

大洋铁锰矿床形成过程中的生物作用*

BIOLOGICAL ACTIONS ON THE FORMATION OF OCEANIC FERROMANGANESE DEPOSITS

卜文瑞 石学法

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266071)

生物在大洋多金属结核形成过程中的重要作用早已引起了学者们的关注。Greenslate 1974年; Dugdinsky等1977年已注意到生物参与了多金属结核的生长。

在大洋铁锰矿床形成过程中,生物起着至关重要的作用。死亡浮游生物在下沉过程中的氧化分解为海底铁锰成矿作用提供了物质基础,是成矿金属元素向海底富集的重要机制。生物的有机分解作用不仅向海底沉积物提供大量的微量金属元素,从而改变沉积物及孔隙水中微量元素的组成和浓度,而且改变了海底的沉积环境,特别是氧化还原环境^[1]。好氧和厌氧细菌的活动营造了有利的成矿环境;某些微生物参与了成矿作用过程,形成了特殊的叠层石构造;底栖生物的觅食和掘穴,客观上翻滚了多金属结核,使之处于海水-沉积物界面,持续接受沉积,而不被埋藏。生物生产力的区域性变化是大洋铁锰矿床分布格局的重要影响因素之一。

概括而言,大洋铁锰矿床形成过程中的生物作用主要表现为富集有用金属、改变环境的氧化还原条件、建造结核的壳层结构、控制结核的产状及地理分布等方面。值得指出的是,本文所称之大洋铁锰矿床包括深海洋盆多金属结核和海山富钴结壳。

1 生物活动对成矿金属元素的富集

洋底沉积物与底层水界面从不同渠道(陆源风化物、海底火山喷发、热液作用等)汇集而来的成矿元素,可被微生物在生理活动过程中所摄取^[2],这是结核内部富集各种金属元素的重要途径。许东禹1994年指出,放射虫、硅藻等硅质生物是海水中Fe, Mn, Co, Ni等微量元素的主要载体,生物从海水中吸收和释放上述元素,在大洋矿床形成过程中起着重要的作用。Szabo 1968年论述了有孔虫在控制大洋微量元素丰度中的重要作用,以及碳酸盐和硅酸盐浮游生物的溶解对海水、孔隙水和Fe, Mn矿床金属成分的影响。

1.1 浮游生物富集成矿金属研究进展

Halbach 1984年研究发现大洋富钴结壳中Fe, Mn, Cu, Ni, Co等金属的含量取决于碳酸盐浮游生物骨骼的溶解;水成型结壳中的Fe主要来自碳酸盐浮游生物骨骼溶解释放到水中的Fe(OH)₃胶粒。Szabo 1968年研究表明,Fe是从上覆海水结合有孔虫壳体和骨骼中的最重要的元素。Martin等1983年的实验结果表明,吸附于碳酸盐表面的大量Mn被搬运到海底,当碳酸盐几乎全部溶解时释放出来。他们发现

每克CaCO₃所吸附的Mn量随上覆水中CaCO₃通量的减小而增加,即随碳酸盐溶解速率的加快而增加。

1.2 浮游生物对成矿金属的富集机制

浮游生物死亡后下沉到海底的过程中,在其生命活动中从海水中摄取的维持其生理需要的微量元素,随之一起下沉。随着生物有机体的氧化分解,这些微量元素重新释放出来,使底层水或孔隙水中微量元素相对富集^[1]。Turkian等1973年关于生物从海水中富集金属元素,以及生物有机体对改变海水的成分、向海底搬运微量元素等作用已被硅质和钙质介壳中微量元素含量所证实。Bowen等1971年在浮游生物中发现富集系数在10³以上的元素有:Al, As, Ba, Cd, Ce, Co, Cu, I, Fe, Mn, Pb, Ni, Nb, Pu, Sc, Ag, Zn, Zr等。

