



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

生物 电磁学

庞小峰 编著

国家级规划教材

作者权威, 学术领先

面向21世纪教学改革

全国优秀出版社倾力打造



国防工业出版社
National Defense Industry Press

Q64/2

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

生物电磁学

庞小峰 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书共有7章,首先深入和全面地剖析了生命体的电磁结构和特性,以及人类生活的电磁环境的特点,以此来阐明建立和发展生物电磁学这门新学科的必要性、重要意义和生物学基础;继后再根据各个波段电磁场与生物作用的不同特点,将包括静电、磁场和电离辐射在内的整个电磁场分成低频电磁场、射频电磁波和微波、毫米波与红外线、可见光及电离辐射7个波段,概括为5章的内容,详细和全面地论述了它们与生物体作用的特点,所产生的生物效应和表现形式、作用机制、特性、理论规律及在医学上的应用。本书所介绍的内容涉及了生物电磁学、电磁生物学、辐射生物学、光生物学、电磁医学、激光生物医学等方面的知识。本书收集和整理了国内外众多学者最近十多年在生物电磁学领域发表的大量论文,结合了作者在这一领域多年的研究成果,参考了国内外有关书籍,并在最近几年所使用的教案的基础上,写成了本书。本书的最大特点是内容全面、新颖,实验实例较多,浅显易懂。

本书适合高等学校相关专业本科生、硕士生和博士生以及在工业、国防、科研和医疗等领域的相关专业人员学习和研究生物电磁学时使用。

图书在版编目(CIP)数据

生物电磁学 / 庞小峰编著. —北京: 国防工业出版社,
2008.7
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-118-05516-0

I. 生... II. 庞... III. 生物电磁学 - 高等学校 - 教材
IV. Q64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 049694 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 19 1/4 字数 450 千字

2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

生物电磁学是研究包括电离辐射、静电场和磁场在内的电磁波与具有电磁结构的生物体相互作用的机理、特性、规律以及应用的一门新兴学科。虽然简单的生物电现象和用电刺激生物引起肌肉收缩的研究已有很长的历史,但是生物电磁现象的研究在最近十多年的时间内才得到了大力发展。其发展的动力始于工、农业和科学技术突飞猛进的发展所带来的国家电气化、通信和电子技术的大普及和大发展。在这种情况下,各种电磁波像水和空气一样,已构成了我们生活的环境,无时无刻地伴随着人类和动植物的生存,影响着包括人类在内的整个生物的生活环境。另一方面,各种形式的电磁与辐射仪器目前已广泛应用于医院和家庭,这些仪器的效果如何以及如何提高它们的医疗效应等科学问题也需要解决。这些都迫使我们要花大气力,认真、全面和系统地研究各种电磁场对人类和动植物生长与发育的影响,使人们真正了解和掌握它的生物效应的特点,寻找出有效方法来预防它的危害;并将有益的方面用于人类健康保健及疾病治疗,发挥它的潜力,为人类健康及动植物的生存服务,借以推动生物电磁学科的顺利发展。

作者收集和整理了国内外众多学者最近十多年来在生物电磁学方面发表的大量论文,结合在这一领域多年的研究成果,参考了国内外有关书籍,特别是国内出版的刘亚宁等的《生物电磁效应及其应用》、李辑煦等的《生物电磁学导论》、郭鹑等的《电磁辐射的生物效应及应用》,丘冠英等的《生物物理学》和 Davydov 的“Biology and Quantum Mechanics”等书籍及第二届和第三届 EMF 国际会议的论文集,以及最近在不同刊物上发表的一些文章,在最近几年教学的教案基础上,写成了本书。本书首先较深入和全面地剖析了生命体的电磁结构和特性,我们生活的电磁环境的特点,以此来阐明建立和发展生物电磁学这门新学科的必要性、重要意义和生物学基础。紧接着,根据各个波段电磁场与生物作用的不同特点,把包括静电、磁场和电离辐射在内的整个电磁场分成低频电磁场、射频电磁波和微波、毫米波与红外线、可见光及电离辐射 7 个波段,将内容概括为 5 章,详细和全面地研究了它们与生物体作用的特点,所产生的生物效应和表现形式、作用机制、特性、理论规律及在医学上的应用。全书共有 7 章。它涉及了平常讲的生物电磁学、电磁生物学、辐射生物学、光生物学、电磁医学、激光生物医学等的知识。本书的最大特点是内容全面、新颖,实验实例较多,浅显易懂。在编写这些内容时,我们首先阐明不同频率和强度的电磁场的特点,结合生

