

专 论 与 综 述

量 子 生 物 学

林 克 椿

(北京医学院)

1970年国际量子生物学会(International Society of Quantum Biology, 简称 ISQB)的成立,标志着当代生物科学从分子水平向着更深的层次——电子水平发展,又一次说明了精密科学(数学、物理学)和复杂的生命科学日益相互渗透、密切结合的必然趋势。

量子生物学是运用量子力学的理论概念和方法研究生命过程本质的一门学科。由于人们长期以来习惯于本门学科的范畴内进行思考、从事研究,因此对于量子生物学这样一门新兴的边缘学科,很自然地会提出各种各样的问题。首先是认识上的问题:量子力学是精确描述微观体系(原子、分子)运动规律的一门精密科学,怎么会和研究极其复杂的生命过程的生物科学结合在一起?能不能结合?有无必要结合?其次,怎样应用量子力学的方法研究生命过程?研究些什么内容?有些什么结果?本文试图对上述问题作一简单介绍。

量子生物学是在量子力学与分子生物学发展的基础上相互结合的产物。

1900年, M. Planck 首先指出,物质对光的吸收与发射都是不连续的过程,从而提出了量子的概念,奠定了量子理论的基础。1913年 N. Bohr 提出了氢原子模型,用来初步说明氢原子光谱的产生,指出光谱是能级间跃迁的结果。1925年到1927年间,经过 de Broglie, E. Schrödinger 与 H. Heisenberg 等人的努力,根据粒

子与波的统一性的观点,创立了能精确描述原子外围电子运动的方法,即波动力学或量子力学的方法,成为廿世纪物理学突飞猛进的一个重要标志。然而量子力学的发展并未到此止步,它从氢原子到氢分子然后逐步扩展到复杂分子,从而过渡到量子化学,而为了适应这种过渡,它所用的方法也在不断改进,不断发展。这种发展很自然地吸引着物理学家和化学家进一步分析具有生物学意义的分子的电子结构以及它和生物活性的关系。比如1938年 Schmidt 就已开始对致癌芳香烃类化合物进行研究,以后经过 Pullman 等人的工作,现已成为量子生物学的一个重要组成部分。

从生物学方面来看,十九世纪 G. Mendel 等人在遗传学上的发现无疑是生物科学的重大成就之一。但是关于突变的概念则是 de Vries 在1902年明确提出来的。突变和不连续变化有密切联系,但在量子论刚刚诞生的当时,还不具备相互联系的条件。十七年后,1939年物理学家 Jordan 进一步提出了“突变是一种量子过程”的观点,这一观点在1944年 Schrödinger 的“生命是什么?”一书中得到了详尽的阐述。他还提出了遗传物质是一种有机分子,遗传性状以“密码”形式通过染色体而传递等设想。这些设想在1953年由于 Watson 与 Crick 用X射线衍射法分析了遗传的主要物质脱氧核糖核酸(DNA),提出了DNA的双螺旋结构模型而得到了极大的发展,奠定了分子生物学的基础。

分子生物学的出现是廿世纪后半叶自然科

学的重大突破,使现代生物学的面貌为之一新。遗传学、分类学、细胞学、药理学、免疫学、病理学都相继进入了分子水平。然而分子的相互作用,却又不能不涉及它们外层电子的行为,而唯一能够精确描述电子行为的手段就是量子力学。这一点不仅物理学与化学工作者早已认识到了,并从五十年代开始大力开展了这方面的研究(包括激素、维生素、药物、核酸、蛋白质等),而且也逐渐为生物学家们所领会,其中特别应该提到的是 A. Szent-Györgyi, 他在 1957、1960、1976 年分别写了名为“生物能力学”、“亚分子生物学导论”和“电子生物学——癌的一种新理论”三本小册子,虽然这三本书里强调的方面有所不同,但中心思想是一致的,那就是必须从电子水平上进一步阐明生命现象的本质。在这种认识的推动下,加上计算方法的改进,特别是电子计算机的应用,大大缩短了复杂的计算过程,促进了量子生物学的形成与发展,也导致 1970 年国际量子生物学会的正式成立。虽然这一学会在成立时还不到 100 人,但各方面的研究工作十分活跃,对这门学科的发展起到了很大的推动作用。