1.3 成矿金属富集过程中的微生物作用

微生物具有从各种浓度梯度的稀溶液中聚集成矿元素的能力。刘宝君等1994年;阎葆瑞等1994年指出,微生物活动产生的有

* 国家自然科学基金资助项目
49776295号。
收稿日期:2000-11-12;
修回日期:2000-12-28



机物质具有络合性,使金属成矿元素能以络合物的形式迁移和富集,另外,微生物的有机代谢能使环境的 pH 值和 Eh 值发生变化而导致金属的释放和沉淀。微生物可以凝聚、分解和富集成矿元素,洋底大量微生物的新陈代谢可以直接富集金属元素堆积成矿。

2 营造适宜的成矿环境

2.1 改变环境的氧化还原条件

在大洋环境中,好氧铁细菌和锰细菌的代谢活动对大洋中的 Eh 值和 pH 值有很大的影响,细菌通过改变沉积物和孔隙水中的氧化还原环境,从而促进了 Fe、Mn 化合物的溶解、元素的迁移或使低价态 Fe、Mn 元素氧化成高价态化合物^[2]。许东禹等 1994 年指出,在铁细菌和硫酸盐还原菌等微生物的作用下,介质中可出现 Eh 值递降、pH 值递增的趋势。阎葆瑞等 1992 年实验研究表明,硫酸还原菌的生存,显著地降低了介质的 Eh 值,使介质转变为还原环境,导致高价 Mn 和 Fe 从固相中溶解进入液相;而好气性铁细菌大量繁殖时,使介质变为氧化环境,导致溶液中低价 Fe、Mn 氧化为高价而沉积。Brever 1975 年指出因铁的亲氧性比锰强, Eh 值的差异,使 Fe、Mn 发生分离,一般 Fe 在海水中 -250 mV 条件下可氧化成氢氧化物,而比 Mn 先发生沉淀。一般说来,生物有机体含量越高,有机体分解作用消耗的氧就越多,其结果是环境的氧化程度变得越低,从而有利于钡镁锰矿的形成。

2.2 控制结核的产状

生物的活动是多金属结核长期处于海水-沉积物界面的重要作用,是多金属结核产状的主要控制因素。Kerr R. A. 1984 年指出,典型结核的生长速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{Mn}^{-1}$ 或更小,而黏土和生物碎屑的沉积速率要快约千倍。然而如此快的沉积

速率为什么不会使结核埋葬呢?他认为其原因可能有地震、底流的翻滚,以及底栖动物的活动等。钱江初 1996 年^[3]在解释锰结核多处于深海盆地海水-沉积物界面时认为,生存于海底的个体较大的海星、海参、海葵以及鱼类的摄食、掘穴和运动等日常活动,会使多金属结核产生翻滚,从而使得这些结核避免了被上覆的“沉积雨”掩埋而赋存于海水-沉积物界面。

3 生物在金属沉淀形成矿床过程中的作用

3.1 参与结核的形成

Graham 1959 年指出,海底的富 Mn 矿床起源于生物活动,而不是无机过程。结核不同纹层构造中锰相和铁相矿物的含量,以及 Fe、Mn 的含量交替变化,这种变化与生物元素 P 和碎屑组分 SiO_2 含量变化密切相关^[4],表明微体生物参与了结核的生长过程,促进了 Fe、Mn 的沉积。锰细菌和铁细菌直接参与了洋底 Fe、Mn 成矿元素的沉积作用。Chukhrov 1978 年实验表明, *Gallionella ferruginea*, *Leptothrix ochracea* 和 *Toxothrix trichogenes* 等铁细菌促进了铁的氧化反应。郝瑞霞等 1998 年^[5]指出,在许多环境中能使锰氧化的细菌可以激发、加速矿物、矿石的沉淀。作用于锰的细菌种类很多,不论是氧化细菌,还是还原菌,在锰的地球化学循环中都起着重要的作用。细菌对锰的氧化和聚集,是其价态转变的主要因素^[6]。另外,史君贤 1996 年^[7]的实验结果表明,在好氧的条件下,锰细菌能使可溶性的 Mn^{2+} 氧化为 Mn^{4+} 。在锰细菌的生长繁殖过程中,环境的 pH 不断升高,有利于锰的氧化;在厌氧条件下,锰细菌可将高价 Fe^{3+} 还原为低价 Fe^{2+} ,而使环境 pH 值明显下降。鲍根德 1989 年研究表明,间隙水中的 Mn^{2+} 可能主要是在细

