

邻近布局引起实验动物电磁剂量变化的仿真

郭娟¹ 牡丹^{1,2} 李静¹ 林加金¹

¹(空军军医大学军事预防医学系辐射防护医学教研室 特殊作业环境危害评估与防治教育部重点实验室 西安 710032)

²(陕西中医药大学公共卫生学院 咸阳 712000)

摘要 针对多频点、大样本量生物电磁暴露系统中剂量差异特征不明确的问题,采用生物电磁仿真软件 Sim4Life 建立了4种对比仿真环境,仿真频率点为1.8 GHz、2.4 GHz、3.6 GHz和5.8 GHz,对实验小鼠的散射电场和全身平均比吸收率(Whole body average specific absorption ratio, WBASAR)进行了仿真计算及分析。结果表明:受到电磁散射的影响,邻近布局中实验动物的WBASAR值随空间分布变化,变化规律与激励电场的分布趋势相似;激励电场是引起WBASAR值变化的主要因素。此外, WBASAR值的变化还受到频率的影响,高“身体尺寸-波长”比值抑制WBASAR值的变化。针对实验动物的电磁剂量变化特征,提出了降低群体剂量不确定性的设计建议。本研究为生物电磁实验平台的设计提供了剂量评估基础。

关键词 邻近布局, 变化, 全身平均比吸收率, 剂量, 电磁辐射

中图分类号 Q64

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0009

引用该文:

郭娟, 牡丹, 李静, 等. 邻近布局引起实验动物电磁剂量变化的仿真[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, 41(5): 050702. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0009.

GUO Juan, DU Dan, LI Jing, *et al.* Simulations of neighboring-layout-induced electromagnetic dose variations in experimental animals[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(5): 050702. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0009.



Simulations of neighboring-layout-induced electromagnetic dose variations in experimental animals

GUO Juan¹ DU Dan^{1,2} LI Jing¹ LIN Jiajin¹

¹(Department of Radiation Medicine and Protection, Ministry of Education Key Lab of Hazard Assessment and Control in Special Operational Environment, Faculty of Preventive Medicine, Air Force Medical University, Xi'an 710032, China)

²(School of Public Health, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712000, China)

ABSTRACT In this study, the issues of unclear characteristics of dose differences in multi-frequency and large-sample bioelectromagnetic exposure systems were studied. For this, four contrast simulation environments were established using Sim4Life. The frequency points in the simulation were set to 1.8, 2.4, 3.6, and 5.8 GHz,

基金资助: 航空医学重大问题科技攻关项目(2020ZTE04)和后勤科研项目(BKJ19C019)资助

第一作者: 郭娟,女,1984年8月出生,2012年于空军军医大学获博士学位,讲师,主要从事辐射生物学研究

通信作者: 林加金,讲师, E-mail: linjiajin913@126.com

收稿日期: 初稿 2023-02-19; 修回 2023-05-16

Supported by Scientific and Technological Tackling Project of Major Issues in Aviation Medicine (2020ZTE04), and Logistics Research Projects (BKJ19C019)

First author: GUO Juan (female) was born in August 1984, and obtained her doctoral degree from Air Force Military Medical University in 2012, lecture, engaging in radiobiology

Corresponding author: LIN Jiajin, lecture, E-mail: linjiajin913@126.com

Received 19 February 2023; accepted 16 May 2023

respectively. The scattering field and whole-body average specific absorption rate (WBASAR) values were simulated and analyzed. The results revealed that the WBASAR value for experimental animals was influenced by the electromagnetic scattering of adjacent animals, and the spatial distribution of the WBASAR value was similar to the trend followed by the excitation field distribution. The excitation field was the primary factor causing the variation in the WBASAR distribution. In addition, the WBASAR distribution varies with frequency, and a higher ratio of body size to wavelength inhibits the WBASAR variation. Furthermore, a design suggestion for the exposed platform was proposed to reduce group dose uncertainty based on the variation characteristics. Overall, this study provides a dose evaluation basis for the design of electromagnetic exposure systems.

KEYWORDS Neighboring layout, Variation, Whole body average specific absorption ratio (WBASAR), Dose, Electromagnetic radiation

CLC Q64

剂量评估^[1-3]是生物电磁学效应评价^[4-5]的重要量化参数。在常见的微波频段内,比吸收率(Specific absorption ratio, SAR)是主要的剂量学量^[6-8]。剂量差异及不确定性^[9-10]是群体剂量统计中关注的重要特征,体现了暴露系统的均匀性^[11-12]。在众多暴露系统中,自由体态暴露系统利用辐射天线产生的平面波对大样本量实验动物进行辐照,具有结构简单、频谱宽广等优点^[5, 13-14]。但有限空间内包含大样本量,导致个体之间的空间距离较近,形成邻近布局^[11]。电磁波在邻近布局的动物之间产生散射,可能导致动物剂量发生变化,引起剂量差异。

Wu等^[15]研究了2.45 GHz频率下新生和成年大鼠群体的全身剂量,结果发现,邻近布局影响实验动物的剂量评估结果,差异相对值最大可达到30%。Wang等^[16]对1.8 GHz下两只相邻大鼠的剂量变化特性进行了仿真研究,结果发现,剂量随两只大鼠之间的距离和角度变化而产生差异。以上研究以量化研究的方式明确了邻近布局对实验剂量差异的影响,但研究结论局限于单频点暴露,在研究中也缺少深层次机制分析。近年来,随着手机通信频率的扩充,生物电磁学研究已涵

盖至第五代通信频率范围,其实验平台也已拓展至多频点暴露^[17-19]。在多频点、大样本量生物电磁学暴露系统中,需要合理的设计以减少个体剂量差异,并降低群体的剂量不确定性^[20-21]。但多频点下邻近布局引起的剂量差异特征尚不明确,给系统设计带来了困难。

