

极低频电磁场的健康效应

包家立

(浙江大学医学院浙江省生物电磁学重点实验室生物物理与医学工程研究组, 杭州 310058)

摘要：来自于输电线路、变压器、家用电器的极低频电磁场已经在现代生活中无所不在，但它们对人体健康的潜在危险还不清楚。为了综合评述近几年的研究成果以指引未来极低频电磁场健康效应的研究方向，在介绍极低频电磁场物理特性的基础上，着重介绍了近年来极低频电磁场在流行病学调查、人体志愿者、动物实验、细胞和分子、生物物理学等领域的研究进展。大多数流行病学调查表明极低频电磁场的健康风险比值比在 1~2 之间。人体志愿者实验研究主要包括心肺生理、脑电与神经、血常规、褪黑素等方面。动物实验研究主要包括认知、血管渗透性、褪黑激素、免疫系统、转基因白血病动物模型、协同致癌作用等方面。细胞和分子研究主要包括细胞周期、细胞凋亡、细胞分裂、DNA 复制转录和翻译等方面。生物物理学研究主要包括 ROS 机制、胞内 Ca^{2+} 、离子通道、鲁棒行为、信噪比、体内磁性颗粒等方面。极低频电磁场限值方面的国际标准主要包括 ICNIRP 指南和 IEEE 标准，国内标准主要包括职业卫生标准和环境控制标准。未来的研究方向应包括极低频电磁场的生物系统特性如鲁棒性和涌现性等、电磁场作用下的生物实时响应和电磁能量的生物效应。

关键词：输电线路；极低频电磁场；ELF-EMFs；生物效应；健康效应；流行病学；人体；动物；细胞；生物物理

Health Effects of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields

BAO Jiali

(Research Group of Biophysics and Medical Engineering, Zhejiang Provincial Key Laboratory of Bioelectromagnetics,
School of Medicine, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Extremely low frequency electromagnetic fields (ELF EMFs) that generated from transmission lines, transformers, household appliances, and so on, have been a ubiquitous part of modern life. To date, potential health risks of ELF EMFs are unclear. To summarize the researches of ELF EMF related health researches in recent years and to guide the researches in the future, we briefly describe several physical characteristics of ELF EMFs and emphatically introduce the research progress in the aspects of epidemiological investigation, human volunteers, animal experiments, cellular and molecular studies, and biophysics. Most of the epidemiological investigations suggested that the odds ratio of ELF EMFs health risks is about 1 to 2. Human volunteer studies have focused on cardiopulmonary physiological changes, behavioral and neurophysiological changes, hematologic, melatonin, etc. Whereas, animal studies mainly targeted recognition memory, tumor, vascular permeability, melatonin, immune system, anti-proliferative effect, synergistic effect, etc. Cellular and molecular studies put main efforts in cell cycle, apoptosis, division, DNA replication, transcription, and translation, etc. Biophysical researches mainly aimed at ROS mechanism, intracellular Ca^{2+} , ion channels, robust behavior, signal-to-noise ratio, and magnetic particles. International standards have been established to define the limit values of ELF EMFs, including the international ones like ICNIRP guidelines and IEEE standards, and some Chinese standards about occupational hygiene and environmental control. Future research should include the system features of living body with ELF EMFs intervention, such as robustness, emergent, etc., the real-time responses of organisms to ELF EMFs, and the biological effect of electromagnetic energy.

Key words: transmission lines; extremely low frequency electric and magnetic fields ; ELF-EMFs; biological effects; health effects; epidemiology; human; animal; cell; biophysics

基金资助项目：国家自然科学基金(61071060)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (61071060).

0 引言

近年来，随着我国国民经济的发展，电力建设项目愈来愈多，如电网、轨道交通等。有些项目需要建设在居民集中的区域，引起公众对电力建设项目的质疑，成为社会所关心的公共卫生问题。1997年，世界卫生组织(WHO)启动了“国际电磁场计划”(International EMF Projects)，目的在于通过电磁健康风险评估、电磁限值标准建立和公众电磁健康知识传播等，向公众传递环境电磁场对健康影响的正确认识。

与人类生活密切的环境电磁场主要是极低频电磁场(extremely low frequency electromagnetic fields, ELF-EMFs)和射频电磁场(radio frequency electro magnetic fields, RF-EMFs)这2种。极低频电磁场主要是电力能源在传输、转换、使用中所排放或泄漏，射频电磁场主要是无线电广播、无线通讯所辐射。本文主要对极低频电磁场的健康效应作一综述。

1 极低频电磁场的物理特性

1.1 电磁场频谱

一般所称的电磁场是指电场、磁场和电磁场的总称。这3种场是有区别的，电场是由带电电荷所产生的，磁场是由流动的电流所产生的，电磁场是由变化的电场与变化的磁场交替感应所产生的。按电磁场交替变化的频率可以分为极低频(ELF)、甚低频(VLF)、甚频(VF)、射频(RF)、红外线、可见光、紫外线、X射线、 γ 射线，称为电磁谱，如图1所示。

电磁生物效应取决于生物体尺度、形状与电磁场的波长。根据IARC报告^[1]，极低频电磁场是指频率为3~3 000 Hz的电磁场^[1]，用于能源的工频(50 Hz或60 Hz)电磁场属于极低频电磁场，波长大于100 km，远超人体尺度，由场力作用来主导生物效应。射频电磁场的频率为30 kHz~3 THz^[2]，频率大于30 MHz的射频电磁场的波长小于10 m，与人体尺度相比拟，由波动作用来主导生物效应。

1.2 极化特性

人体细胞的平均直径约为10~20 μm ，最大的成熟卵细胞直径约为200 μm ，最小的血小板直径约为2 μm 。从人类视角，细胞可以看成是1种电偶极子。当这种电偶极子暴露在外电场(其电场强度为E)中时会产生极化，电极化强度P为

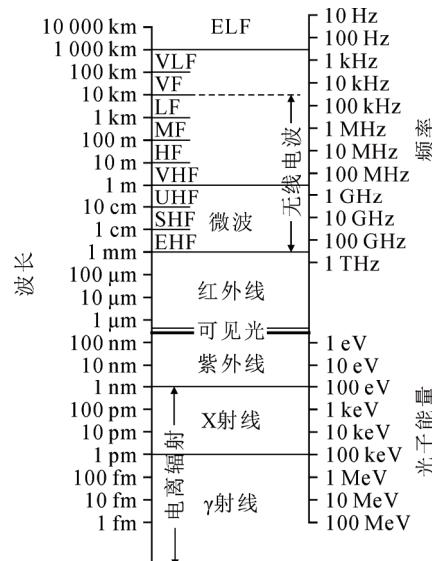


图1 电磁谱

Fig. 1 Electromagnetic spectrum

$$P = \chi_e \epsilon_0 E \quad (1)$$

式中： χ_e 为生物体(细胞或组织)的电极化率； ϵ_0 为真空的电容率。

生物分子(如蛋白质、酶、核酸)中的电子运动构成磁偶极子。当这种磁偶极子暴露在外磁场(其磁感应强度为B)中时会产生磁化，磁化强度M为

$$M = \chi_m H \quad (2)$$

式中： χ_m 为生物体(细胞或组织)的磁化率；H 为生物体内部的磁场强度。

1.3 场特性

极化生物体内部的电场强度E'为

$$E' = \frac{E}{1 + \chi_e} \quad (3)$$

极化生物体的电位移D为

$$D = \epsilon E \quad (4)$$

式中： $\epsilon = \epsilon_0 (1 + \chi_e)$ 为生物体的电容率。

生物体内部的磁场强度H为

$$H = \frac{B}{\mu_0 (1 + \chi_m)} \quad (5)$$

或者 $B = \mu H$ $\mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$ (6)

式中： $\mu = \mu_0 (1 + \chi_m)$ 为生物体的磁导率； μ_0 为真空的磁导率。

1.4 力学特性

带电量Q的生物体在电场中的库伦力F'为

$$F' = Q E' \quad (7)$$

在磁场中的洛伦茨力F为

$$F = Q v B \quad (8)$$

式中v为电荷运动速率。

1.5 能量特性

暴露在电场中的生物体内电场能量密度 w_e 为

$$w_e = \frac{1}{2} DE = \frac{1}{2} \epsilon E^2 \quad (9)$$

暴露在磁场中的生物体内磁场能量密度 w_m 为

$$w_m = \frac{1}{2} HB = \frac{1}{2\mu} B^2 \quad (10)$$

生物体内存储的电磁能量不仅与电场强度 E 和磁感应强度 B 有关, 而且与电容率 ϵ 和磁导率 μ 有关, ϵ 和 μ 决定了生物体的储能能力。

1.6 电磁特性

电容率 ϵ 和磁导率 μ 反映了电场和磁场与生物体之间的相互作用, 是描述生物体电磁特性的主要参数。生物组织具有介电色散特性, 即电偶极子或电偶层弛豫造成介电损耗^[3]。人体活体的不同组织的电磁特性(包括 ϵ 和 μ)与尸体有很大差别, 其数据对基础研究和应用开发具有重要意义。

