

# 海水、大气化学演化对动物起源 和进化方向的制约\*

陈 福

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 550002)

**摘 要** 动物的起源主要依赖于氨基酸等有机小分子在海水中能否进行脱水缩合反应而生成生物高分子, 后者则依赖于海水 pH 值升高和大气 CO<sub>2</sub> 浓度降低的历史演化进程。有机小分子只有在海水 pH 值演化到近中性, 即寒武纪时值此才能发生脱水缩合反应而合成生物高分子。只有大气 CO<sub>2</sub> 分压降到 1000Pa 以下, 即泥盆纪以后, 陆地上才能出现稳定的土壤层和植物, 动物也才能从海洋扩展到陆地。随后大气 CO<sub>2</sub> 浓度继续降低导致了气温下降和植物生长率的衰减, 促使动物进一步演化。

**关键词** 大气和海水化学演化 动物的起源 脱水缩合反应 动物进化方向

**作者简介** 陈 福 1939 年生 研究员 从事沉积矿床和表生地球化学实验研究

动物是生命的高级存在形式, 地球上动物起源于 6 亿年前的寒武纪。地球自形成以来已有 46 亿年历史了, 但地球上的动物为什么起源这样晚? 陆地动物和人类出现得更晚, 一直是个谜。笔者认为, 地球上动物的出现和沉积矿床的形成、演化类似, 也是大气、海水化学演化特定阶段上的必然产物, 并受海、气演化规律的制约。

从化学角度看, 组成动物的基本元素是 C、H、O、N、P、S 等少数几种元素。这些元素在各类地行星内部含量都比较高, 在地球表面也很丰富, 并主要以 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、CO、NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub> 等挥发份形式存在于大气和海水中。这些挥发份是地球岩石在深部高温高压条件下熔融、分异出来的挥发性物质, 在地表积聚下来形成的, 它们既是生命起源的物质基础, 也构成了生命赖以生存和繁衍的环境。但是, 有了这些物质并不一定就能产生生命, 动物的起源还需要大气和海水化学演化条件的配合。

## 1 关于地球大气圈和水圈的成因 及其历史演化

过去人们基于现代的海-气平衡, 一直认为海水和大气没有重大实质性的历史演化, 因此不能从海水和大气化学演化的角度认识动物起源的条件。现已查明, 地球的海水和大气都经历了重大实质性的历史演化, 是从地史早期的强酸性和

还原性条件向地史晚期的弱碱性和强氧化条件波动演化过来的, 并可分为四个大的历史阶段<sup>[1]</sup>:

(1) 46~38 亿年前, 为地球内能最高、去气作用最强烈的阶段。在这个历史阶段, 地表气温高于水沸点, 水蒸气不能冷凝, 形不成水圈和地表水的循环。大气为稠密火山气圈, 总大气压约为  $1 \times 10^7$  Pa 左右, 火山气体充满着整个地球引力场, 过剩组分不断逸散到宇宙空间去。按现代火山气体平均成分推算, 气圈中主要是水蒸气, 约占气体总量的 70%; 其次是 CO<sub>2</sub>, 再次为酸性气体 HCl、HF、H<sub>2</sub>S、SO<sub>2</sub>、SO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>、NH<sub>3</sub>、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>、还原性组分 H<sub>2</sub>、CO、COS、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、PH<sub>3</sub>、S、H<sub>2</sub>S 及一些易挥发的金属氯化物、砷化物、惰性气体 Ne、Ar、Rn 等。大气上部没有稳定的臭氧层, 光解、氧化作用强烈。

(2) 38~26 亿年前, 为稠密 CO<sub>2</sub> 气圈和强酸性-还原性水圈阶段。38 亿年前地表气温开始下降到水的沸点以下, 由火山气圈中的水蒸气冷凝生成了原始水圈。原始水圈水量不多, 水分布在构造断陷盆地内, 形成内陆浅海, 水量随着地球去气作用的进行而不断增多。水圈形成后, 气圈中易溶的酸性气体和还原性组分迅速转入水圈, 形成了强酸性-还原性海水, 其 pH ≤ 0.3。CO<sub>2</sub> 为弱酸性气体, 在强酸性海水中溶解度很低, 且不

