

低温成矿系列中生物有机质的矿床学意义

胡明安

(中国地质大学资源学院, 武汉 430074)

摘要: 在低温热液型矿床的形成过程中, 生物和有机质发挥了重要的成矿作用. 这种作用可以归纳为直接和间接两种. 生物及有机质直接参与成矿作用的意义在于: 在沉积岩主岩的同生沉积阶段形成矿源层, 在成矿物质活化迁移过程中形成含矿流体, 在成矿元素的沉淀阶段富集形成矿床; 生物及有机质间接成矿意义是指有机质的成熟演变作用及其产物可以揭示成矿过程, 反映低温热液成矿机理和成矿条件.

关键词: 低温成矿; 生物有机质; 直接成矿意义; 间接成矿意义.

中图分类号: P593; P61

文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2000)04-0375-05

作者简介: 胡明安, 男, 教授, 博士生导师, 1946年生, 1970年毕业于北京地质学院勘探系, 现主要从事矿床学、生物成矿和矿床有机地球化学的教学和科研工作.

1 矿床中的有机质

在许多金属及非金属矿床中, 尤其在低温热液成矿系列(成矿温度小于 300 °C)^{[1]①}矿床中, 广泛见到有机质与矿石密切共生的现象^[2]. 在这些低温热液矿床中, 有机碳的含量一般为百分之零点几到百分之几, 少数可达百分之十几. 综合研究表明, 这些有机质不但与矿石在空间上紧密共生, 而且在成因方面也存在内在联系^[3].

在矿床中, 有机质既可以赋存于矿石中, 也可以赋存于矿物包裹体中. 有机质的赋存状态, 既有固态的干酪根, 也有液态的沥青、原油, 还有气态的烃类. 这些有机质的来源主要有两个方面: 原生型和他地迁移型. 原生型有机质一般与沉积岩的沉积环境相吻合, 而他地迁移型有机质多为气、液态烃类有机化合物, 主要充填于裂隙、晶洞中. 有机质的原生类型主要有3种^[4]: 即Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型干酪根. Ⅰ型干酪根来自微生物或藻类生物, 多与湖泊相沉积环境有关. 在化学组成中, 这类干酪根的结构主要为脂肪族型, 是一种富氢贫氧型有机质, 其 H/C 比值较高, 为 1.65~1.42; O/C 比值较低, 为 0.050~0.085, 在

地质热事件作用下有最强的生烃潜力. Ⅱ型干酪根由海相浮游生物(其中贡献最大者为海相浮游植物)衍生而来, 与海相沉积环境有关. 这类有机质的 H/C 比值(1.42~1.18)和 O/C 比值(0.085~0.120)均处于中间状态, 具有高度饱和的多环碳结构, 有较强的生烃潜力. Ⅲ型干酪根来源于陆相高等植物, 生成环境代表陆相沉积作用的特点, 其分子组成中 H/C 比值最低, 为 1.18~0.92; O/C 比值最高, 为 0.12~0.16, 主要为芳香族结构, 生烃潜力最低, 小于Ⅰ型和Ⅱ型干酪根.

2 有机质的成熟演化和生物标志物

从形成过程来看, 无机物沉积岩从同生沉积时期松散的沉积物到成岩作用、成岩期后变化、沉积变质, 与之共生的有机物则逐渐成熟, 相应地从活着的生物、死亡的遗体及生物聚合物—腐殖质、地质聚合物—干酪根到结晶形成半石墨和石墨. 引起有机质成熟变化的最主要的因素是“热”作用^[5]. 在热作用下, 有机质的分子链不断被破坏, 长链变小变短, 环链断开, 侧链、分支链及各种官能团不断地断裂, C, H, O, P, S, N 等元素从有机主分子上脱离、丧失, 组成的 H₂O, H₂S, CO, CO₂, N₂, H₂ 以及 CH₄ 等小分子烃类化合物离开有机主分子母体, 残留有机质的结

收稿日期: 2000-04-14

①Touray J.C. 矿物流体包裹体的现代研究方法及其在矿床成因研究中的应用. 见: 世界银行 CUDPII“中国大学发展计划专门小组”中国地质大学专家讲习班中译教材, 1990. 147~150.