物体的特性,说明电磁场与生物作用的特性、机理以及由此引起的疾病和相应的治疗技术,同时也有适当的理论分析和描述。这种描述有利于从全局上理解电磁生物效应的本质。本书适合高等学校相关专业的本科生、硕士生和博士生以及在工业、国防、科研和医疗等领域的相关专业人员学习生物电磁学时使用。本书在编写过程中得到了国家“863”计划项目的财政资助(课题编号:2006AA02Z4C3)。但由于本人知识水平有限和当前掌握的资料不足,所以难免存在一些问题,希望读者能提出宝贵意见,使之改进和提高。

作者

目 录

第 1 章 生物组织的电磁结构和特性	1
1.1 在生命系统中的电磁相互作用	1
1.2 生物分子的电磁特性	4
1.2.1 蛋白质分子的电磁特性	4
1.2.2 蛋白质分子和周围体液组成的系统的电磁特性	7
1.2.3 核苷酸和 DNA(或 RNA)的电磁特性	9
1.3 生物膜和生物中的微量离子的电磁特性	11
1.3.1 生物膜的结构及电磁特性	11
1.3.2 生物膜上的离子及它的静息电位及离子泵产生的电流	14
1.3.3 神经系统中神经元上的动作电位及其传递	17
1.4 水的电磁特性和它的生物功能	20
1.4.1 水在生物体中的分布	21
1.4.2 水在体内的存在形式	23
1.4.3 水分子的电磁特性及它的导电和磁化效应	23
1.4.4 水的生物功能	28
1.5 生物组织中的质子传导特性	29
1.5.1 水的导电和磁化机理及特性	29
1.5.2 α 螺旋蛋白质分子中的质子传导	35
1.6 生物组织中的电子传导	35
1.6.1 电子转移的氧化还原反应	36
1.6.2 电子在线粒体的呼吸链上的传导	37
1.6.3 电子传递的一个理论	41
1.7 生物体和人体的电学特征	43
1.7.1 生物体和人体的电磁特性	43
1.7.2 生物组织的电学特性	43
1.8 生物组织的磁性特征	45
1.8.1 生物磁性产生原因	45
1.8.2 生物磁性的特性	46
1.8.3 生物磁性的检测	47
1.9 心脏的电学特性及心电图	48
1.9.1 心脏的电学特性	48

1.9.2	心电图及其特点	49
1.9.3	心电图的测试	50
1.10	脑的电活动及脑电图	51
1.10.1	脑和中枢神经系统的结构与功能	51
1.10.2	神经兴奋传递的过程	53
1.10.3	大脑皮层的结构及电活动特性	56
1.10.4	脑电图	58
1.10.5	诱发脑电图	60
1.11	血液的电磁特性	61
1.11.1	血液流动产生的电磁效应	61
1.11.2	电泳技术及其特点	62
第2章	生物生存的电磁环境和电磁生物效应的研究	64
2.1	生物生存的电磁环境	64
2.2	电磁辐射对生存影响的流行病学调查	67
2.2.1	极低频(ELF)/工频电磁场对健康影响	67
2.2.2	射频电磁场(RF)的健康效应	68
2.2.3	视屏显示终端(VDT)的健康效应	70
2.3	人和生物受电磁辐射的容许值及标准	72
2.3.1	工频电磁场的安全标准	72
2.3.2	射频电磁场的安全标准	74
2.4	电磁生物效应的研究方法及理论计算与分析法	77
2.4.1	电磁辐射与生物或人体的作用的特点	77
2.4.2	电磁生物效应研究的常用方法	78
2.4.3	时域有限差分(FDTD)的计算方法	79
2.5	对生物电磁特性测量的方法	80
2.5.1	生物组织的电位测定	80
2.5.2	测量细胞膜电位技术	81
2.5.3	微电极技术	82
2.5.4	阻抗的测定	84
2.5.5	细胞或分子带电测定及电泳技术	85
2.5.6	电场场强测量	86
2.6	与生物作用的电磁场的分类	87
第3章	低频电磁场与生物的相互作用	91
3.1	电场的性质及引起的生物组织的极化与传导特性的改变	91
3.1.1	电场的特性和由它引起的生物组织的电学性能的改变	91
3.1.2	外加电磁场引起的生物体的电导特性的变化	94
3.2	人和生物体所带的电荷及静电的生物效应	96