本文在自研的1~6 GHz电磁暴露系统上^[22]开展了个体剂量差异的仿真研究,以两动物布局为研究对象,从电磁散射的角度出发,探究了多频点条件下邻近布局引起的剂量变化特征及本质诱因,为多频点、大样本量生物电磁实验平台的设计提供基础。

1 仿真方法

1.1 仿真环境

利用基于时域有限差分(Finite-difference time-domain, FDTD)^[23]算法的生物电磁仿真软件Sim4Life,开展了实验动物的电磁剂量仿真。建立了4种对比仿真环境,分别为空白暴露、单动物、两动物横向布局、两动物纵向布局。图1给出了4种仿真环境的示意图。

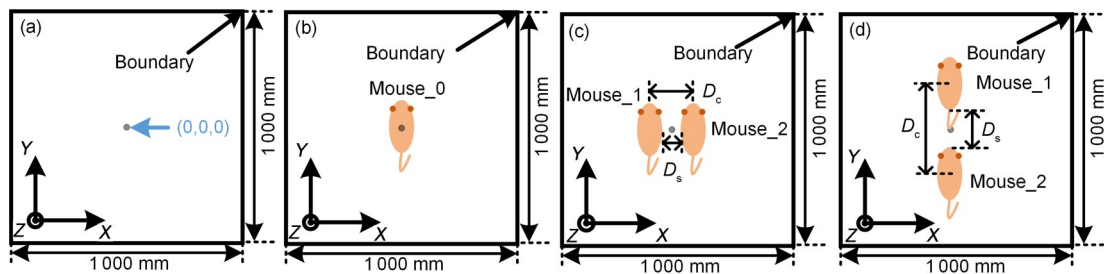


图1 剂量仿真环境:(a)空白暴露;(b)单动物;(c)两动物横向布局;(d)两动物纵向布局
Fig.1 Dose simulation environment: (a) blank exposure; (b) single animal; (c) transverse layout of two-animal; (d) longitudinal layout of two-animal

动物模型为Sim4Life软件配套的三维数字化虚拟模型，名称为Diggy小鼠，性别为雄性，类型为Nude normal mouse，标称身体长度（不含尾巴）为86 mm，标称质量为28 g，三维成像精度为1 mm量级，组织数目为43种，各组织参数参考IT'IS数据库。激励源为平面波激励，功率密度为50 W/m²，平面波的空间区域尺寸为1 000 mm×1 000 mm×80 mm，小鼠全部置于平面波照射区域内。平面波参数按照剂量效益最大化原则进行设置^[9]，照射方向为顶部照射，电场极化方向为小鼠的长轴（即Y轴）方向。边界条件为完全吸收边界条件（Absorbing or open boundary conditions, ABC），并设置为单轴完美匹配层（Uniaxial perfectly matched layers, UPML）。按照1 mm精度对三维动物模型进行网格划分并构成体素模型。调用图形处理器（Graphics processing unit, GPU）并采用Cuda加速技术提升运算处理能力。

在FDTD算法程序处理下，可实现暴露系统的电磁仿真，获得电磁场分布和体内电磁剂量分布等信息。体内电磁剂量采用SAR进行评价。比吸收率是衡量生物体内能量沉积速率的重要参数，是生物电磁学研究中的通用剂量。比吸收率与生物体内的电场值 E 相关，如式（1）所示。

$$\text{SAR} = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (1)$$

式中：SAR为比吸收率，W/kg； σ 为组织的电导

率， Ωm ； E 为电场值，V/m； ρ 为组织的密度，kg/m³。

比吸收率可分为全身平均比吸收率（Whole body average specific absorption ratio, WBASAR）和组织比吸收率（Tissue specific absorption ratio, TSAR）等。在国际生物电磁学标准中^[24]，人体损伤的WBASAR阈值为4 W/kg。本研究主要针对WBASAR值进行探讨。

1.2 剂量采样点设置

按图1所示的建模框架分别开展了空白暴露、单动物、两动物横向布局和两动物纵向布局的生物电磁剂量仿真。依据常见的通信频率，仿真频率点分别设定为1.8 GHz、2.4 GHz、3.6 GHz和5.8 GHz。在两动物布局中，横向或纵向间距 D_c 设定为两只动物中心点之间的距离。 D_c 从紧密接触开始依次拉开，每次仿真的间距递增10 mm，小于波长的1/3。两动物横向布局中，间距 D_c 从50 mm递增至450 mm；两动物纵向布局中，间距 D_c 从90 mm递增至290 mm。横向或纵向间距 D_s 设定为两只动物皮肤之间的最近距离， D_s 随 D_c 变化而变化。表1给出了距离 D_c 、 D_s 值及递增值的信息。

对两动物布局下的全身平均比吸收率进行了初步处理，定义了各位置点处两只小鼠的均值WBASAR_A和差异相对值IRE，其定义分别为式（2）和（3）。

表1 仿真中两动物之间的距离及递增值
Table 1 Interval and increasing value of the two-animal in the simulation

组别 Groups	间距最小值 / mm Interval minimum		间距最大值 / mm Interval maximum		间距递增 值 / mm Interval increment	仿真数据 点 Simulation data points
	中心点距离(D_c) Distance between center points	皮肤间隔 (D_s) Skin interval	中心点距离(D_c) Distance between center points	皮肤间隔 (D_s) Skin interval		
两动物横向布局 Transverse layout of two-animal	50	2	450	402	10	41
两动物纵向布局 Longitudinal layout of two-animal	90	2	290	202	10	21

$$\text{WBASAR}_A = \frac{\text{WBASAR}_1 + \text{WBASAR}_2}{2} \quad (2)$$

$$\text{IRE} = \frac{|\text{WBASAR}_1 - \text{WBASAR}_2|}{\text{WBASAR}_A} \quad (3)$$