从以上所述可以看出,量子生物学的出现是当代生物学发展到分子生物学以后的必然趋势。从量子物理→量子化学→量子生物化学→量子生物学的过程说明量子力学的研究从简单的原子逐步推广到复杂的生物大分子及其功能的极大可能,而从经典生物学→分子生物学→量子生物学的过程则反应了复杂生命现象从分析其物质基础到深入了解运动规律的需要。从两方面都说明生物分子的表现极大程度上依赖于电子水平运动的认识,量子力学就是在这—基础上与生物学(分子生物学)结合起来的。而所以有这种可能,不仅由于量子力学方法的改进,电子计算的发展,而且也由于分子生物学本身的成就,特别是从实验方面确定的对各种生命现象基本规律的阐明。当然,不同的运动形式各有其自身的特点,不能把复杂的运动形式完全归结为简单形式。因此既要反对那种强调生命活动的特殊性,拒绝探讨各个深入层次的

“神秘论”,也要防止认为分子与电子能解释一切生命现象的“还原论”的错误观点。在这里,再一次证明掌握辩证唯物主义的正确观点在研究自然科学中的重要性。

二

量子生物学所用的研究方法基本上就是量子力学用来处理一个微观体系的全部计算过程,并由此得出能说明这一体系的各种参量。在这里只能就其解决问题的思路加以简要说明。

量子力学认为,分子中的原子核是个骨架,而其外围电子则在—骨架附近运动。电子既可以看成是一个个的粒子,同时又具有波动的性质。因此对每一个电子的运动可以用一个波函数来加以描述,整个体系则可以用代表所有电子运动的总的波函数加以描述。

量子生物学所处理的生物分子都具有一个很重要的特点,即这些分子都或多或少具有共轭系统,从经典化学的观点看就是具有双键的系统。在这类系统中除了有一般的单键以外(这种键由 σ 电子组成,比较牢固),还有由 π 电子组成的双键,这种 π 电子活动性较大,实际上它不定位在某个原子周围,而可以在整个共轭系统内自由运动。苯环就是一个典型的共轭系统。成为核酸分子的基本组份的嘌呤和嘧啶碱基,蛋白质中的芳香氨基酸、高能磷酸物、蝶呤、卟啉、醌、类胡萝卜素、所有辅酶、胆固醇以及许多药物无不具有共轭系统。这种无处不存在的共轭系统以及 π 电子在这一系统中的非定域化和各种生命现象密切相关。因此量子生物学首先考虑了这种电子的运动(必要时也考虑 σ 电子)。

量子力学为解决比较复杂的分子体系的问题提供了两种可用的方法,一种称为价键法(Valence bond method),一种称为分子轨道法(Molecular orbital method 简称为 MO 法)。前一种方法对生物分子的应用很不方便,因此目前最常用的是分子轨道法,也就是认为每个电子的运动可以扩及整个分子(或者整个共轭系统)。为了应用量子力学的方法,第一步必须写

出能够描写全部被讨论的电子（例如一个共轭系统中的全部 π 电子）的波函数 φ ，最常用的一种方法就是认为每个电子尽管不固定在某一原子附近的原子轨道上，但它毕竟和原子轨道有关，因此整个体系的波函数可以认为是各个原子轨道的线性组合，称为原子轨道的线性组合 (Linear combination of atomic orbitals)。所以这种分子轨道法可简称为 LCAO-MO 法，波函数 φ 可写成：

$$\varphi = c_1x_1 + c_2x_2 + \cdots c_nx_n = \sum_r c_rx_r \quad (1)$$

式中 $x_1x_2\cdots x_n$ 表示总数为 n 的各个原子轨道的波函数， $c_1, c_2, \cdots c_n$ 为不同的系数， r 是 n 项中的一个代表项， Σ 代表相加。