生物体内的自由电荷(如电子和离子)决定了导电性, 在血液、肌肉、肝脏、肾脏等组织中的水和电解质比脂肪、肺脏多, 具有较高的电导率^[4]。脑中有磁介质(如 Fe_3O_4), 具有较高的磁导率。电导率和磁导率随频率变化, 表现出弛豫现象(relaxation phenomena), 在低频表现为极化。

1.7 输电线路环境电磁场分布特性

输电线是1种无限长直导线, 当导线载有工频电流时, 在导线周围的环境中会形成极低频电磁场。据 Coulomb 定理, 环境的电场强度 E 为

$$E = \frac{E_0 a}{\sqrt{a^2 + E_0^2 r^2}} \quad (11)$$

式中: E_0 为输电线路垂直底电场强度; r 为测点到输电线路垂直底距离; a 为电场系数, 其计算式为^[5]

$$a = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon} \quad (12)$$

式中: λ 为直导线的电荷线密度; ϵ 为环境空气的电容率。当导体置于电场中时电场分布将发生畸变。

据 Biot-Savart 定理, 环境的磁感应强度 B 为

$$B = \frac{B_0 b}{\sqrt{b^2 + B_0^2 r^2}} \quad (13)$$

式中: B_0 为输电线路垂直底磁感应强度; b 为磁场系数, 其计算式为^[5]

$$b = \frac{\mu I}{2\pi} \quad (14)$$

式中: I 为直导线电流; μ 为环境空气磁导率。当导

体置于磁场中时磁场分布几乎不发生畸变。

式(11)和式(13)表明, 输电线路周围环境电磁场分布与到输电线路的距离呈倒数关系, 距输电线路的距离越远, 电场强度和磁感应强度就越小。

2 环境中的极低频电磁场

2.1 电磁源

2.1.1 天然电磁源

天然电磁源主要来源于地磁场、天电等自然界。地磁场最强在两极, 其磁感应强度约为 $60 \mu T$; 最弱在赤道, 其磁感应强度约为 $30 \mu T$ 。地磁场是恒定的, 但在太阳黑子爆发期其磁感应强度有 $0.1 \sim 1.0 \mu T$ 的变化。

大气有电场, 其电场强度取决于地球的纬度、气候、日昼、季节等, 一般为 $50 \sim 500 V/m$, 平均为 $100 V/m$ 。天电(sferics)是1种与闪电放电有关的电磁过程。

2.1.2 人工电磁源

人工电磁源主要来源于能源电力、家用电器、无线通讯等所产生的电磁场。这些电磁场向环境释放电磁能量, 使生物体或人体暴露在电磁环境之中。极低频电磁场的人工电磁源主要有:

1) 背景电磁场, 多数来自于配电线路、导线、接地等。居家背景电磁场的磁感应强度约为 $0.05 \sim 0.07 \mu T$, 电场强度约为 $1 \sim 20 V/m$ ^[1]; 起居室电磁场的磁感应强度约为 $0.07 \mu T$, 电场强度约为 $37 V/m$ ^[5]。

2) 家用电器, 包括电视机、微波炉、电磁炉、空调、热水器、烤箱、电热毯、电灯、手机、路由器、电吹风机、电脑、电熨斗等。距离家用电器 $5 cm$ 处的磁场磁感应强度约为 $1 \sim 40 \mu T$ ^[1]。

3) 输电线路, 有高压输电线路和低压输电线路。高压输电线路用于远距离电力传输, 电压等级有 $1 \sim 1000 kV$ 不等, 环境电场强度为 $0.02 \sim 700 V/m$, 磁感应强度为 $0.25 \sim 1.4 \mu T$; 低压输电线路用于家用电器电源传输, 电压等级有 $110 V$ 和 $220 V$ 这 2 种, 环境电场强度为 $0.62 \sim 13 V/m$, 磁感应强度为 $0.14 \sim 0.57 \mu T$ ^[6]。

4) 工业设备, 焊接电弧的磁感应强度为 $100 \sim 200 \mu T$, 最高达 $1 mT$; 电磁感应炉的磁感应强度为 $0.2 \sim 10 mT$, 最高达 $60 mT$; 电气机车的磁感应强度为 $2 \sim 120 \mu T$ ^[1]。只有职业工人在工作期间才能接触到工业设备, 属职业暴露。

2.2 环境电磁场的测量

极低频电磁场测量探头分为电场探头和磁场探头。电场探头的工作原理是将测量电路放入被测电场中, 测量电路的探测器是1个孤立导体的电极板, 电极板在电场中产生感应电荷, 感应电荷通过测量电路中的电容和取样电阻形成感应电流, 如图2所示, 通过校对可得电流与电场强度E的对应关系式

$$E = \frac{I_r}{2\pi f \epsilon_0 A_e} \quad (15)$$

式中: I_r 为电极板电流; A_e 为电极板面积; f 为电磁场交变频率。

磁场探头的工作原理是将闭合线圈放入被测磁场中, 当穿入闭合线圈的磁场发生变化时, 闭合线圈感应出感应电势, 如图3所示, 可得感应电势V与磁感应强度B的对应关系式

$$V = -\omega B_0 A_m \cos \omega t \quad (16)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为电磁场交变角频率; A_m 为闭合线圈面积; B_0 为磁场磁感应强度B的基础成分。

测量的一般要求是周围没有树木、其他输电线、通讯电路等, 距地面高度为1~2 m、环境相对湿度≤80%。测量员应远离电场测量探头, 一般距离≥2.5 m^[7]。电场测量可只测电场强度E的垂直地面分量, 磁场测量则需测磁感应强度B的垂直分量 B_z 和2个水平分量 B_x 和 B_y , 其计算式为

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (17)$$

2.3 电磁场暴露的评估方法

剂量学是电磁场暴露的评估方法, 有外剂量学(external dosimetry)和内剂量学(internal dosimetry)。外剂量学是通过流行病学调查和实验研究来对电磁场暴露进行评估, 评估指标有^[1]:

- (1) 电场强度或磁感应强度;
- (2) 暴露持续时间;
- (3) 时段, 如白昼或黑夜;
- (4) 单次或重复暴露;
- (5) 频谱;
- (6) 空间特性, 如方向、极化、梯度等;
- (7) 单场或复杂场暴露;
- (8) 静场和极低频场同时暴露;
- (9) 电磁场与化合物联合暴露。

实验研究用的暴露系统包括用于动物实验的在体系统和用于人类或动物细胞实验的离体系统。离体系统包括实时系统^[8]和非实时系统^[9]。实时系

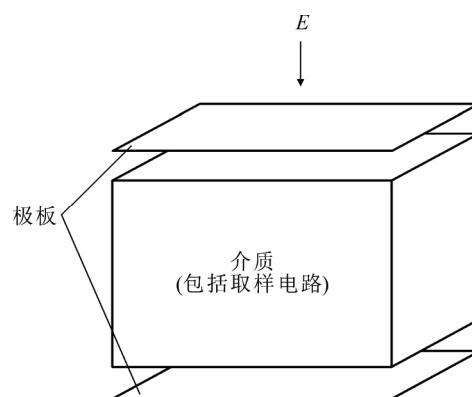


图2 电场测量原理

Fig.2 Electric fields measurement

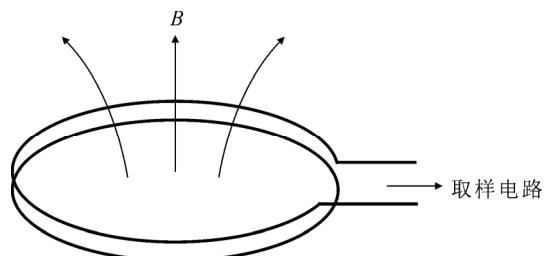


图3 磁场测量原理

Fig. 3 Magnetic fields measurement

统可以准确地确认生物体对电磁场扰动的响应。

内剂量学是通过模型来对生物体内部的电磁场分布进行评估, 主要测量组织内的感应电场, 用感应电场和电流密度的平均值、均方根和最大值, 以及50分位、95分位和99分位值来表示。Stuchly等建立了各个器官感应电场和电流密度的内剂量数据^[10]。人体各个器官的感应电场和电流密度可以用代表解剖学特征的体元模型进行异构数值计算^[11], 如马爱清等利用有限元方法, 分析人体对地绝缘和人体接地2种情况下, 高压输电线路下暴露的人体所产生的感应电压、感应电流、感应电荷密度、感应电流密度^[12]。

