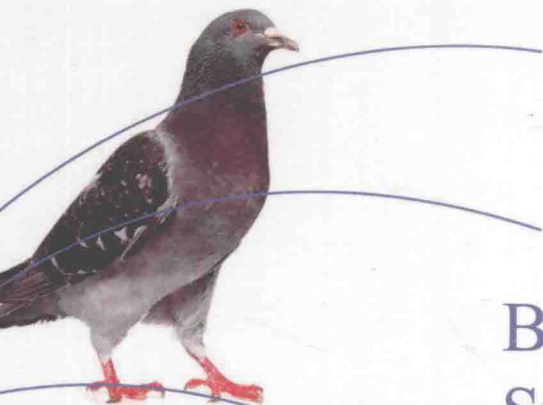
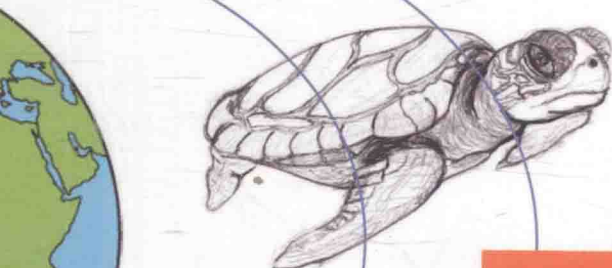
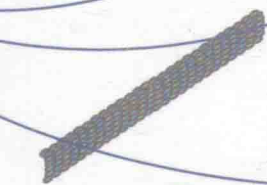




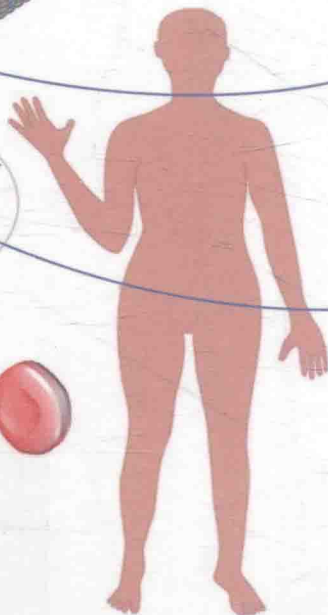
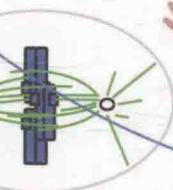
Biological Effects of Static Magnetic Fields



稳态磁场的 生物学效应



张欣 [加] Kevin Yarema 许安/著
张磊 刘娟娟/译



科学出版社

稳态磁场的生物学效应

Biological Effects of Static Magnetic Fields

张 欣 [加] Kevin Yarema 许 安 著

张 磊 刘娟娟 译

科 学 出 版 社

北 京

图字: 01-2018-0436 号

内 容 简 介

随着现代电器的发展和日益普及,以及磁共振成像等设备在医院中的广泛应用,磁场对人类健康的潜在影响引起了人们的日益关注。本书主要总结了现有的从分子、细胞组分、细胞到生物个体的稳态磁场生物学效应的科学依据,并探讨稳态磁场在肿瘤等疾病治疗中的潜在应用。这将帮助澄清本领域研究中的一些困惑,可以使我们对稳态磁场的生物学效应有更好的了解。本书的目的在于鼓励更多学者进行相关研究,从而在不久的将来可以更科学、更理性地将稳态磁场应用于临床诊断和治疗中。

本书可供高等院校、研发机构和医院等对磁场生物学相关领域感兴趣的人员阅读和参考。

Translation from the English language edition:

Biological Effects of Static Magnetic Fields by Xin Zhang, Kevin Yarema, An Xu

Copyright © Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2017. All Rights Reserved.

图书在版编目(CIP)数据

稳态磁场的生物学效应 / 张欣, (加) 凯文·雅瑞玛 (Kevin Yarema), 许安著; 张磊, 刘娟娟译. —北京: 科学出版社, 2018. 3

ISBN 978-7-03-056598-3

I. ①稳… II. ①张… ②凯… ③许… ④张… ⑤刘… III. ①磁场-生物学效应-研究 IV. ①Q689

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 036249 号

责任编辑: 钱 俊 周 涵 / 责任校对: 彭珍珍

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 无极书装

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京汇瑞嘉合文化发展有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 273 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随着现代科技的发展，人类会接触到越来越多的磁场。本书侧重于讨论稳态磁场（SMF，也叫静磁场、恒定磁场等），即强度不随时间变化的磁场。稳态磁场不同于动态磁场（也叫动磁场、时变磁场等）。例如，手机或微波炉等产生的是不同频率的动磁场，所以不在本书中讨论。生活中最常见的稳态磁场是家用的磁铁、医院中磁共振成像仪（MRI）的核心部件以及微弱但广泛存在的地磁场，它们都是强度不同的稳态磁场。人们接触到的磁场强度从 0.05mT（地磁场）到接近 10T（临床前研究中的高场强 MRI）不等。