构则逐渐趋向稳定,有机质演变到最后,只有碳残留下来,结晶形成最为稳定的石墨矿物,而无机物这时也由沉积物过渡到绿片岩相。

在有机质的上述成熟演化过程中,生成大量的生物标志物^[5]。生物标志物是一类产于沉积有机质中以及原油、油页岩、煤中,并来源于活的生物体,在有机质演化过程中具有一定稳定性,没有或较少发生变化,基本保存了原始生物化学组分碳骨架,记载了原始生物母体特殊分子结构信息的有机化合物^[5,6]。正构烷烃、类异戊二烯烃、甾族化合物、萜类化合物、异构和反异构烷烃、芳香烃等是几种重要的生物标志物。由于生物标志物在热成熟演化过程中具有结构上的继承性和变异性,它能记录和传递地质事件的许多重要信息,因此有助于人们研究矿床形成的热演变过程,重建含矿地层的沉积成岩环境,探索矿床形成的条件。

3 生物有机质的低温成矿意义

在某些低温热液矿床中,有机质是一种重要的伴生组分,其成矿意义可以概括为两个方面。

(1)直接成矿意义^[3,7]。在矿床形成过程的不同阶段,生物有机质的直接成矿作用也不相同。在沉积岩主岩的同生沉积阶段,生物及有机质的参与对于矿床的形成可以起到 5 个方面的作用:①生物在生存过程中有选择性地吸取某些元素导致成矿元素的生物聚集;②改变沉淀环境的物化条件,从而改变成矿物质的沉淀过程与性质;③生物的新陈代谢将成矿元素从一种状态转变为另一种状态,改变它们的地球化学再循环方式;④生物死亡后产生大量腐殖质,增强对周围环境中成矿元素的物理吸附作用和化学结合能力;⑤产生小分子有机化合物,形成有机液体。在这一阶段,由于生物有机质的作用,形成矿胚或矿源层。

在成岩及成岩期后成矿液体的形成阶段,由于有机液体的形成,可与矿源层或含矿岩石发生积极的水-岩反应,有机化合物与成矿元素结合形成具有较大溶解度的有机-金属络合物,可以增强成矿元素的溶解作用和迁移能力,构成含矿热液进行运移。在成矿元素的沉淀富集阶段,当含矿热液在构造空间运移并到达有利的构造环境时,若遇到另一种富含有机化合物或含有细菌类微生物的不同流体时,由于有机化合物是一种还原剂,以及由于细菌的

微生物降解作用,构成一种重要的成矿“地球化学障”,因此许多成矿元素,尤其是变价元素如 Au^{3+} , Au^{1+} , U^{6+} 等被还原,含矿热液原有的地球化学平衡被破坏,促使成矿物质从热液中析出,在一个有限的空间范围内沉淀、富集形成矿床。

(2)间接成矿意义^[6,8]。如前所述,在有机质的成熟演化过程中,引起有机质发生成熟的最重要的地质因素是“热”事件。W.C.Pysey III 提出“液态烃窗口”的概念,即在温度为 $65.6\sim 148.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,是液态烃生成的最佳温度范围(据文献[4])。当环境温度低于“液态烃窗口”时,有机质处于未成熟状态;位于这个温度范围,有机质处于高级成熟状态;高于这个温度范围,有机质处于裂解生气状态。很显然,有机质成熟演化的这个温度范围与低温热液矿床形成的温度条件一致,因而有机质的成熟度及其产物生物标志物可以揭示低温成矿过程中地质热事件的性质。不同的生物标志物不但可以反映不同的生物有机质来源,也可以反映地质热事件的演变历史和演变路径、成矿流体的性质和物化条件,因而可以揭示低温成矿作用的地球动力学背景,反映成矿作用的机理及其过程,显示成矿作用的低温地球化学特征。

4 硫酸盐的生物及非生物还原作用

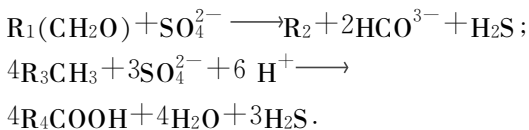
在以碳酸盐类沉积岩为容矿主岩的铅锌硫化物矿床形成过程中,地层硫酸盐 SO_4^{2-} 被认为是生成硫化物所必需的还原硫—硫化氢的主要来源^[3]。硫酸盐中的硫转变成硫化氢,主要通过两种方式^[8]:

(1)硫酸盐的生物还原作用。在这种作用过程中,有机质作为硫酸盐还原细菌的营养基,保证了这些微生物的生存繁殖,导致硫化氢的生成^[7]。根据微生物的生理学、生态学及生物化学原理,硫酸盐还原细菌为严格的厌氧—异养型微生物,其生成繁衍的最佳温度不超过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。它们赖以生存发育的营养基主要来自地层中的各种有机化合物,如醋酸、乳酸、具有较长分子链的脂肪酸以及芳香族化合物。在适合微生物生存的温度条件下($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$),硫酸盐还原细菌等微生物能够选择性地并按一定顺序降解有机组分,进行新陈代谢^[9]。这种降解顺序是:正构烷烃→支链烷烃→异戊间二烯烃→含有母质构型甾烷→藿烷→重排甾烷→孕甾烷→三环萜烷→咖吗烷^[10]。硫酸盐还原细菌生态各异,只要有充足的硫酸盐及有机质存在并构成有利的还原条件,它们便

