矿床 海底喷流成矿 地球演化

SEDEX 型（Sedimentary Exhalative，沉积喷流型）和 VHMS 型(Volcanic-Hosted Massive Sulfide，火山岩容矿的块状硫化物，也称为火山喷流型)矿床都是成矿热液在海底喷出形成的矿床，因此若仅以矿石沉淀就位的方式（机制）和矿体/矿石特征而言，二者具有很大的相似性。但二者的成矿大地构造背景、成矿盆地类型、成矿金属元素共生组合、矿床和矿石的特征、控矿地质因素、成矿地球化学和物理化学条件、以及成矿地质时代和矿床空间分布等方面都存在根本的差异。

1 大洋盆地与大陆地壳基底上的沉积盆地及其对应的流体体系

海底热液喷流成矿作用的研究在最近 20 年取得了长足的进展，主要得益于现代洋底正在活动的热液成矿喷流系统及其产物的发现和研究（刘建明，1991）。据 Rona(1989) 的统计，截止 1987 年，虽然全球总长 55000 km 的洋底扩张中心只有接近 1%被较为系统地调查过，但已发现的百多处矿化地段几乎包括了地质历史上已知的所有贱金属块状硫化物矿床类型，此外还涉及相当一部分铁锰氧化物矿床、以及金矿床和重晶石矿床。Rona 和 Scott (1993)将收集到的 135 个现代海底热液成矿区分成 7 大类：洋中脊火山岩容矿型、洋中脊沉积岩容矿型、弧后盆地火山岩容矿型、弧后盆地沉积岩容矿型、岛弧火山岩容矿型、前弧区火山岩容矿型、大洋板内火山中心火山岩容矿型。其分布遍及四大洋的各种类型洋中脊、裂谷海、弧后扩张中心、岛弧等板块边界以及大洋板内火山中心等环境。他们在今后研究方向中指出，迄今为止尚未发现对应于古代页岩型铅-锌-钡-银块状硫化物矿床（如德国的 Meggen、Rammelsberg 等矿床，亦即 SEDEX 型矿床）的现代类似物。这类矿床是产在大陆地壳基底之上，沉积岩容矿，火山岩可有可无。而部分 VHMS 型矿床则产在玄武质大洋型地壳之上，总是有火山岩共生。Rona 和 Scott 并指出，尽管现代红海底著名的热卤水池与古代页岩型贱金属块状硫化物矿床在很多方面十分相近，但仍然是产在洋壳之上。据我们的调

* 本文受国家重点基础研究项目（G1999043210）的资助
第一作者简介 刘建明，男，1958 年生，研究员，矿床学。

研，真正的现代类似物要数目前在被动大陆边缘和陆内裂谷盆地发现的各种与油气生成有关的流体系统，如我国南海的莺-琼盆地、Gulf of Mexico、东非大裂谷等盆地发现的现代活动热流体。

因此，我们追随 Kingston 等（1983）的全球分类体系，区别两类性质截然不同的盆地：① 具玄武质洋壳的大洋盆地，火山活动强烈，盆地充填物以火山物质、尤其是玄武质火山物质为主；② 发育于大陆性地壳（或至少是过渡性地壳）基底之上的正常沉积盆地，盆地充填物以正常沉积物为主，火山活动和火山沉积可有可无。相应地，两大类盆地对应着两类特征迥异的地质流体，二者的成矿特征也迥然不同（表 1）：① 大洋盆地（经常是大洋扩张中心）与海底基性火山活动有关的地质流体系统，对应于 VHMS 型矿床；② 活动于正常沉积盆地的演化过程中、并积极参与了沉积物的各种成岩-后生变化的复杂流体相（水＋烃），对应于 SEDEX 型矿床。