1999 年 7 月 7 日收稿, 12 月 17 日改回。

\* 国家自然科学基金(批准号: 49773203)资助项目。

能通过强酸性海水生成碳酸盐沉淀,而是聚集在大气圈中,形成了稠密  $\text{CO}_2$  气圈,  $\text{CO}_2$  数量随着火山去气作用的进行而不断增加。 $\text{CO}_2$  气圈形成时,  $\text{CO}_2$  分压约有  $(10\sim 20)\times 10^5\text{Pa}$ , 气圈中还含有少量难溶于强酸性海水的气体如  $\text{H}_2\text{S}$  及还原性组分。后者易被光解和氧化,生成水、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_3$  等,转入水圈和气圈。这个阶段火山去气作用仍然强烈且频繁,火山间歇期很短,海水 pH 值一直在强酸性范围( $\text{pH}< 4.5$ )波动,因而海水中不能形成碳酸盐、磷酸盐和硅酸盐粘土矿物等沉淀。这个阶段形成的岩石以火山岩和被酸性海水改造不彻底的火山碎屑岩为主,夹少量厚大硅质层、鞍山式条带铁矿<sup>[2,3]</sup>、金、锆、镉、铀、钍、铝等惰性金属的氧化物等。

(3)26~6 亿年前,为火山去气作用继续减弱、火山间歇期逐渐延长阶段。从 26 亿年前开始,在较长的火山间歇期晚期,海水 pH 值可升到 4.5 以上,大气  $\text{CO}_2$  分压也上升到了  $(30\sim 50)\times 10^5\text{Pa}$ <sup>[5,6]</sup>,并与海水 pH 值达到了反应平衡。从这个阶段开始,大气  $\text{CO}_2$  周期性向沉积圈转移,而海水则伴随火山去气旋回从强酸性到弱酸性、从还原到氧化的频繁波动演化。随着海水 pH 值渐次升高的历史进程,海水中生成的碳酸盐逐渐增多,与海水 pH 平衡的大气  $\text{CO}_2$  分压相应下降。到 6 亿年前海水 pH 值上升到 6.0 时,大气  $\text{CO}_2$  分压已下降到  $1\times 10^5\text{Pa}$  以下<sup>[5,6]</sup>,随后过渡到氮-氧型气圈。

火山去气时期强酸性雨水多,为风化淋滤创造了条件;而在火山间歇期又形成饱含  $\text{CO}_2$  气雨水,也为风化淋滤提供了条件,结果导致各种元素周期性活化、迁移并在海水中富集<sup>[7]</sup>。海水频繁地从强酸性到弱酸性、从还原到强氧化的波动演化,对金属元素在海水中的富集、分异和沉淀成矿作用很有利,因此这个阶段形成了很多大型和超大型沉积矿床,如鞍山式条带状铁矿、碳酸盐岩-砂页岩型沉积铜矿床、奥林匹克坝金-铜-铀矿床、白云鄂博铁-铌-稀土矿床、开阳-翁福磷块岩矿床等。因此,这个阶段除形成少数几个残积风化壳铁矿以外,其它风化壳矿床(包括粘土矿物风化壳)都不发育<sup>[7]</sup>。

(4)从 6 亿年前到现在,为氮-氧型气圈和弱碱性-强氧化性海水阶段。随着地球内能的大幅度下降,冷的地壳不断增厚。但地球的去气作用仍在进行,于是刚性和脆性的地壳又碎裂成板

块,形成板块构造体系。这阶段地球的去气作用大幅度减弱,并由过去大规模强烈频繁的火山喷发形式转变为主要沿活动板块边缘、洋中脊、裂谷带和深大构造断裂体系进行的连续、和缓的去气过程。当气液进入地表时,已变为近中性和氧化性,对生命的危害程度较小。地表风化淋滤作用常年稳定地进行,形成了海水-大气的稳定平衡。海水 pH 值稳定在  $8.2\pm$ , 并与大气  $\text{CO}_2$  分压  $0.0003\times 10^5\text{Pa}$  保持着动态平衡。这个阶段,雨水 pH 值较高且为强氧化条件,使铁、铝、稀土、磷等的风化壳及粘土矿物的风化壳广泛发育。海水的金属成矿作用大规模收缩,主要变为食盐和石膏等成矿类型。海水从频繁的金属成矿和金属污染环境净化出来,气候变温和,海水变为近中性且氧化环境稳定,为动物起源及发展创造了条件。

## 2 地史早期有机小分子形成的条件

动物是由蛋白质、核糖核酸、多醣等生物高分子组成的,而这些生物高分子则是由很多有机小分子经脱水缩合反应生成的,有机小分子的生成条件已有很多实验验证和论述。美国生物学家 S. L. 米勒(1953)模拟原始大气圈的条件,用甲烷、氨、水和氢的混合气体作原料,通过电火花放电,循环了 7 天(实验装置见图 1)得到的产物经鉴定含有甘氨酸、 $\alpha$ -丙氨酸、 $\beta$ -丙氨酸、少量天冬氨酸和  $\gamma$ -氨基正丁酸等。1972 年,米勒改进了实验条件,降低了氨的浓度,仍用甲烷、氨、水和氢的混合气体作原料,经电火花放电,合成了约 33 种氨基酸。

