

环境射频辐射与健康

主 编 ◎ 丁桂荣 谢学军 郭国祯
副主编 ◎ 马亚红 周 艳 李康樾



环境射频辐射与健康

主 编 丁桂荣 谢学军 郭国祯
副主编 马亚红 周 艳 李康樗

海洋出版社

2015 年 · 北京

图书在版编目 (CIP) 数据

环境射频辐射与健康 / 丁桂荣, 谢学军, 郭国桢主编. —北京: 海洋出版社,
2015. 4

ISBN 978 - 7 - 5027 - 9070 - 7

I. ①环… II. ①丁… ②谢… ③郭… III. ①辐射防护 IV. ①TL7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 001190 号



责任编辑: 杨海萍 张 欣

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京博艺印刷包装有限公司印刷 新华书店发行所经销

2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 10.5

字数: 166 千字 定价: 56.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

《环境射频辐射与健康》编者名单

主 编 丁桂荣 谢学军 郭国祯

副主编 马亚红 周 艳 李康樗

编 者(以姓氏笔画为序)

王 峰 安广洲 李 静 杜 乐 陈永斌

张 敏 苗 霞 周晓华 郎海洋 赵 涛

徐胜龙 郭 娟 高 鹏 秦国富

前 言

电磁辐射是人类素未谋面却又常常打交道的“朋友”，正如人们一直生活在空气中而眼睛却看不见空气一样，无处不在的电磁辐射虽然人们感觉不到（可见光除外），却与人类密切相关，特别是在如今这个高科技时代，更是如此。电脑及网络的发展让我们实现了与全世界面对面的沟通和信息共享；有线、无线通讯让人与人之间的距离缩减为零；家用电器（如电视机、收音机、冰箱、微波炉、电磁炉等）成为日常生活中不可缺少的一部分；高新技术的医疗设备（如核磁共振、射频治疗仪等）也为医生的准确诊断和有效治疗提供了有力的保障。

然而，高新科技在给人们带来诸多便利的同时，也带来了一些烦恼和忧虑。特别是随着电工和电子科技的飞速发展，电磁技术在各个领域的应用越来越广泛，导致环境中电磁辐射日益增强。这些电磁辐射对人体的健康究竟有没有影响？又有哪些影响？这些问题始终受到人们的广泛关注，并越来越成为研究的热点。

电磁场与生命活动有着十分紧密的联系。一方面，许多生命活动都伴随着电磁场的产生，这些电磁信号中包含着生命活动的重要信息，是多种生理、生化现象的独特表征。探测并研究这些信息，可以更深刻地了解生命活动的本质；另一方面，在生命的起源和进化过程中总是伴随着地磁场和大量的电磁辐射（雷电、宇宙射线等）的存在，生物机体的各个层面必然烙下地磁环境和电磁辐射的痕迹。电磁辐射的生物学效应对人类健康影响的研究，关系到电磁辐射的科学应用，使人们能够做到趋利避害，让电磁辐射更好地

服务于人类。

为此，本书围绕公众关心的核心问题，选取与公众关系最为密切的通信频段电磁辐射对健康的影响进行系统的综合介绍。第一章首先介绍电磁辐射基础知识，第二章和第三章分别介绍了生物组织的电磁特性和电磁辐射生物效应的作用机制，第四章和第五章分别从流行病学研究和实验研究方面介绍了射频辐射的生物学效应，最后，第六章介绍了射频辐射的防护策略。

希望本书的出版能对从事电磁生物学研究的科技工作者和有关大专院校相关专业的师生有所帮助，对公众也具有一定的科学普及作用。由于编者学识有限，书中难免会有一些疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2015 年 1 月