2.4 我国的高压电磁环境

特高压输电线路是指交流1 000 kV、直流±800 kV以上电压等级的输电线路, 具有电力输送效率高、输送距离长、输送损耗低、节省土地资源等优点, 非常适合我国国土面积大、西电东送的特点, 是我国近年来大力建设的能源类项目。高压电磁环境包括电晕损耗、无线电干扰、可听噪声、距地面高度1 m处电场强度等^[13]。目前, 我国特高压电磁环境的电场强度控制值是民居附近4 kV/m, 一般区

域 7 kV/m, 农田 10 kV/m^[14], 实际监测电场强度 $\leq 6.06 \text{ kV/m}$ ^[15], 磁感应强度 $\leq 60 \mu\text{T}$ ^[16]。750 kV 电压等级的变电站软母线下方电场强度达到 20.5 kV/m^[17], $\pm 500 \text{ kV}$ 电压等级的直流输电线路合成最大电场强度 $\leq 30 \text{ kV/m}$ ^[18], 500 kV 电压等级的变电站合成电场强度 $\leq 12 \text{ kV/m}$, 磁感应强度 $\leq 16.5 \mu\text{T}$ ^[19], 周围民居的电场强度有 $> 6 \text{ kV/m}$ ^[20]。

3 生物效应与健康效应

极低频电磁场健康效应研究主要有流行病学调查、人体、动物、细胞、生物物理等层次的研究^[21]。

3.1 流行病学调查

流行病学调查研究有描述性研究、病例对照研究和队列研究这 3 种。早期极低频电磁场健康流行病学调查以描述性研究为主, 目前主要是病例对照研究。队列研究有很多优点, 但代价太大。汇集分析(pooled analysis)和 Meta 分析可以借助已有成果, 但不能取代原始研究^[22]。电磁危险度评价通常用比值比(odds ratio, OR), 也有称相对风险度(relative risk, RR)。OR=1, 表示该因素对疾病发生不起作用; OR>1, 表示该因素是 1 个危险因素; OR<1, 表示该因素是 1 个保护因素。环境磁场剂量用磁感应强度和到高压输电线路距离这 2 种形式表示。

极低频电磁健康效应最早是从流行病调查中发现。1979 年, 美国科罗拉多州立大学的流行病专家 Wertheimer 和物理学家 Leeper 在《美国流行病杂志》发表的“电线配置和儿童癌症”一文开启了极低频电磁场对人类健康影响的研究^[23], 并且儿童白血病成为极低频电磁场健康效应的中心议题。2002 年, 国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)流行病常委会回顾了 20 a 来 9 个国家有关儿童肿瘤 18 篇流行病调查文献, 认为没有证据表明磁感应强度 $< 0.4 \mu\text{T}$ 的极低频磁场暴露与儿童白血病之间有关系, 磁感应强度 $> 0.4 \mu\text{T}$ 的极低频磁场暴露下儿童白血病相对风险度增加 2 倍, 但缺乏致癌生物机制或可重复实验的支持^[24]。磁感应强度为 $0.4 \mu\text{T}$ 的极低频磁场暴露成为流行病学证据的标志点^[25]。

关于极低频电磁场是否是儿童白血病发生的因素, 很早就有争论^[26], 并且一直延续至今。1 种观点认为极低频电磁场对人类健康有影响, 至少是弱效应。如 Wertheimer 和 Leeper 研究了 1976—1977 年间丹佛地区居住在配电线(包括 50~230 kV 电压等级的高电流 HCC 和在此之外的低电流 LCC)附

近儿童的 491 例病例组与 472 例对照组数据, 对比后发现: 对照组患白血病、淋巴瘤、神经系肿瘤的概率增加, 原因不明^[23]。之后, 她们收集了在科罗拉多 4 个区域过去 10 a 期间居民罹患癌症死亡例以及同一区域对照用非癌症死亡例共 1 179 例数据, 来研究成人与配电线路之间的关系。结果显示 3 a 内居住在 HCC 与癌症没有关系, 6 a 以上居住在强 HCC 有短潜伏期^[27]。她们将这个调查与 3 个公开发表的职业性死亡率数据源结合起来, 职业包括电工、电气工程师、电厂工程师、焊工和火焰切割工、变电站巡视员和服务员、电解铝工、电影放映员等, 分析神经、淋巴、生殖、泌尿、消化、呼吸及其他系统以及肿瘤与极低频磁场的关系, 表明长期接触交变磁场(AMF)可能是肿瘤促进剂^[28]。另 1 种观点认为极低频电磁场对儿童白血病的产生没有影响, 表 1 综述了近年来关于极低频电磁场与儿童白血病关系的流行病学调查^[29-44]。

极低频电磁场的研究领域除了涉及儿童白血病领域外, 还涉及神经、生殖等领域。ICNIRP 对神经退行性疾病、自杀和抑郁、心血管疾病、生殖效应等进行汇集分析, OR 值在 1.3~3.8 之间^[24]。Vocht 等用队列研究了 1990—2009 年间 265 974 例新生儿的低体质量儿、小胎龄、自发早产风险数据, 研究结果表明: 靠近输电线路有可能导致临床相关影响, 但没有发现有统计学意义的影响, 对公众健康影响有限^[45]。Håkansson 等采用队列研究方法对 537 692 名男性和 180 529 名女性暴露在 1~100 kA 强电流磁场的瑞典职业工人阿尔茨海默氏症患病风险进行研究, 没有证据表明帕金森病和多发性硬化症风险增加^[46]。李丽等研究在 220 kV 和 500 kV 电压等级配电线系统职业工人 364 例暴露组和 346 例对照组数据, 没有发现暴露组在记忆识别、视觉辨别、短期记忆、认知能力和执行功能等神经行为的差别^[47]。Ahlbom 等通过 1、5、10 a 时间职业接触磁感应强度 $> 0.3 \mu\text{T}$ 的极低频电磁场的流行病调查, 没有发现职业接触极低频电磁场与心肌梗死有关(OR=0.57, CI 为 0.36~0.89)^[48]。

表 1、文献[1]和[23]表明, 从 1979 年以来, 极低频电磁场对儿童白血病影响的流行病调查采用了多种手段, OR 值多数在 1~2 之间, 表明极低频电磁场对健康呈弱效应。尽管流行病调查是电磁健康最强有力的证据, 但也是有缺陷的: (1)电磁场无处不在, 使得对照组寻找困难; (2)人们不能探测到电

表 1 极低频电磁场与儿童白血病关系的流行病调查

Table 1 Epidemiological investigation of relationship between ELF EMF and childhood leukemia

研究者	时间	磁感应强度	对象	方法	OR(95%CI)	结论
Linet(1997) ^[29]	1989—1994	0.3 μT	638 病例, 620 对照	汇集分析	1.24(0.86~1.79)	阴性
Ahlbom(2000) ^[30]	1960—1996	0.4 μT	1959 病例, 3547 对照	汇集分析	1.24(0.82~1.87)	阴性
Greenland(2000) ^[31]		0.3 μT	2656 病例, 7084 对照	汇集分析	3.00(2.00~8.00)	阴性
Milha(2001) ^[32]	1920—1950		3973 病例	描述研究		阳性
Draper(2005) ^[33]	1962—1995	200 m 外	33000 病例, 29081 对照	病例对照	1.69(1.13~2.53)	阴性
张徐军(2005) ^[34]	1994—2004	自然环境	4088 病例, 4519 对照	Meta 分析	1.58(1.24~2.03)	阳性
Kheifets(2006) ^[35]		0.4 μT		Meta 分析	5.41(3.78~16.48)	阳性
Schüz(2007) ^[36]	1988—1996	0.4 μT	1842 病例, 3099 对照	汇集分析	1.93(1.11~3.35)	阴性
Kheifets(2010) ^[37]	1979—2010	0.3 μT	988 病例, 2469 对照	汇集分析	1.44(0.88~2.36)	阴性
Kheifets(2010) ^[38]	1960—2001	0.4 μT	8372 病例, 11494 对照	汇集分析	2.19(0.57~8.44)	阴性
Reid(2011) ^[39]			379 病例, 854 对照	病例对照	0.96(0.74~1.25)	阴性
Schüz(2012) ^[40]	10 年	0.4 μT	3073 病例, 3016 对照	病例对照	1.04(0.97~1.11)	阴性
Sermage(2013) ^[41]	2002—2007	50 m 外	2779 病例, 30000 对照	病例对照	1.7(0.9~3.6)	阴性
Slusky(2014) ^[42]	2002—2007		376 病例, 426 对照	病例对照	1.25(0.87~1.79)	阴性
Bunch(2014) ^[43]	1962—2008	600 m 外	53515 病例, 53515 对照	病例对照	1.12(0.90~1.38)	阴性
Salvan(2015) ^[44]	1989—2006	0.3 μT	713 病例, 1380 对照	病例对照	1.87(1.04~3.34)	阴性