式中：WBASAR₁和WBASAR₂分别为两只动物的全身平均比吸收率，W/kg；WBASAR_A为WBASAR₁和WBASAR₂的均值，W/kg；IRE为

WBASAR₁和WBASAR₂的差异相对值，%。

2 仿真结果

2.1 电场分布

按图1(b)所示的单动物环境，开展了平面波

暴露下的电磁仿真。频率点分别设定为1.8 GHz、2.4 GHz、3.6 GHz和5.8 GHz。图2给出了2.4 GHz平面波激励下二维空间的电场分布，可以看出，在小鼠横向方向上，电场分布存在着明显的强弱条纹。

提取了单动物环境中各频率点下横向和纵向电场的幅值信息，并与空白暴露中的空间电场分布进行了对比，结果如图3所示。其中，横向电场是图1(b)中Y=0处的电场幅值信息，纵向电场是图1(b)中X=0处的电场幅值信息。由图3可知，在单动物环境中，横向电场和纵向电场在各自方向上存在衰减振荡现象，幅值在空白暴露的电场幅值附近；纵向方向上，小鼠体表附近存在着明显的场增强现象；整体而言，纵向振荡衰减的趋势大于横向。

依据图3(a)，对单动物环境中横向电场的空

间振荡周期进行了分析，图4给出了各激励频率下空间振荡周期和激励波长的对比。可以看出，空间振荡周期约等于激励电磁波的波长。

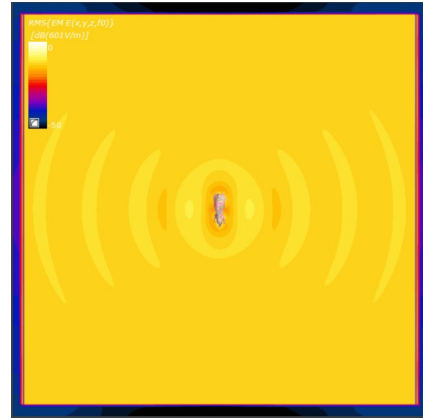


图2 单动物环境电场二维分布
Fig.2 Two-dimensional distribution of electric field in single animal environment

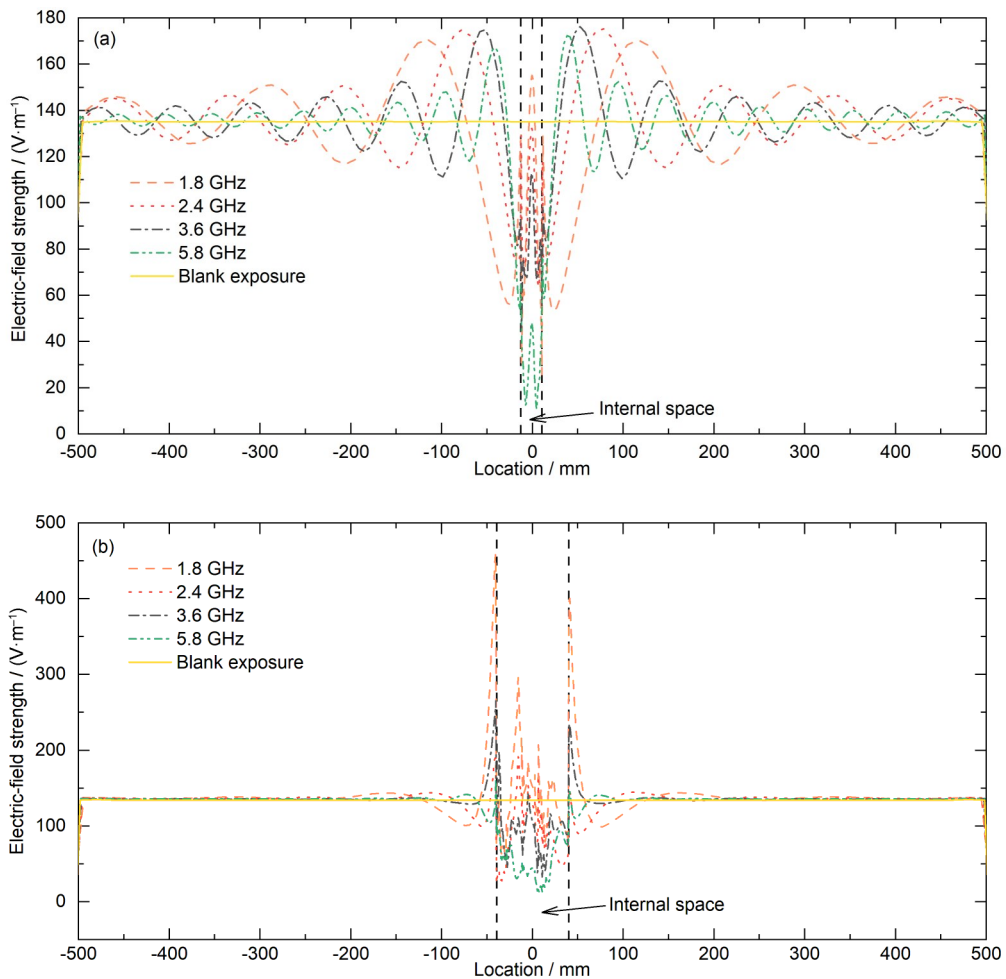


图3 电场分布:(a)横向电场;(b)纵向电场(彩色见网络版)
Fig.3 Field distribution: (a) transverse electric field; (b) longitudinal electric field (color online)

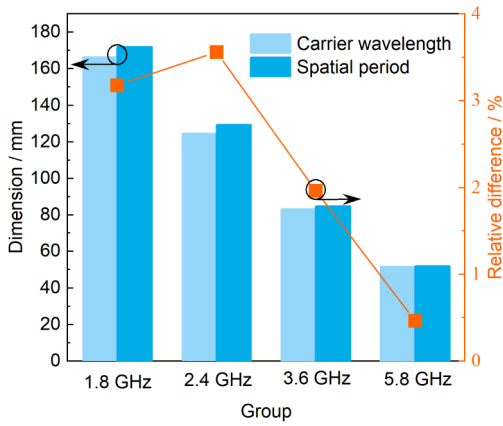


图4 空间振荡周期和激励波长的对比
Fig.4 Contrast between the spatial oscillation cycle and the excitation wavelength