表 **1**　两大类盆地对应的流体体系以及 VHMS 型和 SEDEX 型矿床特征对比简表

洋盆——VHMS 型矿床	陆壳基底上的正常沉积盆地——SEDEX 型矿床
总是与玄武质大洋地壳有关，常产在拉张型板块边界或活动大陆边缘	大陆地壳基底上的拉伸性沉积盆地，包括大陆裂谷、被动大陆边缘、坳拉槽、克拉通盆地、以及弧后盆地等
总是有强烈的火山岩浆活动，赋矿围岩以火山岩为主，正常沉积岩较少	火山活动可有可无，赋矿地层经常是有机质丰富的正常沉积岩系，有关矿床往往具有层控、时控、相（沉积相）控的特征
成矿热液主要由海水/玄武岩反应而来，成矿温度较高，成矿时的海水深度通常较大	成矿流体包括盆地演化过程中产生的自生流体和外来流体，含丰富的有机组分，成矿温度较低，成矿时的海水深度变化较大
流体活动于裂隙相对发育、性质相对较均匀的块状岩石之中，流动形式以大规模的对流为主	流体活动于极不均一的层状岩系中，主要流动形式是压实流和重力流，大规模的对流难以实现
成矿与沉积有机质无关，不与油气藏共生	与沉积有机质关系密切，常与油气藏共生
主要矿床类型是火山岩容矿的块状硫化物矿床（VHMS）和铁锰氧化物矿床	矿床类型复杂，Sedex 型、MVT 型、黑色岩系矿床、红层矿床、SMG 型等
成矿元素组合相对较为简单 Cu-Pb-Zn-(Au)-(Ag)-Ba 以及 Fe-Mn	成矿元素组合十分复杂， Cu-Pb-Zn-Sn-Sb-W-Ag-Au-Hg-As-V-Ni-Mo-Co-Fe-Mn-F-Ba-Pt 族元素
成矿流体：洋盆中与基性火山活动有关的热液流体	成矿流体：陆壳基底上正常沉积盆地中的盆地流体
现代对应物：现代洋底扩张中心的活动热液流体	现代对应物：产油盆地中的油田水、我国南海莺琼盆地超压流体囊、美国墨西哥湾的现代热流体

大陆地壳远较大洋地壳复杂，因此主要建立在大洋地质基础上的板块构造理论在 70 年代末登陆后遇到了极大的困难。同样，主要建立在洋底活动热液体系基础上的火山喷流成矿理论无法解释大陆地壳基底之上的沉积盆地内的流体成矿过程。实际上，后者远较前者复杂得多（表 1）。我们的研究表明，除经典的 SEDEX 型贱金属块状硫化物矿床外，沉积喷流成矿作用对许多性质不同的金属元素都具有很强的成矿能力，可能出现非常复杂的成矿元素共生组合和矿床特征，乃是任何现代洋底热液成矿系统和古代 VHMS 型矿床所无法比较的。中国乃是欧亚大陆的最后拼接部分，素以大陆地质为特色，其复杂的盆山配置格局给人以深刻的印象。在我国，相继发现了一些与已知经典类型不同的、具有中国特色的、重要的沉积喷流型矿床类型，除了常见的贱金属块状硫化物矿床外，还有内蒙林西大井铜-锡-铅-锌-银矿床、滇黔桂金三角地区的微细浸染型金矿床、青城子钴-银矿床、云南白牛厂的独立银矿床、华南巨型锑矿带中的众多层状锑矿床、湘西沃溪钨-锑-金建造矿床、广西大厂锡-锑-铅-锌矿床等（刘建明等，1997，2000，2001），涉及到多种罕见的复杂成矿元素建造组合，并显示了极大的经济意义。

2　VHMS 型和 SEDEX 型矿床与地球演化的关系

矿床，在时间上作为地球某一演化阶段、在空间上作为特定大地构造环境和条件下、某一地质事件的产物，其本身就是理解地球演化历史和大地构造特征的非常有用的标志物。发生于大陆地壳基底上沉积盆地演化过程中的沉积喷流成矿作用，显然与地球上大陆型地壳的形成和演化密切相关。成矿金属元素在参与地球演化的过程中在地球的某些部位发生迁移、贫化、富集、甚至成矿，这也是理解地球演化历史和演