3.2.1	人和生物体的带电及其特性	96
3.2.2	人和生物所带电荷产生的一些效应	97
3.3	电刺激引起的生物效应	99
3.3.1	电刺激的形式及效果	99
3.3.2	电刺激引起的生物效应	100
3.4	磁场对生物组织的影响	101
3.4.1	磁场引起的生物组织的磁学性能的变化	101
3.4.2	磁场作用于生物组织的靶点	102
3.4.3	水是磁场作用的一个对象	103
3.5	磁场的生物效应及其特点	106
3.5.1	磁场对遗传的效应	106
3.5.2	对细胞生长和凋亡的效应	107
3.5.3	对生理和生化特性的效应	108
3.5.4	磁场对机体免疫和内分泌的影响	109
3.5.5	磁场生物效应的特点	109
3.6	磁场对癌组织和癌细胞的影响	111
3.6.1	磁场对癌症的效果	111
3.6.2	磁场治疗癌的原因分析	111
3.7	低频电磁场对细胞信号传导的影响	113
3.7.1	对细胞信号系统的影响	114
3.7.2	细胞膜是低频电磁场作用的靶体	115
3.7.3	低频电磁场与细胞信号的耦合效应	115
3.8	低频电磁场的一些生物效应	116
3.8.1	低频电磁辐射对基因转录的影响	116
3.8.2	低频电磁场对褪黑激素和移植肿瘤细胞的影响	117
3.8.3	极低频电磁场暴露在联合致癌模型中的作用	118
3.8.4	极低频电磁场对于免疫系统的影响	119
3.8.5	低频电磁场对心血管系统的影响	120
3.8.6	极低频电磁场对动物健康的影响	121
3.8.7	极低频电磁场对酶活性的影响	121
3.8.8	极低频电磁场对细胞生长、增殖的影响	121
3.8.9	低频电磁场对生物与人的昼夜节律的影响	122
3.9	高压输电线的电磁场和极低频电磁场的生物效应	124
3.9.1	高压输电线的电磁场的生物效应	124
3.9.2	极低频脉冲电磁场的生物效应	128
第4章	射频电磁波和微波的生物效应及特点	131
4.1	射频电磁波及微波的特性	131
4.1.1	射频电磁波和生物组织作用后的变化	131

4.1.2	微波的基本特点	133
4.1.3	微波与生物组织作用后引起的变化	135
4.2	射频电磁波所引起的生物组织电磁特性的变化	136
4.2.1	射频波导致的生物组织电磁特性的改变	136
4.2.2	三个色散区的特点	137
4.2.3	生物组织的介电性质随温度的变化	143
4.3	由射频电磁波引起的电磁特性的测量	144
4.3.1	测量的基本要求	144
4.3.2	平面接触式的测量系统	145
4.3.3	同轴接触式测量头	147
4.4	射频波与微波对生物大分子和细胞的影响及致癌效应	150
4.4.1	射频波与微波对酶的影响	150
4.4.2	射频波与微波对染色体的影响	150
4.4.3	射频波与微波对生殖细胞等的影响	151
4.4.4	射频波与微波对生殖功能的影响	152
4.4.5	射频波与微波致癌效应的研究	153
4.5	射频电磁波与神经系统的作用及其效应	154
4.5.1	射频电磁波对脑电图的影响	154
4.5.2	射频电磁波对脑组织中钙离子的影响	155
4.5.3	射频电磁波对血脑屏障的影响	156
4.5.4	射频电磁波引起的神经系统组织结构的变化	157
4.5.5	射频电磁波对动物行为影响	158
4.5.6	射频电磁波对外表或离体神经的作用	158
4.6	射频波和微波与免疫和造血系统的相互作用	159
4.6.1	射频波和微波对淋巴细胞的增殖的作用	159
4.6.2	射频波和微波对动物造血系统的影响	161
4.7	内分泌系统在射频电磁场作用下的变化	162
4.7.1	射频电磁场对肾上腺的影响	162
4.7.2	射频电磁场对甲状腺的影响	163
4.7.3	射频电磁场对生长素和类皮质激素的影响	164
4.7.4	在微波照射下人和动物的新陈代谢和生化指标的变化	164
4.8	电磁波对心血管系统的影响	165
4.8.1	射频波和微波辐射引起流行病学调查的结果	165
4.8.2	射频波和微波辐射动物实验结果	166
4.8.3	射频波和微波辐射离体组织与细胞等的实验结果	167
4.9	对视觉和听觉系统的影响作用	168
4.9.1	射频波和微波辐射对白内障的产生及作用机理	168
4.9.2	射频波和微波辐射对听觉的影响	170
4.10	对动物胚胎和微生物的生长和发育的作用	171

