

# 生物磁学与生物电磁学

## Biomagnetism and Bioelectromagnetics

吴本玠

(北京医科大学,教授)

### 一、生物磁学的现状和发展趋势

生物磁学(Biomagnetism)是20世纪60年代初新兴起的一门交叉学科。它研究不同层次生物材料产生的外部磁场以及外部磁场对生物机体不同层次的效应。后者又称磁生物学(Magnetobiology)。

从1963年鲍尔(Baule)和麦克菲(McFee)记录到第一张心磁图(MCG)算起,生物磁学已有28年的历史。国际上已召开过七届生物磁学会议。

#### (一)生物磁学

生物磁学的研究主要在器官、细胞和分子三个水平进行。

#### 1. 器官水平的生物磁学研究包括心、脑、肺、肌磁和恒定磁场的研究。

(1)心磁研究是生物磁学研究中的一个重点领域。萨里南(Saarinen)(1975)应用可变网格系统建立了标准的心磁图,为正常和各种疾病时的心磁研究打下了基础。心磁图比心电图具有较高的空间分辨率、灵敏度和准确度,例如对左心室肥大症和高血压的正确诊断率,心磁图可分别达到55%和40%,而心电图却只有14%和20%,因而心磁图能更有效地早期发现轻度的心脏病。心磁图比心电图更易于检测到ST段的位移,胎龄为27~35周时,在母体腹部经常记录不到胎儿心电图,而可记录到胎儿心磁图。心磁图可直接测量人心脏的兴奋过程,配合信息图象化的应用,可进行心电现象的计算机处理断层图象(CT)的研究。

(2)脑磁研究是生物磁学最重要和最富研究成果的领域。脑磁图测量比脑电图测量的最大优越性是不受容积电流的影响,可对脑内激活区或

病灶区作出精确的三维空间定位,可用于体壁感觉、视觉、听觉、运动觉和内源性磁场的定位等研究。例如通过脑磁图研究发现与脑高级思维过程有关的内源性磁场定位于海马结构及其附近脑区。在临床医学上主要用于癫痫和脑瘤的定位诊断,特别是癫痫病灶的定位诊断,美国专门建立了脑磁图研究中心为癫痫患者进行手术前的定位诊断。脑磁的一个新的研究方向是在脑片上同时研究磁和电活动,可用以研究传播中的电流偶极子模型。用超导量子干涉式磁强计可直接探测神经活动产生的磁场。这种磁场直接与神经元中电流的大小和波形相关,因而不仅可探测快变化电流,也可探测如偏头痛患者的病理性直流和慢变化电流。

(3)肺磁研究,肺磁图可用以反映长期在有尘埃的环境中工作的工人的肺内总尘埃量、分布模式和肺尘埃清除率,是监测肺功能状况的一种有效手段。

(4)恒定磁场研究,恒定磁场是小于0.01赫兹的磁场。用二维检测系统可测量人体不同部位(腹部、头部、肢体和躯干)的恒定磁场。腹部恒定磁场与胃肠道的功能密切有关,因此人体恒定磁场的测量在生理研究和临床诊断中将是一种有用技术。

#### 2. 细胞磁学研究

用微电极电位记录和带有室温检波线圈的超导磁强计可同时记录神经或肌肉纤维的动作电位和动作磁场。这种电和磁技术的结合可以独立测量跨膜电位和细胞内电流,通过计算可得到轴突电阻、跨膜电容和膜的传导电流密度。用磁测定损伤的神经纤维可对其连结性和损伤程度作出定量判断,对其修复程度作出定量评价。巨噬细胞吞入磁性探针 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 或 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ,在外加磁化磁场作用一定时间再中止后,可观察到剩余磁场随时

