



全国高等农业院校教材

物理学

在农业中的应用

● 左冰意 主编
● 农科各专用

生物物理分册



中国农业出版社版

全国高等农业院校教材

物理学在农业中的应用

生物物理分册

左冰意 主编

中国农业出版社

全国高等农业院校教材
物理学在农业中的应用
生物物理分册
左冰意 主编

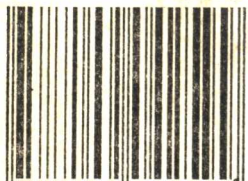
责任编辑 黄慧民
出版 中国农业出版社
(北京市朝阳区农展馆北路2号)

发行 新华书店北京发行所
印刷 中国农业出版社印刷厂

* * *

开本 787×1092mm32 开本
印张 6.75 字数 145千字
版、印次 1996年10月第1版
1996年10月北京第1次印刷
印数 1—2,200册 定价 5.45元

ISBN 7-109-04259-6



9 787109 042599 >

书号 ISBN 7-109-04259-6/S·2638



主 编 左冰意(西南农业大学)
副主编 陈德万(西南农业大学)
参编人 徐志朝(西南农业大学)
孙 凡(西南农业大学)
张光先(西南农业大学)
主审人 傅志东(西北农业大学)

前 言

在科学发展的早期是很多学科综合在一起的，这种综合、交叉促进了科学的发展。到 17—19 世纪，这是一个自然学科分化时期，自然科学分化为种类繁多的学科门类，这种分化也促进了自然科学的发展，到 20 世纪随着各门学科的成熟，各门学科又强烈地朝着综合方向发展。这种综合有人叫它为学科间的兼并，综合、兼并的学科交叉点即所谓边缘学科、交叉学科。这种综合、兼并的结果已经、并将更加强烈地促进科学的迅猛发展。

这种科学的迅猛发展可以称为变革或科技革命。它的特点是：大大缩短了纯科学与应用科学、理论与应用之间的距离。

在这种学科与学科间的综合中物理学有着特殊的地位，它的框架支撑了我们对自然界知识的总体，它与数学、化学特别是近数十年与生物学都迅速相互综合着，生物物理学就是一个交叉点，它已经并力图进一步揭示生命现象基本的物理及化学本质。

今后生命科学的研究将是多科性的，生命科学因数、理、化及现代工程技术的介入而深化、定量化、现代化。

科学间由于综合发展，它们都是相通的，现代科学如一座巨大无比的艺术殿堂，它们拥有各自的“艺术精品”领域，它们间有很多的通道，因而相通。我们可以从各个方位进入学习、

欣赏、穿行其间，我们会感到我们的认识会一步一梯地登得更高，看得更远、更深。

人们预言 20 世纪是生物学的、是各门学科在生物学领域大会演的时期，这是很有道理的，现代高科技就是这种会演的结果，生物物理学是这个会演中的一个重要节目，是这场科技革命浪潮中的一个前沿浪花。

我们编写这本生物物理小册子是想在这场伟大的科技革命浪潮中加一滴水，是想为青年同学们搭一个梯子，让同学们登高望远，为促进农业科学现代化、农业生产现代化作贡献。

目 录

前 言

第一章 生物力	1
1.1 强相互作用力	2
1.2 弱相互作用力	6
1.3 弹性力,植物细胞壁的刚性	15
第二章 生物物理数学模型	21
2.1 导论	21
2.2 连续增长的单种群模型	24
2.3 猎手—食饵模型	27
2.4 蛋白质合成的开关模型	35
2.5 植物根毛吸收作用模型	40
2.6 植物气孔蒸腾作用的流体动力学模型	42
2.7 木本植物导管长度分布规律的模型	45
第三章 生物系统热力学	49
3.1 引言	49
3.2 非平衡态热力学的基本概念	51
3.3 线性非平衡态热力学	60
3.4 非线性非平衡态热力学	69
第四章 植物体内物质运输	89
4.1 化学势与水势	89
4.2 植物细胞的水势	98
4.3 植物细胞对溶质的通透性	112

