

1 绪 论

1.1 地球化学对生物体系的影响

生物圈是地壳的一部分 为现存的生物及遗骸所占的空间 包括大气对流圈和水圈的一部分、土壤以及岩石圈的一部分。生物圈大致可分为三个部分 即生物物质(人、动物、植物及微生物)、生物环境(土壤、水、空气)、生物起源的岩石和矿物等(腐殖质、煤、石油等)。生物圈将大气圈、水圈、岩石圈联结成一个有机整体 是自然界能量转化和物质循环的活动中心。

地表四大圈层(表层岩石圈、水圈、生物圈、大气圈)的相互作用,加上地球内力和宇宙的影响,在地史时期决定了地球表层的演化和发展,在当代决定了人类生存的资源与环境。其中,具有最灵敏反馈能力和最大再生产能力的生物圈是关键的一圈。根据生物圈的变动可以划分地球演化阶段(如古生代—中生代);在各圈层物质和能量交换中,生物圈也起重大作用(如碳循环);一些地学难题一经注意生物作用,往往豁然开朗,形成了新的理论(如生物绝灭→新灾变论)认识了新的地质作用(如生物成矿作用)。

尽管生物圈只占地圈质量的一小部分,但潜力很大,具有高效能。它的作用与其质量不相称,而与其循环时间和反应表面积相均衡。整个地质时代所有活生物体的质量与地球的质量相似。目前估计每年大约有 100km^3 以上的活物质在循环,包括 C、H、O、N 以及金属。

大约有 $1/3$ 的化学元素是生物必需的,而且生物矿化是表面环境的主要过程。生物能从表面固体和流体中吸取营养物质,在表面环境的平衡和反应过程中起着很重要的作用,而且倾向于附着于地壳物质。

生物能产生大量的有机和无机物质,它们也在地表金属转移

和固定过程中起着主要作用。每克可耕种的土壤含有 10^7 个细菌、 10^6 放线菌、 10^5 真菌以及 10^4 藻类 据估计 最简单的细菌 大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 含有大约 5000 种不同的有机分子，包括 3000 种不同的蛋白质和 1000 种不同的核酸。

生物圈基本上是连续不断的，在生物圈的范围内没有长期无生命的地区，生物能够适应各种极不相同的环境而顽强地生活着。生物在各种环境中的生存，将四大圈层紧密地联系在一起，图 1-1 表示了四个圈层的相互联系。很明显，除了生物圈中生物自己的那些组分外，生物所在的环境中的所有组分都是无机的。因此，生物总是与无机物质有着密切关系。它们可以利用无机物质，有时也会受到无机物质的毒性影响。由此看来，生物含有大量的无机元素这一观念就会得到认同。表 1-1 列出了人体、植物、地壳和土壤的化学组成。周期表中的大多数元素对生物体来说是必需的，