磁场, 不可避免地存在电磁接触; (3)偏倚的影响^[49]等。

3.2 人体志愿者实验

人体志愿者实验研究包括心肺生理、脑电与神经、血常规、褪黑素等研究。Kim 等将 30 位成年人和 30 位青少年暴露在频率为 60 Hz、磁感应强度为 12.5 μT(简写为 60 Hz–12.5 μT, 下同)的极低频电磁场实验装置中, 观察受试者心电图、心率(HR)、呼吸率、心率变异性(HRV)、HRV 功率谱、低频功率/高频功率比(LFP/HFP)等生理参数, 结果没有发现差异^[50]。Kurokawa 等也没有发现 50 Hz–20 μT 极低频电磁场对 HR、HRV、RR 间期等有变化^[51]。Capone 等用频率为(75±2) Hz、脉冲宽度为 1.3 ms、磁感应强度峰值为(1.8±0.2) mT、感应电压为(3±1) mV 的脉冲电磁场(PEMF)刺激人体头部, 经过 22 例志愿者的测试, 大脑皮层的电活动加剧^[52]。Ghone 等研究了磁感应强度峰值为 40 μT 和 80 μT 的磁场对人体脑电图 α 波、心率、血压和痛觉阈的影响, 没有发现 40 位男性学生志愿者的心率、血压有变化, 但是发现痛觉阈有明显增加, 认为这个结果可以用感觉门控机制来解释^[53]。

王丽娟等没有从人体血常规中发现有极低频电磁场的影响^[54]。Crasson 等认为虽然从 21 例志愿者没有检测出白天暴露在电磁场中人体 6-羟基硫酸褪黑素增加的结果, 但还是要进一步观察电磁场对褪黑素的影响^[55]。Ikeda 等观察暴露在 60 Hz–0.5 mT 电磁场的志愿者外周血单核细胞(PBMC), 没有

发现 PBMCs 的细胞毒性活性和细胞因子生产^[56]。

3.3 动物效应

动物实验研究包括认知、血管渗透性、褪黑激素、免疫系统、转基因白血病动物模型、协同致癌作用等研究。Zhao 等将 ICR 小鼠暴露在 50 Hz–1.0 mT 的 Helmholtz 线圈磁场中, 研究动物的识别记忆和海马神经元形态学变化, 结果显示自发性自主活动无相应变化, 海马树突棘密度有所降低^[57]。刘肖等将健康 Wistar 大鼠暴露在频率为 50 Hz、磁感应强度为 0.4 μT、暴露持续时间为 60 d(简写为 50 Hz–0.4 mT–60 d, 下同)的电磁场中, 观察到动物认知行为的平均逃避潜伏期明显延长, 体质量增加^[58]。她们还将 Alzheimer's 模型动物大鼠暴露该电磁场中, 动物体质量增加, 动物的认知和临床病理症状部分改善, 突触传递、氧化应激、蛋白质降解、能量代谢、Tau 聚合和炎症等参与了上述效应^[59]。Qi 等将 C57BL/6NJ 小鼠暴露在 50 Hz–0.5 mT 的电磁场中, 结果体质量减少, 肝和肺肿瘤发生率没有增加, 但雌性鼠慢性骨髓白血病发生率增加, 认为极低频磁场还是增加肿瘤的生长和发育^[60]。Kantar 等研究了暴露在不同强度电磁场中的大鼠事件相关电位的失匹配负波(MMN)、以及细胞凋亡和氧化脑损伤, 结果表明电场降低了 MMN 幅度, 可以认为在电场中可能是由脂质过氧化所引起的作用降低了 MMN 振幅^[61]。Gutierrez-Mercado 等将 Wistar 大鼠暴露在 120 Hz–0.66 mT 的谐波电磁场中, 观察对毛细血管(CVOs)扩张的影响, 结果表明动物脑区的血

脑屏障(BBB)渗透性增加, CVOs 扩张^[62]。Foroozandeh 等发现暴露在 50 Hz~8 mT~4 h 电磁场中的小鼠的记忆巩固能力下降^[63]。

Jimenez-Garcia 等将 Fischer-344 大鼠暴露在 120 Hz~4.5 mT~50 min 的电磁场中, 观察肝癌发生、细胞凋亡、细胞增殖、细胞周期, 结果表明极低频电磁场通过减少细胞增殖, 不改变凋亡过程来抑制化学诱导的肿瘤出现前的病变^[64]。Torres-Durand 等将 Wistar 大鼠暴露在 60 Hz~2.5 mT 的 Helmholtz 线圈磁场中, 发现血脂中的胆固醇和高密度脂蛋白(HDL-C)、血清游离脂肪酸等血脂参数显著增加^[65]。Marino 等将 C57BL/6 小鼠暴露在 60 Hz~0.1 mT~105 d 电磁场中, 观察 20 种免疫参数, 没有发现显著性差异, 认为混沌理论可解释对免疫系统的影响^[66]。

3.4 细胞与分子效应

细胞和分子效应研究包括细胞周期、细胞凋亡、细胞分裂、DNA 复制转录和翻译等研究。Ma 等将 BALB/c 小鼠的胚胎神经干细胞(eNSCs)暴露在 50 Hz~0.5 mT~3 d、50 Hz~1 mT~3 d、50 Hz~2 mT~3 d 的电磁场中, 结果表明细胞增殖没有发生明显变化, 认为在 eNSCs 分化期, 极低频电磁场诱导了分子变化, 可能是被后转录机制所补偿来支持细胞内稳态^[67]。

Li 等将果蝇短时程和长时程暴露在频率为 40~499.9 Hz、磁感应强度为 0.05~5 mT、电场强度为 10~1 000 V/m 的电磁场中, 结果显示长时程暴露使得参与代谢过程、应激反应、有丝分裂纺锤体组织、老化、细胞死亡和细胞呼吸的基因表达发生变化, 短时程暴露可能造成雄性动物的生育能力下降, 长时程暴露却没有影响, 这可能与 ark 基因下调有关; 结果还表明极低频电磁场可以加速细胞老化, 与 cat 基因、jra 基因下调, hsp22 基因上调有关^[68]。Reyes-Guerreroa 等将 Wistar 大鼠暴露在频率为 60 Hz 的 Helmholtz 线圈中, 结果显示极低频电磁场对雌性动物嗅球雌激素受体- α 和 - β 的 mRNA 基因表达有双向效应, 从而使雌性动物动情增加, 发情减少^[69]。Lee 等认为精子发生的生殖细胞凋亡可能机制是高剂量电磁场的细胞毒性使成熟精子退化, 改变了睾丸间质细胞的增殖^[70]。

周建等发现 50 Hz~4.8 mT 正弦交变电磁场能促进成骨细胞分化成熟, 并且具有较明显的双强度“窗效应”, 其中磁感应强度为 1.8 mT 和 3.6 mT 的电磁场作用最为明显^[71]。Akan 等将 THP-1 细胞(人

类单核白血病细胞株)暴露在极低频电磁场中, 结果表明对细菌生长和免疫系统反应有影响, 认为极低频电磁场可以作有益利用^[72]。Collard 等用生物芯片获得暴露电磁场后的人类表皮, 结果观察到实验与对照的基因表达有显著差异, 包括参与细胞增殖或分化、有丝分裂、细胞周期、DNA 复制转录和翻译的基因^[73]。

3.5 生物物理机制

生物物理机制是电磁健康效应的第 1 步, 电磁场最初与生物体发生的是物理反应, 然后产生后续的生物效应和健康效应, 具有因果性^[74]。生物物理机制研究主要包括 ROS 机制、细胞内 Ca^{2+} 、离子通道、鲁棒行为、信噪比、体内磁性颗粒等研究。活性氧自由基(ROS)具有不配对电子基团或分子($\text{R}\cdot$), 主要有超氧阴离子($\cdot\text{O}_2^{-1}$)、过氧化氢(H_2O_2)、羟自由基($\cdot\text{OH}$)等, 它们具有活泼、寿命短、有顺磁性等化学性质, 是原初作用所产生的化学产物^[75]。苏海峰等发现海马神经元暴露在 50 Hz~1 mT~48 h 的电磁场中时, 胞内 ROS 和 Ca^{2+} 均有升高^[76]。Reale 等将神经母细胞瘤细胞珠(SH-SY5Y)暴露在频率为 50 Hz 的磁场中, 结果发现 NOS 酶和过氧化氢酶(CAT)活性、细胞色素氧化酶/趋化因子增加, 表明电磁场促胞内 ROS 增加^[77]。Simko 等将小鼠巨噬细胞暴露在 50 Hz~(0.5, 1.0, 1.5)mT~45 min 的电磁场中时, 发现吞噬吸收显著增加; 与对苯二甲酸(TPA)协同暴露时, 发现超氧化物显著增加, 但电磁场刺激巨噬细胞与蛋白激酶 C 信号转导途径无关^[78]。

