

生命起源中的能量转换问题

王孔江 柴之芳

(中国科学院高能物理研究所核技术应用部)

生命起源问题是人类所面临的关于自然本质的几个未解之谜之一。所谓生命起源简而言之就是研究物质如何在自然条件下由“死”变“活”的问题。它的解决将不仅对科学的发展有极大的促进作用，而且将对人类的思想史产生重大影响。

一提到生命起源问题给人的第一感觉也许就是范围太大甚至有些不着边际，实际上并非如此。1924年，苏联生物化学家 A. L. 奥巴林在其“生命的起源”一书中就科学地划分了生命起源的几个阶段并预言了较现实的反应途径，大致包括：

1) 生命必需的有机小分子的合成问题。如氨基酸、核酸碱基、核苷、核苷酸、糖类、脂类的合成。这方面的问题从1953年米勒-尤里实验以来已基本得到了解决。而合成的有机小分子的活化及聚合目前仍处于探索阶段。

2) 遗传密码的起源问题。即蛋白质与核酸之间三联体密码关系的起源。如果肽链或蛋白质与核酸之间不形成明确的密码关系，这个分子体系就不具备储存信息的能力，这个分子体系就无法进化发展。所以，遗传密码起源是大分子体系走向生命体系的关键。

3) 生物手性的起源。单一的手性分子是小分子聚合成大分子并且是形成生物活性(如复制)的前题，手性起源是生命起源的又一关键。



4) 细胞的起源。细胞不仅是生命活动的基本单位，而且也使生命的进化与发展获得了一个稳定的小环境。

5) 以上各个过程化学反应所需能量的来源。

热力学第二定律指明了自然发展的

方向，绝热孤立体系只能是从有序到无序。生物系统却与之恰恰相反，生物系统是由无序到有序，由简单到复杂。这种特点在生物体内的三个基础就是：生物的新陈代谢、手性的均一性及能自我复制的遗传系统。生命起源问题的重点及主要难点目前也正集中在这三点上。

生命起源中的能量转换问题与生命起源的各个阶段均有密切关系，但也是一直未得到解决的问题，本文将重点对生命起源中能量转换问题的研究动态及存在的问题作一简要介绍。

在现代生物圈内，生命活动所需的能量绝大部分最终是来源于太阳能，能量的传递链为：太阳辐射→植物→动物。地球上每年由植物捕获至少 4.2×10^{17} 千焦的能量。植物对太阳能的捕获主要是由其叶绿体中的叶绿素来完成的。两种主要的叶绿素，叶绿素 A、叶绿素 B 的最大吸收分别为 680nm 及 460nm。光合生物的叶绿素将光能转化为化学能并贮存在所合成的化学物质中，其他生物直接或间接地通过分解代谢将化学物质中贮存的能量释放出来用以维持生命活动。在生命起源阶段，以上能量传递链显然是不可能的。因为那时不存在结构非

常复杂的叶绿体。

生命起源的能量转换问题就是要回答在生命起源过程中化学反应所需能量的来源以及与生命起源需能反应的偶联。如果把生命起源过程看成一系列连续的化学反应,生命起源中的能量转换问题就是要找到这一系列反应的自然动力。所以,这个问题实际上是要求回答生命起源的“第一推动力”。

1948年, E. 薛定谔在其“生命是什么?”一书中谈到生命的特征是什么时指出:生命是靠不断的新陈代谢从环境中获得负熵,以不断消除它自身活着时不得不产生的熵并使负熵得到积累。新陈代谢实质上又可以理解为从环境中获得自由能的过程。因为生命起源过程也是一个从环境获得自由能并积累负熵的过程,所以对生命起源的能量转换问题的回答无疑能大大加深对生命起源的认识。

对生命起源中能量转换问题的探索已持续了几十年,到目前为止仍无定论。自90年代以来,对这个问题的研究是生命起源研究的四个热点之一。近几年已提出三种理论来解释早期能量转换:

1) 诺贝尔奖获得者 C. De 杜维(1991)提出的“硫酯理论”。

2) H. 和 M. 巴尔特谢夫斯基等(1993)提出“焦磷酸理论”。

3) G. 沃席特肖塞(1992)提出的“铁-硫理论”。

生命起源中的能量转换大致包括以下几方面:

