生 物 能 力 学

徐 京 華

（中国科学院生理研究所）

物质的結构規定了能量变化的形式，反过来，能量的变化也会影响物质的結构，破坏旧的結构，产生新的結构。物理学和化学，都是研究能量与质量以及运动与結构之間的关系的。近代物理学和化学的进展，也推动了生物科学这方面的发展，产生了生物能力学这門新兴的学科。

生物体內能量变化的可能形式

过去的生物学对于物质結构、生物体內能量变化的可能形式进行了很多工作，对于能量变化，也作了一些整体的观察，但是追問到分子水平，我們知道得就很少了。我們只知道各种物质的代謝到最后都产生所謂高能磷酸鍵的化合物，至于磷酸鍵究竟如何作用，有无其他形式的能量变化，还沒有一个清楚的答案，只有如下一些初步的猜測和理論。

1.电子激发态：

整个生物界的能量来源是太阳光，太阳光的光子激发了叶綠素的分子，这分子的激发能，被利用来綜合碳水化合物。以后，生物体又利用这些化合物把激发能重新释放出来，进行各种生命活动。因此，有人認为蛋白质分子的电子激发态对生命活动有很大的意义，并且設想，这被激发的电子成为分子中各原子的共同电子，而在整个分子上形成了一个传导带，也就是說，蛋白质具有半导体性质[1]。实驗証明，至少在干燥的变性的血紅蛋白及球蛋白中是存在着这种現象的。但是从蛋白质的基态到最低激发态所需要的能量大約是 70 仟卡，而高能磷鍵能量是 10 仟卡，两者相去甚远；因此，这种激发能在生物体正常活动中究竟占有多么重要的位置，还有待研究。

一个分子的电子激发态，通过共振可以引起一定距离內其他分子內基态轉化到激发态。能量由甲分子轉到乙分子的条件是：甲分子的螢光光譜与乙分子的吸收光譜有重合部分。生物体內氧化还原酶系的輔基，它們的螢光光譜及吸收光譜正好构成这样一个传递系統。

生物体中的自由基也可以列入激发态的这一类型。自由基在生物体中普遍存在，它与生物所处的状态有密切的关系。植物种子中自由基很少，或者沒有，而当发芽的时候就有显著的增加。叶綠素在黑暗中自由基很少，光照时就有显著增加。正常的动物組織与肿瘤組織自由基的表現有所不同。受到 X 射綫、γ 射綫照射过的生物体，自由基有很突出的变化。这些都說明自由基或者非对偶的电子在生命活动中占有重要的地位。近来的研究，說明它們可能不局限于氧化还原系統的作用过程[2]，这方面的研究是生物能力学的一个非常重要的方向。

2.电荷运动学說：

有人認为生物体內的大分子，如蛋白质、核酸，表面上有大量的质子。这些质子也在不断地运动着，因此，大分子和周围分子的相互作用可能受到它們的影响。质子运动也可以与邻近类似的分子相呼应，构成能量轉化轉递系統[3]。

3.氫鍵：

蛋白质、核酸这类大分子中有大量的氫鍵。氫鍵中氫原子的位置是不固定的，它摆动在两个氧原子或一个氧原子和一个氮原子之間，摆动能量子的波长相当于紅外綫 2.7 μ 左右，与重要的能量传递物质三磷酸腺苷高能磷鍵的能量子的波长 2.6 μ 非常靠近。这很可能不是一种偶合的現象。这方面进一步的研究一定会得出有兴趣的結果。

4.伦敦—范德华尔作用力：

由于分子內部电子运动的不均一性，原来不带电荷的分子就产生暫时的极化現象，因此就可能引起附近分子相适应的变化而产生吸引力。这类能量传递、轉化形式在生物体內也可能存在。虽然这类作用力一

般比較小，特别是在水这样极化很强的介质內，单独作用可能不大，但是当这种作用力大量存在时，其重要性仍然值得注意。

除了上述四种情况外，靜电吸引力、偶极子的相互作用、分子轉动摆动的震动子偶合作用等等都可能在生物体內能量传递方面占有一定的位置。

沒有疑問，能量变化是生物能力学的重要組成部分，但是生命現象显然不是那一种运动形式可以完全加以闡明的，它是这些能量运动經过生物体的复杂的物质結构綜合起来的总的表現。因此生物能力学还需要从其他角度来考虑問題。