胞内 Ca^{2+} 是重要的第 2 信使。Grassi 等在人神经母细胞瘤 IMR32 和大鼠垂体细胞 GH3 中发现, 50 Hz~1 mT~3 d 电磁场可以促进 Ca^{2+} 通道数和亚单位增加, 从而提高胞膜电流密度, 调制神经元细胞增殖和细胞凋亡^[79]。Luo 等将 EC 神经元暴露在 50 Hz~1 mT~1 d 和 50 Hz~3 mT~1 d 的电磁场中, 发现极低频电磁场对胞间钙动力学有强影响^[80]。Pall 从 23 个由电磁场调控的电压门控通道(VGCCs)分析结果推测, 电磁场暴露的下游反应可能是介导的钙离子/钙调蛋白刺激一氧化氮的合成, 生理/治疗反应可能是氮气-cGMP-蛋白激酶 G 途径刺激^[81]。Zhang 等将 Wistar 大鼠暴露在 50 Hz~0.8 mT 的磁场中, 发现电磁场能够诱导骨细胞内 $[\text{Ca}^{2+}]$ 增加, 证明 Ca^{2+} 窗效应存在^[82]。Shanhidain 等在电场强度为 0.45~86.8 V/m 的电场中没有发现 ROS 17/2.8 细胞的 Ca^{2+} 变化^[83]。

信号通路是信号转导的途径。Cui 等将人源胚胎肾细胞 HEK293 暴露在 50 Hz–0.2 mT 的磁场中，发现电磁场通过 AA/LTE₄ 信号通路抑制了 T-钙通道^[84]。He 等将 SD 大鼠小脑粒细胞 GCs 暴露在 50 Hz–0.2 mT 的磁场中，证明极低频电磁场通过 cPLA2 AA/PGE₂ EP 受体 PKA 信号通路增加 Na 离子电流 I_{Na} ^[85]。Tonini 等证明了引起细胞膜表面变早期分化的拮抗机制和胞内 Ca²⁺增加调制 K 通道超极化机制这 2 种细胞分化机制^[86]。Sisken 等认为电磁场不会影响跨质膜钙离子流入容性钙进入系统^[87]。

细胞可以在细胞分裂、离子流入、化学反应率等方面对极低频电磁场产生反应，但研究这一事件链是困难的，这是因为极低频电磁场能量比热噪声还小。然而，生物系统(包括离子通道)是随机系统，系统对信号是要放大的。这样，信噪比可以用于电磁生物效应的原初反映，弱信号通过细胞信号通路放大。Galvanovskis 和 Sandblom 用随机理论研究了电磁场诱导的离子通道模型、系统放大特性等^[88]。Vaughan 和 Weaver 对信噪比理论认为在电磁场暴露与生化过程之间的强耦合有 1 个未知的生物物理机制；或者实验是应对电磁场以外的因素^[89]。Valberg 认为电磁生物效应可能有以下几个机制^[74]：①能量传递加速离子和电荷修饰细胞膜和受体；②电场力使电子或电荷运动；③磁场使磁性颗粒和自由基相互作用；④共振作用包括电磁场驱动的振动和变轨；⑤时间平均和空间合计可以提高信噪比。

电磁生物效应是 1 种弱效应，人们很难分辨多强的电磁场可以产生足够强的生物效应。包家立认为生物体是 1 种系统，电磁场是挑动系统变化的扰动因素，生物系统具有抵抗挑动的能力，这就是生物鲁棒性的基本思想^[90]。挑动生物系统变化电磁场的作用本质是电磁能量^[91]。

4 极低频电磁场的评价与标准

4.1 评价

WHO 所属的国际癌症研究机构(IARC)在 2002 年对极低频电磁场作出评价^[1]：

- (1) 极低频磁场与儿童白血病相关致癌性的人体证据有限；
- (2) 极低频磁场与其他癌症相关致癌性的人体证据不足；
- (3) 静电或磁场和极低频电场致癌性的人体证据不足；

- (4) 极低频磁场致癌性的实验动物证据不足；
- (5) 无静电或磁场和极低频电场致癌性的实验动物有效数据。

综合上述，极低频磁场为对人类可疑致癌物，分类 2B。至今，这个评价没有修改版。

4.2 标准

ICNIRP 是 1 个与 WHO 有密切合作的 NGO 组织，其指南被世界各国制订本国电磁限值标准所采用。1998 年，ICNIRP 公布过 1 个标准，频率为 50 Hz 的工频电磁场的磁感应强度暴露限值为公众 0.1 mT，职业 0.5 mT^[92]。2010 年又作了修订，工频电磁场磁感应强度暴露限值为公众 0.2 mT，职业 1.0 mT，提高了 1 倍^[93]。2002 年，IEEE 发布了极低频电磁场限值标准，分人体不同部位，其中头部磁感应强度暴露限值为公众 0.904 mT，环境 2.71 mT^[94]。

我国长期以来缺少极低频电磁限值标准，但电力部门还是主动设计电磁限值，积极考虑极低频电磁场对人体健康的影响^[95]，尤其是特高压输电系统考虑较早^[96]，设计电磁限值^[97]。由卫生部负责制订的国家职业卫生标准 GBZ 2.2—2007 只规定了电场强度 <5 kV/m，磁场没有规定^[98]。这是该标准的缺陷，因为磁场的危险性比电场高。2014 年，由环保部负责修订的国家标准《电磁环境控制限值》首次对环境极低频电磁场作出规定，频率为 50 Hz 的环境磁场磁感应强度公众限值为 0.1 mT^[99]。

5 结论

综合 IARC 报告和近 10 a 来文献，总体上，流行病调查、人体和动物研究表现在体效应不明显；细胞和分子、生物物理研究表现离体效应明显。可能因素是：① 生物整体系统是由多子系统组成，具有了系统涌现性、自组织性和鲁棒性，使系统具有抵抗外源电磁场扰动的能力。而细胞缺少子系统，鲁棒性下降，抵抗外源电磁场扰动的能力也下降；② 在体系统是大生物，离体细胞是小生物，它们作用的电磁场强度相近。这样，对小生物来说，这个电磁场足以扰动生物系统的状态，而对大生物来说，这个电磁场力量不够强。未来的研究应该有：

- 1) 系统层次上研究电磁场对生物系统的作用特性，尤其是鲁棒性、涌现性等系统特性。
- 2) 研究电磁场作用下的生物实时响应。目前细胞实验方法多数是将细胞从内置 Helmholtz 线圈的孵箱中移出，检测观察的指标。孵箱(37 °C)与环