1) 生命起源阶段所需能量的来源。

2) 太阳辐射能的吸收。

3) 吸收的太阳辐射能的贮存。

4) 合成的高能化合物是如何与生命起源阶段的需能反应相偶联,并由高能化合物释放的能量来推动生命起源过程的化学反应。

一 太阳辐射是生命起源的主要能量来源

本世纪初, J. B. S. 霍尔丹及 A. 奥巴林都曾提出太阳辐射能是生命起源的能源。生命

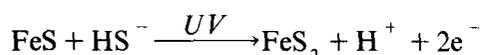
起源界对此也已达成共识,即太阳辐射尤其是紫外辐射是生命起源的主要能量来源。这是因为太阳辐射具有数量上及质量上的两重优势:数量上的优势表现为太阳辐射能占地球表面能量输入的99.9%以上,这一点是其他任何能源所无法比拟的。质量上优势在于光化学反应的选择性。在光化学反应中,只有那些能吸收光子的分子才能发生反应。这一点与电离辐射等形成鲜明对照。电离辐射总是与系统的主要成份发生反应,在水溶液体系中主要与水反应,与溶质的反应基本上属于次级反应。虽然著名的米勒-尤里放电实验表明了放电是前生命小分子合成的重要能量来源。在已进行的前生命合成研究中,采用高压放电作为生命合成能量来源的研究较多,这主要是由于受到米勒-尤里实验的鼓舞。近几年来对放电合成在前生命合成中意义的争议较大,主要是因为原始地球的大气很稀薄,大气放电合成有机物的产率可能很低,在原始地球大气中强烈的紫外辐射之下,放电合成的有机物也会被紫外辐射破坏。就连米勒本人也多次强调太阳辐射是生命起源的主要能量来源。

太阳的发射谱为连续谱。在原始地球的早期,地球的原始大气形成臭氧层以前,太阳发射谱中短至200nm左右的紫外线均可到达地球表面。在地球的大气形成臭氧层以后,由于臭氧层对紫外辐射的强烈吸收,在现代地球表面能到达地球表面的320nm以下的紫外线已经很少。一般认为,地球的臭氧层是植物光合作用的副产物,所以臭氧层是生命起源以后才产生的。那么,在生命起源阶段到达地球表面的紫外线中,从200nm以上的紫外辐射应远远大于现代地球上的短波紫外辐射。在对T-金牛星(相当于几百万年龄的原始太阳)的紫外发射研究表明,其紫外发射的强度比现代太阳紫外辐射强度高约4个数量级。这也说明了在生命起源的能量转换中短波紫外辐射的重要意义。所以,生命起源的能量转换问题实际上已经转变为太阳短波紫外辐射引起的光化学反应问题。

二 前生命阶段的生命小分子对 太阳辐射能的吸收

太阳辐射是生命起源的主要能量来源,接下来的问题就是在原始地球条件下如何吸收太阳辐射能.生命起源中的能量转换问题也就转化为在生命起源过程中如何利用太阳能并把它转化为化学能的问题.

前生命阶段原始地球上可能存在的小分子的紫外吸收波长都太短: $\text{CH}_4 < 145\text{nm}$, $\text{H}_2\text{O} < 185\text{nm}$, $\text{NH}_3 < 225\text{nm}$, $\text{CO} < 154.5\text{nm}$, $\text{CO}_2 < 110\text{nm}$, $\text{H}_2 < 90\text{nm}$. 以上物质紫外吸收的另一特点是摩尔消光系数较小. 所以,它们的紫外吸收对前生命合成的意义不大. 部分无机盐对紫外也有一定吸收. 在近年提出的三种解释前生命过程中能量转换的理论中,已经开始注意到无机盐对太阳辐射能的吸收及其在其能量来源中的意义. G. 沃席特肖塞(1992)的“铁-硫理论”认为:生命起源阶段的能量来源于黄铁矿(pyrite)表面的氧化还原能. 这个理论主要基于以下反应:



以上反应的 $\Delta G^{0'} = -38\text{KJ/mol}$. 作者认为,以上反应产生的自由能与矿物表面的吸能反应相偶连,即能推动高能磷酸键的合成等生命起源的一系列反应. 但是,这一假说的主要缺点是以上反应在水溶液体系中是不可能发生的,而生命体系只可能是水溶液体系.