4.11	微波和射频波的热效应和非热效应及产生机理的分析	173
4.11.1	微波与射频波的热生物效应及其机理	173
4.11.2	射频波和微波的非热生物效应及机理	174
4.11.3	曾提出过的微波和射频波的非热生物效应模型	175
4.12	微波的治疗和诊断作用及肿瘤的治疗	178
4.12.1	微波的治疗效果	178
4.12.2	微波治疗肿瘤的技术	179
4.12.3	微波的诊断作用	180
4.13	脉冲波和射频电磁波在生物学中的应用	181
4.13.1	脉冲射频波的应用	181
4.13.2	射频波在生物学上的应用	182
第5章	毫米波、太赫兹波、红外线和激光的生物效应	185
5.1	毫米波及其特点	185
5.1.1	毫米波的特性	185
5.1.2	毫米波与生物作用的特点	185
5.1.3	毫米波生物效应的特点	186
5.2	毫米波作用生物体产生的生物效应	188
5.2.1	毫米波对神经系统的影响	188
5.2.2	毫米波对动物的DNA和生殖的影响	189
5.2.3	毫米波对具有免疫功能的抗体与抗原的影响	190
5.2.4	毫米波对造血系统的影响	191
5.2.5	毫米波对内脏组织的影响	191
5.2.6	毫米波对细胞增值和凋亡的影响	192
5.2.7	对生物的生长和发育的效果	193
5.3	毫米波的非热和热生物效应及其机理分析	195
5.3.1	毫米波生物效应的机理的一些观点	195
5.3.2	分子转动模型	197
5.3.3	毫米波的生物热效应的机理	198
5.4	毫米波治疗肿瘤和非肿瘤疾病的效应	201
5.4.1	毫米波对肿瘤治疗的效果	201
5.4.2	毫米波对非肿瘤疾病的效应	203
5.5	太赫兹波的特性和生物效应及在生物中的应用	204
5.5.1	太赫兹波的产生及特性	204
5.5.2	太赫兹的生物效应及其机理	206
5.5.3	太赫兹波的生物成像	209
5.6	红外线的特性及红外技术	210
5.7	红外线的生物效应	213
5.7.1	红外线对动物的生物机能的影响	213

5.7.2	红外线对血液循环和生化反应的影响	214
5.7.3	红外线对细胞生长周期的影响	214
5.7.4	红外线对神经细胞膜钠通道电流 I_{Na} 的调制	214
5.8	红外线的非热和热生物效应的机理和特性	215
5.8.1	红外线非热生物效应的机理和理论	215
5.8.2	红外线的热生物效应的机理及特性	221
5.9	激光的特性和产生的一些效应	224
5.9.1	激光及其特性	224
5.9.2	激光与生物体相互作用的特点	225
5.10	激光的生物效应	227
5.10.1	激光对生物大分子的作用	227
5.10.2	激光对细胞结构、状态和功能的影响	228
5.10.3	激光对动物状态的影响	229
5.11	在生物医学中的激光技术	232
5.11.1	激光技术研究生物分子的结构及其特性	232
5.11.2	激光技术在药物分析中的应用	233
5.11.3	激光技术在测量表皮组织和器官的特性中的应用	233
5.11.4	激光光谱技术在诊断和治疗癌肿瘤中的应用	235
5.11.5	生物研究的新技术和新的光谱仪器	236
第6章	可见光的生物效应	238
6.1	光与生物的作用及产生的原初效应	238
6.1.1	光生激发状态	238
6.1.2	荧光和磷光	239
6.1.3	生物荧光特性的理论描述	241
6.2	环境和生物分子的特性对生物荧光的影响	243
6.2.1	体液环境对荧光的影响	243
6.2.2	溶液中的溶质对生物分子的荧光的影响	244
6.2.3	激发分子的结构和运动状态对偏振荧光的影响	247
6.2.4	供体和受体间的间距变化对荧光过程中的能量转移的影响	249
6.3	光合作用的过程、机理及特征	251
6.3.1	光合作用反应、叶绿素和其他色素	251
6.3.2	叶绿体中的光合反应中心	255
6.3.3	细菌和蓝绿藻类的光合作用系统	256
6.3.4	植物的两种光合作用系统	258
6.3.5	光致电荷分离反应与光合磷酸化作用偶联的机理	260
6.3.6	光合作用的暗反应	262
6.3.7	光合作用中的能量传递	262
6.4	视觉中的光过程	263