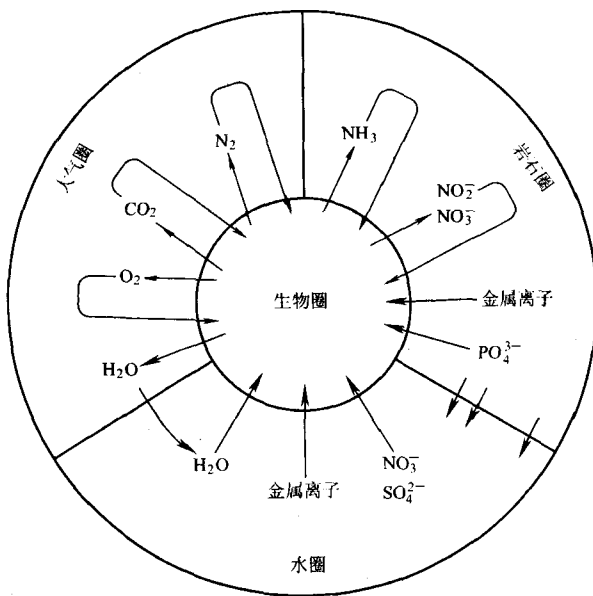


图 1-1 在生物圈、水圈、大气圈和岩石圈中无机化合物的交换

只不过有主次之分。H, C, N, O 和 P 是主要元素 含量一般在 1% ~ 60% ; Na, K, Ca, Mg, S 和 Cl 是次要元素 含量一般在 0.05% ~ 1% ; B, Si, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Se, Mo 和 I 是微量元素, 含量一般小于 0.05%。很久以前, 在活生物体中就发现了微量元素, 耶恩(Hjarne 在 1753 年发现了 Cu, 谢勒 Scheele 在 1772 年发现了 Mn 勒格里普 Legrip 在 1844 年发现了 Co 福斯汉默 Forchhammer 在 1865 年发现了 Zn 等等。现在我们已知道 30 多种 Cu 蛋白质、70 种 Fe 蛋白质、80 种 Zn 蛋白质以及含有 Ca, Cd, Co, I, Mn, Mo, Ni 和 Se 的蛋白质。许多金属可以作为结构物质, 例如, 钙碳酸盐、磷酸盐、藻酸盐、果胶酸盐、蛋白石、镁氢氧化物、Ba 和 Sr 的硫酸盐、含有 F, Cl, Br 和 I 的生物分子等。元素在生物体的分布是不同的, 而且不同的生物体对元素的吸收和利用也是不同的。

表 1-1 人、植物、地壳及土壤的元素组成

元 素	植物的平均组成 (新鲜物)/%	土壤的平均组成 /%	地壳/ 10^{-6}	人体/ 10^{-6}
O	70	50	466000	628100
Si	0.2	34	277200	40
Al	0.005	7	81300	0.5
Fe	0.01	4	50000	50
Ca	0.5	1.4	36000	13800
Na	0.02	0.7	28300	2600
K	0.3	1.5	25900	2200
Mg	0.04	0.6	20900	400
H	10.5		1400	93100
P	0.07	0.1	1180	6300
Mn	0.001	0.1	1000	1
S	0.05	0.05	520	6400
C	18	2	420	193700

续表 1-1

元 素	植物的平均组成 (新鲜物)/%	土壤的平均组成 / %	地壳/ 10^{-6}	人体/ 10^{-6}
Cl	0.02	0.01	200	1800
Rb	0.0005	0.005	120	9
V	0.00012	0.01	110	0.03
Ni	0.00005	0.003	80	0.03
Zn	0.0005	0.005	65	25
N	0.3	0.1	46	51400
Cu	0.0002	0.002	45	4
Co	0.00002	0.0002	23	0.04
Pb	0.00005	0.001	15	0.5
Sn			3	2
Br			3	2
B	0.001	0.001	3	0.2
Mo	0.00001	0.0003	1	0.2
I	0.0012	0.0005	0.3	1

1.2 生物体系的无机元素

1.2.1 无机元素在生物体系的分布

能量元素 C, O, H 和 N 以最大的丰度分布在生物体中的有机化合物中。宏观元素 P 是最丰富的无机元素, 也是组成生物活性化合物的重要结构板块之一。次级宏观营养元素是非过渡族元素 Na, K, Mg, Cl, Ca 和 S。Na, K, Mg 和 Cl 是生物流体和细胞质的主要组分, Ca 组成生物体的骨架物质, 而 S 是有机化合物的一部分。微营养元素 Se 对某些动物是必需的, 如牛和鸡。I 在动物中的惟一作用是分布在甲状腺激素——甲状腺素以及它的衍生物中。I 和 Br 富集在特定的褐藻、腔肠动物以及其他海洋生物中。Si 以 SiO_2 形式存在, 是硅藻及放射虫的主要组分。B 是植物生长的必需元素。V 对某些藻类的生长是必需的, 而且也是海洋无脊椎动物(被囊动物)群中所含蛋白质的重要组分。尽管其他元素,