4.4	植物体内物质的长距离运输	125
第五章	生物磁学与生物电学	135
5.1	生物磁学的任务及其物理基础	135
5.2	生物磁场	140
5.3	磁场生物效应及其应用	141
5.4	磁场生物效应的机理	147
5.5	生物电学及在农业上的应用	149
第六章	光生物物理基础	158
6.1	激发态的辐射弛豫	158
6.2	光化学反应与激发能转移	168
6.3	氨基酸的荧光与能量转移	174
6.4	蛋白质的荧光规律	178
6.5	蛋白质荧光猝灭与涨落运动	184
第七章	生物物理研究方法	188
7.1	X 射线衍射	188
7.2	核磁共振(NMR)技术	191
7.3	激光拉曼光谱法	194
7.4	旋光谱法和圆二色谱法	198
7.5	差热分析法(DTA)和差示扫描量热法(DSC)	201
参考文献		205

第一章 生物力

生物大分子及由它们组成的生物体，是分层次的有序结构，而有序结构主要由分子内和分子间的相互作用力来决定，层次越多，体系越大，作用力越复杂。

生物大分子的结构决定它们的功能，不同的结构就有不同的功能，因此研究生物大分子的力，具有重要意义，是研究生物大分子以及由它组成的体系的结构的基础。

分子内与分子间的相互作用，主要是静电力，通常把静电力分为两类即强力和弱力，衡量一个力是强力或者是弱力的标准是根据分子热运动对它的影响，也就是力的相互作用能，与平均热能 KT 相比较而言， K 为波尔兹曼常数， T 为绝对温度，也就是说比热能 KT 大得多的相互作用能的力谓强力，比 KT 小的或同数量级的力谓弱力。 KT 的值约为 $4.0 \times 10^{-21} \text{J/粒子}$ ($T=310^\circ\text{K}$)。

一般力的测量是很难的，可以说是不可能的，因为它们都是微观对象的力，所以只能用测定相互作用能来衡量相互作用力的大小。

因为 $F(\text{力}) = -\text{grad } U(\text{势能})$ ，若 $U = A/r^n$ ，
式中 A —— 常数；
 n —— 整数。

则可得依赖于距离的力为 $F = nA/r^{n+1}$ ，由此看出，力随距离

r 增大而减小得更快。

强力包括共价键及离子键等,弱力包括范德华尔斯力,氢键,疏水键等。生物大分子的一级结构是由强力来维持的,二、三、四级高级结构主要是弱力来维持的,例如蛋白质的多肽键由强力联系在一起(一级结构),多肽键盘旋而成为 α 螺旋(二级结构),则由相邻二圈之间的氢键来维持。虽然氢键是一种弱力,但许多氢键的协同作用,则相当于较强的力,能够维持结构稳定性。用加热或用其他方法(如加酸等)破坏这些氢键后,多肽键从 α 螺旋转变为无规卷曲,使蛋白质丧失功能,如果有时个别键发生断裂,就能使整个分子失去活性,如在高能辐射作用下,酶的失活等。因此研究结构以及结构与功能的关系都必须以相互作用力为基础。下面我们分别来研究这两种力即强力和弱力。

1.1 强相互作用力

强相互作用力,是一种能引起化学作用的力,如化学键就是指分子中原子之间的强相互作用力,而化学键又分为离子键,共价键,金属键3类,无机物大部分是以离子键形成的化合物,而有机分子中的原子主要是以共价键相结合的。下面分别研究一下离子键和共价键这两种强力。

1.1.1 离子键 当电离能很小的钠原子与电子亲和能很大的氯原子相互接近时,则形成带正电荷的钠离子 Na^+ 和带负电荷的氯离子 Cl^- 。因此 NaCl (蒸气)的离子键可看作带正电的钠离子和带负电的氯离子之间产生库伦引力的结果。把离子近似看成球形状,根据库伦定律,两带电的离子的引力为

$$F = \frac{1}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1-1)$$

式中 q_1 、 q_2 ——正负带电离子的电量；

r ——两球心间距离；

ϵ ——介电常数。

对氯化钠分子的离子键，则有

$$q_1 = -q_2 = q$$

$$\text{因此} \quad F = -\frac{1}{\epsilon} \frac{q^2}{r^2} \quad (1-2)$$

离子之间的相互作用能为

$$U_1 = \int_r^\infty -\frac{q^2}{\epsilon r^2} dr = -\frac{q^2}{\epsilon r} \quad (1-3)$$