与生命相关的氨基酸、核苷酸、磷酸盐、氰类在太阳辐射谱的紫外区均有一定的或强烈的吸收,这意味着它们的光化学反应在生命起源的能量转换研究中可能具有特殊意义. 脂肪族氨基酸的紫外吸收波长在 220nm 以下,摩尔消光系数很小. 在生命合成上的意义不大. 芳香族氨基酸的摩尔消光系数较大,但至今尚未发现在前生命条件下合成芳香族氨基酸的有效途径. 氰类的紫外吸收明显,由氰类紫外光合成碱基已得到实验证实. 因为所有的核酸碱基、核苷及核苷酸均具有非常强烈的紫外吸收,所

以早在 50 年代 C. 萨根曾明确指出:核苷酸碱基的强烈紫外吸收使其最有可能成为生命起源中吸收太阳能的化合物.

一般认为,在前生命合成产物中的腺嘌呤是最重要的吸收太阳辐射能的化合物. 这主要是因为:

1) 在前生命条件下腺嘌呤合成的产量极高. 在前生命合成中,得到 0.5% 的产量也已相当高,但从液态氨加氰化氢途径合成的腺嘌呤产量高达 30%.

2) 在所有的核酸碱基中,腺嘌呤的摩尔消光系数最大,它吸收紫外辐射的能力最强.

3) 在核酸的碱基、核苷及核苷酸中,腺嘌呤及其衍生物光解的量子产率最小. 所以,在原始地球强烈的紫外辐照之下,腺嘌呤最稳定.

4) 腺嘌呤核苷的磷酰化产物——AMP (一磷酸腺苷)、ADP (二磷酸腺苷)、ATP (三磷酸腺苷)是现代生物能量代谢的中心,这也是使人们想到腺嘌呤在前生命能量代谢中可能具有重要作用的原因.

从现代生物圈中生物的能量代谢来看,其能量代谢主要涉及核苷酸及磷酸两种物质. 生物能量的主要载体是 ATP. 从以今论古的原则来看,这可能意味着核苷酸和磷酸在生命起源阶段的能量代谢中具有重要意义. 对生命起源中能量转换的研究也基本是按这种思路进行的. 但是,自 50 年代兴起的光化学研究已经证明,核苷酸在吸收紫外辐射的同时自身也会被破坏. 所以这个问题在生命起源的研究中沉寂了二十几年.

三 核酸碱基、核苷及核苷酸的光化学

由于太阳辐射能是生命起源的主要能量来源,而核酸的碱基、核苷及核苷酸对紫外均具有强烈吸收,所以生命起源的能量转换问题已经被转换为核酸的光化学问题. 在现代生命圈中,生物能量的代谢主要载体是三磷酸腺苷(ATP). 生物的能量代谢主要涉及核苷酸及磷酸两种物质. 这可能也意味着核苷酸在生命起源阶段的能量代谢中有重要意义.

核酸的光化学是一门相当成熟的学科。近十几年来由于大气层臭氧洞的发现,因紫外与核酸反应而导致的诱变及致癌引起了社会的广泛关注。同时也大大促进了核酸的光化学的发展。核酸的光化学研究已经证明,紫外辐射(主要是 254nm)对所有核酸碱基、核苷及核苷酸均有光解作用。

核酸是由五种核酸碱基、核糖(DNA 为脱氧核糖)及正磷酸构成的。无论对其最简单的碱基还是对其复杂的多聚体的光化学反应已经作了大量研究,结论主要可总结为以下几点:

1) 未发现核酸中的正磷酸对核酸的光化学反应有明显的影晌。

2) 在 220nm 以上的紫外辐照之下,核酸分子中的核糖对核酸的光化学反应的影响也可以忽略。

3) 在核酸的两类碱基(嘌呤及嘧啶碱基)中,嘌呤碱基及其核苷、核苷酸在光化学反应中较稳定[量子产率较低]。嘌呤碱的量子产率很小。DNA 分子中嘌呤碱吸收的能量一般趋向于转移给嘧啶。由于嘌呤碱较高的稳定性,对其研究较少,对其光解产物的分离及鉴定也很少。其已知主要光解产物有 NH_3 及尿素。