S. W. 福克斯(1964)使用甲烷、氨和水的混合气体快速通过  $1000^\circ\text{C}$  高温的、装有硅胶的石英管,产物收集在氨水中,水解后经鉴定也有天冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、脯氨酸、甘氨酸、丙氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、酪氨酸和苯丙氨酸等,几乎合成了构成蛋白质的所有氨基酸。

J. 奥罗(1960)在模拟原始大气条件下加热氰化氨溶液时,首先发现了腺嘌呤。C. 波南佩鲁马(1963)应用电子束作能源,照射甲烷、氨、水和氢的混合物时也发现了腺嘌呤。还有人用二氨基顺丁二烯二腈和氰气( $\text{C}_2\text{N}_2$ )于  $100^\circ\text{C}$  在紫外线照射下合成了鸟嘌呤。尿嘧啶可以通过丙烯腈、尿素和水加热至  $135^\circ\text{C}$  合成出来。有人应用丙烯腈、尿素和聚磷酸在  $100^\circ\text{C}$  也合成了尿嘧啶。J. P. Eerri(1968)在  $100^\circ\text{C}$  下加热丙烯腈、氰酸钾和

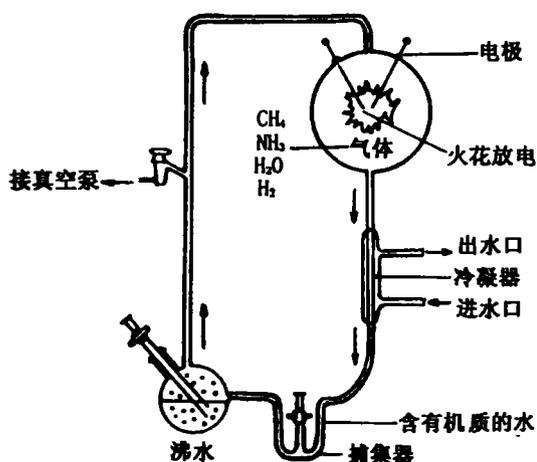
图1 S. L. 米勒模拟实验装置示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 1. The experimental installation of S. L. Miller (1955).

水,合成了胞嘧啶。G. R. Harvey(1971)以高岭土作催化剂,在80℃下加热二氧化碳、氨和水的混合物两个星期后,形成了胞嘧啶和尿嘧啶等<sup>[8]</sup>。

S. L. 米勒(1959)用甲烷、氨、水和氢的混合物进行电火花放电,不仅合成了氨基酸,还发现有甲醛和糖类。C. 波南佩鲁马(1965)用紫外线照射甲醛溶液合成了核糖和脱氧核糖。还有人用核甘和磷酸盐在160℃下,或用核甘和聚磷酸在220℃下合成了核甘酸等<sup>[8,9]</sup>。

W. V. Allen(1967)用甲烷和水通过电晕放电生成了从C<sub>20</sub>-C<sub>12</sub>的一元脂肪酸,其中有乙酸、丙酸、丁酸、异丁酸、戊酸、异戊酸和己酸<sup>[8]</sup>。G. W. Hodgson(1967)用甲醛和吡咯在金属离子的参与下形成了金属卟啉复合物。

上述实验表明,在自然条件下“有机小分子”完全可以通过无机方式合成。而且,合成有机小分子的原料都是火山去气作用中释放出来的挥发性组分:H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>、N<sub>2</sub>等。去气作用在地球演化史中是长期、频繁进行着的地质作用,因此用来合成有机小分子的物质来源丰富。合成有机小分子所需要的能量都不高,生成条件简单,都是自然界经常具有的:如云层闪电、电火花放电、紫外线、电子束或其它射线的照射,以及把气体混合物简单地加热到几十度至一百多度等等。这些条件在前寒武纪的地表环境中都普遍存在。再加上地史早期地表气温高、大气压高,大气中气体混合物的浓度大,可以推测,自有火山去气作用以来,上述有机小分子在大气中就通过无机