在写出波函数之后，第二步就是写出波动方程，也称为 Schrödinger 方程：

$$\mathbf{H}\varphi = E\varphi \quad (2)$$

式中 $\mathbf{H}$ 称为哈密顿算符 (Hamiltonian operator)， E 是整个体系的能量。

再其次就是对 (2) 式进行运算。这里不详细叙述运算的方法，但应该提到一点，就是一般说来，对于除最简单的分子以外的各种体系，真正严格的计算是非常困难的，但在加以合理的近似之后，常常可以得到近似的解答，量子力学中各种近似方法的发展也就是为了能够取得与实验结果接近或一致所作的一些简化。目前常用的近似方法见表 1。

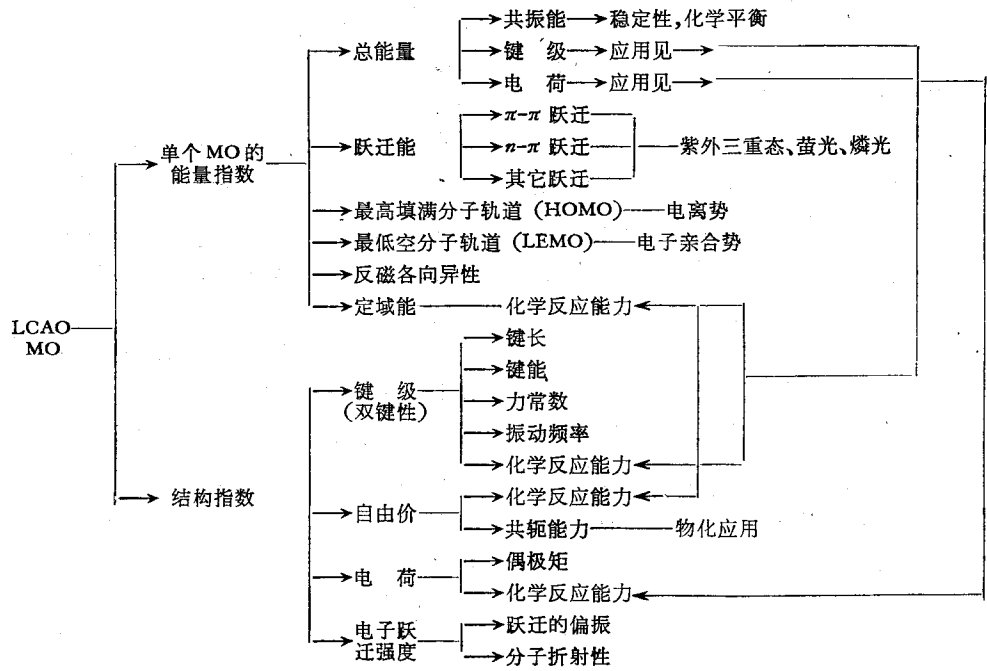
表 1 量子生物学中常用的一些近似方法

近 似 方 法 名 称	所讨论的电子	是否考虑电子间作用
单纯 MO 法 { HMO 法 (Hückel (近似法) EHT 法 (推广的 Hückel 理论)	π 全部价电子	- -
自洽场分子轨道法 (SCF-MO) { P-P-P 法 (Pariser-Parr-Pople) CND0 (完全忽略微分重叠)	π 全部价电子	+ +
非经验 MO 法——从头算起 (ab initio)	全部电子	+

解 Schrödinger 方程后得到的结果可以分为两大类，一类是能量指数，主要说明体系的能量状态；一类是结构指数，说明整个体系中各原子

所在处电荷、结合能力以及键的性质。Pullman 把这些结果及其相互关系总结成表 2 的形成 (略有修改)。

表 2 能量指数与结构指数



在上述总能量中,比较重要的是共振能,它决定分子的稳定性。共振能越大,分子越稳定。跃迁能代表两个能级之差,常可用光谱法实验测定。HOMO 和 LEMO 分别代表电离势和电子亲合势,和给受电子能力有关。在结构指数中,键级、自由价都和化学反应能力有关。在举例讨论具体研究成果时,将利用这些指数说明分子本身的一些生物学特性。