2.2 剂量数据

开展了剂量仿真模拟，图5和图6分别给出了单动物-两动物横向布局和单动物-两动物纵向布局的剂量数据对比。在图5中，剂量差异相对值IRE在3.5%以下，均值 $WBASAR_A$ 随距离衰减振荡，幅值在单动物 $WBASAR_0$ 值附近。在图6中，均值 $WBASAR_A$ 也随距离衰减振荡，幅值也在单动物 $WBASAR_0$ 值附近，剂量差异相对值IRE在4.8%以下。以上数据表明，两动物布局中，两只小鼠之间的剂量差异值较小，其全身平均比吸收率具有一定的互易性；但相对于单动物环境，另一只小鼠的加入改变了原先小鼠的剂量，剂量随空间变化而变化。因此，邻近布局导致了个体实验剂量的变化。

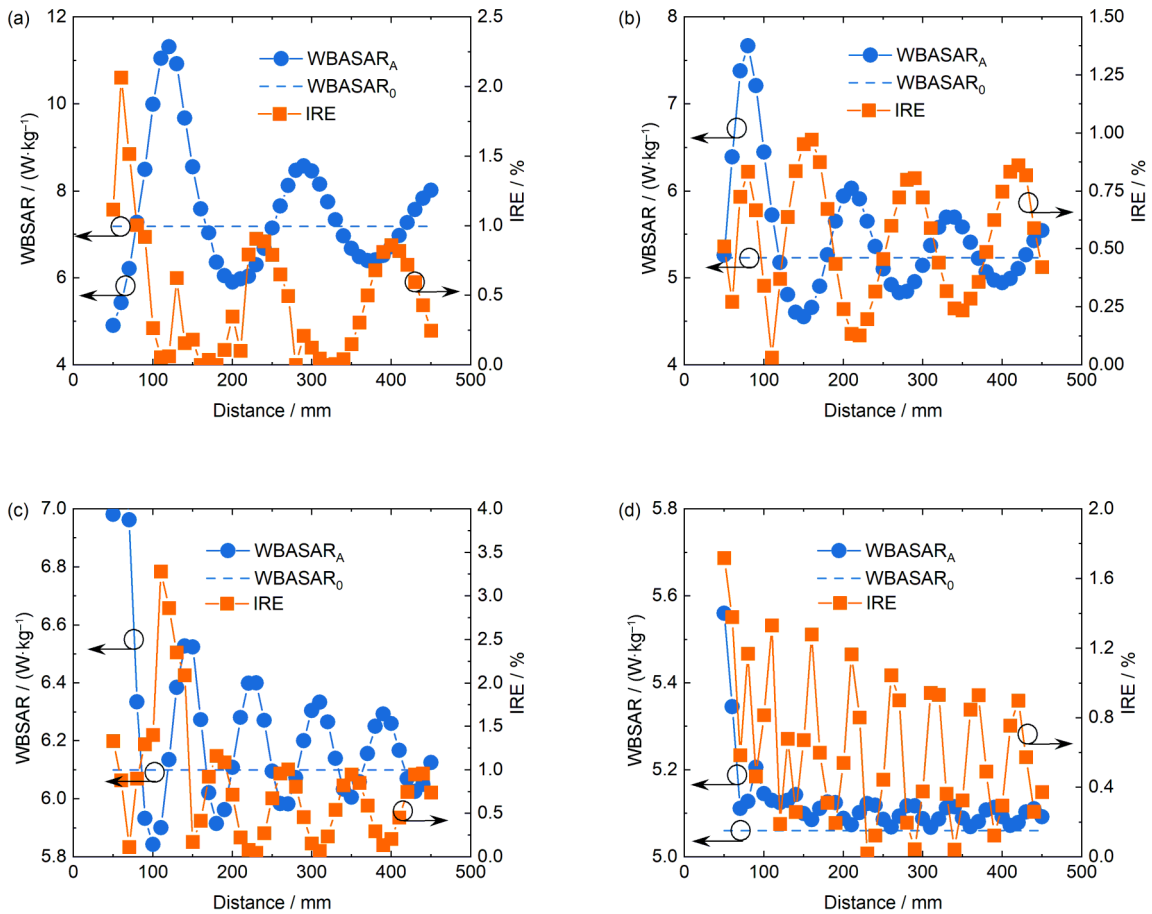


图5 单动物-两动物横向布局WBASAR值对比：(a)1.8 GHz；(b)2.4 GHz；(c)3.6 GHz；(d)5.8 GHz
Fig.5 Comparison of WBASAR values between single animal and transverse layout of two-animal:
(a) 1.8 GHz; (b) 2.4 GHz; (c)3.6 GHz; (d) 5.8 GHz