间而衰减的弛豫现象。通过这种现象可计算出活细胞中细胞浆的粘滞度和物理流变特性,以及细胞内器官的运动和物理特性,从而有助于无损伤地测定正常和病理状态下的细胞机能。

### 3. 分子磁化率研究

用超导磁化率计(Superconducting Susceptometer)可测定铁超负荷病人的肝、脾和心的铁含量,比传统的外科手术和化学分析方法安全和精确。磁化率计结合其它有关技术也可用于研究小容量( $<0.2$ 毫升)和低浓度( $0.3$ 毫摩尔)的金属蛋白样品的磁特性,如样品磁畴的自旋、金属蛋白的顺磁浓度、自旋和零磁场分裂等。

## (二)磁生物学

磁生物学主要研究磁场和磁处理水的生物效应。

### 1. 不同强度磁场的生物效应

(1) 强磁场的生物效应 强磁场的应用日益广泛,磁场的安全标准问题受到各国的重视。前苏联、美国和欧洲等均对磁场对全身或不同部位的强度和作用时间提出不同的上限规定。2特斯拉恒定磁场使心脏循环时间增加,被认为是磁场对窦房结的直接或间接作用。通过8特斯拉强磁场对血纤维蛋白原和凝血酶的研究,可望用强磁场治疗血栓症。高频磁场在生物体中的热效应已作为探索治疗肿瘤的一种新方法,并提出了高频磁场加热治癌的理论模型。研究人和动物对强磁场的适应性对空间生物学和空间医学是重要的,某些生理参数在受磁场作用期间恢复,表明这些生理系统具有适应性。1989年日本用0.6特斯拉磁场作用48小时可100%杀死酵母菌,这说明有可能将磁场应用于食品和医疗器具的灭菌。

(2) 弱磁场的生物效应 在地磁场强度级(约 $5 \times 10^{-5}$ 特斯拉)的恒定磁场和约 $10 \sim 100$ 赫芝的交变磁场同时作用下,使细胞膜对一些有重要生物意义的离子,如 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的通透性发生改变。这与磁场作用下这些离子发生回旋共振效应有关。在60赫芝、 $11.5 \times 10^6$  特斯拉的磁场作用下,海兔神经元的电活动经过几分钟后才发生变化,这表明磁场可能首先影响细胞生化过程,再改变通过细胞膜的离子流。美国加州诺马大学研究了弱磁场作用下细胞膜上信息传递的变化,这是一个值得注意的研究动向,因为它与弱磁场生物效应的作用机理有关。

### 2. 地磁场与生物机体的相互作用

大量实验证明,从细菌、变形虫、鲨鱼到家鸽都能对地磁场产生反应,利用地磁场导航。研究发现,地磁场反向与生物大量灭绝有关,此外还发现

地磁场可干扰胚胎发育。

### 3. 脉冲磁场的生物效应

强脉冲磁场对上肢神经有刺激作用。弱脉冲磁场对培养细胞DNA合成有增减作用,但对姐妹染色体交换则无影响,说明它不影响DNA的复制和不造成损伤。直流磁场对治疗骨折病有较显著效果。脉冲磁场可增强离体组织有机质的合成,增加钙(骨)化,加速骨愈合速率;也观察到脉冲磁场可抑制坏死骨吸收和加速血管增生,使骨坏死患者恢复骨质并保持骨结构的完整。

### 4. 磁处理水的生物效应

磁处理水对结石等疾病的疗效和农业增产的效果均较明显,但其作用机制不清楚。

## (三)我国对生物磁学的研究

目前国内仅极少数研究小组在困难的情况下,从事肺磁图、心磁图、脑磁图以及气功状态下人体弱磁信号测定方面的工作。有关磁场对心脏、血管、胃肠和肝脏等的影响的研究则较多。这些研究说明磁场对正常动物心率无明显影响,对异常心率有明显双向调整作用;对胃肠功能也有双向调整作用。并发现磁场能使机体免疫力有不同程度增强;低频交变磁场有抗辐射作用。在磁疗上我国处于国际领先地位。并已广泛应用于多种疾病的治疗,磁疗用品(磁贴片、磁珠、磁项链、磁腰带和磁枕头等)也很多。值得特别提出的是磁场去除血管瘤效果十分明显,用磁疗机治疗胆结石,医院反应效果明显。在植物方面,对强磁场对物种遗传性状的改变有不少研究,如强磁场处理水稻种子可使水稻发生变异;弱磁场处理植物种子会加速其萌发和生长等。