式中 U_1 ——电量各为 $\pm q$ 的离子相距为 r 时的势能值。 U_1 为负值，而 r 越小， U_1 值越小。

但当越过一定距离 r_0 时，由于两个离子的电子云重叠而产生强大的斥力，距离越近斥力越大。由斥力而产生的势能是按指数规律变化的，为

$$U_2 = be^{-\frac{r}{a}}$$

式中 b 与 a ——常数。

因此，整个体系的势能为 U_1 与 U_2 之和，即

$$U = U_1 + U_2 = -\frac{q^2}{\epsilon r} + be^{-\frac{r}{a}} \quad (1-4)$$

U 与 r 的函数关系称为势能曲线，图 1-1 即表示 NaCl 离子键的势能曲线。由图可以看出，当距离很近时斥力势占优势， U 为正，而 U 从负过渡到正有一极低值，这是在引力与斥力相等时，体系处于最稳定状态。对 NaCl 来说，此最低势能约为 -504 kJ/mol ，可以通过各种物理和化学方法来测定。

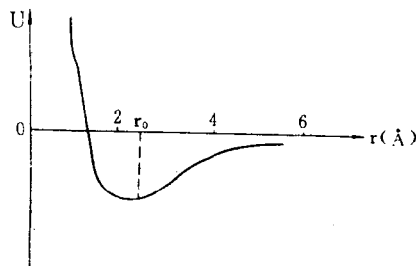


图 1-1 NaCl 离子键势能曲线

电荷与电荷强相互作用，不仅对维持生物大分子的一级结构有关，而且和分子的识别有关。例如，乙酰胆碱是一种神经递质，它影响心脏的跳动，肌肉运动和激素刺激等生理过程。对乙酰胆碱的新陈代谢反应是乙酰胆碱酯酶使图 1-2 中箭头所

指的酯键断裂。

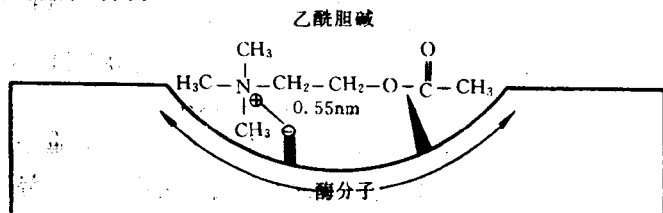


图 1-2 乙酰胆碱酯酶的活性部位和其底物间的相互作用

为了酶有效的工作，要求乙酰胆碱每次都能正确对准酶的活性部位，做到这一点的方式是：酶的活性部位的离子化的羧基负电荷对四价氮的正电荷的强烈吸引力。

正负电荷之间的距离估计为 0.55nm ，设 $\epsilon_r = 1$ ，则相互作用能为 250kJ/mol 左右。

根据实验，结构类似于底物的化合物，如毒扁豆碱等可以欺骗酶，显示出结合到活性部位的竞争抑制，从而堵塞了酶对底物的结合，但我们将看到，底物与酶活性部位准确定位，范德华力也很重要。

1.1.2 共价键 对于极性分子 NaCl 的离子键，可以看成正负离子之间产生库伦力的结果。但对非极性分子，如 CH_4 分子就比较复杂，它不能用经典电磁理论来处理，需要应用近代量子力学来解决，即用价键理论来处理问题，在有些化学教科书中，已有详细论述。共价键通常认为是由共用电子对形成。根据量子力学理论，共价键从本质讲是测不准关系的一个推论，测不准关系表示如下