三

量子生物学的研究内容,主要取决于对生物大分子或具有生物活性的分子本身结构的了解。只要这些分子的化学结构或各级结构已经清楚,就有可能研究与这种分子相互联系的生物学活性的本质,或者它们之间的相互作用。因此,量子生物学实际上已经涉及到了分子生物学的全部研究内容,而成为分子生物学(更确切些应为分子生物物理学)的一个重要方面。例如重要生物大分子(蛋白质、核酸)的物理性质;各级结构与功能;酶的结构与催化原理;酶与底物、酶与辅酶、抗原与抗体之间的特异作用;高能磷酸物的电子构造与能量关系;致癌物质的作用机理;药物作用机理;活体中的电子、质子与能量迁移与转化关系等等。为了方便起见,可以把量子生物学的研究归纳为以下四个方面。

1. 分子间相互作用力的研究

这是整个量子生物学的基础,如果没有这方面的知识就不可能了解大分子本身的构型及其在功能活动中的变化,也不可能了解分子间相互作用的可能性及其作用结果,更不可能认识生物学中经常出现的特异作用和识别过程。

分子间的相互作用力主要考虑的是静电力,包括引力与斥力,至于电磁力在生物分子中一般认为可以不予考虑。静电力又分为强力与弱力两类,强力包括离子键、共价键等,弱力包括氢键、van der Waals 力和偶极作用力等。所谓强或弱是相对而言的,一般都和 kT 相比(k 为 Boltzmann 常数, T 为绝对温度),比 kT 大者列为强力,它在维持分子的基本结构中以及

相互作用中都起主要作用。比 kT 小的一般称为弱力,弱力在量子生物学中也是不可忽视的一类力,它在维持大分子的构象以及功能活动中起重要作用。

2. 生物分子的电子结构与反应活性

这是六十年代前后量子生物学的主要研究领域,也是这门学科最早取得成果的一个领域。对于比较简单的一些体系,例如核苷酸、氨基酸、药物、激素、ATP、辅酶等等,由于易于应用量子力学的方法,因此对这些分子的电子状况就比较清楚,致癌烃就是一个具体例子。根据计算所得结果,和这些分子的生物学活性相比较(例如致癌活性),常常可以得到一些有意义的结果,从而加深人们对其生物学活性的认识。但是应该指出,这仅仅是第一步,是只从分子本身性质这一方面考虑的第一步。如果对于它们在与其它对象相互作用中的变化不进一步进行研究,那么对作用机理的了解也不能说是完整的。

3. 生物大分子的构象与功能的研究

这里首先是指核酸、蛋白质的空间构型及其在功能活动中的改变。由于大分子涉及许多原子,因此对其外围电子活动的研究就要困难得多,目前可以说刚刚开始触及。电子计算机的应用为这方面的研究创造了较为良好的条件,但如果不继续改进现有的计算方法,那么所能解决的问题也是有限的。而这部分恰恰是分子生物学的核心。例如 DNA 的复制、突变产生的可能性、酶的催化机理等等。因此今后将逐步成为整个量子生物学的研究重点。

4. 特异作用与识别机理的研究

由于分子间的相互作用在生物学领域中经常表现为非常特异的作用,因而成为日益受到重视的一个部门。特异作用与分子的空间构型、相互作用力以及分子大小、取向等密切相关。酶与底物的反应、抗原-抗体的反应、药物、激素与受体的反应都是高度特异的一类作用,甚至往往在一大堆分子中能挑选出某一个分子而与之反应。例如一个抗体可以从 10^5 个分子中识别出能与之反应的抗原分子;阻遏物与操