嘧啶碱基及其衍生物的光解机理较复杂。紫外光照嘧啶及其衍生物主要引起嘧啶碱基的水化加成、形成二聚体及嘧啶环的开环不可逆裂解三种反应途径。水化反应是嘧啶碱光解的重要反应,反应机理是在嘧啶环的 5,6 位加成一分子水。在紫外光照下,三重态嘧啶分子与基态分子的 5',6' 位双键加成形成的环丁烷二聚体结构,此结构较稳定,酸化、碱化、加热均不能分解。这是紫外辐射损坏脱氧核糖核酸(DNA)及核糖核酸(RNA)而引起突变及细胞致死的主要方式。嘧啶的光解的最终产物是尿素、 NH_3 、 CO_2 及胍等产物。

紫外照射核酸碱基、核苷及核苷酸(NA)会导致其光解明显限制了 NA 在生命起源能量转换中的作用,这是从 NA 吸收紫外辐射的角度研究生命起源能量转换沉寂了二十多年的主要原因。而且,从生命起源角度进行的核酸

的光化学研究至今仍无大量合成高能化合物的报道。

但是,必须注意到前人从核酸光化学研究所得出结论的前提条件:

1) 前人对核酸光化学的研究所使用的光源主要是 254nm 紫外光源(低压汞灯),而这显然不能代表生命起源过程的真实反应条件。因为原始太阳的发射谱不是低压汞灯所发射的单波长(254nm)而是连续谱。应该强调的是,原始地球上的远紫外辐射特别是 220nm 以前的辐射强度比现代太阳远紫外辐射强度高四个数量级,而且由于当时的原始地球无臭氧层,所以在原始地球表面的远紫外辐射强度应该远远高于四个数量级。也就是说,核酸光化学的研究所得出的结论并不完全适用于生命起源中的能量转换研究。

2) 核酸的光化学研究均是在核酸碱基、核苷及核苷酸单一体系中取得的,从生命起源的角度来看这是不可能的。在生命所起源的原始海洋中,只能是一个由氨基酸、核苷酸、无机盐等组成的混合体系。

3) 前人在核酸的光化学研究中均未注意到磷酸盐在核酸光化学中可能存在的重要作用。

由此可以看出,前人在核酸光化学方面所得出的结论并不完全适用于从生命起源角度进行能量转换研究。遗憾的是前人在生命起源能量转换研究中却接受了以上结论。而这正是生命起源能量转换研究停滞了二十来年的主要原因。

四 吸收的太阳辐射能量的储存

在现代生命体系中,生物的能量代谢主要涉及核苷酸及磷酸两种物质。这可能也意味着核苷酸在生命起源阶段的能量代谢中有重要意义。生物体内的高能化合物可以分为磷氧键、氮磷键、硫酯键及甲硫键型四大类。其中磷氧键型中的焦磷酸类化合物是生物体能量代谢中最主要的高能化合物。生物能量的主要载体三磷酸腺苷就属于这一类化合物。生命过程所需的能量就储存在 ATP 的 β 及 γ 焦磷酸键之

中,所以,在能量转换研究中,一般认为在生命起源阶段的能量也是以核苷酸的高能焦磷酸键的形式储存的,在这一研究中最现实的目标就是合成核苷酸的磷酸化产物特别是腺嘌呤核苷的磷酸化产物如 ADP、ATP 等等。

五 磷与生命起源中的能量转换

前人在生命起源能量转换研究中存在的一个问题是忽略了磷酸盐在能量转换中可能存在的重要作用。在生物的能量代谢中,磷氧键类高能磷化物占主导作用。生物体内生物氧化所产生的能量绝大多数也是以 ATP 分子中高能磷酸键的形式储存、运输。生物分子是以磷酸化的形式活化,氨基酸是以氨酰基腺苷酸的活化形式参加蛋白质的合成,核酸的单体也均以三磷酸核苷酸的形式参与 DNA 及 RNA 的合成。生物体内酶的活性调节方式很多,磷酸化和去磷酸化是一种最重要、最普遍、生理效应显著、反应灵敏、节约能量、机制多样的酶活性调节方式。磷在生物体内的上述作用特别是在生命体系能量代谢中的作用自然使我们想到了磷在生命起源能量转换中可能具有的重要作用。