如 Al, Sr, Ba, Pb, Cd, As 以及 Sn 在自然界普遍存在，但它们对人体以及其他生物的重要性还不太清楚。

1.2.2 无机元素的生物学作用

无机元素的生物学作用列于表 1-2 中,Na 和 K 的无机化学行为很相似，但在生物活动范围内很不相同，在许多方面甚至是相对的。例如 ,K(I) 能够加快肌肉组织的呼吸以及蛋白质合成的速率 而 Na^+ 对这两种过程都有抑制效应。Ca 是脊椎动物骨架、双壳贝类和禽蛋壳体的主要组分。骨架中的钙化合物的化学性质与羟磷灰石 $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 很相似 双壳贝类和禽蛋壳体的主要成分是碳酸钙，以方解石和文石形式存在。 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 优先与 ATP 的磷酸盐基或单一或多核甾酸配位。因此它们参与了酶反应 包括 ATP 或其他含磷酸盐的化合物，它们也在稳定多核甾酸的过程中起着作用。 Ca^{2+} 可以触发肌肉收缩，也是激素作用的信使。

表 1-2 无机元素的生物学作用

元 素	作 用
非过渡元素	
Na, K	电子载体；Na/K-ATP酶的活化剂
Mg	ATP 酶、激酶与其他酶的活化剂
Ca	骨架和壳体的组分；激素作用的信使；触发肌肉收缩；结构作用（蛋白质）
过渡与次过渡元素	
Fe, Cu	氧化还原反应的金属酶和充氧与携氧蛋白质的活化点
Mo	氧化还原酶, N_2 的固定
Mn, Co, Zn ^①	路易斯酸
Co	B ₁₂ 的组分
重金属	
Hg, Pb, As, Cd	酶的抑制剂

① Zn 也有结构作用。

过渡金属能表现出不同的氧化状态，因此它们很容易参加氧化还原反应。 Fe 和 Cu 是不同金属酶的活动中心，催化电子转移、氧化反应和充氧反应，它们也是生物体用作载氧蛋白质活点的元素。除了碱金属外，金属离子一般都能作为路易斯酸。一些过渡金属和次过渡金属，主要是锰、钴和锌组成酶的活化点，这些酶可以催化各种化合物的水解作用、水合作用以及脱羧基作用。

重金属对生物的必要性还不太清楚，不过它们对生物的不利影响已有多方面的报道，尤其是对生态环境的影响。

1.3 生物圈的物质循环

组成生命物质的所有元素，在自然界的转化构成了物质循环，可以认为，生物体内含有的重要元素都处于由非生命环境转入生命物质的组成，然后再回到非生命环境这样一个不断循环之中。

在许多情况下，生物学上的一些重要元素的循环转化，从化学角度来考虑是极其简单的。例如 P ，以无机形式存在的磷酸盐被生命有机体同化，在细胞中通过磷酸盐离子的酯化而把磷结合到有机化合物中；当细胞死亡后，通过水解再释放出无机磷。在这一循环中，磷原子并不改变其原子价，仍保持着磷酸盐基团的形式。在许多环境里， P 元素常成为生物机体生长中的一个限制因素，这纯粹是由于生物圈的某些地区天然缺乏这类元素所造成的。但是，有些重要元素所经历的生物学转化，不仅包括结合到生命物质中和转化为无机状态的变化，也包括该元素的氧化状态（即原子价）的循环变化。具有这种氧化状态循环变化特性的元素有 C 、 O 、 N 和 S 等。其他元素如 H 和 Fe 由于生命机体的活动其氧化态也发生着循环变化。

C 、 O 、 N 和 S 等元素的氧化态是这些元素能否对生命有机体的生长起营养作用的重要因素。这些元素的所谓“缺少”，并不是生物圈内天然缺乏这类元素，而是由于这类元素以稳定的化学形式（如呈氧化型）存在，不易被微生物利用所导致。总之，不断进行着的物质循环，是生物圈得以维持的重要条件，在这一系列的物质