化机制的重要的切入口。同时，这些问题也是认识矿床的时间-空间演化规律和分布规律的关键环节。

目前普遍认为地球是由太阳系中散布的、不同成分的行星尘不均匀地聚集而成的。行星尘的聚集过程是一个高温过程，原始地球可能曾发生整体熔融。亲铁元素聚集成地核演化阶段大约结束于 4.5 Ga（Jackson, 1998）。然后在地球原始物质早期强烈去气产生地球早期大气圈和水圈的同时，地球硅酸盐部分(Silicate Earth)也开始演化。直接从原始地幔产生的最初的洋壳是基性-超基性的。太古宙的热产生率高于今天的 2～3 倍，且随后呈指数函数降低。这些热能很可能通过环流来消耗掉，也就是不断地生成新的洋壳并不断地俯冲再循环。因此当时地幔环流的速度以及相关的大洋板块生长和再循环（板块消亡）的速度可能都比今天快得多。今天地球热能消耗的 60%是通过板块再循环实现的，这也可能是使太古宙的高热能消耗的最有效机制。在这种剧烈的 intra-oceanic 过程中，通过俯冲/仰冲带大洋岛弧的形成、通过部分洋中脊转变成大洋高原、以及通过地幔热柱产生的冰岛式岩浆底板垫托等机制，聚集形成最初的大陆地壳核，从而开始了陆壳的生长演化。随后的 3.2～2.6 Ga 期间则是地壳强烈增生阶段，表现为大量的岛弧型绿岩带、安弟斯型钙碱性正片麻岩的出现。Taylor and McLennan (1995)认为，现有地壳的 60%以上在太古宙末（2.5 Ga 以前）就已经形成，而且有人建议在太古宙末出现了一个巨大的联合古陆（Piper, 1987; Windley, 1998）。因此，进入元古宙时（2.5 Ga）广阔的、高度克拉通化的大陆已经耸立在地球表面，并且开始了与显生宙类似的大陆漂移-板块构造运动机制以及类似的沉积、变质、岩浆、成矿等地质作用过程。地球演化进入了一个崭新的阶段。表 2 简要列出了太古宙与元古宙的主要区别。

表 **2** 太古宙和元古宙基本特征比较简表

特 征	太 古 宙	元 古 宙
热特征	热产生率和大地热流值极高，地球的整体温度高	热产生率、大地热流值、以及地球的整体温度均大大降低
岩石圈特征	洋壳多而且厚，只有少量正在生成的陆核，物质的壳内分异作用不明显	已经有了大量高度克拉通化的陆壳，物质的壳内分异作用显著加强，洋壳数量减少而且厚度也变小
陆壳增生方式	大洋岛弧、洋底扩张脊转变成深海高原、冰岛式底板托垫等相互聚合成大陆的雏形	以活动大陆边缘岛弧的拼贴增生为主 ？
板块构造型式	地幔对流速度快，较多、较小的大洋板片以较快的速度运动，洋壳的生产和消亡快速进行，很少典型的碰撞型造山活动	地幔对流速度和板块运动速度显著减慢，大陆板块显著增多，板块构造型式与显生宙接近，联合大陆和 Wilson 旋回以及碰撞型造山相继开始出现
岩浆作用	岩浆活动强烈、频繁、而且普遍，以基性-超基性岩浆为主，很少碱性岩、金伯利岩和大规模的斜长岩，壳内分熔的岩浆少	岩浆活动强度显著减弱，碱性岩、金伯利岩和大规模的斜长岩大量出现，壳内分熔的岩浆大大增多
沉积作用	以火山沉积和极不成熟的碎屑沉积为主，碳酸盐岩沉积少，没有蒸发岩和陆相红层沉积	大量的浅海台地-陆棚沉积，碎屑物成熟度增高，碳酸盐岩沉积增多，出现蒸发岩和陆相红层沉积
变质作用	以高温低压变质作用为特征，无蓝片岩和榴辉岩等高压变质岩	区域变质温度降低，出现蓝片岩和榴辉岩等高压变质岩
大气圈和水圈	强还原性，CO_2 浓度高	氧化性不断增强，CO_2 浓度降低
生物圈	只有最低等的原始海洋微生物，喜氧生物少	大量的海洋生物和有机物质，喜氧生物增多
成矿作用	阿尔果马型 BIF 硅铁建造，VHMS，绿岩带型矿床，砾岩型 U-Au 矿床	苏必利尔型 BIF 硅铁建造，SEDEX，无绿岩带型矿床和砾岩型 U-Au 矿床

注：主要根据下述文献综合：Condie, 1989; Taylor and Mclennan, 1995; Pirajno, 1992; Windley, 1998。

进入元古宙后，2.4～2.0 Ga 期间，联合大陆开裂并解体成若干较小的陆块，并在随后的 2.0～1.6 Ga 期间主要在这些陆块边缘以岛弧拼贴的方式完成了地球的第二次大规模的陆壳增生，结果在 1.6～1.4 Ga 期间又一次出现了联合古陆（Piper, 1987; Hoffmann, 1992）。值得注意的是，尽管元古宙期间的岛弧及其拼贴造山（并使大陆增生）十分常见，但在早中元古宙期间缺少强烈的碰撞造山活动，直到中新元古宙(1.4～1.0 Ga)才出现一次强烈的、几乎是全球性的碰撞造山运动，即所谓的 Grenvillian 造山运动，Hoffman (1991)甚至提出可能出现了一条 13000 km 长的巨型造山带。此后，地球似乎进入了联合大陆-裂解-联合大陆的 Wilson 板块构造旋回，并在 1.0 Ga、0.55 Ga 以及二叠纪三次出现联合大陆及随后的裂解(Windley, 1998)。