生命起源于原始海洋,而磷酸盐在原始海洋中的浓度问题却是生命起源研究中最有争议的问题之一。自然界无单质磷存在,在地壳中磷的原子百分含量为 0.04%。常见的矿物有磷酸钙的磷灰石。在自然界所有的含磷化合物中,自然界的磷均以磷氧化物盐的形式存在,现代海洋中磷酸盐的浓度为 0.005—0.04ppm,即使在磷矿物的饱和溶液中,磷的含量也只有 0.125ppm。磷酸在中性、碱性条件下会与钙、锶、钡离子结合生成不溶性盐,在酸性条件会同铁离子、铝离子结合形成沉淀,所以磷在原始海洋中的浓度可能很低。

由于磷酸盐在原始海洋中的浓度太小,磷在生命起源中的作用受到严格的限制。以上结论极大地限制了磷在生命起源中作用的研究。最新有关磷对 5' AMP-ADP 合成的催化研究也只是在固态磷矿物表面进行。

磷在原始海洋中的浓度问题并不是不可克服的。A. W. 施瓦茨(1971)就指出,在原始地球条件下,两种途径可以大大提高磷酸的浓度。两种常见磷矿物羟基磷灰石以及氟磷灰石的溶解度与 pH 密切相关。在 pH4 条件下,羟基磷灰石的溶解度大于 $10^{-3}M$,氟磷灰石的溶解度大于 $10^{-4}M$ 。尽管现代海洋有复杂的缓冲体系,火山附近海水的 pH 值仍有降低。这是原始海洋中 pH 较低的证据之一。在原始海洋中二羧酸、三羧酸等的存在会大大降低 Ca^{++} 的浓度,使平衡向提高磷酸盐的溶解度的方向移动。所以,原始海洋中磷酸盐的浓度可能比过去设想的高得多。在过去的生命起源研究中,磷酸盐的意义可能被低估了。

另外还值得强调的是焦磷酸 (ppi) 在前生命能量转换中的可能具有的特殊作用。焦磷酸(两个正磷酸分子的羟基缩合即成焦磷酸)是最简单的带有高能磷酸键的磷酸聚合物。现代生命体系中能量的主要来源即是高能磷酸键的水解。这一反应释放的自由能只比 ATP 水解反应(生物体中最常见的供能反应)释放的自由能(-7.7 千卡/mol)略小,而且实验已经表明,在原始地球条件下焦磷酸及多聚磷酸可能通过多种途径大量合成。对磷酸二氢钙或其他碱金属盐加热至 300℃ 即可形成多磷酸及偏磷酸。在原始地球条件下可能存在的缩合剂也可使正磷酸缩合成焦磷酸。所以早在 60 年代就有人指出,焦磷酸以及其他聚磷酸很可能是最早的高能磷化物,但至今仍然没有取得有力的实验证据。

综上所述,在原始海洋中,焦磷酸、聚磷酸的浓度可能也相当可观。它们在生命起源特别在其能量转换中可能有重要意义。近五年以来提出的能量转换理论中,有两种(C. De 杜维的“硫酯理论”及 H. 巴尔特谢夫斯基提出的焦磷酸理论)均建立在磷酸盐的基础之上。

六 磷酸盐对 NA 光解的促进效应

综上所述,太阳辐射是生命起源的主要能量来源。而核酸碱基、核苷及核苷酸是吸收紫外辐射能的主要化合物。由现代生命体系的能

量代谢可以预测磷酸盐及 NA 在生命起源的能量转换中有重要作用。所以,在原始地球的强烈紫外辐照之下磷酸与 NA 混合体系的光反应可能是生命起源中最现实的反应体系,这种混合体系的光反应可能与生命起源阶段的能量转换有关。基于以上分析,笔者曾用中压汞灯(发射谱与原始太阳的发射谱相似)模拟原始地球表面的太阳辐射,研究了磷酸盐与 NA 混合体系的光化学反应,实验意外发现了磷酸盐对 NA 光解的促进效应。