纵子的结合也是一种识别过程,因为操纵子只占 DNA 的一百万分之一,这种识别过程确实非常惊人。

四

为了具体说明量子生物学的研究问题及其成果,以下仅略举几例加以说明。

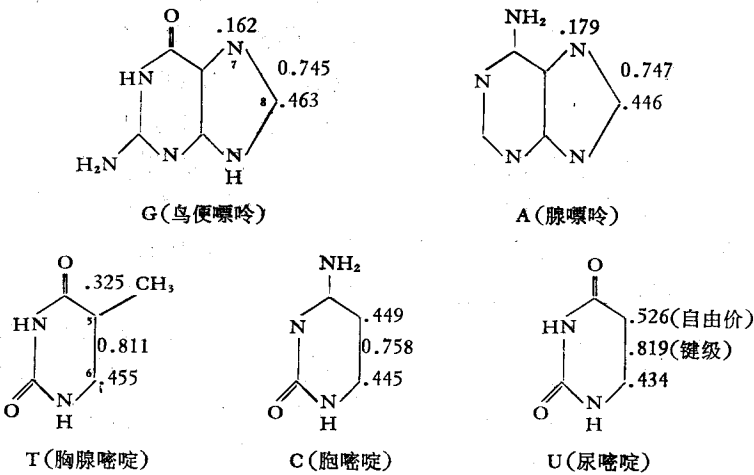


图 1 五种碱基的结构及有关指数

基的辐射敏感性不同,一般来说,嘧啶比嘌呤更为敏感。同为嘌呤,鸟嘌呤又比腺嘌呤敏感,嘧啶中也有同样现象。根据辐射抗性大小可排成下列次序:

$$A > G > C > U > T$$

因此 DNA 在受照射后胸腺嘧啶最易受到损伤。从量子力学的观点看,稳定与否和共振能的大小有关,表 3 是 Pullman 等对各种碱基计算出来的共振能之值。从表中可以看出,共振能大小的次序和上述实验结果大体相符。如果考虑到 U 与 T 的 π 电子数不同,换算为每个 π 电子

的共振能,就和实验结果完全一致。

辐射敏感性还可以从结构指数来看,由于射线作用下产生反应能力极强的自由基,因此稳定性和碱基的化学反应能力有关。从图 1 可以看出,嘧啶的最大键级比嘌呤大,活性高,因此易于和水中受照射后产生的自由基反应。U 中自由价最大为 0.526,似与实验结果不完全一致,这是由于计算的近似性带来的,总的趋势和实验结果基本一致。从结构指数还可以进一步指出产生反应的部位在嘌呤碱的 C_8 位上。

量子力学计算结果还可以用来说明另一个问题,即嘌呤抗代谢物的抗癌活性。实验结果表明许多嘌呤抗代谢物具有抗癌活性,但有时结构很相近的同类物却不具有抗癌活性。究竟抗癌活性取决于什么? 生化研究指出,嘌呤抗代谢物的抗癌活性是由于碱基核苷化作用引起的,这种作用通过 9 位 N 发生。对一系列嘌呤类物质的 N, 原子的电子电荷计算结果列于表 4。

表 3 各种碱基的共振能
(以 β 为单位,其值约为 20 大卡/克分子)

化合物	共振能	π 电子数	每个 π 电子的共振能
A	3.89	12	0.32
G	3.84	14	0.27
C	2.28	10	0.23
U	1.92	10	0.19
T	2.05	12	0.17

表 4 嘌呤抗代谢物的抗癌活性与 N_e 电子电荷

类 别	化 合 物	N_e 电子电荷
天然嘌呤	腺嘌呤	1.593
	鸟嘌呤	1.534
	次黄嘌呤	1.581
	6 巯基嘌呤	1.581
活性抗代谢物	2,6 二氨基嘌呤	1.601
	硫鸟嘌呤	1.594
	6 甲基嘌呤	1.592
	2 重氮腺嘌呤	1.588
	嘌呤	1.592
	8 重氮鸟嘌呤	1.569
	8 重氮腺嘌呤	1.563
	8 重氮 6 巯基嘌呤	1.552
非活性同类物	8 重氮嘌呤	1.559