6.4.1	视网膜的结构及视蛋白的组成	263
6.4.2	视色素在光作用后的变化特性	265
6.4.3	菌紫质和视紫质的结构和功能	268
6.4.4	视蛋白的荧光及能量转移	272
6.4.5	在视觉系统中感受细胞的换能作用	272
6.4.6	菌紫质在蛋白质计算机中的应用	273
6.5	在生物中光的动力学效应	275
6.5.1	光化反应	275
6.5.2	光动力学效应	276
6.5.3	光敏化的自动氧化作用	277
6.6	生物的化学发光、生物发光及物理发光	277
6.6.1	化学发光	277
6.6.2	生物发光	278
6.6.3	物理发光	279
第7章	电离辐射的生物效应	283
7.1	电离辐射的基本特点	283
7.1.1	电离辐射的形式和特点	283
7.1.2	电离辐射的表述方法	286
7.2	电离辐射与生物相互作用的过程及产生的生物效应	287
7.2.1	电离辐射对生物分子和机体的作用及其特点	287
7.2.2	生物分子吸收了电离辐射后引起的结构变化和导致的生物效应	289
7.3	电离辐射与生物组织作用的机理和理论	291
7.3.1	靶模型及其相应的结果	291
7.3.2	电离辐射的生物效应的分子理论	294
7.3.3	电离辐射的双元辐射作用理论	295
7.4	紫外光(UV)的生物效应	297
7.4.1	DNA 的嘧啶光二聚体的生成	297
7.4.2	DNA 的损伤与复合	299
7.4.3	紫外光引起蛋白质的激发与变性	301
7.5	重离子辐射的生物效应及其应用	302
参考文献		304

第1章 生物组织的电磁结构和特性

由于外加电磁场仅能与生物体中具有电磁特性的组织和分子等进行相互作用,于是在研究电磁场与生物体的相互作用时,必须首先了解生物组织本身所具有的电磁特性。只有弄清楚这些问题,才能谈得上生物与电磁场的相互作用,才能找到电磁场的生物效应的机理和特征,并建立起生物电磁学理论。因此,清楚地弄清生物体所具有的电磁特性是研究生物电磁学问题的关键和基础,具有重要的意义。所谓生物组织的电磁特性,具体讲,就是它带有的电荷,具有电和磁偶极矩大小和分布及所形成的电流特征等。研究生物的电磁特性就是找出具有上述这些电磁特性的生物组织或组织中的成分,如蛋白质、DNA和细胞等具有什么性质的电磁特性。用现代的电生理和生物技术,如微电极(尺寸为 $10^{-4}\text{cm} \sim 10^{-5}\text{cm}$)和膜片钳等技术检测出它们所具有的带电特性,用超导量子相干仪检测出组织的磁性等。研究表明,由各种生物组织构成的生物体的内部都存在复杂多样的电磁特性,于是生物体(包括人体)是能与外加电磁场发生相互作用。在这一章中,将叙述生物体的各种离子、分子所具有的静电特性,各分子或分子中的成分具有的电偶极矩,其中所存在的传导电子和质子的运动产生的电流和它们存在的电学和磁学特性,及在外场作用下所产生的电磁极化效应,生物组织的介电特性的变化,在导电组织中所存在的自由电荷(如电子、质子和各种离子)的运动特征,以及它们对外加电磁场的响应特性,生物介质中的束缚电荷(只能在分子线度范围内运动的电荷)对外加电磁场的响应等问题。

1.1 在生命系统中的电磁相互作用

一切生命体,不论人还是动、植物,都是由原子与分子组成的。在生命体中起重要作用的是由氨基酸和核苷酸组成的蛋白质和DNA,以及糖类和脂类分子。它们都是独立存在于生命体中。那么,它们又是如何由小分子的氨基酸和核苷酸等组成的呢?按现代物理学的知识,自然界中存在强、弱、电磁和引力等四种相互作用力。对于生命体来讲,没有必要去考虑它们之间的强、弱和引力等相互作用,因为这些力不是太大就是太小,生命运动一般不涉及它们。剩下的就只有电磁相互作用了。这就是说,生命系统中的各个成分,包括小分子、大分子、各种离子等都是靠电磁相互作用将它们组成一个活的生命体的。因此,电磁相互作用是生命体中主导性的相互作用力。这种相互作用在生命体中主要以下面几种形式体现出来。

(1) 由原子构成的小分子,以及小分子构成生物大分子都是靠它们周围的电子云间的重叠所产生的局部化学键即共价键或原子键,使它们结合起来的。其中的电子在这些系统中的运动便是化学键能发生改变的主要原因。