为了建立人体暴露于稳态磁场的安全标准，科学家们进行了很多关于磁场在分子、细胞、动物以及人体水平影响的研究。因此，世界卫生组织（WHO）和国际非电离辐射保护委员会（ICNIRP）公布了一些指导性意见，确保人们不会过度暴露于磁场中。同时，虽然磁疗从未被主流医学所接受，但是它却作为替代或辅助治疗手段被广泛应用。目前，磁疗大多被用于缓解疼痛，以及其他一些非紧急情况。然而，目前还没有足够全面的科学证据来证实和解释磁疗的效果。只有正确和翔实地认识磁场的生物学效应，人们才可以在日常生活中最大限度地正确使用磁场而避免伤害到自己的身体。所以，我们需要对生物系统的磁效应进行严谨和实用的研究，以期在医学和科学方面获得实用的知识。

需要注意的是，本书将不讨论关于磁性纳米颗粒的研究，尽管该领域研究发展迅速，而且在未来医学治疗中有广泛的应用前景；我们将着重探讨作用于人和动物的外加磁场，而不是活的有机体（生物）产生的磁场。我们尽可能使本书囊括稳态磁场对人体细胞的生物学效应的绝大部分研究进展，同时对任何有遗漏的研究发现深表歉意。我们的目标是努力为读者提供稳态磁场生物学效应的最新研究成果的概述，希望更多的科学家能够涉足这一领域，使得该领域在不久的将来能够获得更清晰、更科学的研究成果。

本书的三位作者，均是曾经或目前正在从事磁场生物学效应研究的学者，他们分别是：张欣博士，中国科学院强磁场科学中心研究员（撰写第 1、2、4、6 章）；Kevin Yarema 博士，美国约翰·霍普金斯大学医学院生物医学工程系副

教授（撰写第 3、7 章）；许安博士，中国科学院合肥物质科学研究院技术生物与农业工程研究所研究员（撰写第 5 章）。

张 欣 中国合肥

Kevin Yarema 美国马里兰州巴尔的摩

许 安 中国合肥

2017 年 7 月 10 日

目 录

第 1 章 磁场参数及其生物学效应的差异	1
1.1 引言	1
1.2 稳态磁场和动态磁场	1
1.3 不同的磁场强度：弱、中等、强（高）和超强（高）磁场	3
1.4 均匀磁场和非均匀磁场	7
1.5 曝磁时间	11
1.6 磁极和不同的磁场方向	13
1.7 磁场生物学效应一致性缺乏的影响因素	15
1.8 结论	17
参考文献	18
第 2 章 稳态磁场对人体的作用	22
2.1 引言	22
2.2 地磁场	23
2.3 核磁共振成像	26
2.4 稳态磁场磁疗	29
2.5 磁生物学和生物磁学	34
2.6 结论	35
参考文献	36
第 3 章 电磁场生物传感效应的分子机制	42
3.1 引言	42
3.2 磁学的基本概念	43
3.2.1 铁磁性、顺磁性和抗磁性	43
3.2.2 磁场种类和强度	44
3.3 各种生物磁感应现象综述	45

3.3.1	细菌	46
3.3.2	无脊椎动物	46
3.3.3	脊椎动物	48
3.4	生物磁受体的种类	50
3.4.1	磁铁颗粒	50
3.4.2	化学磁感应	52
3.4.3	电磁感应/诱导 (electromagnetic induction)	54
3.5	稳态磁场对人类生物学的作用机制	55
3.5.1	“已确定的”生物传感器/磁受体	55
3.5.2	“其他”人类生物传感器	57
3.6	结论	62
	参考文献	63