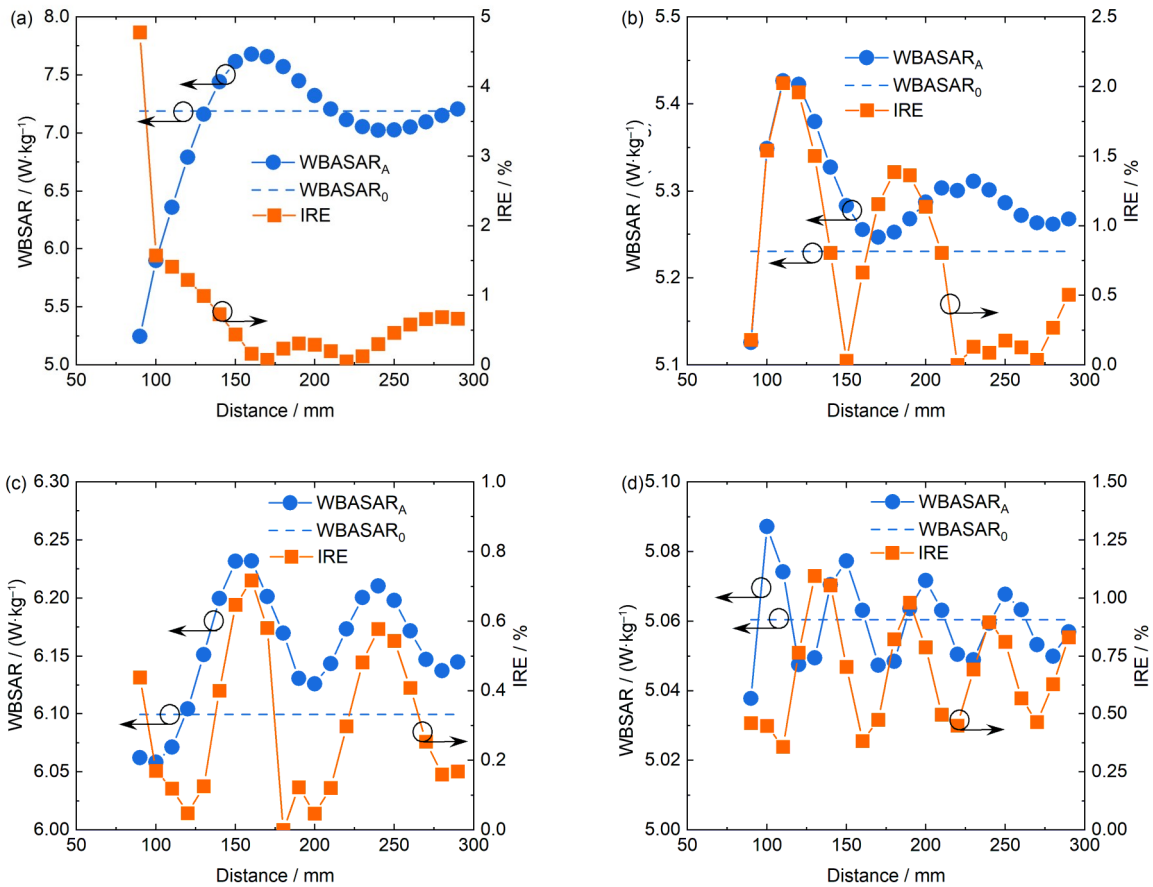


图6 单动物-两动物纵向布局WBASAR值对比:(a)1.8 GHz;(b)2.4 GHz;(c)3.6 GHz;(d)5.8 GHz
 Fig.6 Comparison of WBASAR values between single animal and longitudinal layout of two-animal:
 (a) 1.8 GHz; (b) 2.4 GHz; (c)3.6 GHz; (d) 5.8 GHz

2.3 剂量值与电场值比较

对单动物环境中的电场和两动物布局中的WBASAR值进行了比对处理,处理过程见式(4)、(5)。

$$CC_E = \frac{E_i}{E_0} \quad (4)$$

$$CC_{SAR} = \frac{WBASAR_{Ai}}{WBASAR_0} \quad (5)$$

式中: CC_E 为单动物环境的电场比对系数,%; E_i 为单动物环境中第*i*个位置点处的电场, V/m; E_0 为空白暴露环境的电场, V/m; CC_{SAR} 为两动物布局中的剂量比对系数,%; $WBASAR_{Ai}$ 为两动物布局中第*i*个位置点处的全身平均比吸收率的均值, W/kg; $WBASAR_0$ 为单动物环境中的全身平均比吸

收率, W/kg。

式(4)的含义是将单动物环境的电场与空白暴露环境的电场进行比对,以观察单动物环境中因散射导致的电场分布变化趋势。式(5)的含义是将两动物布局中的全身平均比吸收率与单动物环境中的全身平均比吸收率进行比对,以观察邻近布局引起的剂量变化趋势。

图7给出了两动物横向布局的 CC_{SAR} 值和单动物环境中的 CC_E 值数据。图8给出了两动物纵向布局的 CC_{SAR} 值和单动物环境中的 CC_E 值数据。数据结果表明:对于两动物横向布局的1.8 GHz、2.4 GHz和3.6 GHz频点及两动物纵向布局的1.8 GHz和2.4 GHz频点, CC_{SAR} 值与 CC_E 值振荡趋势相同,具有相似的振荡周期、幅值和相位(图7(a)、(b)、(c)和图8(a)、(b));随着载波频率升高,波形一致性变差(图7(d)和图8(c)、(d))。