(2) 在分子与分子之间,由于它们的结构畸变可以产生范德瓦耳斯力,这种相互作用

势常表示成 $\varphi(r) = \frac{A}{r^{12}} - D/r^6$, 这里 r 是两分子间的间距, 常数 A 和 D 是与分子的性质相关的常数。量子力学可以解释这个力的本质和起源。按照这一理论, 此力是两分子的电子壳层(自旋已配对)相互交叠时产生的力。其中电子之间的关联所引起的交换力会使分子间的排斥力按指数急剧增大, 上式的相互作用势就是这种效应的一个近似。如果分子是非极性的, 它们在远距离时所存在的是吸引力, 这是自身壳层的微小变形引起的。在这些分子中的电子与原子核之间的相互作用使其两分子极化(正、负电荷分开一段距离), 在这种力作用下, 分子出现偶极矩。这个偶极矩矢量的转向便产生了与分子极化系数的乘积成正比的引力。由于分子的极化率决定了电磁波(包括光)的折射率变化(色散), 所以称它为色散力。如果每个自由分子本身是极化的, 则上述范德瓦耳斯力还包括极化分子的取向相互作用(基松效应), 它与距离的六次方成反比。当两个分子的偶极矩转到相反的极性端对着时, 它们之间的吸收力是最大的。这种取向效应紧密地相关于介质的温度, 则其相互作用能量便与温度有关。在温度不太低时, 这种作用势可表示成 $D_1 = d_a^2 d_b^2 / 3KT$, 其中 d_a 和 d_b 是相互作用的两个分子 a 和 b 的电偶极矩, KT 是热能。

除了固有偶极矩间的直接相互作用外, 还存在由固有偶极矩的分子所诱导的另一个没有偶极矩的分子感生出的感应偶极矩, 这叫做德拜效应。它也对 D 作出贡献, 使极化率与偶极矩的平方成正比, 即 $D_2 = a_a d_b^2 + a_b d_a^2$ 。在分子间的范德瓦耳斯力的相互作用中, 色散力是主要的。只有当分子具有相当大的偶极矩(大于 $2D$)时, 取向效应才可观察。因此, 极化相互作用一般很小, 则范德瓦耳斯力是一种弱作用类型, 如分子在靠近时所释放的能量(即分子的束缚能)为 $7 \times 10^{-5} \text{eV}$, 大大小于化学键能(后者大约为几个或十多个电子伏)。范德瓦耳斯力虽然很弱, 但在生命系统中起着重大作用, 它决定了生物组织的分子结构。

(3) 共振相互作用力。在以上研究中, 未考虑分子的激发。事实上, 当分子处于激发态时, 具有偶极矩的分子的电偶极矩也会出现振动。于是, 处于受激状态的偶极态的分子与未受激发的分子间会出现一种共振相互作用, 这种作用与激发态的偶极矩的平方成正比, 并随距离的三次方增加而减少。因此, 在 $5\text{nm} \sim 30\text{nm}$ 的远距离上就会出现这种相互作用, 它是范德瓦耳斯力的作用距离的 16 倍。这种共振相互作用力在生命系统中的能量转移和信息传递上起着重要作用。

(4) 分子间的氢键相互作用力。氢键就是在以化学键结合的一个分子中的氢原子又能与另一个分子中的负电性极强的原子, 如 O 、 F 、 N 、 Cl 、 S 等结合而成的相互作用类型。它们在生物中大量出现, 如在蛋白质中的高级结构的形成和 DNA 中的碱基配对及保持其双螺旋结构稳定性的作用力就是这种相互作用。它可以用来说明生命系统出现的水的聚合物、水与其他离子形成的水合物以及许多生物分子的疏水和亲水作用等效应。因此, 氢键在生命系统中扮演了重要角色。一般的氢键的能量在 $0.13\text{eV} \sim 0.31\text{eV}$ 的范围内, 它小于化学共价键能, 但大于范德瓦耳斯能。一般来讲, 常把由氢原子形成氢键时释放的能量小于 1eV 时叫弱氢键, 它的主要特点是势能曲线对称, 有两个极小值存在。例如, 蛋白质和 DNA 中的氢键是属于此类。在一些由氢原子形成的络合物中, 当它们形成时会释放大量的能量, 如在生成络合物 $(\text{FHF})^-$ 时能释放约 2.17eV 的能量, 则在这种络合物中的氢键便叫强氢键。在这种络合物中, 分子的组态发生了很大变化。因此, 在氢键中的这个

质子容易移动,在外场影响下会出现定向迁移,使络合物有很大的极化率,但它很少在生物系统中出现。

索柯索夫在施主—受主相互作用的基础上,首先提出了氢键的量子力学理论。其成键的原因,他认为这是由于质子引起了邻近两原子 A 和 B 之间的电子密度的重新分布,即发生了“不可分电子对”共有化。实际上,在形成氢键的双阱势能时,分子的其他电子也作出了贡献,尽管其贡献是很小的。