可以在各种环境中生存发育:在地下渗滤水中、在海水中、在盐沼里、在大洋沉积物中甚至在水深万 m 以下的深海沉积物中,都发现了这些微生物的活动.在铅锌硫化物的低温成矿过程中,地层硫酸盐的生物还原作用是导致金属硫化物形成富集的主要原因^[8]. Petra 等^[11]的实验也证实了这种观点: $C_{10}H_{22} + 7.75SO_4^{2-} + 5.5H^+ \longrightarrow 10HCO_3^- + 7.75H_2S + H_2O$. 他们的实验结果表明:一种脱硫弧菌种在 55~65 °C, pH 值为 6.8 时,用癸烷 $C_{10}H_{22}$ 反应,结果每 1.5 g 分子癸烷消耗 1 L 培养媒介,可生成 11.3 mg 分子 H_2S . 硫酸盐通过细菌还原生成硫化氢,正常还伴随着硫同位素的分馏作用^[8]. 因此硫同位素研究是确定自然环境中还原硫生物成因的一种重要手段.

(2) 硫酸盐的非生物还原作用. 许多低温热液矿床的成矿温度高于 100 °C, 这种温度条件是不适合微生物生存发育的^[3]. 在这种成矿条件下,硫酸盐通过有机质或伴生的甲烷发生热化学还原作用,为 MVT 型矿床中铅锌硫化物的沉淀提供充足的硫化氢^[12]. Barten^[12]于 1967 年首次提出了与矿床有关的硫酸盐的热化学反应作用. Rye 等^[13]曾指出澳大利亚北部地区 McArthur River 矿床中贱金属硫化物形成温度为 100~260 °C. 这些金属硫化物是通过主岩中有机质与溶液中的 SO_4^{2-} 发生非生物氧化还原反应生成大量的还原硫——硫化氢,而沉淀富集的. 加拿大西北地区的 Pine Point 铅锌矿床,是在 100 °C 以上温度条件下通过地层中的沥青类有机质与矿液中的硫酸盐发生热化学还原反应,导致铅锌硫化物沉淀而形成的^[14].

下述化学反应表示了有机质作为还原剂,促使硫酸盐发生热化学还原作用生成还原硫的可能^[15]:

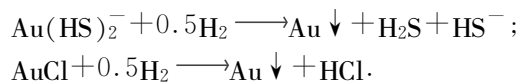


式中: R_1 , R_2 , R_3 和 R_4 均为大分子有机化合物. 在这种非生物的热化学反应中,当温度逐渐升高,还原剂含量加大,在有 H_2S 作为接触剂和粘土作为催化剂的条件下,热化学反应速度更为迅速. 在发生热化学还原的有机质中,成熟度变大,氢含量大大减少, H/C 比值变小,芳构化增强,表征生烃潜力的氢指数 HI 也下降^[15].

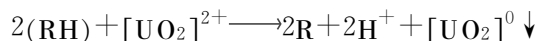
5 生物有机质的成矿地球化学障意义

在低温成矿过程中,发生迁移的含矿热液常会遇到环境物化条件的突变,从而使含矿热液原有的地球化学平衡被破坏,使其中成矿元素的迁移活动强度在一个有限的范围内急剧减弱,并在局部地段发生沉淀富集. 这种有限范围的地段常被称为具成矿意义的“地球化学障”. 各种化学的、物理的以及生物化学的地质因素发生突变的地段都可构成地球化学障. 其中,有机质的存在,以及大气降水所携带的细菌类微生物的参与,也是构成成矿地球化学障的重要因素. 生物有机质的成矿地球化学障意义,对于低温热液矿床的形成尤为重要.