境(20°C)的温差足以使细胞产生热应激而导致非电磁场的生物效应。将电磁场与观察仪器结合一起,实时观察电磁场作用下的生物响应更为可信。

3) 研究电磁能量的生物效应。电场强度、磁感应强度都是表征场力的参数,而推动场力的根本因素是能量,因此,能量是导致生物效应原初作用的本质。

参考文献 References

- [1] IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans: non-ionizing radiation, part 1: static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields[R]. Lyon, France: IARC Press, 2002.
- [2] IARC. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans: non-ionizing radiation, part 2: radiofrequency electromagnetic fields[R]. Lyon, France: IARC Press, 2013.
- [3] Guhr G, Schmidt H, Weihnacht M. A new tool to assess mechanical and dielectric properties of tissues[C]// 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'09), Minneapolis, USA: IEEE, 2009: 729-731.
- [4] Dawson T W, Stuchly M A, Kavet R. Electric fields in the human body due to electrostatic discharges[J]. IEEE Transactions on Biomed Engineering, 2004, 51(8): 1460-1468.
- [5] Tomitsch J, Dechant E, Frank W. Survey of electromagnetic field exposure in bedrooms of residences in Lower Austria[J]. Bioelectromagnetics, 2010, 31:200- 208.
- [6] 王琴, 苏海峰, 包家立, 等. 高压输电线环境电磁场暴露健康效应的原初作用[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 193 -200.
WANG Qin, SU Haifeng, BAO Jiali, et al. Primary reaction for the environmental electric and magnetic fields exposure around power-line on health effects [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 193-200.
- [7] HJ 681—2013 国家环境保护部标准:交流输变电工程电磁环境监测方法(试行)[S], 2013.
- [8] 王顺, 包家立, 朱朝阳. 实时电磁场细胞暴露系统的研制[J]. 高电压技术, 2015, 41(4): 1407-1416.
WANG Shun, BAO Jiali, ZHU Chaoyang. Development of real-time electromagnetic field exposure system for cell[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4):1407-1416.
- [9] Schuderer J, Oesch W, Felber N, et al. In vitro exposure apparatus for ELF magnetic fields[J]. Bioelectromagnetics, 2004, 25:582-591.
- [10] Caputa K, Dimbylow P J, Dawson T W, et al. Modelling fields induced in humans by 50/60 Hz magnetic fields: reliability of the results and effects of model variations [J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(8): 1391-1398.
- [11] Stuchly M A, Dawson T W. Human body exposure to power lines: relation of induced quantities to external magnetic fields[J]. Health Physics, 2002, 83(3):333-340.
- [12] 马爱清, 王淑清, 张绮华, 等. 高压交流输电线路曝露场强限值下人体感应电场和感应电流分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1638-1643.
MA Aiqing, WANG Shuqing, ZHANG Qihua, et al. Induced electric field and induced current analysis of human body at exposure limits of electric field generated by HVAC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1637-1643.
- [13] 虞菊英. 我国特高压交流输电研究现状[J]. 高电压技术, 2005, 31(12): 23-25.
YU Juying. Analysis of research on UHV AC transmission in China[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12): 23-25.
- [14] 邬雄, 万保权, 路遥. 1 000 kV 级交流输电线路电磁环境的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 55-58.
WU Xiong, WAN Baoguan, LU Yao. Study on electromagnetic environment for 1 000 kV AC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 55-58.
- [15] 张广洲, 程更生, 万保权, 等. 交流特高压试验线段电磁环境研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 438-441.
ZHANG Guangzhou, CHENG Gengsheng, WAN Baoquan, et al. Study on EM environment of UHV test line segment[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 438-441.
- [16] 万保权, 谢辉春, 樊亮, 等. 特高压变电站的电磁环境及电晕控制措施 [J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 109-115.
WAN Baoquan, XIE Huichun, FAN Liang, et al. Electromagnetic environment and corona control measures of UHV substation [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 109-115.
- [17] 万保权, 邬雄, 杨毅波, 等. 750 kV 变电站母线电磁环境参数的试验研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 57-60.
WAN Baoquan, WU Xiong, YANG Yibo, et al. Study on electromagnetic environment of bus in 750 kV station [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 57-60.
- [18] 干喆渊, 邬雄, 张广洲, 等. ± 500 kV 直流输电系统电磁环境调查研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 146-149.
GAN Zheyuan, WU Xiong, ZHANG Guangzhou, et al. Research on the EM environment of HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 146-149.
- [19] 孙涛, 万保权. 500 kV 变电站电磁环境参数测量[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 51-55.
SUN Tao, WAN Baoquan. Measurement of the electric- magnetic environment for 500 kV substation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 51-55.
- [20] 张广洲, 邬雄, 万保权, 等. 邻近民房的输电线路电磁环境 [J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 884-888.
ZHANG Guangzhou, WU Xiong, WAN Baoquan, et al. EM environment of the transmission lines adjacent to residential buildings [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 884-888.
- [21] World Health Organization. 2007 WHO research agenda for extremely low frequency fields [EB/OL]. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2007 [2012-03-22]. <http://www.who.int/peh-emf/research/agenda/en/index.html>.
- [22] Elwood J M. Childhood leukemia and residential magnetic fields: are pooled analyses more valid than the original studies[J]. Bioelectromagnetics, 2007, 27: 112-118.
- [23] Wertheimer N, Leeper E. Electrical wiring configurations and childhood cancer[J]. American Journal of Epidemiology, 1979, 109(3): 273-284.
- [24] Ahlbom A, Cardis E, Green A, et al. Review of the epidemiologic literature on EMF and health [J]. Environmental Health Perspectives, 2001, 109 (Supplement 6): 911-933.
- [25] Schüz J. Exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer update of the epidemiological evidence [J]. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 2011, 107: 339-342.
- [26] Pool R. Is there an EME-cancer connection[J]. Science, 1990, 249(Sep 7): 1096-1098.
- [27] Wertheimer N, Leeper E. Adult cancer related to electrical wires near the home[J]. International Journal of Epidemiology, 1982, 11(4): 345-355.
- [28] Wertheimer N, Leeper E. Magnetic field exposure related to cancer subtypes[J]. Annals New York Academy of Sciences, 1987, 502: 43-54.
- [29] Linet M S, Hatch E E, Kleinerman R A, et al. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children [J]. The

- New England Journal of Medicine, 1997, 337(1): 1-7.
- [30] Ahlbom A, Day N, Feychtig M, et al. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia[J]. British Journal of Cancer. 2000, 83(5): 692-698.
- [31] Greenland S, Sheppard A R, Kaune W T, et al. A pooled analysis of magnetic fields, wire codes, and childhood leukemia: Childhood Leukemia-EMF Study Group[J]. Epidemiology, 2000, 11(6): 624-634.
- [32] Milham S, Ossiander E M. Historical evidence that residential electrification caused the emergence of the childhood leukemia peak [J]. Medical Hypotheses, 2001, 56(3): 290-295.
- [33] Draper G I, Vincent T, Kroll M E, et al. Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study [J]. British Medical Journal, 2005, 330(3): 1290-1294.
- [34] 张徐军, 阎 捷. 极低频电磁场与儿童白血病关系的 Meta 分析[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(6): 447-449.
- ZHANG Xunjun, YAN Jie. Meta analysis of childhood leukemia associated with extremely low frequency electromagnetic fields[J]. Journal of Environment and Health, 2005, 22(6): 447-449.
- [35] Kheifets L, Afifi A A, Shimkhada R. Public health impact of extremely low-frequency electromagnetic fields[J]. Environmental Health Perspectives, 2006, 114(10): 1532-1537.
- [36] Schüz J, Svendsen A L, Linet M S, et al. Nighttime exposure to electromagnetic fields and childhood leukemia an extended pooled analysis[J]. America Journal of Epidemiology, 2010, 172(7): 752-761.
- [37] Kheifets L, Ahlbom A, Crespi C M, et al. Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia [J]. British Journal of Cancer, 2010, 103(7): 1128-1135.
- [38] Kheifets L, Ahlbom A, Crespi C M, et al. A pooled analysis of extremely low-frequency magnetic fields and childhood brain tumors[J]. America Journal of Epidemiology, 2010, 172(7): 752-761.
- [39] Reid A I, Glass D C, Bailey H D, et al. Risk of childhood acute lymphoblastic leukaemia following parental occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields[J]. British Journal of Cancer, 2011, 105(9): 1409-1413.
- [40] Schüz J, Grell K, Kinsey S, et al. Extremely low-frequency magnetic fields and survival from childhood acute lymphoblastic leukemia: an international follow-up study[J]. Blood Cancer Journal, 2012, e98.
- [41] Sermage-Faure C, Demoury C, Rudant J, et al. Childhood leukaemia close to high-voltage power lines--the geocap study, 2002—2007[J]. British Journal of Cancer, 2013, 108(9): 1899-1906.
- [42] Slusky D A, Does M, Metayer C, et al. Potential role of selection bias in the association between childhood leukemia and residential magnetic fields exposure: a population-based assessment[J]. Cancer Epidemiology, 2014, 38(3): 307-313.
- [43] Bunch K J, Keegan T J, Swanson J, et al. Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines: childhood cancer risk in Britain 1962—2008[J]. British Journal of Cancer, 2014, 110(5): 1402-1408.
- [44] Salvan A, Ranucci A, Lagorio S, et al. Childhood leukemia and 50 Hz magnetic fields: findings from the Italian SETIL case-control study[J]. International Journal of Environment Research Public Health, 2015, 12(2): 2184- 2204.
- [45] de Vocht F, Hannam K, Baker P, et al. Maternal residential proximity to sources of extremely low frequency electromagnetic fields and adverse birth outcomes in a UK cohort [J]. Bioelectromagnetics, 2014, 35(3): 201-209.
- [46] Häkansson N, Gustavsson P, Johansen C, et al. Neurodegenerative diseases in welders and other workers exposed to high levels of magnetic fields[J]. Epidemiology, 2003, 14(4): 420-426.
- [47] Li L, Xiong D F, Liu J W, et al. No effects of power line frequency extremely low frequency electromagnetic field exposure on selected neurobehavior tests of workers inspecting transformers and distribution line stations versus controls[J]. Australasian Physics Engineering Science Medicine, 2014, 37(1): 37-44.
- [48] Ahlbom A, Feychtig M, Gustavsson A, et al. Occupational magnetic field exposure and myocardial infarction incidence[J]. Epidemiology, 2004, 15(4): 403- 408.
- [49] Kheifets L, Shimkhada R. Childhood leukemia and EMF: review of the epidemiologic evidence[J]. Bioelectromagnetics, 2005, 26(Supplement 7):S51-S59.
- [50] Kim S K, Choi J L, Kwon M K, et al. Effects of 60 Hz magnetic fields on teenagers and adults[J]. Environmental Health, 2013, 12: 42.
- [51] Kurokawa Y, Nitta H, Imai H, et al. Can extremely low frequency alternating magnetic fields modulate heart rate or its variability in humans[J]. Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical, 2003, 105: 53-61.
- [52] Capone F, Dileone M, Profice P, et al. Does exposure to extremely low frequency magnetic fields produce functional changes in human brain[J]. Journal of Neural Transm, 2009, 116: 257-265.
- [53] Ghione S, Seppia C D, Mezzasalma L, et al. Effects of 50 Hz electromagnetic fields on electroencephalographic alpha activity, dental pain threshold and cardiovascular parameters in humans[J]. Neuroscience Letters, 2005, 382: 112-117.
- [54] 王丽娟, 刘 慧, 潘益峰, 等. 职业性电磁辐射暴露对全血细胞参数的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3822 -3829.
- WANG Lijuan, LIU Hui, PAN Yifeng, et al. Effects of occupational exposure to electromagnetic field on hematologic parameters [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3822-3829.
- [55] Crasson M, Beckers V, Pequeux C, et al. Daytime 50 Hz magnetic field exposure and plasma melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin concentration profiles in humans[J]. Journal of Pineal Research, 2001, 31: 234-241.
- [56] Ikeda K, Shinmura Y, Mizoe H, et al. No effects of extremely low frequency magnetic fields found on cytotoxic activities and cytokine production of human peripheral blood mononuclear cells in vitro[J]. Bioelectromagnetics, 2003, 24(1): 21-31.
- [57] Zhao Q R , Lu J M , Yao J J, et al. Neuritin reverses deficits in murine novel object associative recognition memory caused by exposure to extremely lowfrequency (50 Hz) electromagnetic fields [J]. Scientific Reports, 2015, 5:11768.
- [58] 刘 肖, 左红艳, 王德文, 等. 极低频电磁场曝露对大鼠认知功能和海马形态结构的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 156-162.
- LIU Xiao, ZUO Hongyan, WANG Dewen, et al. Effects of occupational exposure to electromagnet field on hematologic parameters [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 156-162.
- [59] Liu X , Zuo H Y, Wang D W, et al. Improvement of spatial memory disorder and hippocampal damage by exposure to electromagnetic fields in an Alzheimer's disease rat model[J]. PLOS One, 2015, 0126963.
- [60] Qi G, Zuo X, Zhou L, et al. Effects of extremely low- frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) exposure on B6C3F1 mice[J]. Environment Health Preventive Medicine, 2015, 20(4): 287-293.
- [61] Kantar G D, Akpinar D, Yargicoglu P, et al. Effects of extremely low-frequency electric fields at different intensities and exposure durations on mismatch negativity[J]. Neuroscience, 2014, 272: 154-166.
- [62] Gutierrez-Mercado Y K, Cariedo-Dorantes L, Gomez- Pinedo U, et al. Increased vascular permeability in the circumventricular organs of adult rat brain due to stimulation by extremely low frequency magnetic fields[J]. Bioelectromagnetics, 2012, 33(1): 1-11.
- [63] Foroozandeh E, Derakhshan-Barjoei P, Jadidi M. Toxic effects of 50