第4章 稳态磁场对细胞的影响 68

4.1	引言	68
4.2	影响稳态磁场的细胞效应的相关参数	70
4.2.1	稳态磁场的细胞效应与磁场强度相关	70
4.2.2	稳态磁场的细胞效应与细胞种类相关	71
4.2.3	稳态磁场的细胞效应与细胞铺板/接种密度相关	74
4.2.4	稳态磁场的细胞效应与细胞状态相关	76
4.3	稳态磁场的细胞效应	78
4.3.1	细胞取向	79
4.3.2	细胞增殖/生长	82
4.3.3	微管和细胞分裂	85
4.3.4	微丝 (肌动蛋白丝)	87
4.3.5	细胞存活	88
4.3.6	细胞附着/黏附	90
4.3.7	细胞形态	91
4.3.8	细胞迁移	92
4.3.9	细胞膜	93
4.3.10	细胞周期	94
4.3.11	染色体和 DNA	96
4.3.12	胞内活性氧簇	97
4.3.13	三磷酸腺苷 (ATP)	98

4.3.14 钙	100
4.4 小结	104
参考文献	104

第5章 稳态磁场对微生物、植物和动物的影响 117

5.1 引言	117
5.2 稳态磁场对微生物的影响	117
5.2.1 稳态磁场影响细胞生长和活力	117
5.2.2 稳态磁场引起的微生物形态学和生物化学变化	118
5.2.3 稳态磁场的基因毒性	120
5.2.4 稳态磁场对基因和蛋白表达的影响	120
5.2.5 感应磁场的磁小体形成	121
5.2.6 稳态磁场在细菌耐药性、发酵与污水处理方面的应用 ...	122
5.3 稳态磁场对植物的影响	123
5.3.1 稳态磁场对植物种子发芽的影响	123
5.3.2 稳态磁场对植物生长的影响	124
5.3.3 稳态磁场对植物向重性的影响	125
5.3.4 稳态磁场对植物光合作用的影响	125
5.3.5 稳态磁场对植物氧化还原状态的影响	126
5.3.6 隐花色素感应磁场	126
5.4 稳态磁场对动物的影响	127
5.4.1 稳态磁场对秀丽隐杆线虫的影响	127
5.4.2 稳态磁场对昆虫的影响	129
5.4.3 稳态磁场对罗马蜗牛的影响	129
5.4.4 稳态磁场对水生动物的影响	130
5.4.5 稳态磁场对非洲爪蟾的影响	131
5.4.6 稳态磁场对小鼠和大鼠的影响	132
5.4.7 动物中的磁感应蛋白	138
5.5 结论与展望	139
参考文献	139

第6章 稳态磁场在癌症治疗中的潜在应用 158

6.1 引言	158
6.2 癌细胞的稳态磁场效应	159

6.2.1 稳态磁场能够抑制一些癌细胞的生长而对正常细胞影响较小	159
6.2.2 稳态磁场通过改变 EGFR 取向并抑制其激酶活性来抑制癌细胞增殖	161
6.2.3 稳态磁场和细胞分裂	163
6.2.4 稳态磁场和肿瘤微循环	165
6.3 稳态磁场与其他治疗方法联合使用	167
6.3.1 稳态磁场和化疗药物联合使用	167
6.3.2 稳态磁场和工频磁场联合	172
6.3.3 稳态磁场和放疗联合	173
6.4 患者研究	174
6.5 结论	176
参考文献	176

第7章 稳态磁场用于磁疗的前景、困难和机遇 181

7.1 引言	181
7.2 电磁场治疗方式概述	182
7.2.1 低频正弦波	182
7.2.2 脉冲电磁场	182
7.2.3 脉冲射频场	182
7.2.4 经颅磁/电刺激	183
7.2.5 稳态磁场	183
7.2.6 “非治疗用途”电磁场的暴露会引发安全性问题	184
7.3 不同磁场强度的稳态磁场疗法的生物医学效应	184
7.3.1 广泛使用但并未经许可的低中强度稳态磁场的自制治疗	184
7.3.2 亚磁场——默认磁疗的依据?	185
7.3.3 更高场强的磁场对人类健康的影响	186
7.4 三个治疗领域前景	188
7.4.1 疼痛感知	189
7.4.2 血液流动/血管形成	189
7.4.3 用于治疗神经系统疾病和神经再生的体外证据	190
7.5 稳态磁场的临床研究面临的困难和磁疗的接纳	192
7.5.1 夸大和模棱两可的言论 vs 完全反对磁疗	192