低温热液矿床的成矿元素在成矿热液中主要呈络合物形式存在, HS^- 和 Cl^- 是两种最重要的络离子配位基^[1]. 成矿元素与 HS^- 形成的络合物的稳定性按 Au, Cu, Pb, Zn 的顺序减少,与 Cl^- 形成的络合物的稳定性则依次增大. Au 在热液中主要与 HS^- 形成 $Au(HS)_2^-$, $Au(HS)^0$ 或 $HAu(HS)_2^0$. Au 的 Cl^- 络合物 ($AuCl_2^-$) 只有在 H_2S 含量极低, Cl^- 含量较高,且 pH 值小于 4.5 时才比较重要. 不同形式的 Au^+ (或 Au^{3+}) 发生还原作用就导致自然金沉淀^①, 而有机质是一种大量存在的还原剂物质. 在生物及有机质构成地球化学障的有利构造空间,成矿流体与有机质的还原作用将导致流体中 H_2 逸度的增大. 这是导致 Au 沉淀的有效机制^[1]. 如:

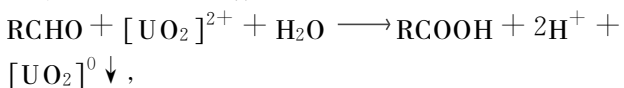


水—岩反应也会使矿液的氧化状态发生变化,而导致矿液中的某些变价元素如 Au, Cu, V, U, Fe 化学价态发生改变,或改变某些络阴离子稳定性. 岩石中有机质的增加是引起矿液发生还原作用的主要因素之一^[2]. Forbes 等^[16]1988 年研究了尼日尔 Akouta 砂岩铀矿中的有机质. 他们指出有机质是一种重要的还原剂. 铀矿物的形成与含铀物质的氧化—还原反应有关,这种关系可用下述化学反应式表示:



式中: R 代表有机质大分子. 这个反应意味着: 当一个 UO_2 分子沉淀时,有机质中就有两个互相连接的氢原子失去,亦即在 100 mg 的 UO_2 生成时,就有 75 mg 的氢在还原过程中失去. Leventhal 等人(据文献^[16])也曾用类似的化学反应式表达了铀矿形成过

程中有机质的重要作用:



这个反应式意味着每 100 mg 还原铀生成时,就有 6.6 mg 的氧增加到有机质中,使有机质发生氧化。

综上所述,在低温成矿系列中,生物和有机质发挥了重要的直接和间接作用,尤其是有机质在受到各种地质热事件影响后其变化的敏感性要比无机质矿物高得多。地质热事件的性质不同,生物有机质的来源不同,成矿作用的类型以及有机质的变化特点也不相同。因此,地质热事件、生物有机质及低温成矿作用这三者在共生空间、发生时间及形成原因诸方面均存在着内在联系,其由来、发展、演变及存在均体现了这三者是一个互相影响又互相依存的统一体系^[4],同时也深刻揭示了在低温成矿系列中生物有机质的矿床学意义。

参考文献:

- [1] 卢焕章,池国祥,王中刚. 典型金属矿床成因及其构造环境[M]. 北京:地质出版社,1995. 148.
- [2] Patrick L, Andrew P. Organic matter in hydrothermal ore deposits [A]. In: Hubert L B, ed. Geochemistry of hydrothermal ore deposits [C]. 3rd ed. [s.l.]: John Wiley & Sons, 1997. 613~645.
- [3] Disnar J R, Sureau J F. Organic matter in ore genesis: progress and perspectives [J]. Org Geochem, 1990, 16: 677~599.
- [4] Tissot B P, Welte D H. Petroleum formation and occurrence [M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1984.
- [5] 胡明安,罗学常,高广立. 有机质成熟异常及生物标志物的矿床学意义[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1998.
- [6] 王启军,陈建渝. 油气地球化学[M]. 武汉:中国地质大

学出版社,1988.

- [7] Hu M A, Disnar J R, Sureau J F. Organic geochemical indicators of biological sulphate reduction in early diagenetic Zn-Pb mineralization: the Bois - Madawe deposit (Gard, France) [J]. Applied Geochemistry, 1995, 10(4): 419~435.
- [8] Trudinger P A, Chambers L A, Smith J W. Low-temperature sulphate reduction: biological versus abiological [J]. Can J Earth Sci, 1985, 22: 1910~1918.
- [9] 胡明安. 与细菌活动有关的成矿作用——两个欧洲铅锌矿床实例[J]. 矿床地质, 1997, 16(1): 61~70.
- [10] Philp R P. Fuel biobarkers: applications and spectra [M]. [s.l.]: Elsevier, 1985. 55.
- [11] Petra R. Anaerobic oxidation of hydrocarbons in crude oil by new types of sulphate-reducing bacteria [J]. Nature, 1994, 372: 455~458.
- [12] Barten P B Jr. Possible role of organic matter in the precipitation of the Mississippi Valley ores [J]. Econ Geol, 1967, 3: 371~378.
- [13] Rye D M, Williams N. Studies of the base metal sulfide deposits at MrArthur River, Northern Territory, Australia. III. The stable isotope geochemistry of the H-Y-C, Ridge and Cooley deposits [J]. Econ Geol, 1981, 76: 1~26.
- [14] Powell T G, Macpueen R W. Precipitation of sulfide ore and organic matter: sulfate reaction at Pine Point [J]. Can Sci Reprint Series, 1984, 224(6): 63~66.
- [15] Joel S L. Organic matter and thermochemical sulfate reduction in the Viburnum Trend, Southeast Missouri [J]. Econ Geol, 1990, 85: 622~632.
- [16] Forbes P, Landais P, Bertr P, et al. Chemical transformations of type - III organic matter associated with the Akouta uranium deposit (Niger): geological implications [J]. Chemical Geology, 1988, 71: 267~282.