循环中，微生物的作用是不容易忽视的。

1.4 微生物的基本特征

微生物是一切肉眼看不见或看不清楚的微小生物的总称。它们是一些个体微小($< 0.1\text{mm}$)、构造简单的低等生物 ,包括属于原核类的细菌、放线菌、支原体、立克次氏体、衣原体和蓝细菌 属于真核类的真菌 (酵母菌和霉菌)原动物和显微藻类 以及属于非细胞类的病毒、类病毒和朊病毒等。

在地球生物圈中，微生物的重要性是与它们在生物圈内分布的普遍性、高速度的生长和代谢以及能分解所有天然存在的有机物质等特征分不开的。

1.4.1 微生物分布的普遍性

目前已确定的微生物种数还只有 10 万种左右 ,其中细菌、放线菌约 1500 种。但近些年来由于分离培养方法的改进，微生物新种的发现正以很快的速度增长，前苏联微生物学家伊姆舍涅茨基曾估计：“ 目前我们所了解的微生物总数至多也不超过生活在自然界中的微生物总数的百分之十 ”。如果这一估计不错的话，将来的某一天，微生物的总数可能会超过目前动物和植物种数之和。

高等生物的分布区域常有明显的地理限制，它们分布范围的扩大常靠人类或其他大型生物的散播。而微生物则因其体积小、质量轻 可以到处传播以至达到‘无孔不入’的地步 只要生活条件合适 它们就可大大繁殖起来。微生物只怕明火 地球上除了火山中心区域外 从土壤、水圈、大气圈直至岩石圈 只要有流体存在而且温度不是大大超过 100°C ，到处都有微生物家族的踪迹。可以认为，微生物将永远是生物圈上下限的开拓者和各种现象的保持者。在动物体内外、植物体表面、土壤、河流、空气、平原、高山、深海、冰川、海底淤泥、盐湖、沙漠、油井、地层以及酸性矿水中 都有大量的与其相适应的微生物在永不停息地活动着。

1.4.2 微生物具有很高的代谢强度

由于微生物体积小 与高等生物相比表面积十分巨大 有利于

细胞吸收营养物质和加强新陈代谢。我们可用表面积与体积之比来表示生物的代谢活跃程度。例如，乳酸杆菌的表面积 / 体积 = 120000 鸡蛋的表面积 / 体积 = 1.5 体重 90.7kg(200磅)的人体表面积 / 体积 = 0.3 有人计算 乳酸杆菌 1h 内生成的乳酸约为其体重的 1000 ~ 10000 倍 但一个人如要想得到 1000 倍于其体重的糖代谢物 则需 40 多年。微生物在地球表面的地球化学转化中起重要作用是与其具有很高的代谢强度这一特性分不开的。

1.4.3 微生物具有惊人的繁殖速度

微生物具有极高的生长和繁殖速度 尤其是细菌 其速度更是惊人。例如，大肠杆菌在最合适的条件下，20min 可繁殖一代，即由 1 个分裂成 2 个，在 3h 多一点的时间内，其代谢位能要增加 1000 倍。如果细菌始终处于最合适的条件下，那么一昼夜可繁殖 72 代。这样经过 4 ~ 5d，就能形成与地球同样大小的物体。事实上 由于种种客观条件的限制 细菌的指数分裂速度只能维持数小时，因而在液体培养基中，细菌细胞的浓度一般仅能达到每 1ml $10^8 \sim 10^9$ 个左右。

1.4.4 微生物代谢类型的多样性

微生物的生理代谢类型之多 是动、植物所不及的。分解地球上贮量最丰富的初级有机物——天然气、石油、纤维素、木质素的能力 属微生物专有 微生物有着多种产能方式 如细菌光合作用，嗜盐菌紫膜的光合作用 自养细菌的化能合成作用 各种厌氧产能途径 生物固氮作用 合成各种复杂有机物——次生代谢产物的能力 对复杂有机物分子的生物转化能力 分解酚、酞、多氯联苯等有毒物质的能力 抵抗热、冷、酸、碱、高渗、高压、高辐射剂量等极端环境的能力；以及独特的繁殖方式——病毒、类病毒、朊病毒的复制增殖 等等。