菌的媒介下,来自沉积物中 Mn^{4+} 参与了某些有机物降解反应而被还原。沉积物中有机碳含量越高,沉积物中生长的细菌可能越多,上述的媒介作用亦越强烈,必然导致孔隙水中的 Mn^{2+} 含量增高,这样造成孔隙水与上覆水 Mn^{2+} 的浓度梯度加大,使孔隙水中 Mn^{2+} 向上覆水大量扩散,成为结核中 Mn 的重要来源。阎葆瑞等 1992 年的微生物成矿作用模拟实验也表明:当溶液中加入铁细菌时,大大加快 Fe、Mn 金属的沉淀,而且 Mn 的沉淀总是滞后与 Fe 的沉淀;无铁细菌加入时,无沉淀反应。

3.2 建造壳层结构

金翔龙等 1997 年^[2]通过透射电子显微镜研究,发现锰结核具典型的生物构造特征。陈建林等 1997 年^[8]在铁锰结核中发现了大量的纳米级超微生物,如光滑型结核中的中华微放线菌 (*Mniactinomyces chinensis*) 和瘤状结核中的太平洋螺球孢菌 (*Spirinopsisphaeospora pacifica*)。他们认为,锰结核内部构造是叠层石构造,锰结核是一种生物岩。光滑型结核中的中华微放线菌构成微小叠层石构造,即柱状构造;瘤状结核中的太平洋螺球孢菌构成奇异叠层石构造,即树枝状构造。另外,有学者认为,锰结核的基本结构单元是叠层石体,结核壳层是叠层石周期性生长形成的,除柱状构造和树枝状构造外的其他构造类型,如缟状构造、同心环状构造及钵状构造等可能是此两种叠层石在不同切面方向上的反应^[2]。微生物是结核纹层和柱状构造的缔造者,不同的微生物产生不同的显微构造。

3.3 参与成核

事实上,类似于结壳可以在海底任何暴露的坚硬岩石表面生长一样,结核可以以海底所有可作为依靠和支撑的固体物为核心,甚至



包括人类海上活动的丢弃物。当然,最常见的结核核心为火山岩块(岩屑),如:玄武岩、安山岩、花岗岩等,取决于当地源岩的性质。生物残骸(鱼齿、鱼骨碎片等)在核心类型中仅占很小的一部分。具体鉴定结核的核心类型,意义并不很大,只不过核心成分是金属质或非金属质的、表面光滑还是粗糙,可能对结核的初始生长速率有所影响^[2]。

4 生物活动对大洋多金属矿床全球分布的制约

生物通过影响海底的氧化还原环境而间接控制大洋铁锰矿床的形成过程,从而也制约了其地理分布。海洋生物的地理分布和生物生产力是影响多金属结核全球分布的重要因素之一。生物有机体中的成矿元素在生物死亡之后伴随着生物遗体一起下沉到海底,经过氧化还原作用,重新被释放到沉积物的孔隙水中,从而得到富集。然而由于生物沉积在海底分布的不均一性,造成了微量元素浓度的区域性变化。这种变化可能控制了大洋铁锰矿床的区域分布格局,也可能是引起大洋铁锰矿床中矿物组合区域变化的重要因素。

大洋铁锰矿床在空间分布上表现出一定的规律性,即主要聚集在与赤道平行的 Fe-Mn 建造带内,该带界于 35°N 和 45°S 之间^[9]。大洋铁锰矿床的这种空间分布特征除与板块构造运动、火山活动、海底地形地貌及古海洋环境等因素有关外,生物的生理活动在 Fe-Mn 建造的全球分布中可能起着至关重要的作用。这也从另一个侧面说明了铁锰矿床形成过程中生物作用的重要性。因为在深部海底有利于 Fe-Mn 建造形成的地质地理条件并非环赤道带所特有,而大洋环赤道带与其他海域的显著差别在于