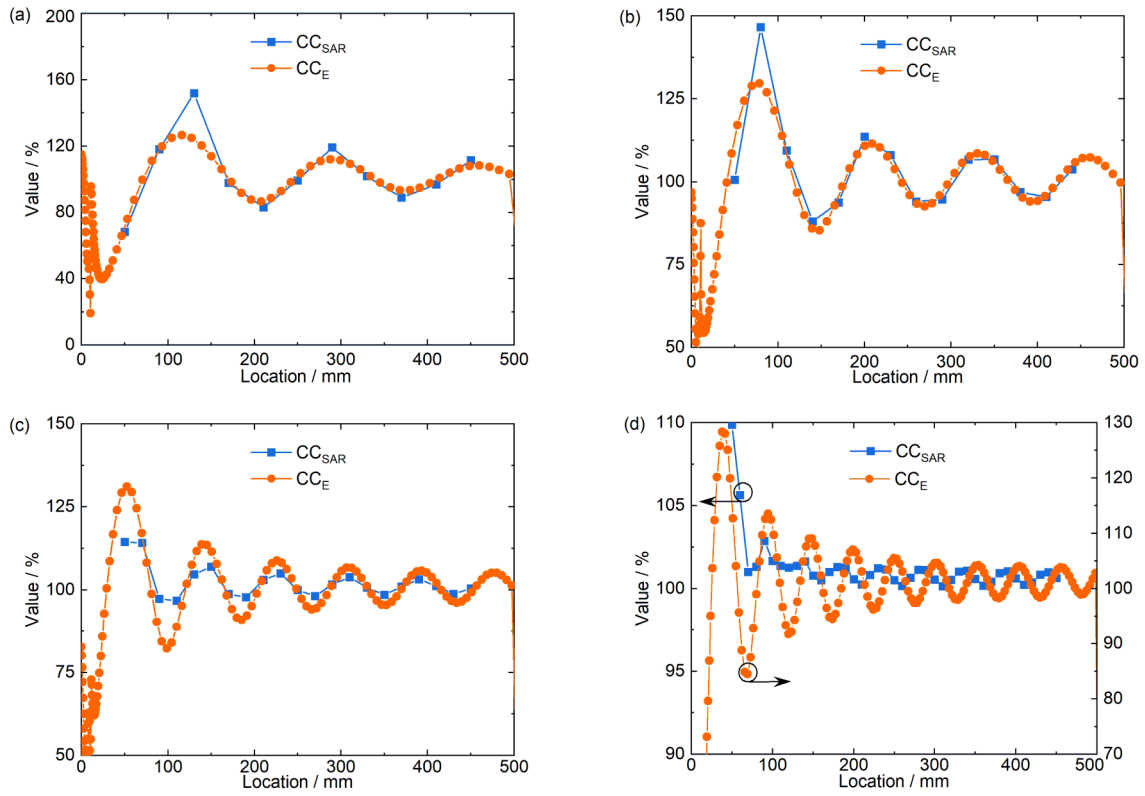


图7 两动物横向布局的 CC_{SAR} 值和单动物环境中的 CC_E 值数据对比：(a)1.8 GHz；(b)2.4 GHz；(c)3.6 GHz；(d)5.8 GHz
Fig.7 Comparison of CC_{SAR} under transverse layout of two-animal and CC_E under single animal:
 (a) 1.8 GHz; (b) 2.4 GHz; (c) 3.6 GHz; (d) 5.8 GHz

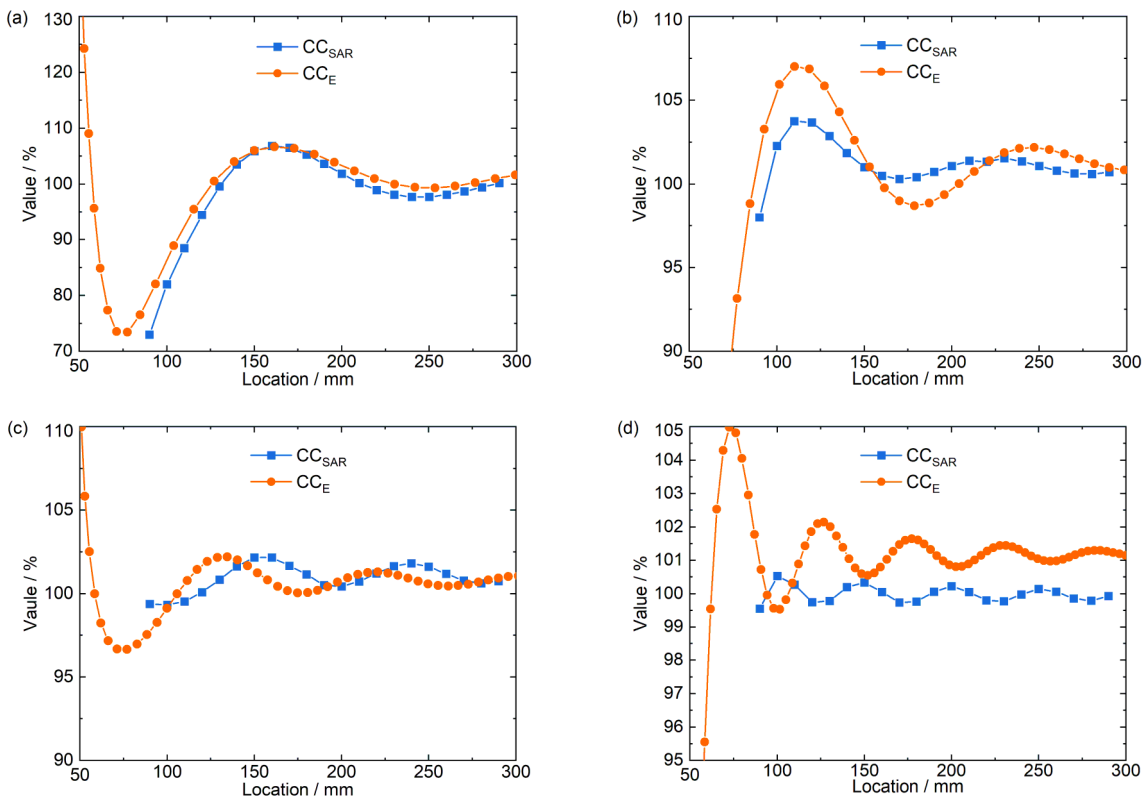


图8 两动物纵向布局的 CC_{SAR} 值和单动物环境中的 CC_E 值数据对比：(a)1.8 GHz；(b)2.4 GHz；(c)3.6 GHz；(d)5.8 GHz
Fig.8 Comparison of CC_{SAR} under longitudinal layout of two-animal and CC_E under single animal:
 (a) 1.8 GHz; (b) 2.4 GHz; (c) 3.6 GHz; (d) 5.8 GHz

3 讨论

3.1 电场对剂量分布的影响

在两动物布局环境中，由于另一只小鼠的邻近效应，目标小鼠的实际激励电场发生了畸变。从图2~4可以看出，电场的畸变具有一定的特点。由于横向截面面积较大，横向电场幅值分布呈现类似于干涉的强弱条纹，条纹的差异随着距离增加而逐渐衰减，空间振荡周期与激励电磁波的波长相同。由于纵向截面面积较小，纵向电场幅值在动物体表面呈电场热点，并随距离增加而迅速衰减，条纹现象较弱。