方式经常地生成着。

从化学角度看,有机小分子通常是元素之间以共价键方式结合在一起的,因此比较耐酸、耐热,热稳定性较好<sup>[9]</sup>。有机小分子大多数具有极性,所以易溶于水<sup>[9]</sup>,有机小分子形成后可大量溶解在海水中。但地史早期火山去气作用强烈频繁,海水为强酸性,地表气温高、光解反应强等因素,可能会使生成的有机小分子部分地分解。但有机小分子分解后,在适宜条件下又会重新合成,并在有利条件下在海水中达到富集。有机小分子还有一个特点,就是电价性很弱,而分子体积却很大,因此不能与大多数无机阴离子如H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>、SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>等化合;在酸性海水中也不能与大多数金属阳离子如K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、Cu<sup>+</sup>、Co<sup>2+</sup>、Ni<sup>2+</sup>等反应,即形不成稳定的矿物沉淀,这就决定了它们只能长期溶解在酸性海水中。但当它们高度富集时,也会被海水碎屑沉积物和化学胶体沉淀(非晶二氧化硅胶体、高价氧化铁胶体、氢氧化铝凝胶、高岭石、绢云母、绿泥石、海绿石等粘土矿物以及碳酸盐、磷酸盐凝胶等)所吸附、包裹,并部分地进入沉积地层中。

有关有机小分子被埋入地层的证据较多<sup>[8]</sup>,如G. 埃格林顿(1964)在10亿年前的诺内萨希页岩中发现了正烷烃和类异戊二烯烃;J. Oro(1965)在20亿年前形成的加拿大安大略省的冈弗林特燧石中发现了正烷烃、姥鲛烷和植烷;T. C. 霍林(1965)报道了30亿年前形成的斯威士兰超群的非格·特里页岩中存在着C<sub>18</sub>-C<sub>31</sub>的正烷烃;J. W. Schopf(1968)从距今大约12亿年至30多亿年的苦泉、冈弗林特、非格·特里含化石的燧石中发现了氨基酸;中国科学院地球化学研究所有机地球化学实验室的研究人员1972年从我国内蒙白云鄂博距今16亿年的页岩中鉴定出苯丙氨酸等十几种氨基酸,从四川震旦纪灯影组白云岩和贵州震旦纪含磷岩石中鉴定出钒卟啉,1976年又从距今20多亿年的我国鞍山群铁矿中鉴定出氨基酸等<sup>[8]</sup>。上述实例都是有机小分子在地史早期能够大量生成的地质证据。

### 3 有机小分子合成生物高分子的条件

有机小分子还不是生命。只有有机小分子通过脱水缩合反应生成蛋白质、核糖核酸和多糖

等生物高分子时,才能出现生物。但当海水中有有机小分子高度富集时,是否就一定能合成蛋白质、核糖核酸及多醣等生物高分子呢?不是的。有机小分子要形成生物高分子,毫无例外地都是通过有机小分子间的脱水缩合反应实现的<sup>[6]</sup>。脱水缩合反应能否进行,与溶液中  $H^+$  的活度密切相关,因此依赖海水 pH 值的演化。

### 3.1 氨基酸脱水缩合生成蛋白质的条件

迄今为止,模拟地球上蛋白质生成条件的实验不多,有关蛋白质的生成条件与海水 pH 值演化关系的实验研究还未见报道。S. W. 福克斯等用氨基酸进行的干热缩合实验,是把固相氨基酸的混合物加热至  $150\sim 200^\circ C$  强行脱水,缩合成了

“类蛋白质”。J. 奥罗(1961)在密封管内加热( $140^\circ C$ )甘氨酸的氢氧化氨溶液(2N)时生成了聚天冬氨酸。J. Kovacs(1961)加热天冬氨酸的水溶液,也生成了聚天冬氨酸。有人在氨基酸的水溶液中添加缩合剂生成了多肽。E. T. 德根斯(1971)加热( $80^\circ C$ )有高岭土存在的氨基酸混合物的水溶液时,得到了成分比例为  $100:100:1:20:1$  的谷氨酸:天冬氨酸:甘氨酸:丙氨酸:苯丙氨酸缩合物等<sup>[6]</sup>。这些实验,都没有考虑海水 pH 值演化的因素。基本上都是在中、碱性水溶液中进行的,对解释生物起源的环境有一定困难。