1.4.5 微生物的生理特性

微生物的演化与动物界和植物界不同之处在于经历了近 35 亿年的漫长时间 仍是保持着微小的体型和简单的构造 多数球菌直径为 $1\mu\text{m}$ 杆菌则长 $2 \sim 5\mu\text{m}$ 宽 $0.3 \sim 1\mu\text{m}$ 。从古老岩层中发

现了与现代原核生物完全一样的微生物化石表明微生物的进化是一种加成过程，而非置换过程。这是因为微生物的生命机能在于通过细胞膜的渗透作用，以吸收的方式将营养物纳入体内。它们摄取营养的形式主要分为：光能自养型、光能异养型、化能自养型和化能异养型 4 种 依靠吸收和分解环境物质来维持生活 必然要求机体构造与周围环境的接触面要大，所以微生物只能保持微小的体型以增大面积，不但对吸收营养有利，而且可以扩大寄生和获食的范围，造成繁殖力强和流动性大的特点。

1.5 自然界中的微生物

地球生物圈中到处可以发现微生物，它们在各自的生态环境中同周围环境保持密切的关系。生物圈内物理的及化学的环境条件，无论从宏观上还是微观上看都是极其多样的，场所不同，差异显著。其中也有高等生物不能生存的严酷环境，但微生物都具有适应这种环境生存的巧妙功能。

例如 就环境温度而言 从冬季气温低达摄氏零下数十度的极地和高山地带 到水温接近 100 的温泉中，都有微生物存在。在这些地方，有的微生物仅能生存；有的不仅能生存，还能繁殖。例如在高达 80℃ 以上温泉中生活的嗜热栖热菌（*Thermus thermophilus*）和水生栖热菌 *Thermus aquaticus* 嗜热细菌则是生活在高温中的微生物。这些细菌能在 85 左右下增殖而在 45℃ 以下不能增殖。这些细菌在普通生物立即死亡的高温环境下也能很好增殖，其原因主要是细胞内的核酸和蛋白质及细胞膜的脂类高分子具有高温下发挥功能的特殊结构。

海洋占生物圈的大部分，全部容积的 90% 以上是 5℃ 或 5℃ 以下的低温。在那里生活的微生物在 0℃ 左右低温下也能增殖；当温度超过 30℃ 时，许多微生物就不能增殖了。海洋微生物多为低温微生物，而土壤和动物消化器官等处的微生物多为中温微生物 它们在 10 ~ 40℃ 增殖。低温微生物和中温微生物在细胞膜和细胞内的各种生命活动方式方面有多处不相同。

作为微生物栖息环境的海洋，还有水压高、盐度较高、有机物浓度低的特征。与这些环境特点相适应，从深海底中分离出的微生物，有很多在高水压下也能增殖良好，即所谓高压微生物。同时，大部分海洋微生物是微好盐微生物，也是低营养微生物。1974年4月和1977年2月，美国科学家在东太平洋加拉帕戈斯群岛东部深达10000m的海底温泉中发现了耐热硫细菌，它们以地壳中逸出的 H_2S 气体为能源以 CO_2 为碳源，在厌氧条件下自养生活；它们既耐高温（100℃）又耐高压（115.5MPa）。

微生物可生活在几万米的高空中。70年代末人们用地球物理火箭从74km的高空采集到处在同温层和大气中层的微生物；后来又在85km处找到了微生物。这就是目前所知道的生物圈的上限。研究表明，它们是由火山喷发、暴风或龙卷风携带，在阳光的作用下，脱离了地球引力而抛向太空的。

有人在南极洲的罗斯岛和泰罗尔盆地128m和427m的沉积岩心中也找到了活细菌；前苏联科学家在南极冰川进行钻探时，在4.5~293m不同深度的岩心中多次发现有球菌、杆菌和微小的真菌。

如上所述，微生物具备了为适应地球生物圈几乎所有环境而生存的生理机制，与此同时，它们在产生次级代谢产物的能力等方面又表现出微妙的差异。

1.6 微生物在自然界中的作用

土壤、海水、活性污泥甚至消化道等处存在的大多数微生物，在其生活中受到各自栖息场所的物理化学条件以及其他共生生物的强烈影响；另一方面，微生物通过增殖和代谢活动与周围环境进行物质交换，也使环境的物理化学条件发生变化，从而对周围环境其他生物的生活产生很大影响。在整个生态系统中，微生物与其他共同存在的生物一起构成了生物群落，并且同它们周围的无机环境进行着不间断的物质交换，维持整个生态系统的动态平衡。

以碳素循环为中心来纵观生态系统中物质和能量的流向时，

微生物不仅起着宏观生态学上一般称之为分解者的作用，也起着生产者和消费者的作用。

自然界的微生物基本上是通过各个微生物个体的活性来发挥作用的。微生物极小的个体之所以能够控制地球生物圈的整个物质运动，是因为微生物较其他生物具有高得多的代谢活性和代谢效率，以及其极快的生长速度。此外，与大型高等生物相比，它们作为一个类群生物而言，代谢形式多样；作为一个物种而言，它们的适应性更强。正因为如此，环境条件显著不同的各种生态系统的功能才能得以维持。

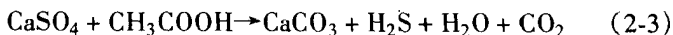
2 微生物成岩与成矿作用

2.1 微生物成岩作用

细菌和真菌影响着各种水域沉积物的形成，而且通过它们的活动还会改变沉积物，在沉积岩的形成过程中起着重要作用。不管是有机成因的还是矿物成因的细菌和小范围内的真菌都可以移居悬浮的颗粒，并改变它们的大小、形状以及沉积速率；同时也影响着沉积物的成层作用。如果悬浮的颗粒被用作食物，微生物移居也许会部分地或全部地破坏它们 例如 被酸溶解。

微生物的生长常常会引起颗粒的增大，尤其是由几个小颗粒聚集成大颗粒。真菌能够通过假根或菌丝把一定数量的颗粒聚集在一起，最后融合它们。细菌中大量的粘液产物也会导致同样的结果。研究表明具有菌毛或纤毛的细菌是微小悬浮颗粒聚集的原因。这些细菌通过它们的菌毛与颗粒接触，然后彼此与几个颗粒相互连接。电子显微照片表明菌毛在土壤的压实过程中起着重要作用，影响着土壤的结构。在沙滩和沙岸中它们可能有着类似的作用。菌毛也影响着沉积物的成层。具有菌毛的细菌数量较大，主要是革兰氏阴性细菌。然而不同类型的菌毛具有不同的作用。

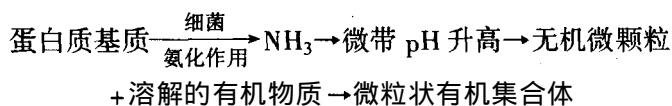
微生物通过新陈代谢活动激发沉积过程。在热带浅水处石灰的沉淀，据说是由各种细菌反应引起 pH 的改变而造成的结果。pH 的改变趋向于碱性区域 例如 在氨化作用、反硝化作用、反硫酸化作用以及有机钙盐的降解过程中，pH 都发生变化。与石灰沉淀有关的主要微生物过程可表示如下：



当 pH 值大约为 9.4 时 碳酸钙发生沉淀。但是 事实上海水是缓冲的，反应如此改变在营养缺乏的海洋是不可能的。它只能在海洋的某些地区发生，这些地区有大量的微生物，而且有利于它们活动的高水温。这样的环境只在一些热带浅水处存在。在这样的区域里，藻类和海藻的同化作用提高了 pH 值 另外 细菌的代谢过程在碱度上也有相对小的增加，因而会导致白垩的沉淀。这种情况在反硝化作用和反硫酸化作用的影响下，容易在沉积物表面发生；但是，在适宜的条件下也可在水里发生。这样的细菌过程可能在非层状石灰岩（通常几千米厚）的形成过程中起着重要作用。

碳酸钙颗粒吸收有机和无机营养，促使微生物在它们表面上生长，进而增大颗粒。在内陆湖泊中，方解石晶体可由细菌分解泥土中的有机质所产生的 CO_2 形成。青色植物丛以及真核藻类、光合作用的细菌和各种异养细菌代表着浅水域底部沉积作用的特殊形式。在地质时代，叠层石就是在这些生物作用下形成的。它们以特定的形式和表面组成了石灰石。青色生物丛的一小部分产物偶而可转变为碳酸盐。克伦宾（Krumbein, 1977）等认为异养细菌也参加了这个过程。

在蛋白质含量高的海水中，通过细菌的活动可以形成有机颗粒。因而，在含有胨或酪蛋白的海水中，注入混合培养液，有机集合体就会存在。在细菌作用下有机颗粒的形成机制表示如下：



大部分有机矿床是由浮游植物形成的。一些海湾矿床表面生长的细菌能很快地侵入和分解这些矿床，尤其是在夏季的几个月中。一般来说，矿床中总的细菌数目为 $2 \times 10^8 \sim 6 \times 10^8$ 个 / mg 有机物质。异养型和自养型细菌也参加了铁和锰化合物的沉淀。磷块岩的形成也是微生物作用的结果。

2.2 微生物成矿作用

微生物及其代谢产物在矿床形成过程中所起的作用称为微生物成矿作用。微生物能在其细胞内积极地富集各种元素，生成活性很大的化合物，这些化合物对成矿环境的氧化还原电位和亲铜元素的活动性具有强烈的控制作用，主要反映在微生物及其代谢产物对成矿元素的迁移、富集、沉淀等方面。这种作用可以是直接的，即通过微生物活动或其代谢产物本身发生作用，也可以是间接的，即微生物通过对环境物理化学条件的改变促使成矿元素发生迁移、富集和沉淀。

微生物在矿床的形成过程中主要表现为以下 4 种作用方式：
(1)聚集成矿元素；(2)改变环境的物理化学条件；(3)产生有机质；
(4)通过代谢作用把元素从一种状态转变为另一种状态。

2.2.1 成矿元素的聚集

一般而言，微生物具有从各种浓度梯度的稀溶液中把许多元素聚集起来的能力。如表 2-1 所示，在大多数由藻类和细菌组成的海洋生物群中，元素富集的浓度，可以超过海水中的 27 万倍。从周围环境中吸取的许多元素都具有重要的生理功能，是细胞构造或与细胞内能量产生以及合成反应有关的催化系统的组成部分。然而，在其他方面尚未有过生理作用的报道。这些元素的聚集反映了活细胞有机组分具有强烈的络合性。微生物可以改造某些特殊的有机络合物，使之能够在重要金属变得有限时，比较有效地吸取它们。硅藻和放射虫硅质骨架大量沉积形成的氧化硅矿床就是微生物聚集元素形成矿床的例子。经计算，每年通过生物活动从大洋中释放出的 SiO_2 大约有 $5 \times 10^{14} \text{g}$ ，看来生物活动是控制海水中 SiO_2 浓度的主要因素。此外，微生物对锰、铁、铀等元素具有富集能力。

表 2-1 元素在海生植物中的典型富集

元 素	海水中的浓度 / 10^{-6}	海生植物中的浓度 (干重)/ 10^{-6}	富 集 系 数
Ag	0.003	0.25	830
Al	0.01	60	6000
As	0.003	30	10000
Au	0.00001	0.012	1200
B	5	120	24
Ba	0.03	30	1000
Be	0.0000006	0.001	1700
Bi	0.000017	0.06	3530
C	28	345000	12300
Ca	400	10000 ~ 300000	25 ~ 750
Cd	0.0001	0.4	4000
Co	0.003	0.7	2300
Cr	0.00005	1	20000
Cs	0.00005	0.07	1400
Cu	0.003	11	3700
F	1.3	4.5	3.5
Fe	0.01	700	70000
Ga	0.00003	0.5	17000
Hg	0.00003	0.03	1000
I	0.06	30 ~ 1500	500 ~ 2500
K	380	52000	140
Li	0.18	30	170
Mg	1350	5200	4
Mn	0.002	53	26500
Mo	0.01	0.45	45
Na	10500	33000	3

续表 2-1

元 素	海水中的浓度 / 10^{-6}	海生植物中的浓度 (干重)/ 10^{-6}	富 集 系 数
Ni	0.005	3	600
P	0.07	3500	50000
Pb	0.00003	8	267000
Rb	0.1	7	70
S	885	12000	14
Se	0.00009	0.8	8900
Si	3	1500 ~ 20000	500 ~ 6700
Sn	0.003	1	330
Sr	8	260 ~ 1400	33 ~ 175
Ti	0.001	12 ~ 80	12000 ~ 80000
V	0.002	2	1000
W	0.0001	0.035	35
Zn	0.01	150	15000

2.2.2 物理化学环境的改变

微生物进行的各种呼吸和发酵反应都会导致环境物理化学条件的改变,从而影响其中发生的矿化作用过程。例如,藻类和细菌能改变环境的 pH 和 CO_2 浓度,对碳酸钙的沉积起着控制作用。微生物对氧的消耗造成了还原条件,这对于元素的氧化状态显然有着间接的影响。细菌生成的 H_2S 使 U^{6+} 离子还原成难溶的 U^{4+} ,从而使黑色页岩和某些砂岩富铀。

2.2.3 有机质的产生

活的有机体大约有 50% 干重是碳 这些碳大多以大分子的形式,例如蛋白质、类酯化合物、糖类和核酸存在。这种有机质最终来自于海生浮游植物的光合作用。大多数有机质通过异养微生物的活动,迅速被再循环成 CO_2 和 H_2O 但有些可溶的有机化合

物，在水环境的存在时间较长，而且一部分有机质加入到了沉积物中。有机质的络合性对金属的活动、搬运和固定都产生了深刻的影响。微生物在整个过程中可能还起了另一种作用，即通过对可溶金属有机络合物的有机部分的代谢作用，导致金属的释出和沉淀。

2.2.4 代谢作用的转移

许多微生物 通过对无机化合物氧化和还原的催化作用 对元素的地球化学再循环起了重大的作用。这些氧化和还原反应直接或间接地造成了具有重要经济价值元素的富集，对矿床的形成具有重要的意义。如铁锰氧化细菌，使低价的铁、锰转变为高价铁、锰而沉积 这可能是铁-锰矿床富集的重要原因。

以上四种作用方式主要侧重于微生物对成矿元素的富集能力，然而微生物对成矿元素的迁移和沉淀也有着不同的方式。微生物对成矿元素的迁移表现为两种方式：(1)通过形成可溶性的金属-有机络合物而进行迁移；(2)通过金属-胶体化合物表面形成保护膜的方式，使之易于溶解而发生迁移。生物沉淀成矿元素的方式可能有以下几种：(1)直接沉淀：铁细菌和需氧硫细菌等微生物可将矿物质吸收并堆积于管细胞内，死后可直接沉积于沉积物中；(2)附着生长方式：微生物附着于铁、锰结核或叠层石的表皮使之不断生长并沉淀；(3)生物化学沉淀 微生物富集金属后 经过一系列的反应，再固定到沉积物中。

近几十年来 国内外学者在金、铜、钴、铁、锰、磷、硫等许多矿床中发现了大量微生物成矿作用的证据，并进行了多方面的研究，取得了可喜的成果。在世界上已有的若干大型、超大型矿床的形成过程中，微生物也起了重要的、乃至关键性的作用。微生物成矿作用是地球科学的前沿课题，随着学科的发展，不论在思路方面还是在方法上都将有所突破。

2.3 微生物与矿物

微生物与矿物形成和改变的相互作用可以追索到太古代和元