

电磁场暴露对生物组织电磁特性的影响 *

李 滚¹⁾ 庞小峰^{1, 2)**}

(¹⁾ 电子科技大学生命科学与技术学院生物物理与生物电子学实验室, 成都 610054; (²⁾ 中国科学院国际材料物理中心, 沈阳 110015)

摘要 电磁辐射严重影响着人体的健康. 电磁场生物效应的发生机制与电磁场本身的特性相关, 同时也与生物组织在电磁场作用下电磁特性的改变密切相关. 生物体内的信号分子、自由基以及磁颗粒等处于外加电磁场中时其电磁特性会发生变化, 尤其是不同频率电磁场暴露作用下生物组织的导电、介电以及磁学等特性会有非常显著的区别. 明确不同频率电磁场作用下生物组织电磁特性的变化规律是研究电磁场生物效应发生机制以及预防问题的关键. 综述了近年来电磁场对于生物组织电磁特性影响的研究成果, 并对未来的研究方向做了展望.

关键词 电磁辐射, 生物效应, 生物组织, 电磁特性

学科分类号 Q6, TL7

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2010.00537

近年来, 各国学者对电磁场生物效应的表现及发生机制进行了大量的研究, 与电磁场相关的正面生物效应和负面生物效应均有大量报道^[1-4]. 无论是电磁场的正面生物效应还是负面生物效应, 其产生的方式都是通过电磁场对生物组织(包括细胞、体液、自由基等)特性的改变表现出来的^[5]. 因此, 电磁场与生物体相互作用的本质是电磁场与构成生物体各个层次物质之间的相互作用, 研究生物组织的电磁特性是研究电磁场与生物体之间相互作用的基础, 对于电磁辐射影响生物组织电磁特性的研究, 可以明确电磁场生物效应产生的微观机理, 从而进行有效地防止或者减少电磁场对生物体的负面影响. 从电磁学角度来看, 生物体是由大量细胞构成的具有复杂电磁性质的容积导体, 对于生物体在电磁环境下其电磁性质改变的研究, 可以揭示电磁场中生物体对于电磁能量的吸收及其与电磁场之间的耦合特性. 电磁场对于生物体电磁特性的影响在诸多领域都将得到具体应用, 例如生物体阻抗成像、电磁剂量以及电磁辐射的防护等^[6-8]. 本文主要综述近年来电磁场对于生物组织电磁特性影响的研究成果.

1 电磁场对生物膜电磁特性的影响

1.1 电磁场对于细胞膜电磁特性的影响

电磁场对生物体的作用是生物学效应, 其大多是通过细胞的作用来实现的, 细胞膜具有低漏电特性, 在电磁场的作用下, 细胞膜表面会产生极化现象. Caterina 等^[9]在理论上研究了红细胞的电磁特性, 通过建立细胞膜的电磁学模型对细胞膜的介电常数进行了理论上的计算, 并证实了细胞极化状态对于外加电磁场的依赖情况. 对于细胞膜电阻的具体数值还没有确定, 学术界通常认为细胞膜的电阻率在 $0.1 \sim 1 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 细胞膜容性成分的阻抗为 $(2\pi fC)^{-1}$, 因此随着频率的升高, 膜阻抗的值会下降, 当外场频率大于 100 MHz 的时候, 细胞膜的阻抗特性与细胞液阻抗特性相近, 此时细胞膜的充电效应会随着频率的升高而快速地下降.

* 国家重点基础研究发展计划(973)(212011CB503701)资助项目.

** 通讯联系人.

Tel: 028-83202595, E-mail: pangxf2006@yahoo.com.cn

收稿日期: 2010-10-14, 接受日期: 2010-12-02

Prodan 等^[10]从理论上计算了外加电磁场对于细胞膜极化特性的影响, 得到了细胞膜电磁特性随着外场频率特性变化而变化的结果. 研究结果显示, 细胞膜的介电常数随着外场频率的升高而降低, 当细胞膜处于高频($f > 10^5$ Hz)电磁场中其介电常数趋近于 0, 显示了在高频范围内, 细胞膜的组成成分随着外加电磁场的变化不会发生明显的响应, 也说明了在高频电磁场对于细胞不会产生明显的生物学效应, 能够对于生物细胞产生生物学效应的主要是低频电磁场, 且频率越低的电磁场的生物效应越明显. Sonja 等^[11]在理论上建立了一个可靠的细胞组织模型, 考虑了离子通道、蛋白质和细胞器等方面的影响因素, 研究了在兆赫范围电磁场作用下生物组织的介电色散特性是由于细胞膜的界面极化所致. 处于极化状态下的细胞膜内外带电离子浓度会发生明显的变化, 因此, 外加电磁场对于细胞膜的极化可以对细胞跨膜分子的特性产生影响, 也会对于细胞内外物质交换产生影响.

1.2 脉冲电磁场对于血脑屏障通透特性的影响

宽频脉冲电磁场通过对细胞的强烈极化进而能够引起细胞膜产生一定程度的电穿孔, 即改变细胞膜的通透性, 在细胞膜上出现的孔洞形成了可以让大分子通过的穿膜通道. 有实验研究发现, 对于血脑屏障(blood brain barrier, BBB)通透性影响较强的是极低频脉冲电磁场, 在高频范围内, 脉冲电磁场对 BBB 的通透性改变不明显^[12]. 电子科技大学生物物理与生物电子学实验室联合第四军医大学放射医学系开展了应用电磁脉冲开放 BBB 的实验研究^[13], 用不同宽频带强脉冲电磁场对大鼠进行照射, 研究了 BBB 开放程度与外加电磁脉冲的场强、频率和辐照时间的量效关系, 明确了由 BBB 开放所引起的脑组织和血脑屏障组织损伤、破坏等负面效应的程度. 研究结果显示, 随着电磁脉冲场强和脉冲次数增加, 标志 BBB 通透性变化程度的伊文思蓝(EB)光斑面积显著增加并且呈现可逆性改变. 同时, 我们用 Nexus 670FT-IR 红外光谱与 F700 荧光光谱仪测量大鼠脑部组织额叶分子结构的改变情况时发现, 大鼠脑组织的红外光谱与荧光光谱的峰值位置没有改变, 但峰值的强度发生了变化, 表明开放所用的脉冲电磁照射作用于大脑组织时并没有使分子的结构和构象发生变化(待发表). 因此, 脉冲电磁场对大鼠脑部组织产生的损伤是非常小的, 从而使 BBB 开放的技术得到了发展, 将为脑肿瘤等脑部疾患的直接施药治疗提供一个新的方法.

2 电磁场对生物分子电磁特性的影响

2.1 电磁场对细胞间信号分子的影响

电磁场可使分子产生扭曲、离子或电子错位、震动、旋转或改变分子极性的方向. 在生物体的信息转导过程中, 尤其是在细胞间的信号转导过程中, 只有少部分信号可以直接引起细胞的生理反应, 多数信号必须先被细胞膜上的受体识别, 然后通过膜上的信号转换系统, 转变为细胞内信号, 进而实现细胞间的信号转导功能, 实现调节细胞的代谢活动和生理功能.

Philippova 等^[14]研究了 900 MHz 脉冲电磁场可作用于鼠嗅觉化学受体的特殊配体上, 说明射频(radio frequency, RF)电磁场的受体是特异的, 此外还证明 RF 场可减轻 Ach 诱导的 Na^+ 通道的开放率, 但其机制尚不明确. Byus 等^[15]报道暴露于 RF 场可降低依赖 cAMP 蛋白激酶的活性, 这将影响细胞跨膜信息在细胞内的表达, 从而影响细胞的代谢功能. 近来, Akira 等^[16]通过研究发现, 极低频电磁场对于细胞的影响可以通过极化细胞膜进行刺激的 p38 MAPK 信号通路, 通过研究发现 PI3K 通路可能参与抑制胶原合成. Yang 等^[17]通过电磁场照射小胶质细胞(N9 microglia cell)的信号转导通路, 结果表明, 电磁场可以触发小胶质细胞活化, 并产生促炎反应, JAK2 和 STAT3 通路可能是减少电磁场激活小胶质细胞促炎症反应的治疗靶点. 目前一般认为, 电磁场与细胞作用的初始位点是细胞膜, 随后触发的一切反应都由细胞膜介导, 细胞膜上的细胞信号系统在介导电磁场作用中扮演着重要角色.

2.2 电磁场对自由基的影响

自由基的寿命非常短暂, 并且具有较高的活性, 可以在生物分子之间高速碰撞直至和周围环境重新组合、磁场可以改变自由基的旋转状态, 进而可能会改变其重新组合的可能性, 同时也可能会改变自由基与周围生物分子之间高速碰撞的特点. Alastair 等^[18]研究发现, 微波频率可以通过施加极化松弛机制对于自由基进行作用, 进而改变自由基可能的化学反应. 因为自由基具有极短的寿命, 在高频($f > 10^5$ Hz)电磁场作用下自由基所受的影响较小, 而在低频电磁场作用下, 自由基对于外加电磁场的应答特性表现得非常明显, 这与自由基的荷质比以及外加电磁场的特性密切相关. 苏海峰等^[19]考察了海马神经元在 50 Hz 频率下进行 0.1 mT、0.5 mT

和 1.0 mT 电磁场暴露 48 h 后活性氧簇(reactive oxygen species, ROS)水平, 暴露于 0.1 mT, 0.5 mT 和 1.0 mT 电磁场海马神经元的 ROS 水平有显著性提高. 暴露于 0.1 mT 和 0.5 mT 电磁场的 ROS 水平与自由基清除剂+电磁场(trolox+EMF)组比较没有差异, 暴露于 1.0 mT 电磁场的 ROS 水平比 trolox+EMF 组有显著性提高, 表明电磁场可以促进细胞自由基的产生. Eichwald 等^[20]在理论上研究了酶反应中磁场对于自由基的影响效应, 研究表明外加磁场可能会导致自由基的重组. Henbest 等^[21]通过研究射频电磁波对于自由基重组反应的影响, 认为自由基对于射频电磁波的响应特性可用于临床诊断.

3 电磁场对于宏观生物组织电磁特性的影响

3.1 电磁场对生物组织介电特性的影响

生物组织也具有介电色散的特性, 其色散的特性是指由于电偶极子或者偶电层介电弛豫所造成的介电损耗特性. 生物组织电磁特性的测量技术与方法在近年来取得了重大进展^[22-23]. Patrick 等^[24]从理论上分析研究了生物体介电常数、电磁场幅值以及频率对于生物体吸收电磁剂量的影响, 对于不同数值生物体的介电常数与电磁场的吸收特性进行了比较, 确定了生物体介电常数对生物体电磁剂量吸收的具体影响的关系. 在静电场的情况下, 生物组织的介电常数是固定的, 而实际环境中存在的电磁场大都是时变场, 所以需要进一步考察在时变场环境下生物组织的介电特性. Grant 和 Tamuta 等^[25-26]分别对于人体活体皮肤的电导率进行了检测, 检测结果显示, 随着外场频率的增加, 人体皮肤的电导率呈现下降的趋势. 当然, 人体不同部位皮肤的电磁特性也有所不同, 例如手掌部位由于存在着丰富的汗腺而具有较高的介电率.

在电磁场对于人体内部组织电磁特性影响方面, Tofighi^[27]研究了肌肉和脂肪组织在 0.5~30 GHz 时的色散特性, Asami^[28]研究了细胞破坏对于其介电特性的影响, 结果表明在细胞破坏时会产生介电松弛现象, 说明了细胞膜对于维持细胞介电特性的独特作用. Rourke 等^[29]考察了频率在 0.5~20 GHz 范围内的电磁场对于人体正常组织以及肝硬化肝组织介电特性的影响, 分别做了在体测量和体外测量, 统计结果显示了在体测量和体外测量有显著差异.

3.2 电磁场对生物组织导电特性的影响

人体组织的导电特性是其重要的电磁性质之一, 对于皮肤组织导电特性的研究较多^[30], 但是对生物体内部组织导电特性的研究比较困难, 尤其是开展在体测量更为困难. 在理论方面, Rosa 等^[31]研究了自然环境中各类电磁场对于不同细胞的影响, 并对地磁场以及雷电与细胞之间的相互作用进行了较为深入的研究. 在动物实验方面, Tutku 等^[32]分别测定了 402~405 MHz 和 2.4~2.48 GHz 范围内电磁辐射情况下大鼠组织的电导率. Rourke 等^[33]分别对于正常肝组织、恶性肿瘤肝组织和肝硬化肝组织的导电特性进行了在体测量和体外测量, 研究结果显示在 0.5~20 GHz 范围内肝组织的电导率随着频率的增加而增加. Mariya 等^[34]对于正常乳腺组织、良性肿瘤以及恶性肿瘤的乳腺组织在 0.5~20 GHz 范围内的导电特性进行了测量, 研究发现, 恶性肿瘤组织的介电常数较高, 但是随着频率变化, 其变化范围较小, 同时也发现良性肿瘤乳腺组织的介电常数与含水量较高的正常乳腺组织的介电特性相似. 众多的研究结论均表明, 随着外加电磁场频率的升高, 生物组织的导电特性发生较大的变化, 尤其在高频范围内($f > 10^5$ Hz), 生物组织的电导率随着频率的升高而迅速升高^[26].

3.3 生物组织的磁性

生物组织的磁性可通过外加电磁场使之磁化来进行测量. 绝大部分生物组织会表现出微弱的抗磁性, 组成生物分子或者原子都有多个电子轨道, 电子在围绕电子轨道绕核运动的同时会作自旋运动, 这种自旋运动将会产生相应的磁矩, 当生物分子处于外加电磁场中时, 磁矩就会受到电磁场的作用, 进而会由于发生取向的改变而表现出磁性, 但有些含有过渡族金属(Fe、Co、Cu 等)离子或颗粒的生物组织处于电磁场中会表现出顺磁性. 与电学特性相比, 生物组织的磁学特性更为复杂, 较多生物, 如家鸽、鲑鱼、趋磁细菌以及人等, 体内都含有磁颗粒, 家鸽体内的磁颗粒可用于辨别方向, 另外, 人体内由于外界入侵的磁颗粒也会使组织表现出磁性(如铁矿石粉末通过呼吸道进入肺部可以产生肺磁, 神经、肌肉等组织活动时电传导也可以产生磁场). 探测生物组织磁特性一般使用超导量子干涉仪(superconductivity quantum interference device, SQUID)在磁屏蔽良好的情况下才能有效地进行, SQUID 可用于颅脑手术前病灶的精确定位,

也可用于神经药物作用的测定等方面^[35-36]. Pannetier 等^[37]近年来还发展了微磁测量技术, 给体内磁颗粒的测量带来了新的手段. Zhao 等^[38]提出了表征趋磁细菌磁性的参数, 并通过改造分光光度计增加磁发生装置, 在未改变细菌形态的基础上研究了趋磁细菌在脉冲磁场作用下的磁特性, 为研究体内磁颗粒的形成提供了有效的手段. Ritz 等^[39]通过研究认为, 许多鸟类可以感受地磁场并被无线电波干扰, 另外还发现鸟类可能是利用眼睛系统的感光色素来感应地磁场, 进而实现其辨别方向的功能. 磁感受的生物学发生机制及其信号传导通路是当前电磁学研究的一个热点问题.

4 生物组织电磁特性的应用

生物组织的电磁特性会随着外加电磁场特性的变化而变化, 在考虑电磁场生物效应的时候需要明确不同电磁场作用情况下生物组织的电磁特性, 同时研究电磁场生物效应时一个最基本的问题就是生物组织电磁辐射的吸收比率 (specific absorption rate, SAR) 问题. SAR 是目前学术界公认的生物组织吸收电磁剂量学量, SAR 与生物组织的电导率、外场强度和生物组织的介电特性等因素有关, 按照平均的组织区域不同, SAR 又分为全身平均 SAR (whole-body-averaged SAR) 和局部 SAR (local SAR). Gaj 等^[40]基于人体组织电磁参数在建立人体模型的基础上进行了相关的研究, 通过不同的人体组织电磁参数计算了不同频率下组织对于电磁波的吸收变化情况, 对于电磁场与生物系统相互作用的研究提供了新的视角. Schmid 等^[41]对于人体松果腺在手机辐射影响下介电特性进行了研究, 主要考察了 400~1 850 MHz 的电磁辐射对于人体松果腺介电特性的影响, 研究结果表明人体松果腺对于在该范围内的电磁波辐射的吸收比例远远小于国际规定的标准. 并且研究结果还说明了温度对于辐射比率不会产生影响, 同时也有相关的研究发现不同年龄阶段的人对于电磁辐射的吸收比率也不相同^[42], 主要是由于不同年龄阶段人体组织的含水量不同造成的. 另外, 由于生物组织电磁特性决定了电磁场生物效应的发生与发展, 还需要精确地测量电磁场对于生物组织电磁特性的影响, 尤其是处于电磁场中生物组织的电磁特性在体测量问题非常棘手. 生物组织本身也存在各种电生理活动以及外加电磁场会造成电磁噪声, 如何将电磁场对于生物分子的影响从生物分子本身电磁特性以及外加电磁场区分开是

研究生物组织电磁特性及其应用的重要问题.

电子科技大学生物物理与生物电子学实验室应用已有的人体电磁参数结合电磁场理论, 研究了不同频率电磁波在人体组织内传播过程中的衰减特性 (图 1). 研究结果显示, 在低频 ($f < 10^6$ Hz) 情况下, 电磁辐射在人体内近乎无衰减传播, 但是在高频范围内 (频率大于 100 MHz), 电磁辐射在人体组织中传播的穿透能力很弱, 主要在人体的表皮组织转化为焦耳热 (待发表). 水作为生物组织的重要组成部分, 电子科技大学生物物理与生物电子学实验室对于水分子在电磁场作用下其特性的变化也展开了大量的研究^[43-45], 为进一步探明电磁场对于生物组织电磁特性的影响奠定了理论基础. 另外, 也有学者对在太赫兹范围内电磁辐射与生物组织之间的相互作用进行了研究, 发现肿瘤组织对于太赫兹范围内的电磁波吸收率相对较大, 使得利用太赫兹技术检测肿瘤的发生与发展成为可能^[46]. Nevzat 等^[47]利用人体头部组织的电磁特性对于脑电波的影响试图寻求新的人体组织电磁特性的测量方法, 并将其具体应用到医学领域.

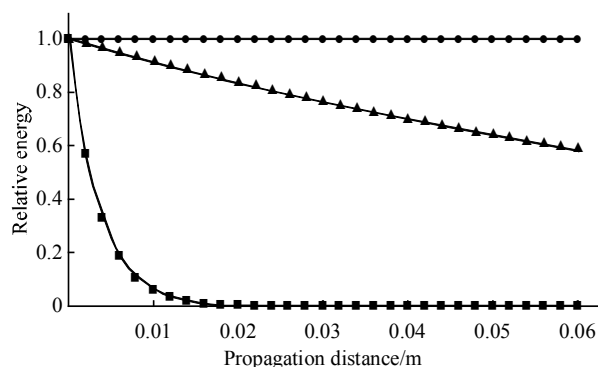


Fig. 1 Attenuation characteristics of electromagnetic fields propagation in the human body

图 1 电磁场在人体内传播的衰减特性

●—●: 1 000KHz; ▲—▲: 1 00MHz; ■—■: 900MHz.

5 结论与展望

世界卫生组织(WHO)非常关注电磁场暴露引起的各类生物效应问题, 在 1996 年制定了国际电磁场规划, 以便确定电磁场的安全范围, 同时也提出鼓励高质量集中研究电磁场生物效应的发生机制以便完善对于电磁场危害的认识, 推动了电磁暴露标准的发展. 另外, WHO 于 2007 年 6 月正式发布的《电磁场和公众健康: 极低频场暴露》和《极低频场

环境健康准则》，阐明了 WHO “国际电磁场计划”对电磁场危害健康风险的全面评估结论与政策建议，向各国政府当局提出了健康保护、预防性措施与政策建议。从这一点来说，研究电磁场生物效应的机理也有非常重要的意义。电磁场与生物体相互作用的过程中电磁场的能量会被生物组织部分地吸收，电磁场的生物效应主要通过生物体对于电磁能量吸收的特性表现出来，而生物组织对于电磁场能量的吸收特性主要取决于生物组织的电磁特性，电磁能量在生物组织内分布、损耗特性与生物组织的介电常数、电导率等电磁特性密切相关，同时电磁场也可通过其与自由基以及细胞间信使等生物分子相互作用引起生物效应。我们未来的研究目的主要是明确生物组织电磁特性随着电磁场变化而变化的特性，这也是明确电磁场生物效应发生机制的基础；还要加强活体组织在电磁环境下各类电磁特性测量方面的研究，建立起严格的生物组织电磁特征参量与外加电磁场之间的关系；同时，我们还需要进一步应用电磁场理论、生物电解质理论和生物电磁学理论进行深入广泛的理论研究，以此用来建立生物效应和电磁场之间的关系，进而能够明确电磁场生物效应的发生机制，为电磁辐射的医学防护研究奠定基础。

参 考 文 献

- [1] Prodan E, Prodan C, Miller J H. The dielectric response of spherical live cells in suspension: an analytic solution. *Biophysical J* Volume, 2008, **95**(11): 4174-4182
- [2] Gaj P, William D H, Ziriak J M, *et al.* Parametric dependence of SAR on permittivity values in a Man model. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2001, **48**(10): 1169
- [3] 左红艳, 王德文, 彭瑞云, 等. 电磁辐射对原代培养海马神经元的损伤效应及其机制探讨. *生物物理学报*, 2007, **23**(1): 47-53
Zuo H Y, Wang D W, Peng R Y, *et al.* *Acta Biophysica Sinica*, 2007, **23**(1): 47-53
- [4] Solov'yov I A, Chandler D E, Schulten K. Magnetic field effects in *Arabidopsis thaliana* cryptochrome-1. *Biophys J*, 2007, **92** (8): 2711-2726
- [5] Biasio A D, Cametti C. Polarizability of spherical biological cells in the presence of localized surface charge distributions at the membrane interfaces. *Phy Rev E*, 2010, **82**(2): 021917
- [6] Neven S, Donald T H. FDTD simulation of exposure of biological material to electromagnetic nanopulses. *Phys Med Biol*, 2005, **50**(2): 347-360
- [7] Hawkins A R, Schultz S M, Oliphant T E. Fast nonlinear image reconstruction for scanning impedance imaging. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2008, **55**(3): 970-977
- [8] Lange T, Schilling A F, Peters F, *et al.* Proinflammatory and osteoclastogenic effects of beta-tricalciumphosphate and hydroxyapatite particles on human mononuclear cells *in vitro*. *Biomaterials*, 2009, **30**(29): 5312-5318
- [9] Caterina M, Micaela L, Francesca A, *et al.* A 3-D microdosimetric study on blood cells: A permittivity model of cell membrane and stochastic electromagnetic analysis. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, **58**(3): 691
- [10] Prodan E, Prodan C, Miller J H. The dielectric response of spherical live cells in suspension: An analytic solution. *Biophysics J*, 2008, **95**(9): 4174
- [11] Sonja H, Daniel E, Jurg F. Modeling effective dielectric properties of materials containing diverse types of biological cells. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, **43**(36): 365405
- [12] Henrietta N, Gustav G, Jacob L E, *et al.* Radiofrequency and extremely low-frequency electromagnetic field effects on the blood-brain barrier. *Electromagnetic Biology Medicine*, 2008, **27**(2): 103-126
- [13] Ding G R, Qiu L B, Wang X W, *et al.* EMP-induced alterations of tight junction protein expression and disruption of the blood-brain barrier. *Toxicology Letters*, 2010, **196**(3): 154-160
- [14] Philippova T M, Octoselov V I, Alekseev S I. Influence of microwaves on different types of receptors and the role of peroxidation of lipids on recept-protein shedding. *Bioelectromagnetics*, 1994, **14**(2): 183-192
- [15] Byus C V, Kartum K, Pieper S. Increased ornithine decarboxylase activity in cultural cells exposed to low-energy modulated microwaves fields and ester tumour promoters. *Cancer*, 1988, **48**(15): 4222-4226
- [16] Akira S, Toshitaka I, Yohsuke K, *et al.* Effect of exposure to an extremely low frequency-electromagnetic field on the cellular collagen with respect to signaling pathways in osteoblast-like cells. *J Medical Investigation*, 2008, **55**(3-4): 267-270
- [17] Yang X S, He G L, Hao Y T, *et al.* The role of the JAK2-STAT3 pathway in pro-inflammatory responses of EMF-stimulated N9 microglial cells. *J Neuroinflammation*, 2010, **7**(1): 54
- [18] Alastair D S, Edward L, Kristofer J T, *et al.* Dielectric properties of free-radical polymerizations: molecularly symmetrical initiators during thermal decomposition. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2010, **49**(4): 1703-1710
- [19] 苏海峰, 包家立, 李 鹏. 电磁场暴露海马神经元自由基和胞内 Ca^{2+} 的变化. *生物化学与生物物理进展*, 2010, **37**(3): 313-318
Su H F, Bao J L, Li P. *Prog Biochem Biophys*, 2010, **37**(3): 313-318
- [20] Eichwald C, Walleczek J. Model for magnetic field effects on radical pair recombination in enzyme kinetics. *Biophys J* Volume, 1996, **71**(8): 623-631
- [21] Henbest K B, Kukura P, Rodgers C T, *et al.* Radio frequency magnetic field effects on a radical recombination reaction: A diagnostic test for the radical pair mechanism. *J American Chemical Society*, 2004, **125**(26): 8102-8103
- [22] Guhr G, Schmidt H, Weihnacht M. A new tool to assess mechanical and dielectric properties of tissues. 31st Annual International Conference of the IEEE EMBSM, 2009: 729-731

- [23] Patel P, Markx G H. Dielectric measurement of cell death. *Enzyme and Microbial Technology*, 2008, **43**(7): 463–470
- [24] Patrick A M, William D H, Thomas J W, *et al.* Effects of frequency, permittivity, and voxel size on predicted specific absorption rate values in biological tissue during electromagnetic-field exposure. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2000, **48**(11): 2050–2058
- [25] Grant J P, Clarke R N, Symm G T, *et al.* *In vivo* dielectric properties of human skin from 50 MHz to 2.0 GHz. *Phys Med Biol*, 1988, **33**(5): 607–612
- [26] Tamura T, Tenhunen M, Lahtinen T, *et al.* Modelling of the dielectric properties of normal and irradiated skin. *Phys Med Biol*, 1994, **39**(6): 927–936
- [27] Tofghi M R. FDTD Modeling of biological tissues cole-cole dispersion for 0.5 ~ 30 GHz using relaxation time distribution samples. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, **57**(10): 2588
- [28] Asami K. Effects of membrane disruption on dielectric properties of biological cells. *J Phys D: Appl Phys*, 2006, **39**(21): 4656–4663
- [29] Rourke A P, Lazebnik M, Bertram J M. Dielectric properties of human normal, malignant and cirrhotic liver tissue: *in vivo* and *ex vivo* measurements from 0.5 to 20 GHz using a precision open-ended coaxial probe. *Phys Med Biol*, 2007, **52**(15): 4707–4719
- [30] Sunaga T, Ikehira H, Furukawa S, *et al.* Measurement of the electrical properties of human skin and the variation among subjects with certain skin conditions. *Phys Med Biol*, 2002, **47**(1): N11–N15
- [31] Rosa D S, Blanca M. Study of the interaction between biological cells of different shapes and sizes and electromagnetic fields produced by natural phenomena. *Natural Hazards*, 2004, **31**(1): 143–156
- [32] Tutku K, Robert C, Erdem T. Electrical properties of rat skin and design of implantable antennas for medical wireless telemetry. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, **57**(9): 2806–2812
- [33] Rourke A P, Lazebnik M, Bertram J M, *et al.* Dielectric properties of human normal, malignant and cirrhotic liver tissue: *in vivo* and *ex vivo* measurements from 0.5 to 20 GHz using a precision open-ended coaxial probe. *Phys Med Biol*, 2007, **52**(15): 4707–4719
- [34] Mariya L, Dijana P, Leah M C, *et al.* A large-scale study of the ultrawideband microwave dielectric properties of normal, benign and malignant breast tissues obtained from cancer surgeries. *Phys Med Biol*, 2007, **52**(20): 6093–6115
- [35] Hashimoto S, Oda T, Yamada K, *et al.* The measurement of small magnetic signals from magnetic nanoparticles attached to the cell surface and surrounding living cells using a general-purpose SQUID magnetometer. *Phys Med Biol*, 2009, **54**(8): 2571–2583
- [36] Udrea L E, Strachan N J, Badescu V, *et al.* An *in vitro* study of magnetic particle targeting in small blood vessels. *Phys Med Biol*, 2006, **51**(19): 4869–4881
- [37] Pannetier M, Fermon C, Goff G L, *et al.* Femtotesla magnetic field measurement with magnetoresistive sensors. *Science*, 2004, **304**(5677): 1648–1650
- [38] Zhao L, Wu D, Wu L F, *et al.* A simple and accurate method for quantification of magnetosomes in magnetotactic bacteria by common spectrophotometer. *J Biochem Biophys Methods*, 2007, **70**(3): 377–383
- [39] Ritz T, Thalau P, Phillips J B. Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature*, 2004, **429**(7000): 177–180
- [40] Gaj P, William D H, Ziriak J M. Parametric dependence of SAR on permittivity values in a man model. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2001, **48**(10): 1169
- [41] Schmid G, Uberbacher R, Samaras T. The dielectric properties of human pineal gland tissue and RF absorption due to wireless communication devices in the frequency range 400 ~ 1850 MHz. *Phys Med Biol*, 2007, **52**(17): 5457–5468
- [42] Christ A, Gosselin M C, Christopoulou M, *et al.* Age-dependent tissue-specific exposure of cell phone users. *Phys Med Biol*, 2010, **55**(7): 1767–1783
- [43] Pang X F, Feng Y P. Mobility and conductivity of the proton transfer in hydrogen bonded molecular systems. *Chem Phys Lett*, 2003, **373**(3–4): 392–397
- [44] Pang X F. The conductivity properties of protons in ice and mechanism of magnetization of liquid water. *Eur Phys J B*, 2006, **49**(1): 5–23
- [45] Pang X F, Deng B. Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field. *Sci China Ser G*, 2008, **51**(11): 1621–1632
- [46] Hiuk J S. Terahertz electromagnetic interactions with biological matter and their applications. *J Applied Physics*, 2009, **105**(10): 102033
- [47] Nevzat G, Can E A. Sensitivity of EEG and MEG measurements to tissue conductivity. *Phys Med Biol*, 2004, **49**(5): 701–717

Effects of Electromagnetic Field Exposure on Electromagnetic Properties of Biological Tissues*

LI Gun¹⁾, PANG Xiao-Feng^{1,2)}**

¹⁾ *Laboratory of Bio-electromagnetic and Bio-electronic Technology, Institute of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;*

²⁾ *International Centre for Materials Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015, China)*

Abstract Electromagnetic radiations affect human health seriously. Bio-effects of electromagnetic fields mechanisms closely depend on the properties of themselves. Moreover, electromagnetic properties of signaling molecules, radicals and magnetic particles within body will be changed in electromagnetic fields, especially the conductivity, dielectric and magnetic properties of biological tissues will be significant difference when biological tissues exposure to various frequency electromagnetic fields. Identifying the evolution of electromagnetic properties of biological tissues is a key issue to explore underlying mechanisms and prevent electromagnetic bio-effects. Effects and applications of biological tissues in electromagnetic fields are summarized, and several future research directions are put forward.

Key words electromagnetic radiation, biological effect, biological tissue, electromagnetic property

DOI: 10.3724/SP.J.1206.2010.00537

* This work was supported by a grant from National Basic Research Program of China (212011CB503701).

**Corresponding author.

Tel: 86-28-83202595, E-mail: pangxf2006@yahoo.com.cn

Received: October 14, 2010 Accepted: December 2, 2010