(5) 离子—离子之间的库仑相互作用。在生物中的细胞膜的内外及细胞质中都存在有大量 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 等,则它们之间便有库仑相互作用存在。同时,在生物化学反应中所形成的化合物大都是靠这种相互作用,产生一些离子化合物。

(6) 极化水和离子之间的电磁相互作用。在生物中的水大多是极化的,它具有一定偶极矩,从而使它的介电常数很大。在离子的电场中,极化水会部分地有序排列起来,去包围这些离子,以部分屏蔽这个离子的场,从而形成一些水合物。于是,在生物中的许多离子不是裸离子形式,它以“水化”形式存在。但分子间的氢键和热运动能阻碍这些水的“排齐”效应。

(7) 极化水和极化大分子间的亲水和疏水相互作用。这种现象在细胞膜中和细胞质内大量存在。极化的水分子很容易与极化的生物大分子结合在一起,从而使它们的极化部分与水结合。这种可溶性是由于水分子在极化分子的场中发生了转向,以使体系的自由能降低而达到稳定状态。这是由于大分子与溶剂水分子之间的电偶极矩间的关联效应所致。

疏水效应是极化水和生物大分子的非极化部分之间的相互作用造成的一种现象。由于它们的性质特异性,在它们接触时,会使体系的自由能升高,从而使这些大分子不能溶于水。其自由能增高的原因可能是由于在它们接触时要改变水的结构和分布,使它们的分布变得有序,从而导致熵减少。从微观上讲,它是两种物质的分子间的氢键和范德瓦耳斯力作用的一个综合结果,但这种疏水性与分子的尺寸有很大关系。对于不大的非极化分子(CH_4 、 C_2H_6 等),在浓度不大时,是可溶于水的,并均匀地分布于水的大缔合分子间的“空穴”中,从而使自由能由于其中存在的范德瓦耳斯力而下降,混合熵增加。但当分子增大时,这种相容性减少,如直径为 0.5nm 的 C_2H_6 和 C_6H_{14} 的溶性大约为 C_2H_6 (0.38nm) 的 1/30,为 CCl_4 的 1/100。若想把一些非极性大分子引进到水中,要使它们溶于水,则必然要折断其中的氢键。但是水分子与这些非极性大分子之间的相互作用比水分子间的氢键能小得多,至此,这些非极性分子(如油分子)最终不得不从水中被排除出来。

(8) 分子链与分子链间的相互作用——二硫键。一般来讲,蛋白质由几条一维长链组成,如 α 螺旋蛋白质由三条链组成,胰岛素由两条链组成。在这些链中存在相互作用,它们用一个二硫键相连接。这种键实质上就是包含在蛋白质分子链中的半胱氨酸的硫原子与另一个链中的半胱氨酸残基上的硫原子形成 S—S 键的结果。它们是共价键,由电子云间的重叠产生(实际上是分子中含有巯基(—SH)的两个半胱氨酸分子脱氢并氧化后,在两个硫原子之间的电子云重叠形成了二硫键)。于是,在同一链的分开处可由一个二硫键形成一个环。具有这种二硫键的氨基酸叫胱氨酸。胰岛素的两条链就有两个二硫键,在它的短链上还有一个二硫键,这使它能形成一个环。显然,它可用一个外力或电磁

场来截断,于是两条链便可分开,此时,蛋白质分子发生变性,其功能也可能会逐渐消失。

对于组成蛋白质的酸性和碱性氨基酸侧链在生理 pH 值环境中都是带负电和带正电荷的,则在蛋白质折叠时,这些正、负基团之间可靠电磁相互作用组合起来,形成盐键,如氨基和羧基间就是如此,其键能为 -21kJ 。

总结起来,如果计及被水化层包围着的两个具有相反电荷的侧基,在水化层被破坏后产生的盐键,则在生命体的成分之间是靠五种类型的电磁相互作用结合在一起的,这些键包括共价键、氢键、范德瓦耳斯键、离子键、二硫键和盐键。它们在不同情况、不同结构中出现,所以生命体是由大量生物分子通过它们之间的电磁相互作用结合起来,形成具有生命活力的复杂系统。