7.5.2 磁疗中需要控制的参数	193
7.5.3 安慰剂效应	193
7.6 结论	194
参考文献	195

名词索引	200
------------	-----

第 1 章

磁场参数及其生物学效应的差异^①

本章的主要内容是对磁场的不同参数所导致的不同生物学效应进行介绍和总结，其中包括磁场的种类、强度、均匀性、方向和曝磁时间等。目的是解释和讨论磁场的生物学效应研究过程中普遍出现的实验结果缺乏一致性的原因。

1.1 引言

研究发现，磁场的不同参数直接导致了磁场生物学效应的差异。根据磁场强度随时间的变化情况，研究人员将磁场分为稳态磁场和动态磁场（或交变磁场），后者根据频率的不同又有更细致的划分。而根据强度的不同，磁场又可以分为弱磁场、中等磁场、强（高）磁场和超强（高）磁场。此外，部分研究中涉及的均匀磁场和非均匀磁场则是根据磁场的空间分布情况来分类的。本章将讨论磁场参数的多样性及其导致的生物学效应的差异。

1.2 稳态磁场和动态磁场

研究人员将强度不随时间变化的磁场定义为“稳态磁场”，而将强度随着时间变化的磁场称为“动态磁场”或是“交变磁场”，如生产生活中常见的 50Hz 或 60Hz（赫兹）交变电磁场和射频磁场等。在过去的几十年里，人们对这些电磁场的潜在影响的担心与日俱增，同时也促成了大量相关的流行病学和实验室研究。因此，世界卫生组织（WHO）创立了国际电磁场计划，用来评估频率范围在 0~300GHz（千兆赫兹）的稳态或交变电磁场对于健康和环境的影响（图 1.1）。

^① 本章英文版作者为 Xin Zhang（中国科学院强磁场科学中心的张欣研究员），因此本章节中的“笔者”均指张欣研究员。

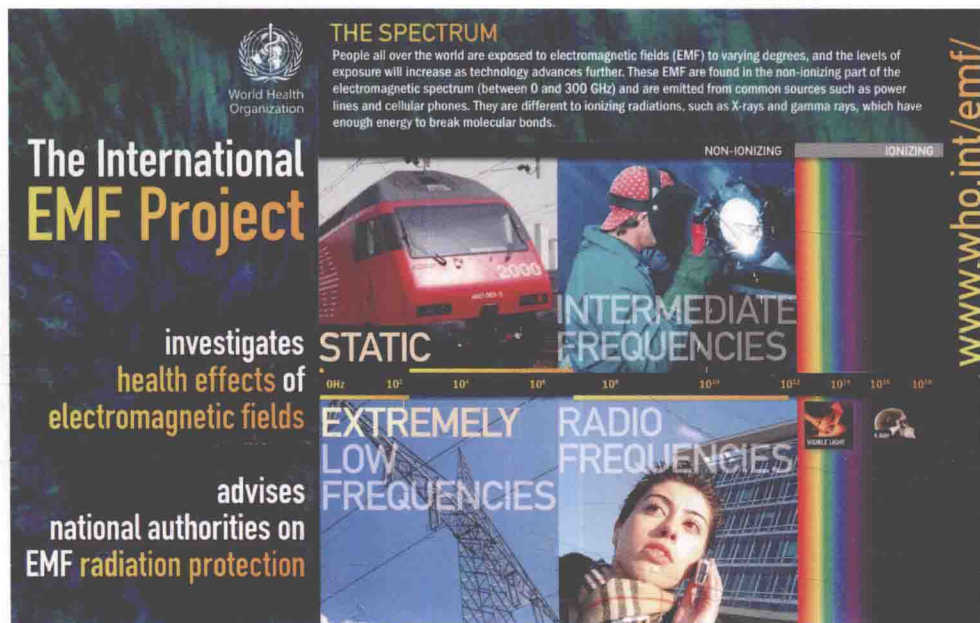


图 1.1 国际电磁场计划

该计划的目的是评估稳态磁场和动态/交变电磁场对暴露于其中的人体健康和环境的影响, 包含了目前常见的电磁场 (图片摘自世卫组织网站 <http://www.who.int/entity/peh-emf/project/en/>)