剂量值在空间的分布与激励电场分布的趋势相似。从图7和图8可以看出，近距离处剂量波动的振幅较高，振幅随着距离增加而减少；横向布局的剂量振荡幅值明显大于纵向布局的剂量振荡幅值。从电磁散射过程及比吸收率定义的角度分析，外部空间激励电场决定了实验动物体内剂量^[25]，而剂量变化分布的特征也符合电磁散射的物理过程。因此，激励电场是引起剂量变化的首要因素。

3.2 频率对剂量分布的影响

剂量分布特征还受到频率的影响。以两动物横向布局为例，在1.8 GHz处，剂量对比系数 CC_{SAR} 的振幅与电场对比系数 CC_E 相差较小，且第一峰值处 CC_{SAR} 的振幅高于 CC_E （图7(a)）；在5.8 GHz处，除了第一峰值外， CC_{SAR} 的振幅均小于 CC_E （图7(d)）。因此，随着频率逐渐升高，激励电场对剂量变化的影响逐渐减小。

为了进一步探究频率对剂量变化的影响，图9给出了电场条纹和动物尺寸的示意图。表2给出了本案例中频率、波长和尺寸比等信息。随着频率升高，身体尺寸-波长的比值逐渐增加。对于较高的身体尺寸-波长比，即图9中的Mouse_H模型，身体内所容纳的条纹数较多，体内电场的平均值相对稳定，剂量变化较小；这也就是图7(d)和图8(d)中的剂量值没有随电场变化、剂量振荡值明显弱于电场振荡值的原因。相反地，对于较低的身体尺寸-波长比，即图9中的Mouse_L模型，身体内所容纳的条纹数较少，体内电场的平均值不稳定，剂量值随电场平均值变化，剂量的变化值较大（图7(a)、(b)、(c)和图8(a)、(b)）。因此，较高的“身体尺寸-波长”比值抑制实验动物的剂量变化。

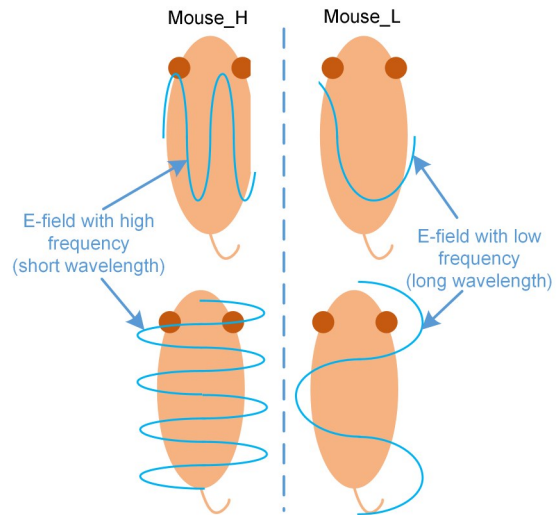


图9 条纹和小鼠尺寸的示意图
Fig.9 Schematic of stripes and mouse size

表2 身体尺寸和波长的比值参数
Table 2 Ratio of body size and wavelength

频率 / GHz Frequency	波长 / mm Wavelength	小鼠横向尺寸和波长的比值 Ratio of horizontal dimension of mouse to wavelength	小鼠纵向尺寸和波长的比值 Ratio of longitudinal dimension of mouse to wavelength
1.8	166.7	0.27	0.52
2.4	125.0	0.36	0.69
3.6	83.3	0.54	1.03
5.8	51.7	0.87	1.67

3.3 实验设计建议

两动物布局的研究结果表明，实验剂量值受到邻近动物的电磁散射影响，激励电场是引起剂

量变化的首要因素。此外，剂量变化还受到频率的影响，较高的“身体尺寸-波长”比值可以抑制剂量变化。在大样本量暴露平台设计中，为了减

少个体的剂量差异、降低群体的剂量不确定性，需要注意以下几个方面：(1)实验布局中避免近距离、横向位置处摆放相邻的实验动物，减小电磁散射引起的干涉条纹对剂量的影响；(2)实验动物优先摆放于纵向位置，但要避开实验鼠的头尾部凸起处，以减小场增强点对剂量的影响；(3)电磁散射引起的空间电场分布与暴露频率相关，可选用大尺寸实验动物以抑制电场干涉条纹对剂量的影响；(4)为验证布局设计的合理性，可结合剂量仿真进行验证和优化。

4 结论

实验动物的比吸收率评估是生物电磁学实验设计中的重要剂量参数，对于群体实验，由于动物之间的距离较近，电磁波在动物之间产生散射，邻近因素可能产生显著剂量差异，影响实验设计和剂量评估。本文基于多频点暴露平台，以两动物布局为模型，利用生物电磁仿真方法探究了多频点条件下邻近布局引起比吸收率变化的特征。利用仿真算法阐明了邻近布局引起的剂量变化规律，从散射波的角度探究了引起剂量变化的关键因素，针对大样本量暴露平台提出了合理布局的设计建议。研究发现对于生物电磁学实验平台的设计及评估具有一定的指导意义。