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi} \quad (1-5)$$

式中 Δx ——位置的不确定程度；

Δp_x ——动量的不确定程度。

当两个原子彼此靠近时，认为不是停留在空间某一点，而是必须看作是布满原子周围的电子云外层电子不再属于某一个特定的原子。这说明，这时电子位置的不确定性较两个原子分立时为大。因此，动量的不确定性以及最小的可能动量都减少了。因为动量，能量有以下的关系

$$\frac{1}{2}mv^2 = E \quad mv = p \quad \text{因此} \quad E = \frac{p^2}{2m}$$

所以体系的能量也减少，结合能增强，因而两个原子就结合在一起。再则，存在一个平衡距离。假如原子过分接近，则电子可进入的体积减少，因而使可能的动量及能量增加。

上述理论完全是一种定性的解释，但只有用完全的数学分析才能真正的了解。这类化学键所以被称之为共价键是因为每个原子各贡献一个电子。复杂的原子能够共用更多的电子对，因而形成的键更为牢靠。然而表 1-1 表明共价键能的大小与共用电子对数目不是线性关系。

表 1-1 共价键能

键	能量 (J)
H—H	7.6×10^{-19}
C—H	6.1×10^{-19}
C=C	7.0×10^{-19}
C≡C	8.6×10^{-19}
C—C	4.0×10^{-19}

1.2 弱相互作用力

前面我们已经提到,生物大分子的高级结构(二、三、四级结构)是靠弱力来维持的。而生物大分子的结构决定它的功能,生物大分子的结构是分子生物物理研究的重要内容,弱力是分子之间或分子内部原子之间的相互作用力。它是一种电力,由原子和分子的外层电子产生的。弱力分为范德华尔斯力、氢键、疏水键等,下面分别讨论之。

1.2.1 范德华尔斯力 范德华尔斯力有 3 种类型即偶极矩间的作用力(葛生力)、偶极矩与诱导偶极矩之间的作用力(德拜力)、色散力(伦敦力)。在讨论之前,介绍一下分子的极性及偶极矩。

(1) 分子的极性及偶极矩 分子中的正负电荷分布中心假如不是重合的,称为极性分子。例如, O—H 键,就是这样一种系统,由于 O 原子的电负性,使 O 吸引 H 上的电子,结果 O 这一端带负电, H 端带正电,正负电荷相等。设正电荷与负电荷相隔距离为 l , 则此分子的偶极矩 p 为

$$p = q \cdot l$$

其单位常用德拜 (Debye), 简写为 D, $1\text{D}=10^{-18}\text{esu}\cdot\text{cm}$ 。例如, O—H 键的偶极矩为 1.60D 。偶极矩是一个矢量, 其方向规定为从负电荷指向正电荷的方向。根据这一点可以了解分子中原子的排布。例如, O—H 的偶极矩如上述为 1.60D , 但由二个 O—H 键组成的水分子其偶极矩为 1.85D , 可见水分子二个 O—H 键之间的夹角约为 105° 。 CO_2 的偶极矩为 0, 可见 CO_2 分子应按下列方式排列



其中每个 $\text{C}=\text{O}$ 的偶极矩大小相等而方向相反, 互相抵消。

假如分子中正负电荷分布中心是重合的, 称为非极性分子, 则 $p=0$ 。当分子在外电场作用下, 分子中各原子的价电子层会产生趋向正极方向, 使分子中的正负电荷中心的位置发生偏移, 分子骨架也会在外电场作用下发生变形, 并产生正负电荷中心进一步的偏移。不论是极性分子还是非极性分子, 这种正负电荷的偏移将产生一定的电偶极矩 p_i , 其效应称为诱导极化。 p_i 可写为

$$p_i = \alpha_i E \quad (1-6)$$

式中 α_i ——极化率;

E ——电场强度。

对非极性分子只产生诱导极化; 对极性分子除产生诱导极化外, 还会产生后面所讲的取向极化。

我们知道, 极性分子本身是个偶极子, 当外电场不存在时, 虽有永久偶极矩, 但由于分子热运动的影响, 偶极矩在各个方向的机会均等, 因此 $\bar{p}$ (平均值) $=0$, 当外电场存在时, 外电场使得极性分子趋向外电场方向, 而分子热运动却扰乱这种取向, 在达到热力学平衡时, 分子具有一定的平均