上覆海水的生物生产率。

生物地理区和生物生产力的空间变化,不仅对大洋铁锰矿床的空间分布起着决定性的作用,而且也是其特征的影响因素之一。一般说来,越靠近生物生产力高的地带,就越发育菜花状和盘状结核,钡、镁、锰矿和 Mn, Cu, Ni, Zn 等元素的含量也越高,Fe, Co 和 Pb 等元素的含量则越低,结核生长速率也越快;姚德等 1991 等指出随着远离高生物生产力带,光滑球状结核就越发育, δ_{MnO_2} 值越高,Fe, Co, Pb 等元素含量就越高, Ni, Cu, Zn 等元素含量趋于减少,结核生长速率也逐渐减慢。这可能是由于生物生产力大小的变化直接影响成矿速率的缘故。

5 生物生产率与大洋铁锰矿床的生长速率

海水中动植物遗体的下沉,不仅为深海结核的形成提供了物质来源,而且决定了结核生长速率及成分。Kerr R. A. 1984 年指出,结核的慢速生长速率为 $1 \text{ mm} \cdot \text{Mh}^{-1}$,即每年一个 Mn-O 原子结构层。随着沉落生物碎屑量的增大,可使结核生长速率加快数十倍。碎屑物质沉积过快则会稀释有经济价值的元素 Co, Mn 等。随着碎屑层的进一步增大,将会使结核埋藏。对结壳而言,单位时间内沉积的 Co 金属量是一定的,生长速率越慢,则 Co 含量越高,其最大值可高达 2%; Halbach 1984 指出随着生物通量的增大,单位时间内提供的 Fe、Mn 量增多,从而使 Co 被稀释,含量降低。

6 存在问题及展望

近年来的研究使人们对生物在大洋铁锰矿床形成过程中的作用有了一个全新的认识,取得了不少引人注目的成果,大洋铁锰矿床形成过程中生物的作用得到了普遍的关注。但尚存在一些问题,如有

些结论缺乏直接而有力的证据,仅是对现象的一种较为合理的解释;生物聚集成矿元素和改变环境氧化还原条件的机制还有待深入研究等。

尽管生物在大洋铁锰矿床形成过程中有着举足轻重的作用,但在成矿作用的某些环节中生物作用并非必不可少的。大洋铁锰矿床是形成于一个复杂的系统中的—个复杂的过程,单从某个方面的研究很难取得令人满意的结果。因此用系统的观点来研究大洋铁锰矿床形成过程中生物的作用,建立生物成矿系统理论,是今后大洋铁锰矿床形成过程中生物作用的研究方向,也是大洋铁锰矿床成因研究的重点。

主要参考文献

- 1 张德玉、陈穗田. 东太平洋海盆中、西部多金属结核主要锰矿物区域变化规律的研究. 北京:海洋出版社, 1998. 1~124
- 2 金翔龙等. 东太平洋多金属结核成矿带海洋地质与矿床特征. 北京:海洋出版社, 1997. 305~429
- 3 钱江初. 多金属结核的产状及其主要控制因素. 见:沈华悌、钱江初主编. 东太平洋多金属结核论文集. 北京:海洋出版社, 1996. 39~46
- 4 许东禹、阎葆瑞. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(3): 31~33
- 5 郝瑞霞、彭省临. 矿物岩石地球化学通报, 1998, 17(3): 197~200
- 6 郝瑞霞、彭省临. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(2): 69~74
- 7 史君贤、陈忠元. 锰细菌对锰、铁金属离子的转移作用. 见:沈华悌、钱江初主编. 东太平洋多金属结核论文集. 北京:海洋出版社, 1996. 97~101
- 8 陈建林、张富生、边立曾. 科学通报, 1997, 42: 337~342
- 9 潘家华、刘淑琴. 地球学报, 1999, 20(1): 47~54

(本文编辑:李本川)