热力学与生命現象

热力学第二定律告訴我們，在一个封閉系統內发生了运动和变化，熵值总是增加的*(至多在可逆反应中熵值不变)。

熵值的增加，意味着秩序和組織結构的破坏，也就是說，运动是会破坏組織結构的。但是生物的发展，不論是个体的发展或是种族的发展，都是从簡单到复杂，从低級到高級的，組織秩序不是破坏，而是增加。生物体不是一个封閉系統，不断地有物质进入体內，不断地有物质排出体外。从近代有关不可逆的热力学看来，如果不是一个封閉系統，总熵值随着变化增加，局部的熵值却是可能有相反的变化的。因此生物体內部熵值变化趋向于減少完全是可能的。抽出一部分热量，降低这个系統的溫度可以使一个系統內的熵減少，但是生命活动显然与这种簡单变化形式相距很远。为了进一步了解这种情况，应該考虑自由能的变化。

自由能的变化包括焓的变化（簡单的說即內能部分的变化）和熵的变化两个部分。一个系統內自由能的增加，意味着熵的減少，反过来也一样。

生物体不同，自由能的变化也不相同。例如綠色植物自由能的变化显然是吸收了阳光的能量增加了內能而不是簡单地由于熵的減少。但在另外一些主要依靠碳水化合物作为食物的生物体的自由能的变化中，熵的部分占有很重要的地位。无論是什么样的生物体，共同的問題是如何从外界得到能量来減少自身的熵值，如何从外界得到物质，促进自身的生长。

* 熵值的变化$=\frac{\text{热量的变化}}{\text{絕对溫度}}$.

生物体內的熵与信息

信息論給我們带来了如何处理和衡量組織秩序程度的方法和概念。信息含量的多少可以衡量一个系統的組織秩序程度的高低，信息就好象一个系統內的能量一样是一个物理量，是可以衡量的。但是信息的概念是一个比熵更广泛的概念。只是在分子热运动的問題的水平上，熵与信息是可以联系起来的，信息含量可以等于負的熵值。例如，机器中的一个齿輪的形状，是机器的信息，齿輪形状如果有了改变，机器就不能运轉，这个时候齿輪的信息有了很大的变化，而齿輪的熵却沒有什么变化。反过来，如果齿輪的形状不变，制成齿輪的材料有了改变，这时候齿輪的熵起了很大的变化，而齿輪的信息却沒有改变，机器仍然照常运轉。在这种情况下，熵与信息不是一回事。因为机器运轉的信息是客观世界机械构造的信息，而齿輪的熵則是分子的信息，它們不在一个水平上。生物体的組織結构同样也有着不同水平的信息。分子、細胞、器官以及整个生物体各有各的信息，它們与沒有生命的机械的信息不同。这一系列的信息是彼此相互貫穿的。細胞結构的信息建筑于分子結构的信息上，器官結构的信息又建筑在細胞結构的信息上，如此等等。而沒有生命的机械，它的分子水平的信息与客观世界的結构是割裂的，彼此不联系的。

生物体內的蛋白质和核酸这类大分子含有无机世界物质所沒有的大量的信息，蛋白质由几个、几十个、几百个以至几千个氨基酸組成。各种氨基酸在蛋白质中的排列的可能性是很多的，信息含量是很大的，根据信息論的計算，天然蛋白质都趋向于理論上信息的最高值。蛋白质的空間构型、蛋白质与核酸及其他分子构成絡合物，又出現了新的更高一級的信息。由此可見大分子系統的信息，与无机界有着质的不同。

能障与熵障

生物体不仅組織結构复杂，而且它的活动是有秩序地进行着的。这是生命的最突出的特点。无机系統熵值的減少是依靠降低分子的热运动，增加分子結构秩序来实現的，生物体的秩序則是在分子的运动过程中保持和不断增加的。为了进一步討論这个問題，我們还需要研究生物体与外界环境相互作用的情况。