从目前的研究结果来看, 细胞对于不同种类和不同强度的磁场的响应明显不同。2004 年, Grassi 等发现 50 Hz、1 mT (毫特斯拉) 的交变电磁场能够促进大鼠垂体 GH3 细胞的增殖^[1]; 而在 2009 年, Rosen 和 Chastney 发现, 同样是 GH3 细胞, 其增殖却能被 0.5 T 的稳态磁场明显抑制^[2]。此外, 多项证据表明, 相同磁场强度的不同类型磁场对同一生物样品可能产生完全不同的效应。已有文献报道, 0.4 mT/50 Hz 和 2 μ T/1.8 GHz 的交变电磁场均可以促进表皮生长因子受体 (EGFR) 的磷酸化, 但是相同磁场强度的非相干磁场 (也称“噪声磁场”) 却能逆转上述效应^[3,4]。因此, 虽然非相干磁场如何逆转交变磁场所引起的磷酸化效应的机制尚不清楚, 但是磁场类型直接影响生物学效应这一事实已毋庸置疑。

已有研究表明不同频率的动态电磁场对于细胞增殖呈现不同的作用效果, 这说明动态电磁场参数的可变性 (如磁场强度和频率等) 会导致利用其对磁场的生物学效应机制进行全面系统的研究比较困难。因此, 与交变/动态磁场相比, 稳态磁场因其较少的可变参数成为研究磁场生物学效应更好的工具。众所周知, 人们常常暴露在永磁铁产生的磁场中, 通常这些磁铁的强度并不是很高

(小于1T),如家用冰箱的磁吸、玩具配件等;相比之下,目前医院中广泛使用的核磁共振成像仪(MRI)的核心部件却是一个强度比较高的电磁体,能产生范围在0.5~3T的稳态磁场。

近年来国内外的研究发现,相较于交变磁场,稳态磁场对人体的影响是较温和的,而且通常都是有益的。因此,我们将研究的注意力集中到稳态磁场的生物学效应,这也是本书所要介绍和讨论的主要内容。对于想要了解动态电磁场(如由交流输电线、微波炉和手机等产生的电磁场)的读者而言,也有一些相关的书籍和文章可供阅读,如1996年出版的《磁场和电磁场的生物学效应》(*Biological Effects of Magnetic and Electromagnetic Fields*;作者Shoogo Ueno),2015年出版的《生物磁学:生物磁效应刺激和成像的原理及应用》(*Biomagnetics: Principles and Applications of Biomagnetic Stimulation and Imaging*; Shoogo Ueno与Masaki Sekino合著);2015年出版的《生物学和药领域中的电磁场》(*Electromagnetic Fields in Biology and Medicine*,作者Marko S. Markov)以及其他一些综述^[5,6]。除了这些著作和国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)于2014年发布的指南,张成岗课题组^[7]和J. P. McNamee课题组^[8]于2016年的最新研究成果也表明人体在日常生活中所接受的射频磁场剂量对动物模型是无害的。总之,据笔者所知,目前仍然没有足够的证据证明动态磁场对人体健康一定有不利影响。当然,科学家们还需要继续进行详细和长期的流行病学和实验研究,以期在未来能获得明确可信的结论。

1.3 不同的磁场强度:弱、中等、强(高)和超强(高)磁场

根据磁感应强度,用来研究磁场生物学效应的稳态磁场通常被分为弱磁场(小于1mT),中等磁场(1mT~1T),强(高)磁场(1~20T)和超强(高)磁场(20T及以上)。

$$1\text{T(特斯拉)}=10\,000\text{Gs(高斯)}$$

$$1\text{Gs}=100\mu\text{T}$$

因为不同的研究领域中的稳态磁场的分类是有所区别的,所以研究人员在实验过程中应当清楚地标记所使用的磁场强度。随着现代科技的进步,人类会越来越多地接触各种稳态磁场。图1.2展示了生活和医疗中常见的多种强度的稳态磁场,包括无处不在的微弱的地磁场,不同强度的永磁体(通常为中等强度),医院里的磁共振成像仪和研究机构中的高强度和超高强度的磁场。值得一提的是,近年来学术界对强磁场和超强磁场的应用越来越广泛,不仅只局