- Hz electromagnetic field on memory consolidation in male and female mice[J]. Toxicology and Industrial Health, 2012, 29(3): 293-299.
- [64] Jimenez-Garcia M N, Arellanes-Robledo J, Aparicio-Bautista D I, et al. Anti-proliferative effect of extremely low frequency electromagnetic field on preneoplastic lesions formation in the rat liver[J]. BMC Cancer, 2010, 10: 159.
- [65] Torres-Duran P V, Ferreira-Hermosillo A, Juarez-Oropeza M A, et al. Effects of whole body exposure to extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on serum and liver lipid levels, in the rat[J]. Lipids in Health and Disease, 2007, 6: 31.
- [66] Marino A A, Wolcott R M, Chervenak R, et al. Nonlinear response of the immune system to power-frequency magnetic fields[J]. American Journal of Physiology - Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2000, 279(3): R761-R768.
- [67] Ma Q L, Deng P, Zhu G, et al. Extremely low-frequency electromagnetic fields affect transcript levels of neuronal differentiation-related genes in embryonic neural stem cells[J]. PLOS One, 2014, 9(3): e90041.
- [68] Li S S, Zhang Z Y, Yang C J, et al. Gene expression and reproductive abilities of male Drosophila melanogaster subjected to ELF-EMF exposure[J]. Mutation Research/ Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2013, 758: 95-103.
- [69] Reyes-Guerrero G, Guzmán C, Garca D E, et al. Extremely low-frequency electromagnetic fields differentially regulate estrogen receptor- α and - β expression in the rat olfactory bulb[J]. Neuroscience Letters, 2010, 471: 109-113.
- [70] Lee S K, Park S, Gimm Y M, et al. Extremely low frequency magnetic fields induce spermatogenic germ cell apoptosis possible mechanism [J]. Biomed Research International, 2140: 567183.
- [71] 周建, 陈克明, 葛宝丰, 等. 50 Hz 正弦交变电磁场促进体外培养成骨细胞分化成熟的双“强度窗”效应[J]. 生物物理学报, 2011, 27(6): 507-516.
- ZHOU Jian, CHEN Keming, GE Baofeng, et al. Double effect intensity of 50 Hz sinusoidal electromagnetic fields as different intensity on differentiation and mRNA expression of osteoblasts in vitro[J]. Acta Biophysica Sinica, 2011, 27(6): 507-516.
- [72] Akan Z, Aksu B, Tulinay A, et al. Extremely low- frequency electromagnetic fields affect the immune response of monocyte-derived macrophages to pathogens[J]. Bioelectromagnetics, 2010, 31: 603-612.
- [73] Collard J F, Lazar C, Nowé A, et al. Statistical validation of the acceleration of the differentiation at the expense of the proliferation in human epidermal cells exposed to extremely low frequency electric fields[J]. Progress in Biophysics and Molecular Biology, 2013, 111(1): 37-45.
- [74] Valberg P A, Kavet R, Rafferty C N. Can low-level 50/60 Hz electric and magnetic fields cause biological effects[J]. Radiation Research, 1997, 148(1): 2-21.
- [75] Brocklehurst B M , Lauchlan A. Free radical mechanism for the effects of environmental electromagnetic fields on biological systems[J]. International Journal of Radiation Biology, 1996, 69(1): 3-24.
- [76] 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[J]. 生物化学与生物物理进展, 2010, 37(3): 313-318.
- SU Haifeng, BAO Jiali, LI Peng. Electromagnetic fields exposure elicits radical and Ca^{2+} response in rat hippocampal neurons [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2010, 37(3): 313-318.
- [77] Reale M, Kamal M A, Patruno A, et al. Neuronal cellular responses to extremely low frequency electromagnetic field exposure: implications regarding oxidative stress and neurodegeneration [J]. PLOS One, 2014, 9(8): e104973.
- [78] Simko M, Drost S, Kriehuber R, et al. Stimulation of phagocytosis and free radical production in murine macrophages by 50 Hz electro-
- magnetic fields[J]. European Journal of Cell Biology, 2001, 80(8): 562-566.
- [79] Grassi C, D'Ascenzo M, Torsello A, et al. Effects of 50 Hz electromagnetic fields on voltage-gated Ca^{2+} channels and their role in modulation of neuroendocrine cell proliferation and death [J]. Cell Calcium, 2004, 35 (4):307- 315.
- [80] Luo F L, Yang N, He C, et al. Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields alters the calcium dynamics of cultured entorhinal cortex neurons[J]. Environmental Research, 2014, 135: 236-246.
- [81] Pall M L. Electromagnetic fields act via activation of voltage-gated calcium channels to produce beneficial or adverse effects[J]. Journal of Cell and Molecular Medicine, 2013, 17(8): 958-965.
- [82] Zhang X, Liu X L, Pan L T, et al. Magnetic fields at extremely low-frequency (50 Hz, 0.8 mT) can induce the uptake of intracellular calcium levels in osteoblasts[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2010, 396: 662-666.
- [83] Shahidain R, Mullins R D, Sisken J E. Calcium spiking activity and baseline calcium levels in ROS 17/2.8 cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields (ELF EMF)[J]. International Journal of Radiation Biology, 2001, 77(2): 241-248.
- [84] Cui Y J, Liu X Y, Mei Y A, et al. Exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields inhibits T-type calcium channels via AA/LTE4 signaling pathway [J]. Cell Calcium, 2014, 55: 48-58.
- [85] He Y L, Liu D D, Fang Y J, et al. Exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields modulates Na^+ currents in rat cerebellar granule cells through increase of AA/PGE2 and EP receptor-mediated cAMP/PKA pathway[J]. PLOS One, 2013, 8(1): e54376.
- [86] Tonini R, Baroni M D, Masala E, et al. Calcium protects differentiating neuroblastoma cells during 50 Hz electromagnetic radiation[J]. Biophysical Journal, 2001, 81(5): 2580-2589.
- [87] Sisken J E, Deremer D. Power-frequency electromagnetic fields and the capacitative calcium entry system in SV40-transformed Swiss 3T3 cells[J]. Radiation Research, 2000, 153(5): 699-705.
- [88] Galvanovskis J, Sandblom J. Amplification of electromagnetic signals by ion channels[J]. Biophysical Journal, 1997, 73(6): 3056-3065.
- [89] Vaughan T E, Weaver J C. Molecular change signal-to-noise criteria for interpreting experiments involving exposure of biological systems to weakly interacting electromagnetic fields[J]. Bioelectromagnetics, 2005, 26 (4): 305-322.
- [90] 郑秀秀, 包家立, 朱朝阳. 电磁扰动下的细胞系统鲁棒性研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3837-3845.
- ZHENG Xiuxiu, BAO Jiali, ZHU Chaoyang. Robustness on cell system after an electromagnetic fields disturbance [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3837-3845.
- [91] 包家立. 电磁场暴露对健康影响的原初作用探讨[J]. 中华预防医学杂志, 2010, 44(5): 458-460.
- BAO Jiali. Primary reaction on health effects of exposure to electromagnetic field[J]. China Journal of Preventive Medicine, 2010, 44(5): 458-460.
- [92] ICNRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)[J]. Health Physics, 1998, 74(4): 494-522.
- [93] ICNRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) [J]. Health Physics, 2010, 99(6):818-836.
- [94] IEEE Std C 95.6-2002 IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0~3 kHz[S], 2002.
- [95] 李妮, 邬雄, 裴春明. 工频电磁场长期曝露健康风险的预防性政策分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 2930- 2936.
- LI Ni, WU Xiong, PEI Chunming. Analysis of precautionary policy on health risk for chronic exposure to power frequency electric and mag-