从表 4 可以看出,有无活性,在 N_e 电子电荷这一指标上有所反应。活性抗代谢物的电子电荷在 $1.57e-1.62e$ 之间,而非活性者一般较低,大约在 $1.56e$ 附近。

关于核酸中的碱基配对问题也曾用量子力学进行过计算。计算结果表明, G-C 对的稳定性大于 A-T 对,这就有助于说明含有 G-C 对较多的核酸热变性温度较高这一事实。特别重要的是氢键在形成碱基对中的作用问题。根据计算,碱基在异构化作用时以及用异构形式形成错误的碱基对,所损失的能量较小,由此可以算出错误几率可达 $10^{-4}-10^{-5}$, 这似乎说明 DNA 复制过程合成新的互补键有较大的错误几率。实际上自然突变的几率仅为 $10^{-8}-10^{-11}$, 由此可见,碱基配对中氢键不是唯一的因素,甚至不是主要的因素,目前认为更主要的是应该考虑构象的问题。

2. 蛋白质

对蛋白质主要从两个方面研究,一是芳香

氨基酸的给受电子性质,二是蛋白质的半导体性质。

芳香氨基酸包括色氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸,也包括组氨酸在内。它们的共同点是都具有共轭系统。图 2 示其结构,为了说明它们给受电子的能力,还标明了这些结构的最高填满轨道能 (HOMO) 与最低空轨道能 (LEMO)。

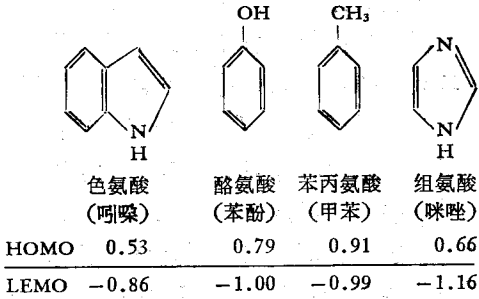


图 2 芳香氨基酸共轭系统及其给受电子能力

HOMO 的值越小则给电子能力越强, LEMO 的值(一般为负值)越大(绝对值越小)则受电子能力越强。一般以 0.5 作为区别强弱的标准。从图中可以看出,芳香氨基酸与其看作为电子受体,不如看作为较好的电子给体,特别是色氨酸更是如此。在说明它们和一些氧化还原酶的辅基相互作用时,这种性质很有用。例如,黄素单核苷酸 (FMN) 的 HOMO 为 0.496, LEMO 为 -0.343; DPN⁺ 的 HOMO 为 1.032, 而 LEMO 则为 -0.356, 它们都是极好的电子受体,这样就能明确指出,当色氨酸与 FMN 相互作用时,电子从色氨酸的吲哚环向 FMN 的异咯嗪环移动,从而形成所谓电荷迁移络合物的原因。量子力学的计算还可以进一步看到这二者在相互作用时是以二个共轭平面按一定方式相互接近的。图 3 中标明了各位置的电子电荷值:

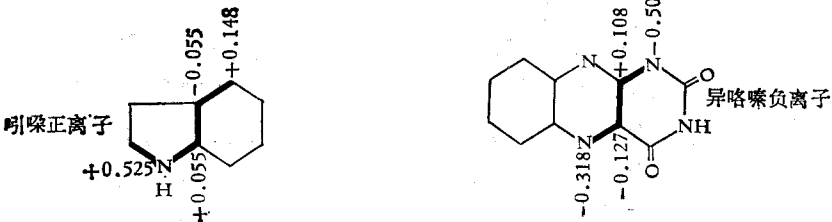


图 3 色氨酸与 FMN 形成电荷迁移络合物时的电子电荷分布

从沿着粗线各点电荷符号正好相反可以看到,这种状况极有利于二个平面的平行接近。

用量子力学计算还可能有助于对药物的设计与选择。例如已知5羟色胺(血清素)在脑内保持一定量是维持正常神经机能的必要条件,含量改变将会引起精神分裂症。目前用血清素抗代谢物来进行治疗,它们都含有吲哚环。有人认为它们的作用是和5羟色胺竞争给电子体的作用,其中特别是麦角酸二甲酰胺,其HOMO为0.218(血清素为0.461)。虽然还不能用实验直接证明,但从氯丙嗪(一种极好的镇静剂)的HOMO值很小来看,似乎也是一种旁证。

对蛋白质来说,除芳香氨基酸以外,在多肽键上似乎没有广泛的共轭,但仔细研究说明,在同一条链的C=O和N—H之间还是有少量共轭现象的。因此,当相邻的多肽链以氢键相互连接时就能形成链与链之间的较为广泛的共轭系统(图4)。 π 电子虽不能沿同一多肽链的骨架运动,却可以跨链运动,而在整个蛋白质总体结构中非定域化,蛋白质的导电性应该由这

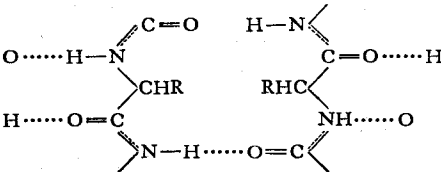


图4 蛋白质多肽链之间通过氢键的共轭作用

一特点所决定。对这一问题从量子力学进行过各种计算,证明在蛋白质中由于不同能级相互靠近而形成一个个能带,只要给予能带间隙所代表的能量就能使导电性体现出来。从实验方面也证明了这一点。现在的问题是,计算方法不同所得到的结果有差异。例如 Evans, Suard, Itoh 三人用不同方法算出的值分别为3.05, 5.0与4.41电子伏,另一方面与实验结果也有差异,例如 Duchesne 对DNA测得值为1.80电子伏,肌球蛋白为1.75电子伏,骨胶原为0.9电子伏。这种不一致性既和理论计算的方法有关,也和实验方法有关。对蛋白质大分子能带的处理,代表了量子力学对大量有一定规则排列的原子进行研究的一种尝试,对于说明蛋白

质性质有重要作用,因此是值得引起重视的问题。

3. 致癌芳香烃

癌的发生长期以来成为生物学与医学中的一项重大研究课题,而从目前来看,各种致癌因素中,化学因素又占有极大的比重,而且随着工业的发展有日益增加的趋势,引起人们的密切关注。在量子生物学中,致癌烃的研究从1938年就已开始,是历史最久的一个问题。

有致癌活性的主要是四、五、六环烃中的一部分,其中比较显著的是3,4-苯并芘,3,4,8,9-二苯并芘,3,4-苯并菲等,三环以下和七环以上的碳氢化合物一般没有致癌活性。Pullman 等对几十种烃类的电子结构进行了计算,发现这类物质中有二个区域是对化学反应起决定作用的,分别称为K区和L区(图5示苯并蒽的K区与L区),其中K区是进行键反应的部位,L区

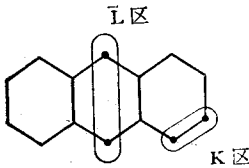


图5 苯并蒽的K区与L区

是进行对位加成反应的部位。为了能更好说明计算结果与实验结果的一致性,他们提出了一种考虑到分子间互相作用的所谓定域理论,而且用一种复合指标即定域能来说明化学反应能力,例如对于键反应用键定域能(扰乱一个共轭分子的电子结构,使一对 π 电子定位在二个相邻C原子间所需能量)与碳定域能(使二个电子定位在发生反应的一个C原子上因而不参与共轭所需能量)之和,对于对位加合反应则用对位定域能(使二个电子同时定位在C原子所需能量)与碳定域能之和。并且找到了具体的界限即致癌烃必须具有活性较高的K区,其复合指标应小于 3.31β (β 为共振积分,其值约为20大卡/克分子),此外如果分子还有L区,则L区的活性应较低,其复合指标应大于 5.66β 。根据这些规律,3,4-苯并芘无L区,而K区指标为 3.23β ; 3,4,8,9-二苯并芘也无L区,K区指