1.2 生物分子的电磁特性

1.2.1 蛋白质分子的电磁特性

众所周知,蛋白质分子是由 20 多种不同氨基酸组成的,这种合成是在细胞质的核糖体中进行。氨基酸又是由氨基($-\text{NH}_2$)和羧基($-\text{COOH}$)及黏附于 α 碳原子上的侧基(R)组成的,不同的氨基酸的侧基是不同的。两个氨基酸分子结合在一起释放出一个水分子,靠肽键连接成一个长链,组成了蛋白质的一维结构,一些常见的蛋白质分子的氨基酸的结构如表 1.1 所列。其氨基和羧基端都带电,一般是氨基(NH_3^+)带正电,羧基(COO^-)带负电,特别是酸性(天冬氨酸、谷氨酸)和碱性(精、赖和组氨酸)及极性(丝、苏、色、酪、半胱与脯氨酸及谷氨酰胺)氨基酸都具有明显的电性或电极化特性。这是由于由氨基、羧基和不同的侧基组成的 20 种氨基酸分子的电荷和质量都是非球形对称分布的,其中的正、负电荷中心不是重合的,于是它们都具有一定的电偶极矩,这是它的永久偶极矩。当众多氨基酸分子通过肽键结合在一起构成蛋白质时,这些氨基酸残基进一步极化,从而使蛋白质的偶极矩增加。例如,氨基酸中最简单的甘氨酸,其分子结构式为

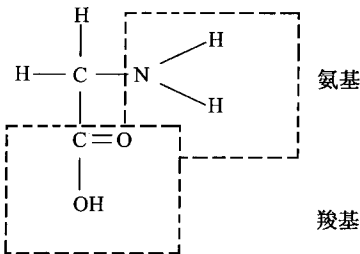


表 1.1 一些蛋白质分子的氨基酸组成

氨基酸	乳清蛋白(牛的)	溶菌酶(人的)	弹性蛋白酶(猪的)	血清白蛋白(人的)
Ala	3	14	17	62
Arg	1	14	12	24
Asp	9	8	6	36
Asn	12	10	18	17

(续)

氨基酸	乳清蛋白(牛的)	溶菌酶(人的)	弹性蛋白酶(猪的)	血清白蛋白(人的)
Cys	8	8	8	35
Glu	8	3	4	61
Gln	5	6	15	21
Gly	6	11	25	12
His	3	1	6	16
He	8	5	10	8
Leu	13	8	18	61
Lys	12	5	3	59
Met	1	2	2	6
Phc	4	2	3	31
Pro	2	2	7	24
Ser	7	6	22	24
Thr	7	5	19	28
Trp	4	5	7	1
Tyr	4	6	11	18
Val	6	8	27	41
总数	123	129	240	585
分子量	14183	14602	25906	66470
酸性基/%	13.8	8.5	4.2	16.6
碱性基/%	13.0	15.5	8.8	16.9

可粗略估计它的永久偶极矩为 $\mu = qd = (0.2 \times 1.6 \times 10^{-19}) \times (3 \times 10^{-10}) \text{ c} \cdot \text{m} = 0.96 \times 10^{-29} \text{ c} \cdot \text{m} = 3.2\text{D}$, 这里 q 为氨基酸羧基的剩余电荷, d 为它们间的距离, D 表示 Debye, 是偶极矩的单位。一般的氨基酸都具有大约 3.8D 的 averages 的偶极矩, 它大于水分子的偶极矩 (1.81D)。在蛋白质分子中由于所有氨基酸分子都变成残基, 则它们所具有的有效偶极矩又会进一步增加。同时, 单肽主链上的各个键或基也具有一定偶极矩, 如 $\text{C}=\text{O}$ 为 2.49D , $\text{N}-\text{C}$ 为 0.22D , $\text{N}-\text{H}$ 为 1.35D 。一些侧链极性基团也具有一定偶极矩, 如 $\text{O}-\text{H}$ 为 1.675D , COOH 为 1.65D , NH_2 为 1.55D , $\text{N}-\text{H}$ 为 1.35D , $\text{S}-\text{H}$ 为 0.71D 。并且, 这些主链和侧链上的偶极矩的大小和方向还随外界条件的改变而变化。因此, 能肯定每一个蛋白质都具有一定的电偶极矩, 它们是电磁场作用的靶点。

但是人们常把蛋白质的总偶极近似看成是一系列单肽群偶极矩的矢量和。若用 μ^2 表示每一个单肽群的平方平均偶极矩, 则整个蛋白质分子的总的平方平均偶极矩可表示为 $\langle \mu^2 \rangle = 1.1n\bar{\mu}^2$, 其中 n 为单肽群的数目。对于不同的生物蛋白质具有不同的空间构型和构象, 则所受到的相互作用不一样, 其总偶极矩的大小和方向也不一样, 如表 1.2 所列。