在中压汞灯的辐照下,磷酸对所有 NA 的光解均有明显促进作用。在磷酸的存在条件下,NA 光解的相对量子产率从 1.45(5 尿嘧啶核苷单磷酸)到 8.5(腺嘌呤)。当磷酸的浓度达到 $1 \times 10^{-3} \text{M}$ 后,磷酸对 NA 光解的促进作用才较明显。上述反应体系中只有 220nm 以下的紫外光源才对 NA 的光解有明显促进作用。有趣的是磷酸盐对 NA 光解促进作用有明显选择性。芳香族氨基酸的杂环在结构及紫外吸收谱上与核酸碱基很相似,但实验却未观察到磷酸对三种芳香族氨基酸的光解有任何影响。与磷酸根外层电子结构相似的砷酸盐对 NA 的光解也有明显促进作用。碳酸盐的 UV 吸收谱与磷酸盐的紫外吸收谱非常相近,所以在同样的光源条件下碳酸盐吸收的紫外辐射能与磷酸盐相似,但碳酸盐对 NA 的光解均无明显影响。其他的磷酸盐如次磷酸、亚磷酸、焦磷酸对 NA 的光解均有明显促进作用。

基于前人及上述实验结果得出的另一有趣结论是磷酸盐吸收紫外辐射能引起光化学反应的量子产率极高。有人通过研究 5' AMP 光解后的磷酸的释放计算出 5' AMP 在 253.7nm 光解产生磷酸的 $\phi = 5 \times 10^{-5}$, 以上结果是基于 5' AMP 的 Σ_{max} 得出的。前人已经证明,磷酸的释放不是由于核苷酸的碱基的紫外吸收引起的而是由于磷酸吸收紫外光引起的,所以上述量子产率明显是错误的。因为 5' AMP 在 254nm 的消光系数为 1.54×10^{14} , 而磷酸在 254nm 处的消光系数为 0.1—1,所以紫外光照 5' AMP 产生磷酸的实际量子产额

应比由 5' AMP 的消光系数计算所得的量子产额高至少 10^{14} 倍。也就是说磷酸吸收光子发生反应的量子产率高达约 0.4。

七 磷酸盐对 NA 光解的促进效应与生命起源中的能量转换

磷酸对 NA 光解的促进效应在生命起源的能量转换中可能有重要意义,主要包括以下几点。

磷酸对 NA 光解的促进效应的发现表明,磷酸盐是一种新的、高效的吸收及利用太阳远紫外辐射能的物质。无机正磷酸存在时 NA 的相对量子产额为 1.45—8.5,实际上意味着磷酸盐的存在使 NA 对中压汞灯辐射能的利用效率提高了 1.5—8.5 倍。由于中压汞灯辐射谱与原始地球上太阳的辐射谱的相似性,无机磷酸盐对短波紫外(约 220nm 以下)辐射能量的吸收以及向 NA 的能量传递提供了一条新的吸收及储存太阳辐射能的途径。尤其值得注意的是,焦磷酸与腺嘌呤核苷混合体系的相对量子产率更高(达 33.7)。也就是说,焦磷酸盐的存在使腺嘌呤核苷对中压汞灯辐射能的利用效率提高了 33.7 倍。而腺嘌呤的磷酸化产物(如 AMP, ADP, ATP 等)恰好是现代生物体最主要的能量载体。所以磷酸及焦磷酸向腺嘌呤核苷、核苷酸能量传递的高效率决不是偶然的。

虽然该体系中,磷酸对中压汞灯辐射能的吸收以及向 NA 的能量传递结果使 NA 的光解量子产率增加。但可以预言,在磷酸与较浓的 NA 组成的混合体系中,太阳辐照可能会合成相应核苷一磷酸、核苷二磷酸以及核苷多磷酸。以上体系中,磷酸盐把吸收的短波紫外辐射能量向 NA 的能量传递可能意味着 NA 可能由此途径激活和聚合。

应当强调指出的是,磷酸对 NA 光解促进效应的发现虽然明显促进了生命起源能量转换问题的研究,但离问题的解决还有一定距离。这是因为生命起源能量转换研究的最终目标是利用太阳能合成生命过程所需的高能化合物如 ATP 等。磷酸对 NA 光解的促进效应是一种