作者根据地层中沉积矿物组合的研究,认为在整个前寒武纪时期,海水 pH 值一直都波动在

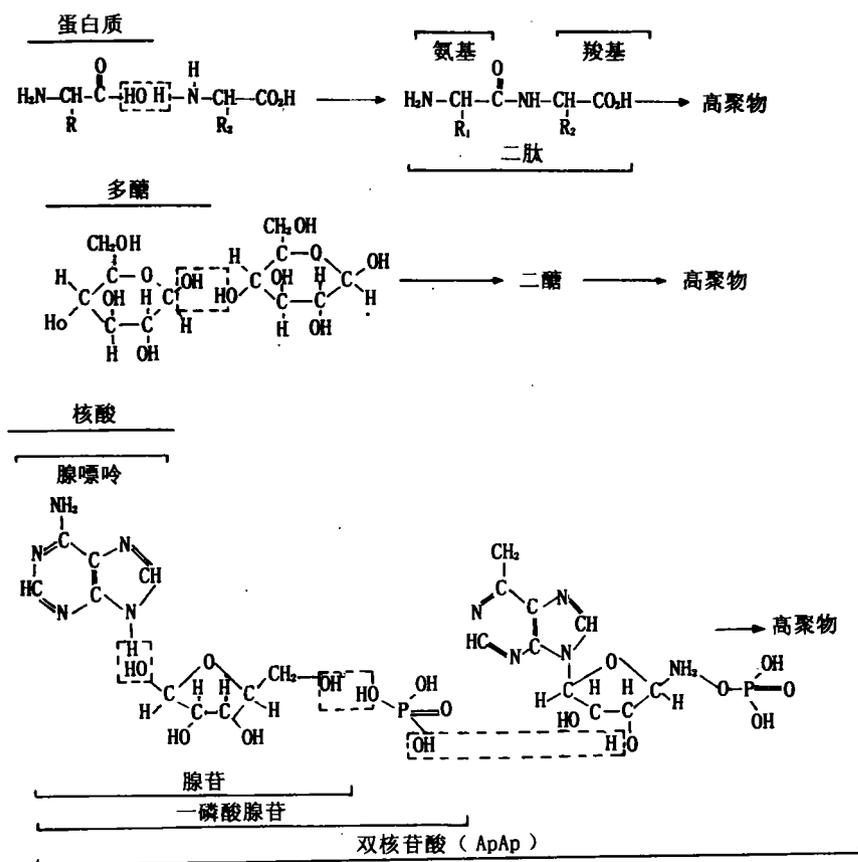


图2 脱水缩合反应生成蛋白质、多醣、核酸的过程示意图<sup>[8]</sup>

Fig.2. The dehydration-condensation reactions to form protein, ribonucleic acid and polysaccharide. (after R. M. Lemmon, 1970<sup>[8]</sup>)

强酸性至弱酸性范围,直到寒武纪初才上升到6.0。可以想象,在地史早期较强的酸性海水中,氨基酸分子即使富集量很高,彼此之间也不能进行脱水缩合来生成蛋白质。这是因为,在较强的酸性海水中,每个氨基酸分子中的羧基-OH都被海水中过剩的 $H^+$ 所包围着,而氨基中的 $H^+$ 则离解不出来。假如氨基酸分子要脱羧基,羧基将首先与海水中的游离 $H^+$ 化合,而不会花更高的能量去夺取氨基中的 $H^+$ 。在酸性海水中,每个氨基酸的羧基-OH都具有很弱的负电性,其周围将被游离 $H^+$ 所包围,整体上氨基酸分子将显微弱的正电荷,氨基酸分子之间彼此将互相排斥,不能进行脱水缩合反应来生成蛋白质。只有随着海水pH值的升高,当大部分氨基酸分子都接近于它们的等电点时,即氨基酸分子中的氨基和羧基都同时开始活化的时候,就可以进行脱水缩合反应了。而且,在脱水缩合反应之前,在海水中每个氨基酸分子的氨基还要与另一氨基酸分子的羧基彼此调整方位,相互对应起来。在这种条件下,随着海水pH值的升高,发生脱水缩合反应生成蛋白质就是不可避免的了(图2)。