METALLOGENIC SIGNIFICANCE OF ORGANISMS AND ORGANIC MATTERS IN LOW-TEMPERATURE MINERALIZATION SYSTEM

Hu Ming'an

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

Abstract: During the mineralization of the low-temperature hydrothermal deposits, organisms and organic matters play an important metallogenic role deduced as two major categories: direct and indirect metallo-

genic roles. The direct metallogenic role of organisms and organic matters means the formation of source beds in the contemporaneous sedimentary stage, the formation of ore-bearing fluids in the activation-migration of mineralizing materials, and the formation of mineral deposits derived from the accumulation of mineralizing elements during the precipitation of mineralizing materials. The indirect metallogenic role refers to the fact that the maturation-evolution of organic matters and relative organic products may reveal the mineralization process, reflecting the low-temperature hydrothermal metallogenic mechanism and condition.

Key words: low-temperature mineralization; organism and organic matter; direct metallogenic significance; indirect metallogenic significance.

积极开展对超大型矿床的国际合作研究 ——中、俄、南非三国专家会议在京举行

应中国科学院院士翟裕生教授和中国工程院院士裴荣富研究员的邀请,俄罗斯和南非著名地质学家 S. Cherkasov 和 E. Hammerbeck 教授于 2000 年 4 月 24 日至 5 月 1 日来中国地质大学(北京)进行了学术交流,对于超大型矿床的一些最新研究成果以及进一步研究和找寻超大型矿床的思路和方法交换了意见,还就合作编制全球超大型矿床图达成协议。

中国地质大学(北京)党委书记兼校长吴淦国教授代表学校对 S. Cherkasov 和 E. Hammerbeck 教授的北京之行表示热烈欢迎,并希望今后进一步加强交流与合作。地球科学与资源学院副院长岑况向客人介绍了学院的有关情况,并安排参观了海洋地质研究中心和校地质博物馆。校国际合作处、地球科学与资源学院和学术交流中心给予了积极支持与协助,对整个学术交流活动做了很好的安排。

E. Hammerbeck 教授是南非地学委员会主席、国际成矿图编委会主任,S. Cherkasov 博士是俄罗斯科学院地质博物馆教授,他们都是超大型矿床研究领域的著名地质学家。在中国地质大学(北京)期间,E. Hammerbeck 教授做了“南非金属矿床的精华——超大型矿床成矿特征”,S. Cherkasov 教授做了“超大型矿床全球成矿规律探讨”的学术报告,翟裕生教授介绍了“中国超大型矿床的特征及其时空分

布”,并强调了超大型矿床的某些独特性,裴荣富研究员介绍了“中国超大型矿床图的编图思路与方法”。许多教授、副教授、博士生和硕士生参加了这次学术交流活动,并与 E. Hammerbeck 教授、S. Cherkasov 教授、翟裕生教授和裴荣富研究员就超大型矿床的成矿地质背景、形成机制、控矿条件等问题进行了广泛而热烈的讨论。

会议期间组织考察了张家口地区小营盘大型金矿床,经过对地表和坑道的详细观察,对该矿床的成因、找矿前景、矿山的当前目标和长远找矿与发展规划提出了一些新认识,并与张家口金矿的领导和工程技术人员交换了意见。

三国专家还商讨了今后进一步加强交流与合作的一些具体问题,认识到需要加强对超大型矿床成矿地质背景、成矿过程的研究,特别是就合作编制全球超大型矿床图(1:2500 万)的原则和方法技术达成了共识,提出了项目要点草案,准备进一步征求有关国家的同行专家意见,再经补充完善,拟在今年 8 月的第 31 届国际地质大会上正式确定。

本次学术交流活动,对于今后如何进一步加强国际合作,研究超大型矿床,将起到积极作用。

彭润民 王建平