磁处理水的应用在我国历史就有记载。我国在磁处理水治病、育种和养鱼方面做了不少有明显成效的工作。磁处理水可提高动物和人体的免疫功能,对溃疡有保护作用,通过防止主动脉内皮细胞损伤而防止大鼠实验性早期动脉粥样硬化;特别值得提出的是对结石形成有抑制作用,能提高排石率和提前排石时间。磁处理水明显加快鱼卵的胚胎发育,并促进生长。磁处理水使水的结构及理化性能发生改变。但是目前理论研究大大落后于应用。

生物磁学在生物物理学中是一门新兴学科,它对生物学医学基础理论的发展将起一定的推动作用;在医学、农业等领域也有较广泛的应用,希望能引起国家的重视。

## 二、生物电磁学的发展现状及趋势

生物电磁学(Bioelectromagnetics)是正在形成的一门新的分支边缘学科,研究电磁波与生物系统的相互作用。电磁波生物效应研究始于第二次世界大战中雷达的出现,最初仅限于微波波段。当时研究的目的是试图通过动物实验和流行病学调查建立微波辐射卫生标准和防护指南。磁场和电磁波应用的发展以及苏美安全卫生标准的差异(实质上是关于热效应和非热效应的分歧)推动了这一研究的发展。目前生物电磁学已在一些发达国家受到关注。现在研究的电磁波频率已向低端扩展到极低频,高端扩展到毫米波;波形已由连续波发展到脉冲波;生物样品由整体动物到培养的单个细胞;从生物效应的实验研究发展到效应机理的理论研究;从制订卫生标准发展到临床应用研究。随着生物电磁学国际间学术交流和合作的不断发展,成立了一些有关的国际性学术组织。生物电磁学研究的主要内容包括:

1. 射频电磁场生物效应的实验研究,即研究电磁场(不同频率、强度、波形和作用时间)对不同层次(大分子、细胞、器官、个体或群体)生物系统的作用。目前除少数实验结果被普遍承认并给予科学解释(如微波听觉效应、血脑屏障通透性效应等)以外,许多结果还未确认。

2. 生物电磁剂量学研究。任何生物效应实验必须有剂量表述,否则实验无法重复,结果也无法比较。

(1) 剂量学量,目前被广泛采用的比吸收率(SAR)和最近提出的热通量密度(HFD)都是生物体吸收的总功率对空间和时间的平均值,不能反应电磁波对生物体各点的作用强度。只有作为生物体内的点函数的某一电磁量,如 $E(r)$ 、 $H(r)$ 、 $J(r)$ 或 $SAR(r)$ ,才能符合剂量学量的基本要求。

(2) 剂量学方法,即如何确定剂量,目前有理论和实验方法。理论剂量学是求解复杂电磁场边值问题,美国目前处于领先地位。甘德希(O.P.-Gandhi)等用时域有限差方法,在100兆赫以下,按人体解剖结构用5628小块组成人体模型,计算所得的 $SAR(r)$ 与实验吻合较好。其不足是在静止、线性的生物体模型上进行的。随着电磁热疗的发展,也有人将 $SAR(r)$ 作为分布热源,考虑到血流等影响求解热方程来确定热分布。实验剂量学是研究测量方法,有代表性的方法是用热象仪测量生物体在电磁波照射后的温度分布。

(3) 生物组织电参数测量,无论是理论计算还是建立仿真模型进行测量,其前提是要知道各种生物组织的电参数。生物组织电参数测量是很困难的,目前在10吉赫以下的实用数据较多,最高频率也只能测量到18吉赫。

3. 效应机理研究。电磁能的热效应已被普遍

承认,但是在低电平电磁场作用下是否产生所谓“非热效应”,还存在不少争议。尽管目前已提出多种理论和假设,例如粒子对细胞膜的通透理论、生物系统中的相干电振荡理论、射频能量的谐振效应理论、跨膜粒子的回旋谐振理论,以及解释微波听觉效应的热弹性波和电致伸缩理论等,但均有待于进一步的实验证实。

4. 应用研究。在临床医学中的应用,目前较为成熟的是利用电磁能的热效应进行肿瘤的过热疗法和一般的电磁热疗。其存在的主要问题是治疗机理和剂量的分析与控制。

生物电磁学近年来的发展动向和前沿课题包括:在电磁波频率上向低端和高端转移;在波形上对脉冲波生物效应研究增多;在功率上突出了低强度电磁波的生物效应。在实验研究和机理研究关系上,机理研究的比重明显增加;而在实验研究方向上,强调独立可靠地重复一些关键实验,而不是盲目地增加新的指标实验。还要继续发展剂量学研究和不断修订卫生标准,在基础研究的同时,要注意发展医学应用研究。前沿课题包括:

#### 1. 极低频(ELF)生物学效应

极低频(特别是工频,即50或60赫芝)电磁场照射对人体存在潜在危险,特别是与癌症发生率有关。有人在鸡脑组织钙离子流出的实验中发现频率窗和功率窗效应。窗效应是电磁场的频率和功率对不同生物系统作用时所显示的共振型反应。因此,极低频生物效应引起全世界极大的关注。美国从1989年底开始一项四年研究计划,研究60赫芝电磁场的致癌作用。目前12个国家和地区(美、英、澳大利亚、巴西、加拿大、芬兰、法国、新西兰、荷兰、瑞典、瑞士和台湾)的科学家正在进行世界范围的流行病学调查,以研究极低频电磁场照射与癌症的可能联系。

#### 2. 毫米波的生物学效应

由于在研究应用大功率脉冲微波和毫米波作为“能量武器”,因此有必要建立此种辐射对人体的安全标准。毫米波的频率窗和功率窗效应虽有多年研究,但仍有争议,目前仍在继续研究,感受器装置对毫米波是一种敏感结构。有人研究了34~38吉赫毫米波对小龙虾慢适应压力感受器神经元自发放电速率的效应,发现250毫瓦/平方厘米的功率可引起放电速率的瞬间减少。基因组的构象状态对毫米波也是高度敏感的。用毫米波照射大肠杆菌的溶胞产物,可使基因组的构象状态发生转变,启动原噬体诱导的基因活动,激活DNA的合成,使细胞分裂速率增加。

#### 3. 脉冲波生物学效应

美国、加拿大、西班牙和瑞典的六个实验室,共同进行的一项研究认为,弱脉冲磁场可引起鸡

胚显著性发育异常。日本学者在研究弱脉冲磁场对哺乳动物细胞株DNA合成的影响中,发现有脉冲宽度、重复频率和脉冲强度窗效应。美国沃尔特·里德军事研究院微波研究部的初步研究认为,微波脉冲似可对中枢神经系统产生类似电刺激的作用,对心血管系统可产生非热效应。在连续波和脉冲波的比较研究中发现,后者对离体眼组织的损伤远比前者大,且损伤阈值比前者小。

#### 4. 低强度电磁波的生物学效应

目前研究的重点是极低频、低频调制的射频或微波以及等幅毫米波。关于电磁波的非热效应已有一定数量的实验证据,并为大多数人所接受,但重复性存在问题,是这一研究面临的挑战。

#### 5. 生物效应的机理研究

机理研究并不是单纯的理论研究,还需要在细胞和分子水平上进行实验。理论研究目前有两种途径:一是基于经典物理学的理论和方法,例如用电磁波在生物体内感应的微电流来解释对神经系统、心血管系统等生物学过程的影响,把生物学过程视为线性问题;二是基于近代物理学和生物学相结合的理论生物学方法,例如各种“谐振”效应理论,生物能传播的孤波论等,把上述过程视为非线性过程。

我国电磁波生物效应研究始于70年代中期,经过一定的流行病学调查和动物实验,制定了一个暂行微波卫生标准。此后若干高等院校相继开展了一些生物学效应的实验研究,形成了一定的研究力量,但和国外比,差距还比较大。