新的而且是高效的吸收及利用太阳紫外辐射能的方式,而在实验所采用的条件之下,磷酸对NA光解的促进效应是促进了NA的光致分解而不是合成。但是,如果考虑到核酸光化学反应对反应体系条件的敏感性,通过改变反应条件来改变反应的进程及结果在原则上是完全可能的。

从目前生命起源的研究发现生命所需的小分子均有合理的前生命合成途径。与前生命合成同等重要的是合成产物的稳定性,近年来前生命合成产物的稳定性问题越来越引起重视。因为核酸催化功能的发现,科学界似乎已接受了一个基于RNA分子的“RNA世界”作为生命起源最简单分子体系。但S. L. 米勒等人指出,从生命起源的角度来看RNA世界的基本问题是RNA单体的稳定性及聚合。如果以上实验体系是对原始地球条件的正确的模拟,磷酸盐对NA光解的促进作用似为米勒,奥吉尔及乔伊斯等对“RNA世界”的怀疑提供了具体的实验证据。

这一现象对核酸光化学的重要意义是不言自明的。就笔者所知,即使在最近的核酸光化学研究中仍然否认磷酸的作用。可以毫不夸张说,磷酸对NA光解促进效应的发现给核酸光化学带来了观念性的变化。由于地球大气中臭氧洞的发现,阳光中的紫外辐射对生物的诱变及致癌作用也越来越引起人类社会的重视。因为紫外对生物的诱变及致癌作用主要是通过紫外辐射引起细胞DNA形成TMP二聚体以及水化物引起的,而且细胞中较高的磷化物含量以及DNA本身就是通过磷酸二酯键连接起来的,磷酸对NA光解的促进效应以及磷酸盐对NA光解促进效应的高效率可能意味着磷酸在紫外所致的生物的诱变及致癌作用中有重要意义。

八 大自然为什么选择磷?

生物进化过程就是自然选择的过程。生命起源过程中对元素的选择也是一个自然选择的过程。磷在生命过程中的作用主要表现在以下

三方面:能量的载体、生命单体的活化及酶活性的调节,所以磷是生命元素中最活跃的元素之一。那么自然也就提出为什么大自然会选择磷。对于这个问题的讨论早就开始了。60年代初期,圣捷尔吉就提出为什么磷在有机体内起着如此奇特的作用。G. 沃尔德(1962)在分析比较了常见生命元素的原子结构、键长、键角、键能等因素后认为,磷之所以在生物体内有如此重要的作用主要是由于以下三个原因:1)磷比它的同一周期的其他元素能形成更开放更弱的键。2)因为磷具有3d轨道,所以能形成四个以上的键。3)磷保持有形成多个键的能力。1965年,当ATP的发现者F. 李普曼被问及为什么磷在生物能量传递中有如此重要的作用以及是否有什么基本的物理上的原因时,他只是从高能磷酸化物如ATP既带有高能键但同时又是较高稳定性的角度加以解释。1987年,F. H. 韦斯特海默在“科学”杂志上讨论到“大自然为什么选择磷?”时认为,磷酸是唯一的适合于在连接两个核苷酸的同时自身也电离而产生负电荷的化合物,它所产生的负电荷能保护核酸的磷酸二酯键以防其水解。

对以上问题目前作出结论也许为时尚早,但我们认为生命的起源及进化是一个连续的过程,生命起源过程中对元素的选择当然也遵循“适者生存”的原则,而从生命起源角度来回答以上问题似乎更合理也更有力量。磷酸对NA光解的促进效应不仅表明磷酸盐能吸收远紫外吸收,而且表明磷酸还能把吸收紫外辐射能特异性地传递给核酸碱基、核苷及核苷酸。这实际上是把现代生命体系中能量代谢中的两种最主要的化合物磷酸及核苷酸结合到了一起。因为以上现象是在模拟原始地球条件下得出的,所以这一现象显然不是偶然的。磷酸盐把吸收的短波紫外辐射能量向NA的能量传递可能意味着NA可能由此途径激活和聚合。在磷酸与NA混合体系中,模拟原始太阳辐照可能会合成相应的核苷一磷酸、核苷二磷酸以及核苷多磷酸,这明显有助于生命起源中能量转换问题的研究。