标为 3.175β , 所以都是很强的致癌物; 1, 2, 5, 6-二苯并蒽虽然 K 区指标为 3.305β , 但 L 区指标为 5.67β , 只略大于 5.66β , 故为次强的致癌物; 1, 2, 7, 8-二苯并丁省 K 区指标为 3.24β , L 区指标为 5.42β , 故无致癌活性。因此这一理论能较好地判别芳香烃的致癌活性。

Allison 等从另一个角度, 即认为致癌物与受体间形成电荷迁移络合物是致癌的必要条件。致癌物应该既是良好的电子给体, 又是良好的电子受体。从几何条件来看, 应该比较容易接近细胞表面或内部的重要生物大分子。这种理论目前比较流行, 而且电荷迁移络合物的形成很容易用可见光区的吸收谱、电子自旋共振技术等测量。虽然具体的细胞受体是什么, 目前还不清楚, 但各种致癌物与吖啶形成电荷迁移络合物, 颜色深浅是形成络合物能力的量度它和致癌活性之间有着相当一致的关系。

以上只是举出几个例子说明量子生物学的研究对象、研究所得的结果及其意义。实际上目前工作已经有了很大进展, 这里不再一一列举。

综上所述, 量子生物学的发展已经成为分子生物学的一个重要分支, 也是生物物理学在微观方面发展的重要方向。虽然它的发展还只不过二十年左右的历史, 还是一门非常年轻的边缘学科, 但由于它所研究的内容正是当前分子生物学还无法解决的关键性问题, 因此具有广阔的发展前途。另一方面它的发展必须同时有实验工作者的支持, 否则无法检验理论本身的准确性。在我国, 必须尽快建立一支队伍开始从事这方面的专业研究。同时, 广大的生物学工作者和生物物理学者也应具备这方面的基本知识, 以便经常互相沟通, 促进发展。

参 考 资 料

- [1] Pullman, A. and B.: Quantum Biochemistry, 1963.
- [2] Szent-Györgyi, A.: Introduction to a Submolecular Biology, 1960.
- [3] Zeno Simon: Quantum Biochemistry and Specific Interactions, 1976.
- [4] 永田親義: 《量子生物学入門》, 1975.

[本文于 1978 年 1 月 10 日收到]

细胞工程学在遗传与育种上的应用

郑 国 锴

(兰州大学生物系)

前 言

以微生物为材料进行遗传与育种的研究。有很多方便。这是由于微生物生长一代的时间短, 有较长的单倍体期, 而且它们能在一定的培养条件下, 在很短时间内生长出大量相对同源的种群, 供我们筛选大量基因型 (Chaleff 和 Carlson, 1974)。对高等植物来说, 就没有这些有利条件, 因此, 在遗传与育种研究上, 受到很大限制。近年来, 细胞生物学方面许多新技术的兴起, 如单倍体育种技术, 植物原生质体的分离、培养, 细胞器的移植和细胞融合等, 大大改

变了过去的面貌, 高等植物也能像微生物一样进行实验操作了。这是一个巨大的革新。

应用细胞生物学的方法, 按照人们预先的设计, 有计划地改变或创造细胞遗传物质的技术, 以及发展这种技术的研究领域, 叫做细胞工程学 (常胁恒一郎, 1975)。随着细胞遗传学, 细胞生理学, 分子遗传学以及组织和细胞培养的发展, 细胞工程学在遗传与育种上的重要性将与日俱增。

根据设计要求, 按研究对象中需要改造的遗传物质的不同, 细胞工程学可分为 5 个方面: