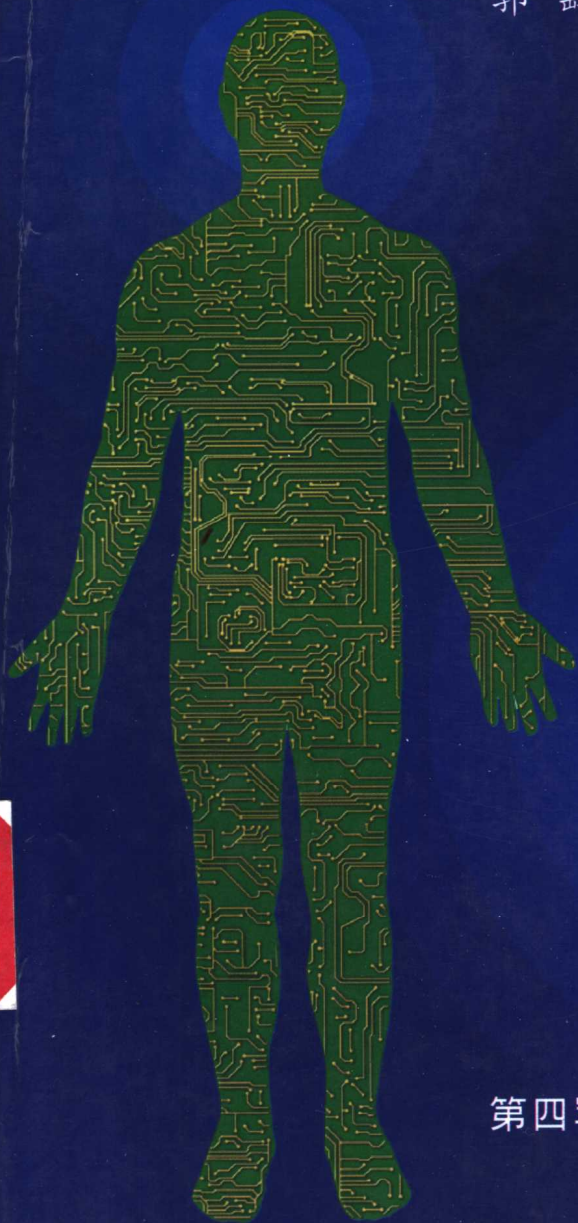
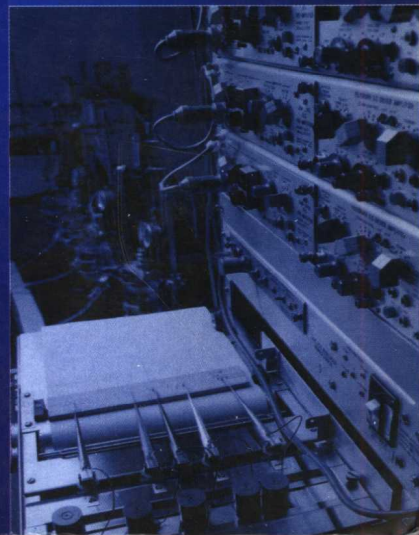


电磁辐射生物效应 及其医学应用

郭 鹄 陈景藻 主编



第四军医大学出版社



电磁辐射生物效应及其医学应用

主 编

郭 鷗 陈景藻

副主编

曾桂英 任东青 郭国祯

编 者

(以姓氏笔画为序)

丁桂荣	王 琦	王 毅	王中和	王文学	王保义
王德文	牛中奇	付一提	任东青	刘文魁	刘亚宁
刘朝晖	孙文均	朱 琨	闫丽萍	宋明银	张 弘
张 峰	张 敏	张安英	张建军	张黄河	李 军
李丹明	李振杰	季爱玲	吴彦卓	陈景藻	屈大信
庞小峰	庞轶兵	林 海	胡大为	赵玉峰	赵梅兰
郝为强	钟金城	钦耀坤	郭 鷗	高 昕	高攸纲
崔玉芳	曹晓哲	黄迪泽	彭瑞云	曾桂英	程 康
韩月东	解恒革				

第四军医大学出版社

内容提要

电磁辐射在工业生产、通讯、交通、日常生活、医疗以及军事等领域得到了广泛的应用,给人类生活、工作带来巨大的益处。但与此同时,电磁辐射也造成了越来越严重的环境污染,影响着人们的健康。本书以综述、实验研究报告的形式介绍了国内外对电磁辐射生物效应研究和电磁波仪器在疾病诊断、治疗中应用的概况;介绍了在整体水平、细胞水平、分子水平上对电磁辐射生物效应研究的新方法、新技术和新进展,同时还介绍了电磁波诊断、治疗仪器的发展、电磁辐射剂量的测定和防护等相关内容。该书可作为从事电磁辐射生物效应研究人员、电磁辐射工程技术人员、电磁波医疗仪器使用人员、大专院校学生学习相关内容的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

电磁辐射生物效应及其医学应用/郭鹂,陈景藻主编.—西安:第四军医大学出版社,2002.2
ISBN 7-81086-002-X

I. 电… II. ①郭…②陈… III. ①电磁辐射—生物效应②电磁辐射—防护③电磁辐射—应用—医学 IV. R594.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 002682 号

第四军医大学出版社出版发行

(西安市长乐西路 17 号 邮政编码: 710032)

电话: 029-3376765 (发行部) 029-3376763 (总编室)

传真: 029-3376761 E-mail: fmmup03@fmmu.edu.cn

第四军医大学印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 17.25 字数: 404 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1~1000 册 定价: 29.00 元

ISBN 7-81086-002-X/R·5

(购买本社图书, 凡有缺、损、倒、脱页者, 本社负责调换)

前 言

电磁辐射包括电离辐射(γ 射线、x射线)和非电离辐射(无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线等),而非电离辐射则常被人们俗称为电磁辐射。电与磁常相伴而存在。随着人类社会的进步和科学技术的飞速发展,电器的使用也随之成为人们日常生活和工作中不可缺少的部分,电磁辐射对人类的影响也日益扩展。自十九世纪末伦琴发现x射线以来,人们对电离辐射已有了较为深入的了解,同时也拥有了一系列防护措施。但对于非电离辐射,却知之有限。本书仅对非电离辐射的生物效应及其医学应用进行讨论。

电磁辐射对人类的贡献大多集中在工业、通讯、医疗和军事等方面,而对人类的影响却涉及到与人们日常生活息息相关电脑、移动通讯、广播、电视、家用电器和各种各样含有电磁设备的工作环境。因此,深入开展电磁辐射对生物体的损伤效应、损伤机理、防护和用于疾病的诊断、治疗等方面的研究已成为人们关注的热点之一。

为了加强学术交流,促进多学科的合作,由中国电子学会电磁辐射生物学专业委员会和毫米波医学应用专业委员会联合主办,第四军医大学预防医学系放射医学教研室承办了首届“全国电磁辐射生物效应及其医学应用”学术研讨会,来自全国各地的专家、教授和同行就电磁场的生物效应、微波生物效应及其医学应用进行了学术交流。为使学术交流更加广泛,应与会代表和各界人士的要求,我们将会议交流中的部分论文进行整理,汇编成书,希望能给广大读者、科研工作者带来启迪,促进这一领域研究的不断深入。

在此书的编辑、整理过程中,西安电子科技大学牛中奇教授给予了大力支持和帮助,第四军医大学放射医学教研室全体同志和第四军医大学印刷厂同志们付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心的感谢!

由于本书内容涉及多学科和多专业,而我们的水平有限,故文中尚有不尽完善之处,敬请指正。

编 者

2001.12.30

目 录

第一篇 电磁场的生物效应及其安全防护

1. 辐射、电磁辐射、辐射效应与防护	郭 鹄 (1)
2. 再谈工频磁场对人体健康的危害影响	高攸纲等 (4)
3. 工频磁场对应激活化蛋白激酶信号转导途径的影响	孙文均等 (7)
4. 60Hz 磁场对培养的乳腺癌细胞凋亡及凋亡相关蛋白表达的影响	丁桂荣等 (13)
5. 极低频电磁场生物学效应的研究现状	王德文等 (17)
6. 极低频电磁场与肿瘤危险度关系的细胞水平研究现状	丁桂荣等 (24)
7. 极低频电磁场生物学效应的动物实验研究现状	丁桂荣等 (29)
8. 极低频电磁场暴露健康危害的流行病学研究现状	丁桂荣等 (34)
9. 极低频磁场辐照对细胞间隙连接通讯功能的作用及其阈值研究	傅一提等 (38)
10. 60Hz 磁场对培养的乳腺癌细胞细胞周期及 P21 蛋白表达的影响	丁桂荣等 (42)
11. ELF 脉冲电磁波在癌细胞上的生物学窗效应	牛中奇等 (47)
12. 电磁暴露与老年痴呆	解恒革等 (50)
13. 某导航台电磁场对人体部分生理指标的影响	李振杰等 (54)
14. 某导航台电磁场对人体影响的卫生学调查	李振杰等 (58)
15. 脉冲强磁场对小鼠 H22 肝癌杀伤作用的实验研究	胡大为等 (63)
16. 利用电磁辐射引起细胞膜穿孔进行癌症治疗的研究	王保义等 (67)
17. 高强度电磁脉冲对猴淋巴细胞及免疫功能损伤机理的探讨	崔玉芳等 (70)
18. 电磁脉冲辐射对猕猴凝血机制影响研究	彭瑞云等 (73)
19. 电磁脉冲对肺癌细胞株 A549 损伤的研究	曹晓哲等 (76)
20. 电磁脉冲与细胞膜功能	赵梅兰等 (80)
21. 脉冲电磁场对犬红细胞的影响	林 海等 (85)
22. 低幅度瞬态电磁脉冲引起细胞膜穿孔的实验研究	张 弘等 (87)
23. 移动通讯电磁辐射对人体的影响	吴彦卓等 (90)
24. 手机辐射近场中人头颅内部的 SAR 分布	高 昕等 (97)
25. 某导航台电磁场职业安全管理措施	李振杰等 (101)
26. 磁共振成像系统的人体安全性	韩月东等 (105)
27. 1.5T 磁共振成像系统与人体安全性观察	韩月东等 (108)
28. 电磁辐射污染、影响与治理浅述	刘文魁 (111)

29. 浅谈影响城市电磁辐射环境质量的几个主要污染源 李 军 (113)
30. “大哥大”基站电磁辐射调研及居民环境超标原因分析 王 毅等 (116)
31. 电磁辐射危害与防护 赵玉峰等 (118)

第二篇 微波的生物效应及其医学应用

1. 关于毫米波生物学作用机理研究和临床应用的若干问题 陈景藻 (123)
2. 毫米波在我国医学生物学领域的文献分析 王文学等 (135)
3. 微波非热生物效应的机理及其特性研究 庞小峰 (138)
4. 非热效应的几种理论和假说 刘亚宁 (145)
5. 微波热效应机理的实验研究 张安英等 (148)
6. 毫米波生物热效应产生的机理和特性 庞小峰等 (150)
7. 毫米波对细胞内外离子浓度的影响 牛中奇等 (156)
8. 毫米波辐射对大鼠海马组织中谷氨酸、 γ -氨基丁酸等含量的影响 刘朝晖等 (160)
9. 国外毫米波疗法在肿瘤治疗中的应用 钦耀坤 (163)
10. 国内毫米波疗法治疗癌症的基础和临床研究新进展 黄迪泽 (171)
11. 高功率密度毫米波联合放射对肿瘤细胞抗瘤效应的实验研究 王中和等 (175)
12. HPT 毫米波治疗癌转移疼痛的临床研究 黄迪泽等 (180)
13. 毫米波治疗中、重度癌性疼痛的临床研究 张建军等 (183)
14. 化疗联合 HPT 毫米波治疗晚期肺癌的临床研究报告 黄迪泽等 (186)
15. 毫米波非肿瘤临床应用研究 张 峰 (190)
16. 毫米波医疗技术运用于运动系统疾患的论证 张黄河 (202)
17. 毫米波在骨折创伤愈合中的临床疗效观察 宋明银 (206)
18. 厘米波生物效应的研究 郭 鹂 (208)
19. 微波在冠心病诊疗中的应用进展 程 康等 (212)
20. 微波致癌作用的分子机理 庞轶兵等 (219)
21. 微波对人视网膜色素上皮细胞的增殖和形态学影响 季爱玲等 (225)
22. 电磁辐射对机体一氧化氮的影响的研究进展 李丹明等 (229)
23. 2450MHz 微波对受照小鼠骨髓增殖能力的影响 曾桂英等 (233)
24. 电磁辐射对学习记忆影响的分子机制 王 琦等 (236)
25. 2450MHz 微波照射对雄性小鼠生殖系统的影响 任东青等 (241)

第三篇 电磁波诊断、治疗仪及

电磁辐射剂量测定与防护

1. 毫米波诊断技术发展概况 屈大信 (244)
2. 激光毫米波治疗仪的研究 郝为强等 (248)
3. 211 胶囊 (康辐灵) 对电磁辐射损伤的防治作用 郭 鹞 (252)
4. 波导法测氨基酸及碱基的损耗 钟金诚等 (253)
5. 一种低频电磁成像方法 闫丽萍等 (255)
6. 同轴线测量生物组织电特性参数的反演计算 张 敏等 (259)
7. 电磁辐射测量仪器及发展动态简介 朱 琨等 (264)

第一篇 电磁场的生物效应及其安全防护

辐射、电磁辐射、辐射效应与防护

郭 鹞

(第四军医大学放射医学教研室 西安 710032)

【摘 要】 本文介绍了辐射、电磁辐射以及辐射效应的研究与防护的一些基本概念, 以及这些概念之间的内在联系, 以供电磁辐射研究者参考。

【关键词】 辐射; 电磁辐射; 辐射效应; 防护

辐射是一种能量传递方式, 能量通过一点向周围辐射传递, 中介质可能是真空、空气(或其它气体)。介质不同, 传递的速度也不同。

一般认为辐射可分为两大类, 即粒子辐射与电磁辐射。粒子辐射一般是带一定能量并有一定质量的粒子(如电子、质子、中子、负介子和带电重粒子等), 在粒子高速运动下, 消耗自己的功能, 将能量传递给其它物质; 电磁辐射则是一种带能量的电磁波, 它仅有能量而无静止质量。

无论电磁辐射或粒子辐射, 能量可有所不同。能量高时, 冲击物质可以使物质的核或外围的电子脱离原有位置, 形成自由电子, 或跃迁到能量较高的能级, 产生物质的电离或激发, 这一类称为电离辐射, 而能量较低的电磁波或粒子, 能量还不足以引起物质电离, 称之为非电离辐射^[1, 2]。

电磁辐射根据其频率与波长又可分为许多频段与波段(见表 1, 2)。

随着科学迅速的发展, 人们对生命的了解不断深入, 从而逐渐走近“生命”。克隆细胞、克隆动物、克隆人类自己; DNA、RNA、蛋白质、基因图谱的完成, 只是标志

着人们靠近了生命。从物理学、化学角度理解, 也是从无机物、有机物的组成—原子与分子的角度理解, 原子组成分子有赖于原子间键长、夹角、扭角之间的电磁力, 分子原子结合间有强键、弱键的结合能。一句话, 人们逐渐了解了生命的组成基础、柱石。用这些柱石如何堆在一起产生了“生命”, 至今还是一个谜^[3]。

尽管生命起源还是朦胧莫测, 但人们探索到电磁在生命柱石间起着不可比拟的作用。细胞所有的代谢过程、信息传导过程都与电磁有关。在生物发展的过程中, 电磁起着极其重要的作用, 太阳电磁波、地球电磁场伴随了整个生物进化、分化, 在生物个体发育过程中电磁场也起着不可忽视的作用, 如 Makoto Asashima 等在 1991 年报道, 将蝶螈幼虫 (*Cyheps pyrhogaster*) 置于磁力线 5nT 环境下(约低于正常环境 10000 倍) 5d, 发现出现畸形、双头、露肠, 还有脊椎弯曲、眼畸变等。

就生命本身而言, 它就是充满活力的电活动。而外界(机体之外)的电磁波对生命的电活动肯定有所影响。对生命活动有益的影响, 我们统称为正效应; 而对机体生命活

动产生不利的影响,我们称之为负效应(或危害)。人类想利用其正效应为人类服务(特

别是医疗作用),防护其危害(损伤),就必须对电磁效应进行深入细致研究。

表 1 电磁辐射谱(包括电离与非电离辐射)

名 称	波长(真空中)	频率(Hz)	能 量(ev)
无线电波	$10^4 \text{ m} \sim 1 \text{ m}$	$3 \times 10^4 \sim 3 \times 10^8$	$1.24 \times 10^{-10} \sim 1.24 \times 10^{-6}$
微波	$1 \text{ m} \sim 1 \text{ mm}$	$3 \times 10^8 \sim 3 \times 10^{11}$	$1.24 \times 10^{-6} \sim 1.24 \times 10^{-3}$
红外波	$1 \text{ mm} \sim 0.8 \mu \text{ m}$	$3 \times 10^{11} \sim 3.7 \times 10^{14}$	$1.24 \times 10^{-3} \sim 1.24 \times 1.55$
可见光	$800 \text{ nm} \sim 380 \text{ nm}$	$3.7 \times 10^{14} \sim 7.9 \times 10^{14}$	$1.55 \sim 3.26$
紫外线	$380 \text{ nm} \sim 10 \text{ nm}$	$7.9 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{16}$	$3.26 \text{ ev} \sim 1.24 \times 10^{-2}$
X—射线	$10 \text{ nm} \sim 10^{-3} \text{ nm}$	$3 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{20}$	$1.24 \times 10^{-2} \sim 1.24 \times 10^4 \text{ M}$
γ 射线	$10^{-3} \text{ nm} \sim 10^{-4} \text{ nm}$	$3 \times 10^{20} \sim 3 \times 10^{21}$	$1.24 \times 10^6 \sim 1.24 \times 10^7$

表 2 非电离辐射划分(依频率、波段、波长)

频段名称	频率范围	波段名称	波长范围
极低频	3~30Hz	极长波	100~10 兆米
超低频	30~300Hz	超长波	10~1 兆米
特低频	300~3000Hz	特长波	100~10 万米
甚低频	3~30KHz	甚长波	10~1 万米
低 频	30~300KHz	长 波	10~1 千米
中 频	300~3000KHz	中 波	10~1 百米
高 频	3~30MHz	短 波	100~10 米
甚高频	30~300MHz	超短波	10~1 米
特高频	300~3000MHz	分米波	10~1 分米
超高频	3~30GHz	厘米波	10~1 厘米
极高频	30~300GHz	毫米波	10~1 毫米
至高频	300~3000GHz	丝米波	10~1 丝米

40 多年来,通过各个领域的广泛研究,尽管已经弄清了一些问题,但更多的问题还等待我们去解决,对电磁辐射生物效应的认识与人们对生物的认识、非生物的认识有着密切的关系。许多无机物对电磁的效应与有机物不一样,对单细胞、组织、器官、生物整体效应更是如此。对非生物或无机物观察到的效应,有些可以在生物实验中得到证实,有些得不到证实,原因在于生物体反应的条件可变性太大,如遗传、个体发育、组

织差异,再加上电磁波参数的频段、强度以及作用次序,作用时间间隔……机体在发生反应前后状态的千差万别^[4, 5]。

许多研究资料证实,不同频率、强度的电磁波在生物实验中,可产生不同程度的效应,但有些情况比较特殊,如发现在频率方面有效应窗,在强度方面也有效应窗,也就是在某个频率、某个强度,反应出现异于前后电磁频段、强度的结果,如 Sanders 等人 1984 年就报道在 200 及 591 MHz 引起的神经

组织代谢情况在 2450 MHz 频段重复不出来。我们还发现,在场强为 40KV/m 时,生物所出现的反应比 40 V/m 前后的强度要强。Salford 等也报道,血脑屏障可在 915 MHz、1200 MHz、2450 MHz 出现同样反应^[4, 6, 7]。

苏联病理生理学家 ии федров 曾根据病因与疾病过程关系将疾病分为四个类型,即:(1)病因存在疾病整个过程,如有些传染性疾病;(2)病因只是在疾病开始时起作用,如许多物理性因子损伤;(3)病因在病程一段后离去;(4)B 病因在 A 病因作用一段后才起作用,如复合伤,伤后感染。电磁波效应应属于第二种类型。第二类疾病的病因只起“扳机作用”,子弹击中某点,某个机制启动,外因是条件,内因是依据。神经系统的兴奋抑制、思维行为反应、内分泌系统也依其本身规律来反应。因而无论哪种子弹击中神经、内分泌、免疫哪个环节,均可出现相同反应,反之,同样子弹击中部位不一,反应也千差万别。许多实验(特别是生物实验)条件不一,结果可以很不相同。将动物实验结果应用于人,更得十分慎重。人不允许作实验,只能作流行调研,而流调材料结果分析,许多地方难以统一。例如,使用手机是否诱发脑癌问题,至今争论不一,再过几年能否得出结论也很难讲,因为在使用手机时,不同人、不同机型、使用时间等因素都统一不起来,结果只能各持己见。

辐射效应与辐射防护是一个有内在联系的问题,为了使机体更健康,对辐射有害的一面要尽量减少,这是防护的任务,防护的效果如何,需要一定的指标来检查,因此,为了达到防护目的,必须认识电磁辐射各方面的效应。人的衣、食、住、行,生活各个方面都在电气化,因此电磁辐射不是单一源而是复合的,多因素的分析研究,是我们目前急待解决的问题。希望各方面加强交流,共同努力,使问题能早日得到解决。

参 考 文 献

1. 第一届电磁辐射与健康国际研讨会文集. 1999, 5 北京
2. 第二届电磁辐射与健康国际研讨会文集. 2000, 10 中国西安
3. 罗辽复. 物理学家看生命. 湖南教育出版社, 1994
4. 姜槐, 叶国钦. 微波高频对健康的影响与生物效应. 北京: 人民卫生出版社, 1985
5. 吴祈耀, 唐晓英. 毫米波技术与生物医学. 北京理工大学出版社, 1998
6. Human exposure to Radiofrequency Radiation. A comprehensive review pertinent to air force operation. <http://www.brooks.afmil.afrl.hedherd.humanexposure.htmlpdie13.htm>. 2000
7. Henry Lai. Vienna Report on RFR Bioeffects 1998, 25-28

再谈工频磁场对人体健康的危害影响

高攸纲¹ 刁庆安²

(¹北京邮电大学 171 信箱 北京 100876 ²江苏泰州市人民医院 泰州 225300)

早在 1975 年,环境科学家就曾预言:空间电磁能量平均每年增长 7%~14%,这就是说,25 年后环境电磁能量密度最大可能增加 26 倍,而 50 年后则可能增加 700 倍。毫无疑问,21 世纪人类生活中电磁环境的恶化已成定局。严重恶化的电磁环境不仅在电气、电子设备间造成电磁干扰从而影响设备的正常工作,而且还将危害人们的身心健康。这些都是环境电磁学及电磁兼容技术亟待研究解决的课题。鉴于此课题牵涉面较广,本文仅就电磁场对人们健康的危害影响加以扼要介绍,而且重点则是对工频磁场的危害影响进行论述,希望能引起有关方面对这一问题的重视。

世界著名学者、日本电磁兼容学术界先驱,北京邮电大学名誉教授 Akao^[1]先生曾于 1996 年 9 月发表了题为“令人忧虑的电磁波”一文,文中明确指出,不管人们承认与否,所有靠电气运转的设备都产生电磁波,这种电磁辐射只要超过定量,都将对人体及其它电器造成危害。长期暴露于 X 线和紫外线光谱的电磁辐射,无疑会使人们受到伤害。现在引起人们关注的是长期暴露于强电线路、个人电脑、移动电话、微波炉和所有其它电器设备所产生的辐射中会产生哪些潜在的负面影响?就输电线附近的居民中,婴儿白血病以及脑瘤的发病率问题,瑞典的研究人员已经提出报告。在美国也有一些人起诉移动电话制造商,说移动电话产生的电磁波可导致脑瘤。对电磁辐射安全性的顾虑正在增加。在许多工业化国家,在居民区架设高压输电线的计划遭到强烈反对。1996

年 6 月世界卫生组织正式宣布设立一个为期 5 年的计划,研究与电磁波有关的电器设备对健康的影响。

微波辐射是电磁辐射的一种形式,它使物质中的分子产生振动,进而产生摩擦并发热。在使用移动通信的时候,用于接收和传送微波的天线是直接置于电话使用者头部一侧的。这带来以下的忧虑:如此近距离的微波辐射是否会对大脑产生影响。此外,人体内的神经信号是以低频传送的,因此,它们可能受到电器发出的低频电磁波影响,进而扰乱细胞的生长。尽管各国学者对此类问题尚无完全统一的意见。但不管如何,长期暴露于超限量电磁波中会带来危害,这是显而易见的。因此,最好避免长期近距离地接近可产生电磁波的电器,婴儿和孕妇尤其如此,因为这些人对电磁辐射更加敏感。最近 Nokia 生产了一种配有耳机的手机,使用者可将辐射天线远离头部,实为当前条件下防止手机危害的一项良策。

1993 年 7 月,World Vision 杂志^[2]上也指明电磁波能使人的免疫力降低,白细胞数量减少。一个 15 岁以下的儿童,如果生活在磁感应强度为 3mG 的房间里,那么他患白血病的可能性将比一般儿童高 4 倍;生活在磁感应强度为 2mG 的地方,白血病的发病率也比正常情况下要高。

1997 年 1 月,瑞典斯德哥尔摩的卡罗利斯卡大学的科学家们,对 43 万长期居住在高压输电线附近的居民进行了调查并公布了一项研究成果。科学家们明确指出,电磁波与癌症,尤其是脑瘤和儿童白血病,有直

接的联系。伦敦大学机械系主任利夫·弗里柏格说，在他们那里工作的职工中，发现6名癌症患者，其中4人都是由电磁波辐射造成的，这几名都是研究电磁铁的科学家，整天生活在磁感应强度高达400mG的环境里，比其他人受到的辐射都多。也有人证实，在电磁场里工作的人患白血病的数量剧增，其中受害最大的当属电气铁道司机，飞机乘务

员和核电站的工作人员。

实际上，家用电器在居室中产生的电磁波不知要比高压输电线强多少倍。这些电器很多都是在人体很近的地方使用的，如剃须刀和吹风机。每天使用剃须刀的时间如超过2.5min，就会给身体造成危害。受电磁波辐射的时间越长，受到危害越大。表1是家庭常用电器的磁感应强度值。

表1 家庭常用电器的磁感应强度值 单位: mG

电器名称	距 3cm	距 30cm	距 1m 处
剃须刀	150~1500	0.8~90	0.1~0.3
吸尘器	2000~8000	20~200	1.3~20
搅拌器	600~7000	6~100	0.2~2.5
微波炉	750~2000	40~80	2.5~6
电视机	25~500	0.4~20	0.1~1.5
洗衣机	8~500	1.5~30	0.1~1.5
电熨斗	80~300	1.2~3	0.1~0.25
咖啡室	18~250	0.8~1.5	>0.1
烤面包片机	70~180	0.6~7	0.1
电冰箱	5~17	0.1~2.5	>0.1

强电线附近的磁场可进行理论计算加以确定。如图1所示，运用镜象法，将大地的影响等效为地下的一等值反向电流所产生的影响。镜象深度为： $y_i + \alpha$ ，其中：

$$\alpha = \sqrt{2\delta\sqrt{-j}}$$

$$\delta = 503\sqrt{\frac{\rho}{f}} = 503\sqrt{\frac{1}{\sigma f}}$$

σ 为大地导电率， f 为强电线电流的频率。

显然电流为 I_i 的第 i 根传输线所产生的磁感应强度为：

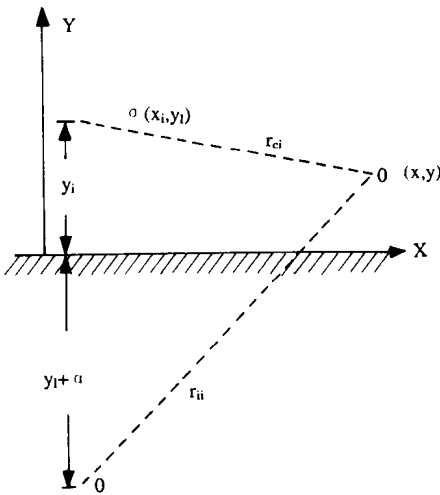


图1 磁感应强度的确定

$$B_{xi} = -2 \times 10^{-3} I_i \left[\frac{(y - y_i)}{r_{ci}^2} - \frac{(y + y_i + \alpha)}{r_{ii}^2} \right]$$

$$B_{yi} = 2 \times 10^{-3} I_i \left[\frac{(x - x_i)}{r_{ci}^2} - \frac{(x - x_i)}{r_{ii}^2} \right]$$

$$B_{zi} = 0$$

其中

$$r_{ci} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

$$r_{ii} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y + y_i + \alpha)^2}$$

对于有多根导体的传输线,其总的磁感应强度为各导体所产生的磁感应强度的复矢量之和。即:

$$B_x = \sum_{i=1}^N B_{xi}$$

$$B_y = \sum_{i=1}^N B_{yi}$$

我们曾对三相输电线及交流电气化铁道附近的磁感应强度进行了计算^[3],当电气铁道触线网上电流为 $I=15A$ 时,在距离电气化铁道 75m 地面上 1.8m 处的磁感应强度计算值为 2.1mG,而实测值则为 1.7mG,说明理论计算值与实际测值取得较好的一致。此外文献 2 中,介绍了在 40 万伏高压线正下方磁感应强度可达 130mG,距它 30m 的地方磁感应强度为 80mG,而在距它 200m 的地方,磁感应强度则降为 1mG。

美国能源部朱克博士对高压输电线引起的工频电磁场污染问题进行过长期研究,现正与日本、加拿大、俄罗斯等国密切合作,就工频场对人体的危害作长期观测研究,并定期开会,交流科研成果。

美国在 IEEE Spectrum 1995 年第 10 期早已刊登 60Hz 感应强度不得超过 2mG,否则将对人体产生危害。文献 4 中也报导了这一标准。目前瑞典已正式承认强度在 2mG 以上的低频磁场对人体有害。瑞典全国辐射协会并呼吁成千上万使用家用电器的家庭注意不要坐在近处看电视,不要把电子钟或收音机放在床头,不要长时间坐在计算机屏

幕前工作,使用微波炉要在离人 2m 以外的地方,缩短使用剃须刀和吹风机的时间。现在专家们正在呼吁生产厂家研制电磁场较弱的家电产品,以减小危害。

最近美国又报道:今后电磁场防护技术必须强制贯彻于建筑物设计过程中。事实上,在不久的将来,减少电磁污染必然会成为政府强制执行的建筑规范的内容。表 2 列出美国辐射与测试咨询中心(NCRM)、瑞典 MPRII 及美国电力研究院(EPRI)等组织机构在建筑设计中提出的磁场标准限值。

表 2 磁感应强度最大容许限值

组织名称 国家名称	NCRM 美国	MPRII 瑞典	EPRI 美国
背景磁场最大容许值	10 mG		
在 50cm 处容许的最大 CRT 发射值		2.5 mG	
不存在暴露危害			<2mG
危害限值			10 mG

在多数情况下,很难满足 10mG 的限值要求,因此必须采取屏蔽等措施,以保证设备正常工作及人身健康安全的要求。

目前我国国家环境保护局对电磁污染问题已加强调研,首先对城市电磁环境进行普查,在弄清污染源的基础上,再进行防治。相信在不久的将来,我国在这方面的工作也会取得较快的进展。

参 考 文 献

1. 佐藤利三郎. 令人忧虑的电磁波. 日本瞭望 1996, 9 (2): 18
2. 蔡润国译. 家中的敌人. Word Vision. 1993, 7
3. 李莉, 高攸纲. 高压传输线附近磁场环境的理论分析. 电波科学学报, 1998
4. Health effects of EMF Fields. IEEE EMC-Society Newsletter No.168, 1996
5. Joes M Rio. The EMC Building: design & construction strategies. ITEM UPDATE. 2000, 23-35

工频磁场对应激活化蛋白激酶信号转导途径的影响

孙文均¹ 余应年² 傅一提¹ 姜 槐¹ 谢海洋² 鲁德强¹

(浙江大学医学院¹微波研究室²病理生理教研室 杭州 310031)

【摘要】 目的 研究 50Hz 工频磁场对细胞内应激活化蛋白激酶 (stress-activated protein kinase, SAPK/JNK) 信号转导途径的影响, 探讨工频磁场生物效应相关的细胞信息转导机制。方法 细胞分别经两个不同强度的工频磁场作不同时间辐照处理后, 利用 Western 印迹方法, 比较辐照后细胞与对照细胞胞浆中 SAPK 及 SEK1/MKK4 (SAPK/ERK kinase-1) 磷酸化程度。随后以固相激酶分析法 (solid-phase kinase assay), 对经两个强度分别辐照 15min 后的细胞 SAPK 活性进行测定。结果 0.4 及 0.8mT 两个强度的工频磁场均可在一定程度上增强 SAPK 的磷酸化, 但在磷酸化峰值的时程上存在着一定的差异。同时 SAPK 的激酶活性也增强。然而, SAPK 上游激酶 SEK1/MKK4 的磷酸化 (活化) 却不受工频磁场的影响。结论 工频磁场可以激活 SAPK, 但其激活并非通过 SEK1/MKK4 激酶途径。其生物学效应可能与 SAPK 信息转导途径相关, 具体的环节还有待于深入研究。

【关键词】 工频磁场 信号转导 应激活化蛋白激酶

电力的广泛应用, 使得工频磁场无论在空间上还是在强度上都不断扩大和增强, 由此引发的生物学效应也越来越被人们所关注。工频磁场的某些生物学效应 (例如促癌等) 是否存在, 却存在着争论。这不仅影响对极低频辐照可能危害的认识, 也不利于相关卫生标准的制订或修改^[1]。因此探索工频磁场生物效应机制成了生物电磁学研究的热点。对工频磁场生物效应机制的研究方法众多, 涉及的领域也很广泛。然而, 对工频磁场生物效应相关的信息转导过程的研究却大多局限于细胞第二信使 Ca^{2+} 及 cAMP 上, 对细胞内其它信息转导途径的研究很少。细胞内存在的一些信息转导途径, 如 Ras 通路, SAPK 途径等是传递外界信息并产生效应的重要通路。研究发现, 细胞外界的物理应激因子 (原), 其信息通常由 SAPK 途径经蛋白质间级联磷酸化的方式进行传递^[2, 3]。蛋白质磷酸化是细胞内极其重要并广泛使用的调节方式。许多蛋白激酶、酶等

生物大分子物质都通过磷酸化的方式来执行功能, 因此通常可以通过磷酸化程度来评价它们的活性状态。我们曾对工频磁场对细胞浆蛋白质酪氨酸磷酸化的影响作初步的研究, 并发现它能诱导胞浆内一些蛋白质酪氨酸磷酸化的改变^[4]。本研究试图从工频磁场对 SAPK 信号转导途径的影响来探索其生物效应较为具体的信息转导机制, 为极低频辐照的可能危害作用提供科学依据。

1. 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 细胞株: 中国仓鼠肺成纤维细胞 (Chinese hamster lung cell line, CHL)。

1.1.2 主要试剂: Anti-JNK1 (FL) (Santa Cruz), MEK-4 (SEK1) 抗体 (Santa Cruz), ECL (Amersham), 羊抗兔 IgG-HRP (华美), Agarose-c-Jun (Santa Cruz), $[\gamma\text{-}^{32}\text{P}]\text{ATP}$ (北京), Phospho-SEK1/MKK4 (Thr233) 抗体 (Bio, Labs)。

1.1.3 主要仪器：凝胶电泳及转膜系统 (Bio-Rad)，低温高速离心机 (Beckman)，细胞培养箱 (Forma)，CycloneTM 贮磷屏系统 (Packard)。

1.1.4 工频磁场辐照系统：该系统主要由一对边长 36cm、高度 8cm、168 匝的 Helmholtz 线圈，一只等长等高、60 匝的中置补偿线圈，两只调压器及细胞培养箱构成。其中，3 只线圈相互串联后叠放于细胞培养箱中的铁制屏蔽箱内，线圈的两个端线与培养箱外的调压器相连。3 只线圈内的空间区域即构成了一个恒温、均匀、强度于 0-0.8mT 之间连续可调的 50Hz 正弦磁场辐照区。

1.2 方法

1.2.1 细胞培养：分组及处理：CHL 细胞在含 FCS (15%)、青霉素 (100U/ml)、链霉素 (100 μ g/ml)、卡那霉素 (100 μ g/ml)、的 MEM 培养基、5%CO₂ 及 37℃ 条件下，培养 3d 后作辐照处理。实验分为 0.4mT 及 0.8mT 两个强度组，每个强度组又按不同的辐照时间分为 3、5、10、15、30、60min 及 12 和 24h 8 个亚组及假辐照空白对照组。不同时间亚组的细胞于距收获相应的时间放入辐照系统进行处理，于第 4d (96 h) 同时收获。

1.2.2 细胞蛋白质样品制备：经处理后的细胞立即弃去培养液，4℃ PBS 洗涤细胞 2 遍，吸尽残液，每瓶各加 2ml 0.05% 胰酶消化 1~2min (4℃)，弃去胰酶并加 4ml PBS 制成细胞悬液，将细胞悬液移至 5ml 离心管，5000rpm 离心 5min，弃上清后加 4ml PBS 重悬细胞，离心并重复 1 次。吸尽残液，加预冷细胞裂解液 0.5ml，吹散细胞沉淀，4℃ 放置 60min，然后于 4℃ 下 15000rpm 离心 15min，取上清备用。

1.2.3 蛋白质定量：以改良 Lowry 氏法测定蛋白质含量^[5]。

1.2.4 蛋白质电泳及印迹电转移：按 Bio-Rad 说明配制 SDS-聚丙烯酰胺凝胶 (含 5% 积层胶，12% 分离胶)。取含等量蛋白质的样品

液，加入 1/3 体积的点样缓冲液，煮沸 3min，冷却后上样。电泳条件为：80V 1h，160V 2h。电泳结束后，取下平板凝胶，按 Bio-Rad 操作说明进行印迹转膜。条件为：120mA 60min。

1.2.5 Western 印迹分析：转膜后，取下 NC 膜，丽春红染色 5min，观察转膜效果。以去离子水清洗数遍后，按 Santa Cruz 说明作蛋白质印迹杂交：TBS 洗膜 1 min x 2 次，常温下 Blotto A (1×TBS，5% 脱脂奶粉，0.05% Tween-20) 封闭处理 15min 后，弃去 Blotto A，加入含 5 μ g anti-JNK1 的 Blotto A，置于 37℃ 震荡恒温水浴箱内作用 70min，而后以含 0.05% Tween-20 的 TBST 洗膜 5min x 3 次，弃去洗液，加入含羊抗兔 IgG-HRP 的 Blotto A 于 37℃ 震荡恒温水浴箱内进行第二次杂交，45min 后，弃去洗液，TBST 洗膜 5min x 3 次，最后以 TBS 洗膜 5min。移至暗室，倒去洗液后加入 ECL，室温下反应 2-10min，暗盒内曝光 2-5min，取出胶片及时冲洗。SEK1/MKK4 蛋白质的免疫印迹过程参照 BioLabs 说明，过程与前者相似。光密度扫描仪测定 SAPK 条带及其磷酸化的滞后条带，计算磷酸化的 SAPK 条带光密度值占总 SAPK 条带光密度值的百分比，并以空白对照组作为 1.00 进行比较。同样测定 SEK1/MKK4 的磷酸化 (活化形式) 及非磷酸化形式 (非活化形式) 的条带并进行比较，同时以 0.5M NaCl 处理 30min 作为阳性对照，测定 SEK1/MKK4 的磷酸化。每个强度组重复 3 次。

1.2.6 固相激酶分析法测定 SAPK 活性^[6]：辐照 15min 后的 CHL 细胞与假辐照空白对照组一起收获，按前述方法提取胞浆蛋白质并定量后，取含 100 μ g 蛋白质的样品，稀释后加入 5 μ g Agarose-c-Jun (5 μ g/100 μ g 蛋白质)，间歇混匀并冰浴 4h。然后加入 1ml HEPES 结合缓冲液漂洗，13000rpm × 20sec 离心沉淀，去上清，并重复漂洗 3 次，小心吸去上清后加入 30 μ l 激酶缓冲液 (含 5 μ Ci [γ -³²P]ATP)，

30℃水浴 30min, 重复上述漂洗过程 5 次, 13000rpm×2min 离心沉淀, 去上清, 加入 25 μl 1.5×点样缓冲液, 煮沸 4min 后上样电泳, 电泳条件同上。电泳后卸胶, 以 Cyclone™ 贮磷屏系统显示放射自显影图象, 并以条带的灰度作为放射性强度的指标, 以此来反映 SAPK 的激酶活性并与对照组作比较。每个强度组重复 3 次以上。

2. 结果

2.1 0.4mT 工频磁场对 SAPK 磷酸化的影响

经不同时间处理后, SAPK 磷酸化程度呈时相性变化。辐照 3min 后, SAPK 的磷酸化即开始增高, 15min 时, 磷酸化达到最大值, 为对照的 1.20 倍(磷酸化程度增加 20%)。此后 SAPK 的磷酸化逐渐下降, 并略低于对照, 即表现为脱磷酸化过程(见图 1a)。

2.2 0.8mT 工频磁场对 SAPK 磷酸化的影响: 0.8mT 工频磁场作用后, SAPK 磷酸化程度也发生较为明显的随时间性的变化。表现为磁场辐照 5min 时达到磷酸化的第一个峰值, 为对照的 1.12 倍, 此后略有下降, 15min 时, 达到磷酸化的最大峰值。而后表现为脱磷酸化过程, 但于 24h 时又达到一个峰值, 为对照的 1.13 倍(见图 1b)。

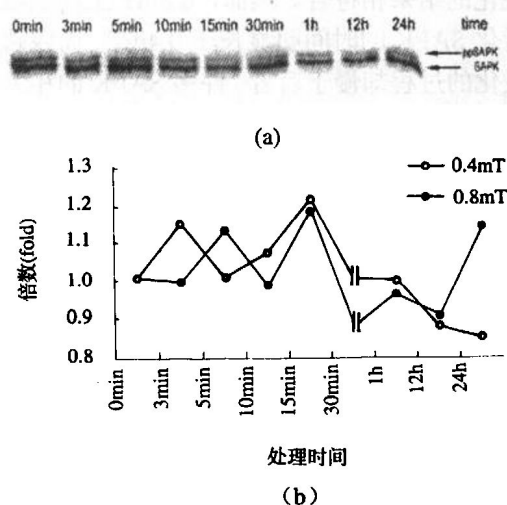


图 1 工频磁场对 SAPK 磷酸化的影响 (a, b)
ppSAPK:磷酸化的 SAPK;

2.3 工频磁场对 SAPK 活性的影响

上述结果显示, 不同强度的工频磁场均在处理 15min 时, SAPK 磷酸化程度达到最大, 因此选择辐照 15min 作为 SAPK 活性测定的代表值。结果表明, 经 0.4mT 与 0.8mT 工频磁场辐照处理 15min 后, 细胞内 SAPK 的活性都有所增强, 分别是对照组的 2.91 ± 0.4 和 2.1 ± 0.9 倍(见图 2a, b)。SAPK 激酶活性的变化与磷酸化的变化相一致。

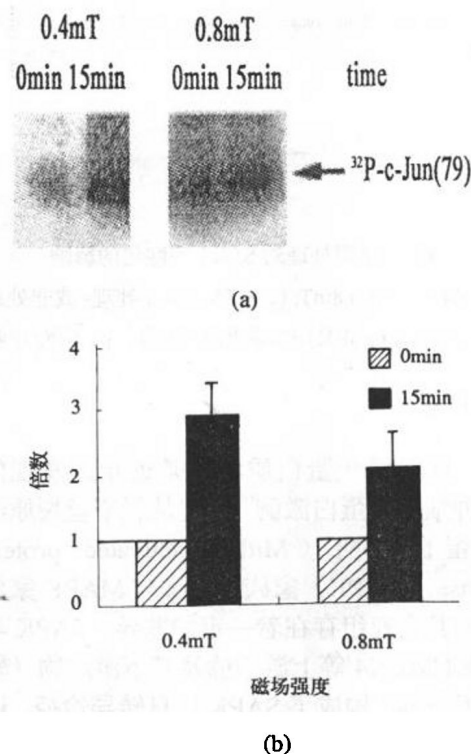


图 2 工频磁场辐射 15min 后 SAPK 激酶活性 (a,b)

2.4 工频磁场对 SEK1 活化的影响

相同条件下的工频磁场作用后, 结果显示非磷酸化(非活化)的 SEK1/MKK4 蛋白条带清晰, 但不呈现磷酸化(活化形式)的 SEK1/MKK4 条带, 而 0.5M NaCl 处理 30min 却可诱导 SEK1 的磷酸化(见图 3a, b, c)。表明 SEK1/MKK4 的活性(磷酸化)不受工频磁场的影响。

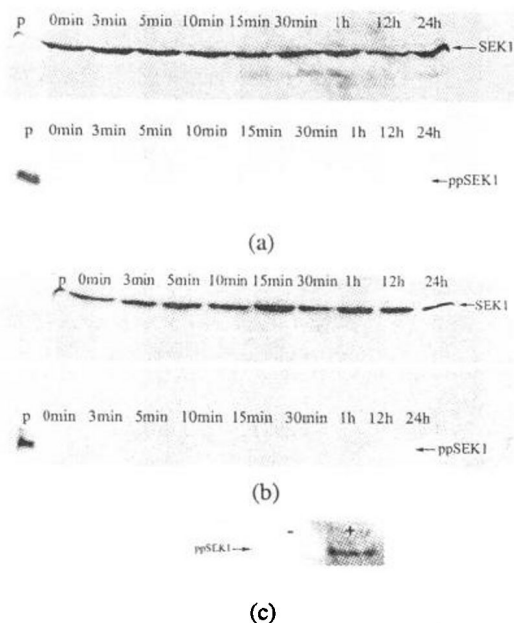


图3 不同处理对 SEK1 磷酸化的影响

(a) 0.4mT; (b) 0.8mT; (c) 0.5M NaCl 处理+或非处理
(-)30min; ppSEK1:磷酸化的 SRK1; p: 阳性对照

3. 讨论

应激活化蛋白质激酶是近年来发现的一种细胞内蛋白激酶^[6]，它从属于丝裂原活化蛋白激酶（Mitogen-activated protein kinase, MAPK）家族，但又与 MAPK 家族中的其它亚组存在着一定的差异。SAPK 与 SEK1/MKK4 等上游激酶及其下游底物（转录因子等）构成了 SAPK 信息转导途径。许多外界的作用因子可激活 SAPK 途径，并经蛋白质级联磷酸化的方式作细胞内信息转导，调控细胞的增殖、分化、凋亡等生物效应。因此，SAPK 在细胞内起着非常重要的作用。许多实验研究发现，外界的物理性应激源，尤其是紫外线（UV），能较特异地激活 SAPK 途径，产生生物效应。从本质上说，工频磁场与 UV 一样，都属于非电离辐射的范畴。此前，我们发现，工频磁场可使细胞内一些蛋白质的酪氨酸磷酸化发生变化^[4]，而蛋白质的磷酸化与脱磷酸化又是细胞内多种信息途径的关键环节。因此工频磁场能

否使 SAPK 磷酸化（激活），经 SAPK 途径进行细胞内的信息转导，这自然就成为研究工频磁场生物效应机制的新课题。

本实验结果表明，0.4 及 0.8mT 两个强度的工频磁场不仅都能增强 SAPK 的磷酸化，并且均在 15min 前使 SAPK 达到磷酸化的最大值，这与工频磁场影响细胞蛋白质酪氨酸磷酸化在时间性上相一致^[4]，因此认为 SAPK 磷酸化的变化也是工频磁场影响细胞的早期表现，应属早期反应。SAPK 磷酸化是该激酶活化的前提，为了证实磷酸化后的 SAPK 其激酶活性也相应增强，本研究选择了对两个强度的工频磁场均能产生较强 SAPK 磷酸化的辐照时间，即 15min，分别进行两强度的辐照处理，并以固相激酶分析法测定 SAPK 特异底物 c-Jun 的磷酸化程度。结果显示，磷酸化后的 SAPK，其激酶活性也相应提高，表明 SAPK 磷酸化与活性呈正相关。而且从本研究中可以发现，信号经 SAPK 途径转导后，是呈级联放大的。SAPK 较小程度的磷酸化改变可以较大程度地影响其激酶活性，从而使信号得到放大。从两强度在激活 SAPK 的效应上看，0.8mT 的效应略低于 0.4mT，不呈明显的强度（剂量）一效应关系。SAPK 活性测定的结果也与磷酸化的结果相符合。然而，0.8mT 工频磁场活化 SAPK 的时间明显长于 0.4mT，而脱磷酸化的过程却慢于后者。许多 SAPK 的相关研究发现，外界信息原，尤其是物理性的应激原，对 SAPK 的磷酸化（活化）都呈强度（剂量）一效应关系，提示 SAPK 活化的程度是外界信息原产生效应的一种调节方式。然而有学者发现，持久地活化 SAPK 途径可导致细胞的凋亡，而短暂的活化却可致细胞的增殖^[7]。可见，SAPK 途径活化的持久度也是细胞外作用因子调控细胞效应的一种方式。这可能与细胞株的类型及信息原的种类有关。本研究的结果提示，0.8mT 的工频磁场与 0.4mT 相比，前者能更长时间地激活