### 3.2 关于核酸生成的条件

核酸完全水解的产物是两个嘌呤、两个嘧啶和一个核糖分子(或一个脱氧核糖分子)。核酸是通过磷酸二酯键连接相邻核糖残基的3'-和5'-的位置形成的。磷酸是弱酸,又是一种三元酸,在地史早期的强酸性海水中, $H_3PO_4$ 中的第一个 $H^+$ 离解出来还比较容易,但第二个 $H^+$ 离解出来就有些困难了。无机化学表明,磷酸二氢盐都易溶于水,与阳离子形不成难溶化合物沉淀。只有磷酸分子中的第二个 $H^+$ 也离解出来时,才能和 $Ca^{2+}$ 等阳离子化合生成难溶矿物沉淀;要使磷酸分子中的第三个 $H^+$ 也离解出来需要在碱性溶液中进行。这在磷的成矿作用中也显示得比较清楚,如太古宙和元古宙海水处在较强的酸性范围时,海盆中一直形不成具工业意义的磷矿层,即使在火山间歇期晚期沉淀一点磷灰石,也只能是矿层薄、品位低的,多在下一次去气作用时期被重新溶解掉。海洋中发生的第一次世界性大规模的磷成矿作用是在晚震旦纪至早寒武世,其成矿规模之大,范围之广,品位之高前所未有。成矿带北起苏联南部、经蒙古北部、中国西南部、尼泊尔西部、越南北部、印度西部,直到澳大利亚东北部的广大

地区。各地质时期磷矿的成矿强度见图3。

根据模拟实验,磷块岩沉淀成矿的pH条件是海水 $pH \geq 5.8 \sim 6.0$ 。磷块岩的成分主要是隐晶-细晶的含氟或含 $OH^-$ 的磷灰石。显然,磷酸与嘌呤和嘧啶形成稳定化合物的条件也应是弱酸性的条件,即当磷酸中的第二个 $H^+$ 也离解出来时,才能形成较稳定的脱氧核糖核酸分子。这与氨基酸脱水缩合生成蛋白质的pH条件很接近。

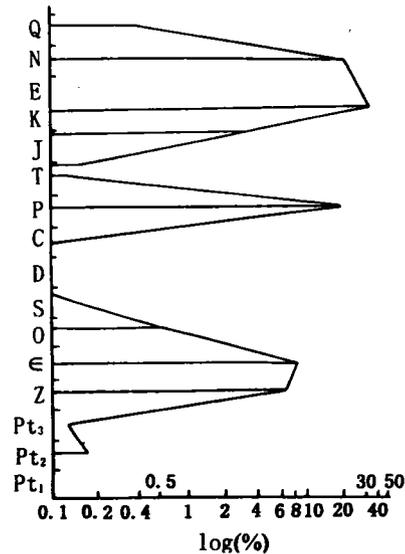


图3 世界各地地质时期磷块岩储量对比图<sup>[12]</sup>

Fig. 3. Quality comparison of phosphorites formed in different eras in the world<sup>[12]</sup>.

### 3.3 高能磷酸键 ATP 生成的条件

动物的活动都需要能量,如细胞的分裂和繁殖、呼吸作用、营养的吸收、运输及有机体的合成、肌肉的收缩和肌体的运动、神经的传导、血液的循环和分泌过程等等都需要能量。细胞中的能量交换主要靠“高能”磷酸键的转换实现的,其中最主要的化合物就是三磷酸腺苷(ATP),其结构见图4。图4中的~为高能键,当它水解时释放出约 $8000 \times 4.1868J$ 的自由能。动物是通过三磷酸腺苷在体内不断的生成、积累和能量释放等重复过程提供生命活动所需能量的。从图4中可以看出,在地史早期的强酸性海水中,三磷酸腺苷不可能生成,因为水解后不能再通过脱水缩合反应重新生成三磷酸腺苷。

### 3.4 多醣分子形成的海水条件

组成动物支撑组织的纤维素以及构成甲壳类动物和昆虫硬壳部分的几丁质都是多醣类高分子,它们也是由有机小分子经脱水缩合反应生成

的(图 2),这种脱水缩合反应在地史早期的强酸性海水中同样不能进行,因此只有等到海水演化

到弱酸性时才能合成。看来,这就是地球上动物起源很晚,直到 6 亿年前才在海水中出现的原因。

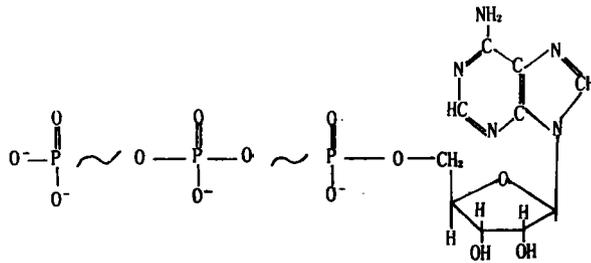


图 4 三磷酸腺苷(ATP)的结构

Fig. 4. The structure of adenosine triphosphate (ATP).