偶极矩 $\bar{p}$ ，我们称这种效应为取向极化。分子的分布在热平衡时遵守玻尔兹曼分布，可以证明，分子的偶极矩在电场方向的平均分量 $\bar{p}$ 近似表示为

$$\bar{p} = \frac{p^2}{3KT} E \quad (KT \gg pE \text{ 时}) \quad (1-7)$$

当 $KT \ll pE$ 时，分子的偶极矩基本上与电场方向平行排列并达到饱和，故 $\bar{p} = p$ 。

具有偶极矩 p 的分子在外电场的作用，将受到一个力矩的作用，其作用势能为

$$U = -pE \cos \theta = -p \cdot E \quad (1-8)$$

式中 θ ——偶极矩 p 与电场方向的夹角。

(2) 偶极矩之间的静电力（亦称葛生力） 极性分子具有偶极矩，偶极矩之间存在静电相互吸引的力，分子的偶极矩越大，吸引能也越大。对于两个方向一致，相互距离 r 较大（即 $r \gg l$ ）的两个偶极矩 p_1 与 p_2 ，在热平衡时，其相互作用平均能量经过计算可近似表示为下式

$$U_1 = -\frac{2}{3} \frac{p_1^2 \cdot p_2^2}{KT} \frac{1}{\epsilon^2 r^6} \quad (1-9)$$

从上式可以看出相互作用能 U 与 r^6 成反比，因此当 r 增大时，相互作用能迅速减小。所以偶极矩与偶极矩相互作用是一种短程作用。

上式偶极矩间相互作用能的公式只适用于 $l \ll r$ 的情况。但当距离相对较小时，即 r 与 l 可比较，为了计算相互作用能，必须知道偶极子各自的长度和电荷。为了得到偶极子之间相互作用能的精确值，可用下式来计算

$$U = \sum_{ij} q_i q_j / \epsilon r_{ij} \quad (i \neq j) \quad (1-10)$$

式中 r_{ij} ——电荷 q_i 和 q_j 之间的距离。

在确定肽链的空间构象的势能计算中，相邻酰胺基团偶极子之间相互作用能有相当大的贡献。

(3) 诱导力 (亦称德拜力) 极性分子的偶极矩 p_1 可以诱导非极性分子极化，并产生诱导偶极矩 $p_i = \alpha_i E$ ，此种偶极矩 p_1 与诱导偶极矩 p_i 的相互作用能经过计算后，可写为

$$U_2 = \frac{\alpha_i p_1^2}{\epsilon^2 r^6} \quad (1-11)$$

同样可以看出这种相互作用能也是一种短程作用。注意 (1-9) 式和 (1-11) 式，仅对点偶极矩才有效，即是说偶极矩的大小与它们的距离相比是很小的即

$$p \ll re \quad e \text{ 为电子电荷}$$

(4) 色散力 (亦称伦敦力) 如上所述，关于范德华尔斯力的本质，1912 年葛生 (Keesom) 提出范德华尔斯力是偶极矩之间的静电引力 (葛生力)。1920 年德拜 (Debye) 认为除了考虑葛生力之外，还应考虑诱导力 (德拜力)。1930 年，伦敦 (London) 根据量子力学理论，提出范德华尔斯力是一种色散力 (伦敦力)，这种力即使在完全非极性分子中也存在。至此人们对范德华尔斯力的本质有了深刻的了解，广义的范德华尔斯力包含了上述 3 种力，狭义的范德华尔斯力是指最后一种色散力，它在生物体系中，起着重要的作用，下面我们来讨论色散力 (伦敦力)。

当两分子互相接近时，不管它们的电子云是否对称，即不管它们是极性分子还是非极性分子，都会相互影响而变形，并产生一种称为色散力的引力，色散力是一种量子力学的力，可以定性理解：分子中的电子云分布是对称的是指某段时间的平均值，但在某一瞬间，电子云的分布并不一定是对称的，因此，分子可具有瞬间偶极矩。这样周期性变化的偶极矩使