目 录

第1章 基础知识介绍	(1)
1.1 电磁辐射概述	(1)
1.1.1 相关专业术语	(1)
1.1.2 电磁现象	(4)
1.1.3 电磁辐射来源	(5)
1.1.4 电磁频谱的划分	(5)
1.2 移动通信电磁辐射	(7)
1.2.1 移动通信的原理及系统组成	(7)
1.2.2 移动通信的特点	(7)
1.2.3 移动通信系统工作方式	(8)
1.2.4 移动通信电磁辐射	(9)
1.3 电磁辐射暴露限值和标准	(12)
1.3.1 ICNIRP 限制交变电场和磁场暴露的导则	(12)
1.3.2 职业和公众暴露限值	(13)
1.3.3 我国的电磁辐射暴露限值管理标准	(14)
1.3.4 国内典型电磁标准暴露限值的对比	(16)
1.3.5 基站辐射的安全距离及标准	(17)
1.3.6 基站现场电磁场暴露评估	(20)
1.3.7 电磁辐射与安全标准评价	(21)
第2章 生物组织的电磁特性	(23)
2.1 生物分子及离子的电磁特性	(24)
2.1.1 水分子电磁特性	(25)
2.1.2 离子溶液电磁特性	(29)
2.1.3 生物大分子的电磁特性	(31)
2.2 生物膜的电磁特性	(34)

2.2.1	细胞膜的结构模型	(35)
2.2.2	细胞膜的电磁特性	(36)
2.2.3	细胞膜的等效电路	(38)
2.3	生物体的电特性	(40)
2.3.1	导电特性	(40)
2.3.2	介电特性	(40)
2.4	生物体的磁特性	(43)
第3章	电磁辐射生物效应的作用机制	(45)
3.1	电磁场的热效应	(45)
3.2	电磁场的非热效应	(46)
3.2.1	谐振效应理论	(47)
3.2.2	相干电振荡理论	(48)
3.2.3	粒子对膜的穿透理论	(49)
3.2.4	跨膜离子的回旋振荡理论	(49)
第4章	射频辐射健康效应流行病学研究	(51)
4.1	射频辐射与自觉症状和认知	(51)
4.1.1	射频辐射与自觉症状	(51)
4.1.2	射频辐射与认知	(52)
4.2	射频辐射与肿瘤	(53)
4.2.1	射频辐射与脑肿瘤	(54)
4.2.2	射频辐射与神经胶质瘤	(56)
4.2.3	射频辐射与脑膜瘤	(61)
4.2.4	射频辐射与听神经瘤	(62)
4.2.5	射频辐射与其他肿瘤	(63)
4.3	射频辐射与生殖机能障碍	(65)
4.3.1	电磁辐射对女性生殖功能的影响	(65)
4.3.2	电磁辐射对子代的影响	(66)
4.3.3	射频辐射对男性生殖功能的影响	(66)
4.3.4	射频辐射对性功能的影响	(67)
4.3.5	射频辐射对子代性别比例的影响	(68)
4.4	射频辐射与儿童生长发育	(69)

4.4.1	射频辐射对儿童神经系统的影响	(69)
4.4.2	射频辐射可导致儿童智力残缺	(69)
4.5	其他	(70)
4.5.1	射频辐射对心血管系统的影响	(70)
4.5.2	射频辐射对免疫系统的影响	(72)
4.5.3	射频辐射对激素水平的影响	(73)
4.5.4	射频辐射对听觉和前庭系统的影响	(73)
4.5.5	射频辐射对晶状体的影响	(74)
第5章	射频辐射生物效应实验研究	(75)
5.1	射频辐射与肿瘤发生	(75)
5.1.1	致癌	(75)
5.1.2	促癌或协同致癌	(83)
5.1.3	射频辐射遗传毒性	(93)
5.2	射频辐射对中枢神经系统的影响	(106)
5.2.1	学习记忆	(106)
5.2.2	血脑屏障	(107)
5.2.3	代谢	(110)
5.2.4	脑组织生物电	(112)
5.2.5	对神经细胞的影响	(115)
5.3	射频辐射对生殖系统的影响	(118)
5.3.1	射频辐射对雄性生殖系统的影响	(119)
5.3.2	射频辐射对雌性生殖系统的影响	(128)
5.4	射频辐射对其他系统的影响	(131)
5.4.1	射频辐射对免疫系统的影响	(131)
5.4.2	射频辐射对视觉系统的影响	(136)
5.4.3	射频辐射对血液系统的影响	(141)
5.4.4	射频辐射对内分泌系统的影响	(143)
第6章	环境射频辐射防护策略	(146)
6.1	物理防护	(146)
6.1.1	接触水平	(146)
6.1.2	应对措施	(146)