限于凝聚态物理和材料科学的研究，还延伸到了各种抗磁性物质，例如，人体的组成成分大部分为抗磁性物质。

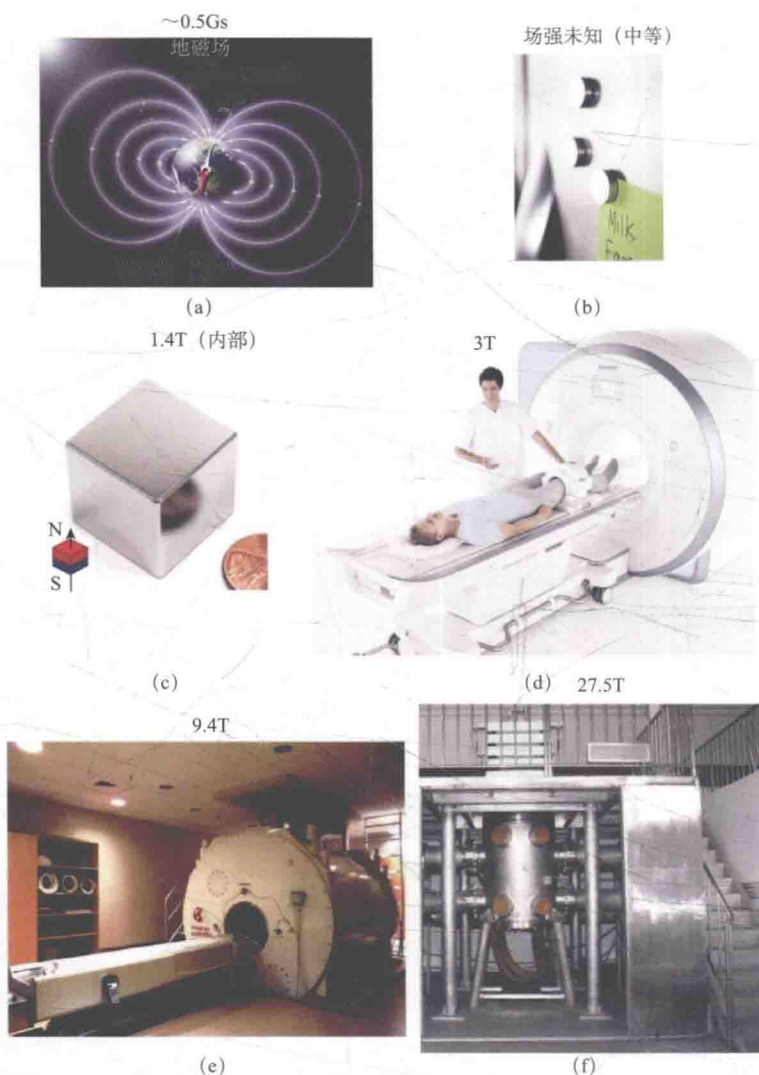


图 1.2 不同磁感应强度的稳态磁场

(a) 地磁场 (大约 $50\mu\text{T}$, 强度很弱), 照片摘自美国国家航空航天局 (NASA) 网站; (b) 一类家用小型永磁铁, s 图中显示的规格是 $22\text{mm} \times 6\text{mm}$, 强度属于中等, 常常用于磁性书写板、冰箱及办公室橱柜上。照片摘自亚马逊网站 (amazon.com); (c) 一块正方体永磁铁 (规格是 N50, 强度为 1.4T), 旁边放置一美分硬币作为尺寸对照, 照片摘自亚马逊网站; (d) 一台西门子公司生产的强度为 3T 的 MRI, 照片摘自西门子公司网站; (e) 位于明尼苏达大学医学院的内径为 65cm 的 9.4T MRI, 可用于人体头部检测; (f) 位于中国国家强磁场科学中心的水冷磁体之一 (产生高达 27.5T 超强稳态磁场)

由于目前医院使用的 MRI 仪器（图 1.2（d））的稳态磁场场强范围多在 0.5~7T，所以公众对该范围内的稳态磁场对人体健康所产生的潜在影响非常关注。事实上 MRI 的成像过程是比较复杂的，包括了非电离的稳态磁场、梯度磁场和射频磁场。目前的多项研究表明 MRI 总体来讲对人体是安全的，实验显示受试人群在 7T 的高场 MRI 中耐受性良好，并且没有过度不适^[9-11]、DNA 损伤^[12]或其他的细胞异常^[13]。与此同时，因为更强的磁场能够提供更高的分辨率以及检测更多的指标，所以研究人员和工程师正紧锣密鼓地研究开发具有更高场强的 MRI 仪器。事实上，目前科学家不仅利用如图 1.2（e）所示的 9.4T 的 MRI 仪器进行了动物实验，而且在健康人类志愿者身上也进行了临床前期实验^[14-16]。此外，科研人员已经研发出了场强高达 21.1T 的 MRI，并且已应用于小鼠脑组织成像^[17-19]（见第 2 章，图 2.3）。