生物电磁学是生物物理学中一门正在形成的分支边缘学科,由于电磁波在工业、医疗和军事上的应用发展迅速,家用电器进入家庭,人类的生存环境受到严重的电磁污染,电磁波的生物效应以及它对人类的有利和有害影响都是迫切需要研究的问题。

(责任编辑 刘先曙)

## 科技动态

# 以色列、沙特阿拉伯等国用太阳能生产化学燃料

由于矿物燃料的数量有限,而且燃烧矿物燃料会释放大量的CO<sub>2</sub>造成温室效应,危害地球气候。因此,寻找替代能源受到普遍重视。而能满足全球能源需要又有利于环境保护的唯一替代能源就是太阳能。

太阳每年辐射到全球表面的能量只要能利用很小一部分就足够全球使用。

但是,利用太阳能必须解决好人们面临的两个问题:一是日照充足的地区都不在人口和工业中心,而在这儿的能量需求却是最大的;另外,由于气候关系,辐射到地球表面的太阳能是断断续续的。这样就必须解决大规模获取太阳能的方法和适于长期储存和远距离输送的问题。到目前为止,还没有找到在经济上和技术上达到这一目标的满意方法。

当前,主要是利用光电转换和光热转换方法利用太阳能。即利用光电电池把太阳光直接转换成电(如许多空间卫星就是用这种方法供电),或把太阳能首先转换成热,再用热能驱动蒸汽涡轮机或发电机。由以色列一家公司设计的发电量约400兆瓦的一家太阳能电厂已在美国加利福尼亚的盖达特运转。但这两种方法都不能解决长期储存太阳能和远距离输送的问题。

能满足储存和远距离运送太阳能这两种需求的方法是把太阳能转换成化学制品。许多化学制品可以用管道输送和以气体、液体或固体的形式储存,然后用作燃料。

用太阳能生产化学燃料的试验大多以氢为中心。氢是可燃气体,且很容易通过电解水来生产,它既可以储存又可以远距离输送。现在,沙特阿拉伯正在和德国合作,建造一家用太阳能生产氢的工厂,其中包括建造一个350千瓦容量的光电转换装置和一个生产氢的电解厂。

电解生产氢的总效率约8%(光电转换效率约12%,电解水的效率约70%)。

有些国家,特别是挪威和加拿大也在用太阳能生产氢,但这些氢有时是作为合成氨的化工原料使用而不是作为燃料。

在以色列雷霍沃特的韦斯曼(Weizman)科学院建造了一个太阳能塔,用以聚集阳光的热量来生产化学燃料,可以产生兆瓦以上电力的太阳能装置也已经建成。

除用太阳能直接电解水生产氢外,还可以利用太阳能推动SO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O等的化学反应生产氢。例如:

1. 利用太阳能产生的热量,促使硫酸高温分解: $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 0.5\text{O}_2$ 。再添加碘产生碘化氢: $\text{I}_2 + \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HI} + \text{H}_2\text{SO}_4$ 。随后碘化氢热分解得到氢: $2\text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2$ 。美国加利福尼亚圣迭戈通用原子能(General Atomics)公司开发了这种生产氢的方法。

2. 威斯汀豪斯公司开发了第二种用太阳能生产氢的方法(电解法): $\text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$ 。这种方法的优点是只需施加0.29伏的电压,比用水直接电解生产氢需要加2伏电压小得多。

3. 意大利的伊斯帕拉(Ispra)实验室开发了第三种利用太阳能生产氢的方法,也是电解法,这种方法还要利用溴(Br<sub>2</sub>)。 $\text{Br}_2 + \text{SO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HBr} + \text{H}_2\text{SO}_4$ ,然后,对溴化氢分子加0.62伏的电压进行电解就能得到氢: $2\text{HBr} \rightarrow \text{H}_2 + \text{Br}_2$ 。

(王竟 摘译自《科学美国人》1991年12月号)