6.1.3	国际标准中电磁辐射公众暴露限值	(147)
6.1.4	脉冲电磁辐射暴露限值的确定	(147)
6.1.5	电磁辐射防护	(148)
6.2	合理膳食	(149)
6.2.1	具有抗氧化作用的食物成分	(149)
6.2.2	抗氧化食品	(150)
6.3	手机使用注意事项及建议	(151)
6.3.1	正确使用手机	(151)
6.3.2	特殊人群	(152)
6.3.3	其他注意事项	(152)
参考文献		(154)

第1章 基础知识介绍

1.1 电磁辐射概述

随着社会经济的发展，电磁辐射在人们日常生活和工作中的应用日益广泛，人类暴露于电磁辐射的强度、时间和复杂性也与日俱增，电磁辐射已经成为威胁人类健康的重要环境物理因素之一。

从科学的角度来说，电磁辐射是一种能量传播的过程，其本质是电磁场的一种运动形态。电可以生磁，磁也能生电，变化的电场和变化的磁场构成了一个不可分离的统一场，即电磁场，而变化的电磁场在空间的传播形成了电磁波。

电磁场与生命活动有着十分紧密的联系。一方面，许多生命活动都伴随着电磁场的产生，这些电磁信号中包含着生命活动的重要信息，是多种生理、生化现象的独特表征。探测并研究这些信息，可以更深刻地了解生命活动的本质；另一方面，在生命的起源和进化过程中总是伴随着地磁场和大量的电磁辐射（雷电、宇宙射线等）的存在，生物机体的各个层面必然烙下地磁环境和电磁辐射的痕迹。特别是随着电子科技的飞速发展，电磁技术在各个领域的应用越来越广泛，导致环境中电磁场日益增强。这些电磁场对人体健康的影响问题一直受到人们的广泛关注，相关领域已成为研究热点。外加电磁场对生物体影响的研究成果，能够帮助人们趋利避害，更好地造福于人类。

为了从科学的角度深入了解和认识电磁辐射，在本章中我们将一些电磁辐射相关的基础知识进行了梳理。

1.1.1 相关专业术语

辐射：指的是能量以电磁波或粒子（如 α 粒子、 β 粒子等）的形式向外

扩散。自然界中的一切物体，只要温度在绝对温度（国际单位制的 7 个基本量之一，热力学温标的标度，符号为 T）零度以上，都以电磁波和粒子的形式时刻不停地向外传送热量，这种传送能量的方式称为辐射。辐射是不需要介质参与而传递能量的一种现象。根据辐射性质的不同，可将辐射分为电磁辐射和粒子辐射；根据作用原理的不同，又可将辐射分为电离辐射和非电离辐射。

电磁辐射：指能量以电磁波的形式通过空间传播的现象。其本质是以互相垂直的电场和磁场，随时间变化而交变振荡，形成向前运动的电磁波。电磁辐射能量取决于其波长。具有电离作用的是短波长的较高能量的电磁波，如 X 射线、 γ 射线等。电磁辐射可按其波长、频率排列成若干频率段，形成电磁波谱。

粒子辐射：是高能粒子的辐射；可以是带电粒子，如 α 粒子、 β 粒子、质子、 π 介子和各种重粒子；也可以是电中性粒子，如中子。粒子辐射的能量主要是动能，高能粒子会引起物质的电离。

电离辐射：引起被作用物电离的高能辐射。一些高能电磁波，如 X 射线、 γ 射线和几乎所有的粒子辐射，能直接或间接地作用于物质的轨道电子，使其获得能量后成为自由电子。