目前许多学者认为，在全球板块构造运动中，大陆块体倾向于周期性地联合形成 1～2 个巨大的联合

大陆，并随后开始一个正常的 Wilson 板块构造旋回(如 Hoffman, 1992; Unrug, 1992; Anderson, 1994; Taylor and MecLennan, 1995; Windley, 1998)，而且每次联合古陆的出现都与大陆的周期性增长以及与板块构造旋回相呼应。这种周期型的联合古陆和大陆增生一方面与地球化学元素在大陆地壳的周期性分异以及地壳成熟度的提高相联系，同时还与海平面的升降、古气候的全球变化、古生物的灭绝、大规模的火山岩浆活动等全球性事件密切相关。而所有这些都是控制金属矿床、尤其是控制沉积喷流型矿床生成的重要因素。

对我们的研究至关重要的是，SEDEX 型成矿作用发生在大陆地壳基底之上的沉积盆地中，因此太古宙时较少发生，但太古宙却有十分丰富的 VHMS 和 BIF 型矿床的形成。Klau 和 Large（1980）将全球的海底喷流型铜-铅-锌矿床分为镁铁质-长英质火山岩容矿型和沉积岩容矿型，发现所有太古宙的矿床都是火山岩容矿的，而所有沉积岩容矿的矿床都是太古宙以后形成的，尤其是在中元古宙(（1.5±0.2）Ga)出现了一个沉积岩容矿型矿床的成矿高峰。在我国，古生代（尤其是寒武纪和泥盆纪）也是 SEDEX 型矿床形成的重要地质时代。尤其是那些倾向于在上部地壳富集的元素，如铅锌锑锡等，当其在地球动力学演化过程中重新卷入深部再循环时（如大陆深俯冲），就会通过各种途径向上往地壳浅部迁移，从而在浅部形成 SEDEX 型矿床。

参 考 文 献

刘建明. 1991.海底喷流型层控矿床. 见：朱上庆，郑明华主编. 层控矿床学. 北京：地质出版社. 101～120.

刘建明，刘家军，顾雪祥. 1997. 沉积盆地中的流体活动及其成矿作用. 岩石矿物学杂志，16（4）：341～352.

刘建明. 2000. 沉积盆地动力学与盆地流体成矿. 矿物岩石地球化学通讯，19（2）：76～84.

刘建明，叶杰，等. 2001. 一种新类型热水沉积岩——产在湖相断陷盆地中的菱铁绢云硅质岩. 中国科学，D 缉，44：570～577.

Anderson D L.1994. Superplumes or supercontinents? Geology, 22, 39～42.

Condie K C.1989. Plate tectonic and crustal evolution (3rd ed.). Oxford: Pergamon.

Hoffman P F. 1991. Did the break-out of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? Science, 252, 1409～1412

Hoffman P F.1992. Supercontinents. In: Encyclopedia of Earth System Sciences. Academic, San Diego. 4, 323～328.

Jackson I. 1998.ed. The Earth’s mantle: Composition, structure, and evolution, Preface. Cambridge University Press, 1～556.

Kingston D R. Dishroon C P. Williams P A.1983. Global basin classification system. AAPG Bull, 67：2175～2193.

Klau W. Large D E. 1980. Submarine exhalative Cu-Pb-Zn deposits——A discussion of their classification and metallogenesis. Geol. Jahrbuch D/40, 13～58.

Piper J D A. 1987. Palaeomagnetism and the continental crust. Milton Keynes：Open University Press.

Rona P A. Scott S P. 1993. A special issue on sea-floor hydrothermal mineralization: New perspective——Preface. Econ Geol, 99：1933～1976.

Rona P A.1989. Hydrothermal mineralization at oceanic ridge. Canadian Mineralogist, 26：431～465.

Taylor S R. Mclennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Rev. Geophys. 33：241～265.

Unrug R. 1992. The supercontinent cycle and Gondwanaland assembly: Component cratons and the timing of suturing events. J. Geodyn. 16：215～240.

Windley B F.1998. The evolving continents (3rd ed.). Wiley, Chichester.417～465.