- netic fields[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 2930-2936.
- [96] 李 妮, 邬 雄, 张广洲, 等. 特高压工频电磁场对人体健康影响及其曝露限值 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 1842-1848.
- LI Ni, WU Xiong, ZHANG Guangzhou, et al. Health effects on human and exposure limits of power frequency electric and magnetic fields for AC UHV engineering[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 1842-1848.
- [97] 邬 雄, 龚宇清, 李 妮. 确定工频磁场公众曝露限值的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2091-2095.
- WU Xiong, GONG Yuqing, LI Ni. Analysis on determination of public exposure limit of power frequency magnetic field[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 2930-2736.
- [98] GBZ 2.2—2007 工作场所有害因素职业接触限值[S], 2007.
- GBZ 2.2—2007 Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace, part 2: physical agents[S], 2007.
- [99] GB 8702—2014 环境电磁控制限值[S], 2014.
- GB 8702—2014 Controlling limits for electromagnetic environment[S], 2014.



BAO Jiali

Ph.D., Professor

包家立
1961—, 男, 博士, 教授
1983 年毕业哈尔滨工业大学, 获工业自动化仪表专业学士学位; 1993 年获浙江大学自动控制理论与应用专业硕士学位; 2003 年获浙江大学生物医学工程专业博士学位。1983—1988 年在中国核动力研究设计院反应堆工程实验研究所任助理研究员; 1988—1998 年在浙江医科大学生物医学工程研究所任副教授、副所长; 1998—2000 年在浙江大学生生物医学工程与仪器科学学院临床工程研究所任副教授、副所长; 2000—2005 年在浙江大学医学院生理学教研室任教授; 2005 年以后在浙江大学医学院浙江省生物电磁学重点实验室和慢性病研究所任教授。目前研究方向有生物电磁学、药物释放控制、医疗仪器、慢性病控制、临床工程、计算生物学

E-mail: baojl@zju.edu.cn

收稿日期 2015-07-31 修回日期 2015-08-10 编辑 李东

中国电机工程学会高电压专业委员会 2015 年学术年会第二次征文通知

根据中国电机工程学会批复, 经协商, 中国电机工程学会高电压专业委员会定于 2015 年 10 月 15—17 日(14 日报到)在中国西安市曲江会议中心(曲江宾馆)召开 2015 年学术年会, 会议将采取主旨报告、专题研讨和论文粘贴等多种学术交流形式, 主要展现近年来我国在高电压技术领域科研、设计、生产运行、设备制造等方面的研究成果, 并展望高电压技术领域未来发展。本次会议由中国电机工程学会高电压专业委员会主办, 西安交通大学承办, 中国西电电气股份有限公司协办。

一、会议形式

会议形式是大会报告、专题研讨和论文发表等。提交的论文经分类后, 经高电压技术专业委员会委员评审及大会研讨后, 评选出优秀论文并推荐至《高电压技术》及《中国电机工程学报》发表。

二、会议征文

- 论文提交截止时间为 2015 年 9 月 15 日。
- 论文要求: 参会论文应尽可能反映近 5 年来的科研成果。年会论文只收录未发表的论文, 请勿一稿多投。论文须确保内容的真实性和客观性, 文责自负。论文格式参照《高电压技术》期刊论文要求, 论文页数原则上不超过 6 页。本次年会论文要求和会议详情可在年会网站(hv2015.ambermeeting.com 或 www.2015hv.org)上查询。
- 论文提交方式: 本次年会直接提交全文。论文可通过电子邮件 liuxuand@mail.xjtu.edu.cn(刘轩东)、hvzhang@mail.xjtu.edu.cn(张乔根)进行提交, 也可在 hv2015.ambermeeting.com 进行快速注册后进行提交。

三、联系方式

联系人: 刘轩东, 张乔根, 李鹏
电 话: 029-82668376, 029-82668171; 传 真: 029-82668376
手 机: 13379239835, 15229289025
通讯地址: 陕西省西安市西安交通大学电气工程学院
电子邮箱: liuxuand@mail.xjtu.edu.cn hvzhang@mail.xjtu.edu.cn

四、征集范围

1. 过电压与绝缘配合

- 电力系统过电压与仿真新技术;
- 特高压串补与同塔双回输电系统过电压特性;
- 交流超/特高压输电系统过电压深度抑制技术;
- 风力发电站雷击与防雷新技术;
- 长空气间隙放电机理与模拟;
- 雷电监测、定位与防护技术;
- 过电压与绝缘配合典型事故分析;
- 防雷与接地技术;
- 铁路系统过电压与防护新技术。

2. 高压试验技术

- 超/特高压输变电工程调试技术研究与应用;
- 交直流超/特高压输电电磁环境测试新技术;
- 状态监测与状态检修技术;
- 高压领域新型传感器与光电测量技术;

5) 高电压测试系统标定、比对与校准新技术;

6) VFTO 产生、模拟及测试技术;

7) 高压测量新技术及应用;

8) 特高压输变电设备的试验技术与标准动态;

9) 带电作业技术及其他相关高压测试技术研究。

3. 高电压绝缘

- 绝缘电介质击穿机理;
- 超/特高压输变电设备绝缘特性与放电机理;
- 电气设备绝缘老化与寿命评估技术;
- 电气设备绝缘智能监测与故障诊断技术;
- 电气设备状态检修与全寿命周期管理技术;
- 新型电工绝缘材料;
- 极端条件下绝缘材料特性与绝缘技术;
- 交直流设备局部放电、介损、分解产物等测试新技术。

4. 高压电器

- 输变电设备国内外发展动态与展望;
- 输变电设备智能化理论与技术;
- 特高压输变电设备的设计与制造新技术、新工艺;
- 直流开断理论与新技术;
- 电接触与电弧等电器基础理论;
- 输变电设备运维新技术;
- 节能、环保型输变电设备设计与制造技术;
- 高压开关设备智能控制技术。

5. 高电压新技术

- 气体等离子体技术及应用;
- 脉冲功率技术及应用;
- 生物电工、超导电工技术;
- 高压柔性直流技术;
- 电力电子新技术;
- 新能源利用与储能技术;
- 电磁脉冲产生与模拟技术;
- 强电磁脉冲效应与防护技术。

6. 防污闪技术

- 输变电设备绝缘子典型污闪、冰闪及雨闪特性的试验研究与事故分析;
- 超/特高压输变电设备外绝缘特性与放电机理;
- 复合绝缘子和硅橡胶防污闪涂料的运行经验;
- 污秽度监测与污区分布;
- 复合绝缘人工污秽试验与覆冰闪络试验方法的研究;
- 防污闪新技术;
- 输电线路覆冰监测与防护技术;
- 输电线路舞动与防护技术。