非电离辐射：能量较电离辐射弱。非电离辐射不会引起物质直接或间接的电离，只会改变分子或原子的旋转、振动及电子能级状态。

非热效应：电磁场产生的与热无关的生物学效应。

介电常数：又称电容率或相对电容率，表征电介质或绝缘材料电性能的一个重要数据，用 ϵ 表示。它是指在同一电容器中用某一物质为电介质和真空时的电容的比值，表示电介质在电场中贮存静电能的相对能力。

剂量测定：通过衡量或计算确定暴露在电磁场的人或动物的内部电场强度或感应电流、比吸收能或比吸收能率分布。

电场：传递电荷与电荷间相互作用的物理场。电荷周围总有电场存在，同时电场对场中其他电荷又有力的作用，通俗的说，有电压存在就会产生电场，电压越大，产生的电场越大。

磁场：磁场是传递运动电荷（电流）之间相互作用的物理场，由运动电

荷（电流）产生，同时对场中其他运动电荷（电流）又有力的作用。通俗的说，有电流通过就会产生磁场，电流越大，产生的磁场越强。

电磁场：随时间变化的电场产生磁场，随时间变化的磁场产生电场，两者互为因果，形成电磁场。电磁场可由变速运动的带电粒子引起，也可由强弱变化的电流引起，不论原因如何，电磁场总是以光速向四周传播，形成电磁波。电磁场是电磁作用的媒介，具有能量和动量，是物质存在的一种形式。电磁场的性质、特征及其运动变化规律由麦克斯韦方程组确定。

近场：一般而言，以场源为中心，在三个波长范围内的区域即近场区。该区域能量在辐射源周围空间及辐射源之间周期性地来回流动，不向外发射。

远场：以场源为中心，半径为三个波长之外的空间范围。该区域电磁场能量脱离辐射体，以电磁波的形式向外发射。

频率：一秒钟内电磁波完成的正弦循环数量，单位：赫兹（Hz）。

波长：周期波传播方向上，振动相位相同的两个连续点之间的距离。

波阻抗：代表某一点横向电场复数（矢量）和代表该点横向磁场的复数之间的比率，单位：欧姆（ Ω ）。

平面波：一种电磁波，在这种电磁波中，电场和磁场矢量位于与波的传播方向相垂直的平面，而且磁场强度乘以空间的阻抗和电场强度相同。

电磁能量：储存在电磁场中的能量，单位：焦耳（J）。

功率强度：在无线电波传播中，经过垂直于波传播方向单位面积的能量，单位：瓦特/平方米（ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）。

电场强度：电场中的某一点上对静态单位正电荷的力量，表示电场强弱和方向的物理量，电场强度用 E 表示，单位：伏特/米（ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ）。

磁场强度：一种轴向矢量数量，它和磁通密度结合在一起确定了空间中任何点的磁场，单位：安培/米（ $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ ）。

磁通密度：即磁感应强度，表示垂直穿过单位面积磁力线的多少。单位：特斯拉（T）。

磁导率：表征磁介质磁性的物理量。表示在空间或在磁芯空间中的线圈流过电流后、产生磁通的阻力，或者是其在磁场中导通磁力线的能力。将其与磁场强度相乘即可得磁通密度。单位：亨利/米（ $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ）。

特低频：低于 300 Hz 的频率。

射频：适用于通信的电磁辐射的任何频率。本书中，射频是指 300 kHz ~ 300 GHz 的频率。

微波：波长足够短，因而可以将波导和相关谐振腔技术应用在波的发射和接收的电磁放射物。一般用来表示频率范围在 300 MHz ~ 300 GHz 之间的放射物或电磁场。

谐振：电磁波的频率接近或等于介质的自然频率发生的振幅变化。谐振频率附近全身对电磁波的吸收具有最高值，即谐振频率大约为 $114/L$ ， L 是个体以米为单位的高度。