薛列丁格尔曾經提出过一个看法[4]。他根据人的某些遺传特征可以几百年地完整地保存下来沒有变

化，而多少年来分子的热运动居然对这些遺传特征的物质基础沒有影响，因此認为外界因素如果要对生物体的物质发生作用就必須經过一个量子化了的很高的能阶。换句話說，能障，能量的障碍，挡住了外界因素对生物体的物质的影响。

薛列丁格尔的这种看法指出了某些重要的問題，但是他的結論是錯誤的。他只看到生物体稳定的一面，而沒有看到生物体变化的一面。只看到分子热运动对生物体破坏那一面，而沒沒看到生物体的活动本身还需要，同时也离不开分子运动的一面。維持生物体稳定的，不是别的，正是它的复杂的結构，正是它的有規律的活动。它对周围世界的反应是有选择性的。从分子水平来看，蛋白质、核酸这类大分子的稳定性并不是依靠某一个很强的化学鍵来維持的，而是依靠大量的弱鍵如氫鍵以及其他亲和力在空間构型上特殊的分配規律来維持的。两个蛋白质分子的結合，也是由于空間构型的对立，而不是依靠某一个强的化学鍵。这也就是蛋白质作用专一性(特异性)的基础。不仅如此，从电荷运动学說看来，蛋白质的相互作用，还不单純决定在空間构型規律上，而且在时間上的电荷运动規律也有很大的重要性。

由此看来，維持生物体的稳定性的，不是能障，而是熵障，而是信息的障碍，也就是組織結构的障碍。

熵障与能障不同。能障好象一座高墙，外界因素必需拥有很高的能量，越过这个障碍，否則就不起作用。无机界許多物质結构是依靠能障来維持的，因此表現出相对的靜止，长期沒有变化。熵障好象迷路，不需要很多能量，只要走的对头就可以通过。外界活动經常在影响着內部的組織与結构，熵障起着一个将外界紛乱活动滤过的作用。它使外部的物质与活动到內部来变成有規律有秩序。换句話說，抽提出信息来。

生物体并不依靠强的能障来保护本身的組織結构，經常受到外界紛乱的分子热运动的冲击，因之熵障会逐漸地老化和衰亡，也就是說信息会逐漸地減少。如果熵障消失和信息減少的过程大于熵障从外界抽提信息的过程，物体就不能长期存在。反过来，后者大于前者，就会使物体产生新的結构，也就是說剩余結构，物体就会生长、发展。从信息論的观点来看，剩余的結构可以使原有結构进行更精确的活动，減少干扰的作用。从生物学的角度看来，剩余的結构是生物进化所必不可少的。

新的物体生长中的信息，一方面由旧物体的熵障的性质所决定，另一方面，由外界环境中存在的信息所决定。因此新的物体的出現与新熵障的形成，不断受到周围环境的影响，这可能是适应現象的基础。

更具体地来說，在蛋白质和核酸这类大分子的形成和衰亡过程中，在它們与周围环境的相互作用过程中，在細胞以及物体整体的生长与衰亡过程中，都是熵障可能出現的場合。熵障的概念可以适用于不同的水平。

熵障与能障不是一个相互排斥的概念。不論一个物体如何簡单，它仍然是有結构的。不論一个物体多么复杂，它仍然需要能量来維持。熵障与能障只不过在不同情况下相对作用有所差别。生物体的組織結构非常复杂，因此在研究生物体內的能量轉化时，熵障的問題应該給予特殊的注意。

生物能力学的目的是研究各式各样形式的分子运动如何通过生物体的复杂物质結构而变成了我們所謂生命現象的这种运动形式，即生长、衰亡、遺传、适应等等現象。这門学科的发展必然会使我們能够从分子运动的基础上来闡明和控制生命的活动。

[1] A. Szent-Györgyi, Bioenergetics, Academic Press INC NY 1957.

[2] Л. А. 布留門費尔德，А. Э. 卡尔門逊，盛沛根，科学通报，1959，327.

[3] J. G. Kirkwood, Discussions Farad. Soc. 20, 78, 1955.

[4] E. Schrödiger, What is Life, Cambridge University Press 1951.