## 4 海气演化对动物进化方向的制约

### 4.1 动物首先在海水中起源,然后再向陆地扩展

动物首先起源于海水中,不可能首先在陆地上诞生。这是因为要形成生物高分子,首先需要有机小分子的富集。如氨基酸要通过脱水缩合反应来形成蛋白质,首先就需要大量、多种氨基酸分子富集在一起。氨基酸富集起来之后,还需在水溶液中调整方位,使每个氨基酸分子的氨基都对准另一氨基酸分子的羧基,然后当海水 pH 值升高到接近于多数氨基酸分子的等电点时,才能进行脱水缩合反应来生成蛋白质。这些都需要在水溶液中进行。陆地上通常没有使有机小分子充分富集并与无机组分分离的作用过程。在陆地上,氨基酸的脱水缩合反应即使能够进行,也难以把所含的杂质排除干净。陆地通常比较干燥,温度、湿度易变而不稳定,刚诞生的生命细胞经不住风吹雨打,没有足量的水作介质也无法运动,更难于从周围摄取营养物质。

另外,根据海-气平衡原理,在火山间歇期,海水 pH 值和雨水 pH 值同时受大气  $\text{CO}_2$  分压所控制,即海水 pH 值是由“大气  $p_{\text{CO}_2}$  -  $\text{H}_2\text{O}$  - 碳酸盐”平衡体系所决定,而雨水 pH 值则是由“大气  $\text{CO}_2$  直接溶解于云层水”形成的,地表水(河水、湖水等)的 pH 值则多介于雨水 pH 值和海水 pH 值之间。如在现代,海水  $\text{pH}=8.2\sim 8.4$ ,而雨水  $\text{pH}=5.7$ ,地表水的 pH 值多变化在  $5.7\sim 8.5$  之间。因此在同一时期,海水 pH 值总比雨水 pH 值高得多。当海水 pH 值升高到 6.0 时,雨水 pH 值仅为 4.0 左右,雨水和地表水仍为酸性。在这样的地表水中,有机小分子还不能进行脱水缩合反应来生成生物高分子,因此动物不能首先起源于大陆。

### 4.2 海水从频繁的金属成矿作用中净化出来是动物起源的先决条件

酸性海水与组成盆地的岩石矿物接触时,金属矿物如金属的硫化物、氧化物、碳酸盐、硅酸盐和磷酸盐等矿物都要溶解,酸度越大溶解得越多。其中很多金属元素对动物的新陈代谢过程都是有巨毒的,如放射性铀、钍,重金属汞、镉、砷、铅、铜等。医学上说的某些有益元素如锌、铁、锰、硅酸、磷、钙等,也是其含量为微量时才对生物有益,是针对现代的中、碱性地表水中绝大多数金属都已呈惰性,水中几乎不含这些金属,动植物从自然界水体中长期汲取这些金属元素达不到致病程度而言的。实际上,很多有益金属的含量长期高到  $10^{-9}$  时,对生命就已构成致命毒害了。在地史早期酸性海水中,当多数金属成矿浓度都在  $10^{-6}$  以上,有时甚至高达每升几十克,已大大超过动植物生存所能忍受的含量范围,所以生命不能起源。

从寒武纪开始,火山去气作用已极大地减弱,火山间歇期延长,地壳变稳定。海水 pH 值长期稳定地升高到 6.0 以上<sup>[1,7]</sup>。海水中的  $\text{OH}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{SiO}_4^{4-}$  等阴离子的活度都已大大提高,并使海水中的  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^+$ 、 $\text{Sb}^{3+}$ 、 $\text{As}^{3+}$  等有害金属以各种矿物形式从海水中沉淀出去了。另外,在海水 pH 值高于 5.5 以后,海水中已生成大量粘土矿物,它们对海水中溶解的微量有毒元素进一步吸附,就使海水从金属污染环境中彻底净化出来了,从而为生命的起源创造了先决条件。由此看来,地球上动物的出现不能提早,是由于受海水 pH 值演化进程制约的结果。

### 4.3 大气 $\text{CO}_2$ 演化对陆地动物出现时代的制约

陆地动物的生存依赖于陆地植物的生长发



使一些动物种属受到抑制或灭绝,而适应这一环境的种属则迅速发展起来。因此,各地质时代都形成有自己的代表性动物种属。到了第四纪,大气  $\text{CO}_2$  含量继续下降,导致气候继续变冷,进一步迫使类人猿站立起来行走,并从事生产劳动,于是劳动创造了人类。

地球上的动物是否能永远存在下去?动物的生存依赖于地表的热能和地表水的循环。地表热能是地球内能和太阳辐射能综合作用的结果<sup>[1,10]</sup>。根据火星资料推测<sup>[10,11]</sup>,再过几亿至十几亿年,地球的内能还将继续大幅度降低。当地表气温降至  $0^\circ\text{C}$  以下时,地表水将全部凝结为冰雪。地表若无液态水和水的循环,植物将无法生长,动物也将随之灭绝,因此,动、植物的出现和发展是行星演化特定阶段的产物。

## 5 结 论

(1) 地球岩石熔融分异出来的挥发性组分的

混合物,在地表的阳光、紫外线及云层放电等能量作用下,可以通过无机方式合成有机小分子。这种合成反应在整个地质历史中都可以进行;并可在海水中富集。它们是组成生物高分子的原料。

(2) 组成动物的蛋白质、核糖核酸、多醣等生物高分子都是有机小分子经脱水缩合反应来合成的。有机小分子间的脱水缩合反应在地史早期的强酸性海水中不能进行,只能等到海水演化到近中性时才能发生,因此地球上的动物起源很晚,直到寒武纪时才能起源。

(3) 大气  $\text{CO}_2$  含量降低的历史进程制约着火山间歇期的海水 pH 值和雨水 pH 值升高的历史进程,因此决定了动物首先在海水中起源,然后再扩展到陆地,并由两栖类向爬行类、鸟兽类至人类的方向演化。

## 参 考 文 献

- [1] 陈 福,地球大气圈和水圈的成因及其历史演化。见:中国科学院地球化学研究所编,地球化学进展——30届国际地质大会文集,贵阳,贵州科技出版社,1996,66~73(中文),225~233(英文)。
- [2] 陈 福,水圈的化学演化。见:中国大百科全书(地质学),北京,中国大百科全书出版社,1993,507。
- [3] 陈 福、朱笑青,玄武岩古风化淋滤生成条带状铁硅建造的模拟实验。地球化学,1984,(4):341~349。
- [4] 陈 福、朱笑青,太古代海水 pH 值的演化及其和成矿作用的关系。沉积学报,1985,(4):1~15。
- [5] 陈 福、朱笑青,根据沉积矿物的共生组合恢复大气  $\text{CO}_2$  气分压值的演化。中国科学(B辑),1988,(7):747~755。
- [6] Chen Fu and Zhu Xiaqing, A Theoretical Approach to  $\text{P}_{\text{CO}_2}$ -Evolution in the Atmosphere Based on Associations of Sedimentary Minerals. Science In China (Series B), 1989,32:(12)1509~1519.
- [7] 陈 福、朱笑青,表生风化淋滤作用的演化和为沉积矿床提供矿质能力的研究。地球化学,1987,(4):341~350。
- [8] 中国科学院地球化学研究所有机地球化学与沉积学研究室编著,有机地球化学,北京,科学出版社,1982,200~214。
- [9] 汪小兰编,有机化学,北京,人民教育出版社,1978,200~214,299~316。
- [10] 陈 福、朱笑青,类地行星大气的对比和演化。天文学报,1987,28(4):354~363。
- [11] Флоренский К. П. и др., Очерки сравнительной планетологии. Изд., <Наука>, 1981, Москва.
- [12] 张士才、东野脉兴,中国元古代—寒武纪磷矿的分布。见:国际地质对比计划中国委员会主编,第五届国际磷块岩讨论会论文集,北京,地质出版社,1984,1~20。

# CONSTRAINTS OF ATMOSPHERE AND SEAWATER EVOLUTION ON THE ORIGIN AND PROGRESS OF ANIMALS

Chen Fu

(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

## Abstract

The origin of animals is dependent mainly on "dehydration-condensation reaction" between small organic molecules as amino acids enter into organic high molecules as protein, ribonucleic acid, polysaccharide and so on in seawater. Research showed that the "dehydration-condensation reaction" is dependent on the course of pH-evolution of seawater and  $P_{CO_2}$ -falling in the atmosphere. When the pH of seawater went up to near-neutral pH, i. e., only up to Cambrian, the "dehydration-condensation reaction" can proceed, and only after then the animals could be originated. When the  $P_{CO_2}$  of atmosphere fell below 0.01 atmosphere, i. e., only up to Devonian, the crust of clay minerals and soil layer and plants on land could appear, and only after then the animals can extend from seawater to land. Following the  $P_{CO_2}$ -falling further in the atmosphere, air temperature dropped down and the output of plant-food was reduced, causing further evolution of animals into small sized, little-eating, quick-moving, and having other superior abilities to live.

**Key words:** evolution of seawater pH and  $P_{CO_2}$  of atmosphere; origin of animals; dehydration-condensation reaction; direction of animal evolution