职业暴露：个人在从事工作过程中所受到的所有电场、磁场和电磁场 (EMF) 照射。

公众暴露：普通大众所受的全部电场、磁场和电磁场照射，不包括在工作中和医疗过程中受到的照射。

比吸收能：每单位质量生物组织吸收的能量，比吸收能是比吸收能率对时间积分，单位：焦耳/千克 ($J \cdot kg^{-1}$)。

比吸收率 (SAR)：每公斤生物组织吸收的电磁辐射能量，SAR 值越大表明被组织吸收的能量越多。SAR 是一个广泛应用于频率高于 100 kHz 的电磁波的剂量测定指标，单位：瓦/千克 ($W \cdot kg^{-1}$)。

1.1.2 电磁现象

在认识和利用电磁现象之前，人类就生活在自然界产生的电磁场之中，包括地球自身产生的大地电场、大地磁场、大地与云层之间和云层之间由于闪电产生的雷电电磁场、来自太阳和其他星球的电磁场等。尽管人类很早就注意到了自然界的电磁现象，但直到 18 世纪才开始对电磁现象进行规律的探索。19 世纪，基于对电磁现象的实验研究和理论研究取得的成果，人类基本掌握了电磁现象的物理本质和运动规律，并利用这些知识服务于人类社会。

1831 年，法拉第发现了电磁感应定律，1865 年，麦克斯韦建立了著名的麦克斯韦电磁场方程组，随着这些电磁场理论的诞生，人类对电磁现象的认

识和利用达到了前所未有的高度。此后,人类相继发明了发电机、变压器、电动机、电灯、电力网、电报、无线电广播、雷达等人造电磁系统,迎来了人类历史上电气装置的大规模应用,使人类社会从蒸汽时代进入到电气时代。

1.1.3 电磁辐射来源

基于大规模集成电路和微电子技术的进步,计算机技术、光纤通信技术和互联网技术取得飞速发展,人类社会从电气时代跨入信息时代。随着这一时代的到来,人们正在被智能化的电子产品“掌控”。从物质层面上讲,这是社会的进步表现,从精神层面上讲,也正在加速陷入这个社会进步所带来的对“电磁辐射”的精神恐惧中。

移动电话、计算机、平板终端、游戏机、微波炉、电磁炉等电器进入家庭生活,同时也将复杂的电磁辐射带到了我们的身边。科学研究表明,家用电器和电子设备在使用过程中都会产生各种不同频率和强度的电磁辐射,这些电磁辐射充斥人们工作与生活的空间,潜在地危害着人类健康,对其生存环境构成新的威胁。比如,在医院使用手机会干扰医院心电监护仪、血液透析机、自动注射仪以及心脏起搏器等医疗仪器的正常运转,造成使病人生命垂危的险情;在加油站使用手机会干扰计数系统的工作或者诱发火灾。由于电磁辐射污染日益严重,因此被联合国人类环境会议确定为必须抑制的公害之一。

1.1.4 电磁频谱的划分

我国对无线电频谱划分为下面表中的14个频带(表1-1),无线电频率以赫兹(Hz)为单位,其表达方式为:

- 3 000 kHz 以下(包括3 000 kHz),以千赫兹(kHz)表示;
- 3 MHz 以上至3 000 MHz(包括3 000 MHz),以兆赫兹(MHz)表示;
- 3 GHz 以上至3 000 GHz(包括3 000 GHz),以吉赫兹(GHz)表示。