尽管美国食品和药品监督管理局（FDA）将稳态磁场安全强度限制提高到了 8T，但是对于人体长时间接触该强度磁场是否有健康隐患，目前并没有确切结论，高于 8T 的磁场对于人体是否安全更是未知。随着高场 MRI 仪器的发展，其安全问题将越来越受到人们的关注。到目前为止，关于 9T 左右高场下动物细胞和人体细胞的研究还非常有限。2011 年，赵国平等发现 8.5T 稳态磁场降低了人-仓鼠杂合细胞（AL）的 ATP 水平，同时升高了其 ROS 水平^[20]。还有文献报道 10T 稳态磁场并不影响中国仓鼠卵巢细胞（CHO）的细胞周期和增殖，但是与 X 射线联合作用后其指标会发生明显变化^[21]。最近，我们课题组发现 9T 稳态磁场并不影响 CHO 细胞，但是会抑制结肠癌细胞（HCT116）和鼻咽癌细胞（CNE-2Z）等多种人类肿瘤细胞的增殖^[22]。此外，科研人员将人脑胶质瘤细胞 A172 嵌入胶原凝胶后再暴露于 10T 稳态磁场中，发现细胞会垂直于磁场方向排列，而单独的 A172 细胞在磁场中却没有这种现象^[23]，这是由胶原纤维的抗磁各向异性所造成的。另外，有研究发现 13T 稳态磁场处理后的仓鼠永生化细胞和人原代成纤维细胞的细胞周期和细胞活力均未发生变化^[24]；而 14T 超强稳态磁场处理后的平滑肌细胞的细胞形态及细胞集落形态则受到影响，导致细胞沿着磁场方向生长排列^[25]。另外有文献报道 7~17T 的磁场影响了大鼠成纤维细胞（Rat2）、小鼠胚胎成纤维细胞（NIH-3T3）和人宫颈癌细胞（HeLa）的细胞贴壁以及神经细胞的分化，免疫组化分析结果显示这可能是由于磁场影响了细胞微丝骨架^[26]。综上所述，科学家们必须进行大量系统严谨的研究，以证明（超）高场 MRI 的安全性，使其可以完全应用于人体。

由于技术上的限制，至今关于高于 20T 的超高稳态磁场生物学效应的报道非常有限。虽然目前最先进的超高核磁共振仪（NMR）能够产生大约 20T 的稳态磁场，但是它们非常狭窄的孔径使得在其中进行细胞实验是不切实际的。另

外, 动物细胞和人体细胞的培养需要精确的温度、湿度和 CO_2 浓度, 这在 NMR 中也难以实现。目前国际上只有少数可以产生大于 20T 的稳态磁场的大口径磁体, 而且多用于材料科学和物理学研究。如果科学家想利用它们来研究细胞及动物等生物样品, 就必须建造出特殊的样品架。我们课题组最近设计建造了一套适用于大口径超高场磁体系统 (图 1.2 (f), 图 1.3) 的生物培养装置。该装置可以提供精确的温度和气体控制, 从而能够进行超强磁场下的细胞培养和小动物模型试验 (图 1.3)。利用这套装置, 我们研究了 27T 磁场下的人体细胞生物学效应, 发现 27T 稳态磁场对人鼻咽癌细胞并没有直接的细胞毒性效应, 但却能影响细胞纺锤体的方向及形态^[27]。