可以看出,我们所谈论的“辐射”中仅在无线电频段就有14个对应频

带。电磁辐射是广泛的概念。为了理清射频辐射，我们对我国电磁频谱划分中相应频率范围的电磁波用途进行简要的介绍（表1-2）。

表 1-1 我国电磁频谱划分

带号	频带名称	频率范围	波段名称	波长范围
-1	至低频（TLF）	0.03 ~ 0.3 Hz	至长或千兆米波	10 000 ~ 1 000 兆米（Mm）
0	至低频（TLF）	0.3 ~ 3 Hz	至长或百兆米波	1 000 ~ 100 兆米（Mm）
1	极低频（ELF）	3 ~ 30 Hz	极长波	100 ~ 10 兆米（Mm）
2	超低频（SLF）	30 ~ 300 Hz	超长波	10 ~ 1 兆米（Mm）
3	特低频（ULF）	300 ~ 3 000 Hz	特长波	1 000 ~ 100 千米（km）
4	甚低频（VLF）	3 ~ 30 kHz	甚长波	100 ~ 10 千米（km）
5	低频（LF）	30 ~ 300 kHz	长波	10 ~ 1 千米（km）
6	中频（MF）	300 ~ 3 000 kHz	中波	1 000 ~ 100 米（m）
7	高频（HF）	3 ~ 30 MHz	短波	100 ~ 10 米（m）
8	甚高频（VHF）	30 ~ 300 MHz	米波	10 ~ 1 米（m）
9	特高频（UHF）	300 ~ 3 000 MHz	分米波	10 ~ 1 分米（dm）
10	超高频（SHF）	3 ~ 30 GHz	厘米波	10 ~ 1 厘米（cm）
11	极高频（EHF）	30 ~ 300 GHz	毫米波	10 ~ 1 毫米（mm）
12	至高频（THF）	300 ~ 3 000 GHz	丝米或亚毫米波	10 ~ 1 丝米（dmm）

注：频率范围（波长范围亦类似）均含上限、不含下限；相应名词仅作简化称呼参考。

注 1：“频带 N”（N = 带号）从 0.3×10^N Hz 至 3×10^N Hz。

注 2：词头：k = 千（ 10^3 ），M = 兆（ 10^6 ），G = 吉（ 10^9 ）。

表 1-2 常见电磁频段的用途

频率范围	波长	符号	传输媒介	用途
3 Hz ~ 30 kHz	$10^8 \sim 10^4$ m	VLF（甚低频）	有线线对 长波无线电	音频、电话、导航、 数据终端
30 Hz ~ 300 kHz	$10^4 \sim 10^3$ m	LF（低频）	有线线对 长波无线电	导航、电力线通信
300 kHz ~ 3 MHz	$10^3 \sim 10^2$ m	MF（中频）	同轴电缆 中波无线电	调幅广播、业余无线电

续表

频率范围	波长	符号	传输媒介	用途
3 MHz ~ 30 MHz	$10^2 \sim 10 \text{ m}$	HF (高频)	同轴电缆 短波无线电	军用通信、业余无线电、 无线电话、短波广播
30 MHz ~ 300 MHz	$10 \sim 1 \text{ m}$	VHF (甚高频)	同轴电缆 短波无线电	电视、调频广播、空中 管制、车辆通信、导航
300 MHz ~ 3 GHz	$100 \sim 10 \text{ cm}$	UHF (特高频)	波导 分米波无线电	电视、空间遥测、雷达 导航、移动通信
3 GHz ~ 30 GHz	$10 \sim 1 \text{ cm}$	SHF (超高频)	波导 厘米波无线电	微波接力、卫星通信、 雷达
30 GHz ~ 300 GHz	$10 \sim 1 \text{ mm}$	EHF (极高频)	波导 毫米波无线电	雷达、微波接力、 射电天文学

1.2 移动通信电磁辐射

移动通信是泛指以手机、无线终端电子设备为主的移动状态下的信息互动。

1.2.1 移动通信的原理及系统组成

移动通信是移动体之间的通信，或移动体与固定体之间的通信。移动体可以是人，也可以是汽车、火车、轮船、收音机等在移动状态中的物体。即通信双方有一方或两方处于运动中的通信，包括陆、海、空移动通信。采用的频段遍及低频、中频、高频、甚高频和特高频。移动通信系统由移动台、基站、移动交换局组成。若要同某移动台通信，移动交换局通过各基台向全网发出呼叫，被叫台收到后发出应答信号，移动交换局收到应答后分配一个信道给该移动台并从此话路信道中传送一信令使其振铃。

1.2.2 移动通信的特点

(1) 移动性

即保持物体在移动状态中的通信，因此，必须是无线通信，或无线通信