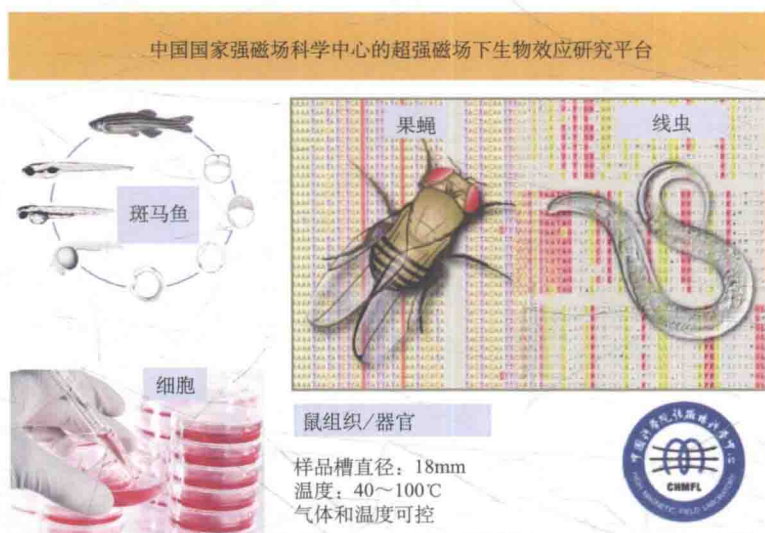


图 1.3 中国国家强磁场科学中心的超强磁场下生物效应研究平台
该生物平台的 18mm 培养皿适合研究多种生物样品, 包括人和动物细胞、真核和原核生物, 以及小动物模型 (如果蝇、线虫和斑马鱼等)

众多研究表明, 磁场强度是造成生物学效应差异的关键因素之一。例如, Okano 等的研究表明, 0.7T 中等强度的梯度稳态磁场显著降低了青蛙神经纤维的神经传导速度; 而 0.21T 的梯度磁场对其却没有效果^[28]。我们最近还发现, 不同于微弱磁场, 1~9T 的强 (高) 稳态磁场能通过影响人表皮生长因子受体 (EGFR) 的蛋白取向来抑制 EGFR 的激酶活性, 从而抑制相关肿瘤细胞的生长; 并且, EGFR 纯化蛋白的体外活性测试结果显示, 稳态磁场对其活性抑制呈磁场强度依赖性^[22]。同样的, 27T 超强稳态磁场影响了细胞内纺锤体的取向, 而中等强度的磁场则完全没有作用^[27]。

另外, 磁场强度和相对应的生物学效应之间的关系也不可一概而论。有多个研究小组发现稳态磁场的生物学效应与场强是呈正相关的, 具体说来就是场强越高, 效应越明显^[22,29-32]。例如, Bras 等于 20 世纪 90 年代便发现稳态磁场能够使微管沿着磁场方向排列, 并且该效应随着场强的升高而增强^[29] (图 1.4)。日本学者研究了 0.5~14T 范围内稳态磁场对 DNA 完整性的影响, 发现在 0.5~2T 范围内, DNA 损伤程度与场强呈正相关, 但是高于 2T 之后直到 14T 其损伤程度便再无明显升高^[30]。有趣的是, 部分实验还发现较高场强条件下会出现与低场强不同甚至是截然相反的生物学效应。例如, Morris 等学者用 10mT 或 70mT 的稳态磁场处理由组胺引起水肿的大鼠 15 分钟或 30 分钟后, 其水肿程度显著减轻, 但是 400mT 的磁场却没有此效应^[33]。还有我国西北工业大学的商澎课题组通过实验证实了 500nT 和 0.2T 的稳态磁场能够促进破骨细胞的分化、形成和吸收, 然而 16T 的磁场却对其有抑制作用^[34]。

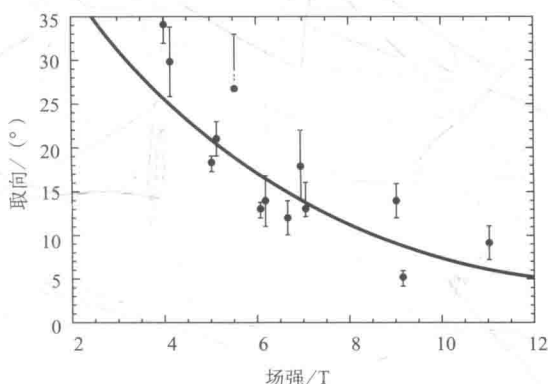


图 1.4 不同场强下的微管排列方向

Bras 等的研究表明微管装配方向与磁场方向的夹角随着场强的升高而减小 (图片摘自文献 [29])

1.4 均匀磁场和非均匀磁场

根据磁感线的空间分布情况, 稳态磁场可以被分为均匀场 (场强在一定空间范围内处处相等) 和非均匀场 (场强在一定空间范围内分布不同)。在大部分情况下均匀场和非均匀场是同时存在的。对于产生稳态场的电磁铁, 其中心部位的场强一般是均匀的。2002 年, Nakahara 等在发表的文章中报道了他们使用的一台 10T 磁体的场强分布和梯度分布^[21]。文中以 “0” 代表磁体的中心位置, 该处的磁感应强度最高但是磁场梯度为 “0”, 但是一旦样品被移动到远离中心