作者贡献声明 林加金提出了本文的研究思路和实验方案；李静为剂量仿真提供了指导；牡丹完成了剂量仿真及评估工作；郭娟完成了资料的整理和撰写。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 苏镇涛, 杨国山. 高功率脉冲微波照射时大鼠体内 SAR 值计算[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2004, **24**(6): 561-563. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2004.06.030. SU Zhentao, YANG Guoshan. Calculation of SAR in rats exposed to pulsed high power microwave irradiation[J]. Chinese Journal of Radiation Mediation and Protection, 2004, **24**(6): 561-563. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098.2004.06.030.
- 2 苏镇涛, 周红梅, 罗霞, 等. 微波暴露下实验用鼠体重与电磁能量吸收关系研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2008, **28**(3): 301-303.. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098.2008.03.034. SU Zhentao, ZHOU Hongmei, LUO Xia, *et al.* The EM
- energy absorption in different rat model exposed to microwave irradiation[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2008, **28**(3): 301-303. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2008.03.034.
- 3 彭怀禹, 李孟达, 齐红新, 等. 双波源同向交替入射下大鼠的电磁暴露仿真[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, **39**(5): 050303. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2021. rrj. 39.050303. PENG Huaiyu, LI Mengda, QI Hongxin, *et al.* Numerical simulation of electromagnetic exposure in rats with alternate incidence of double wave sources[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, **39**(5): 050303. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2021. rrj. 39.050303.
- 4 周兢程, 林艳云, 陈克亮, 等. 射频电磁辐射对大鼠脑组织胆碱能标志物的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2017, **35**(1): 010202. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2017. rrj. 35.010202. ZHOU Jingcheng, LIN Yanyun, CHEN Keliang, *et al.* Effects of radiation-frequency electromagnetic radiation on cholinergic neuronal markers of SD rat brain[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2017, **35**(1): 010202. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2017. rrj. 35.010202.
- 5 芮刚, 刘力源, 林加金, 等. 5.8 GHz 射频辐射对大鼠学习记忆和海马神经元突触可塑性的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2020, **40**(6): 427-433.. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.06.003. RUI Gang, LIU Liyuan, LIN Jiajin, *et al.* Effects of 5.8 GHz radiofrequency radiation on learning and memory along with synaptic plasticity of hippocampal neurons in rats[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2020, **40**(6): 427-433. DOI: 10.3760/cma. j. issn.0254-5098.2020.06.003.
- 6 王海彬, 牛中奇. 人体对电磁脉冲吸收剂量的仿真研究[J]. 电波科学学报, 2006, **21**(2): 259-264. DOI: 10.13443/j.cjors.2006.02.021. WANG Haibin, NIU Zhongqi. Specific absorption and currents induced in human body for exposure to electromagnetic pulses[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, **21**(2): 259-264. DOI: 10.13443/j. cjors. 2006.02.021.
- 7 牛中奇, 侯建强, 周永军, 等. 生物电磁剂量学及人体吸收电磁剂量的数值分析[J]. 中国生物医学工程学报, 2006, **25**(5): 580-584. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-8021. 2006.05.014.

- NIU Zhongqi, HOU Jianqiang, ZHOU Yongjun, *et al.* The bioelectromagnetics dosimetry and numerical analysis of electromagnetic dose absorbed by human body [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2006, **25** (5): 580-584. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-8021.2006.05.014.
- 8 朱士虎, 卢智远, 孔令锋. 稳态平面波作用下人体比吸收率分布研究[J]. 山东生物医学工程, 2003, **22**(2): 25-27. DOI: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2003.02.008.
- ZHU Shihu, LU Zhiyuan, KONG Lingfeng. Study on the distribution of specific absorption rates(SAR) in human body effected by stable plane wave[J]. Shandong Journal of Biomedical Engineering, 2003, **22**(2): 25-27. DOI: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2003.02.008.
- 9 玉冬. 中国参考人可变形模型构建方法及电磁辐射剂量研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- YU Dong. Construction method of deformable model of China reference person and study on electromagnetic radiation dose[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- 10 王萌. 生物电磁学仿真框架构建及儿童可变形模型的电磁辐射模拟应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- WANG Meng. Development of bioelectromagnetic simulation framework and electromagnetic radiation simulation application based on children deformable phantom[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- 11 Kuster N, Torres V B, Nikoloski N, *et al.* Methodology of detailed dosimetry and treatment of uncertainty and variations for *in vivo* studies[J]. Bioelectromagnetics, 2006, **27**(5): 378-391. DOI: 10.1002/bem.20219.
- 12 孙艺宸, 牡丹, 李静, 等. 实验动物体重差异引起的电磁剂量差异和不确定性[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, **41**(1): 010302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0115.
- SUN Yichen, DU Dan, LI Jing, *et al.* Variations and uncertainty in electromagnetic dose caused by weight differences of experimental animals[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, **41** (1): 010302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0115.
- 13 Paffi A, Apollonio F, Lovisolio G A, *et al.* Considerations for developing an RF exposure system: a review for *in vitro* biological experiments[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, **58**(10): 2702-2714. DOI: 10.1109/TMTT.2010.2065351.
- 14 袁梦, 林艳云, 郭奇彦, 等. 1 840 MHz 电磁辐射对雄性 SD 大鼠性激素的影响及其抗氧化损伤作用研究[J]. 现代生物医学进展, 2017, **17**(28): 5406-5411. DOI: 10.13241/j.cnki.pmb.2017.28.002.
- YUAN Meng, LIN Yanyun, GUO Qiyan, *et al.* Effects of 1 840 MHz radiation-frequency electromagnetic radiation on the sex hormone secretion of male SD rats and its anti-oxidative damage effect[J]. Progress in Modern Biomedicine, 2017, **17**(28): 5406-5411. DOI: 10.13241/j.cnki.pmb.2017.28.002.
- 15 Wu T N, Hadjem A, Wong M F, *et al.* Whole-body newborn and young rats' exposure assessment in a reverberating chamber operating at 2.4 GHz[J]. Physics in Medicine and Biology, 2010, **55**(6): 1619-1630. DOI: 10.1088/0031-9155/55/6/006.
- 16 Wang X H, Xia C J, Lu L, *et al.* Electromagnetic exposure dosimetry study on two free rats at 1.8 GHz via numerical simulation[J]. Frontiers in Public Health, 2021, **9**: 721166. DOI: 10.3389/fpubh.2021.721166.
- 17 Hirata A, Diao Y L, Onishi T, *et al.* Assessment of human exposure to electromagnetic fields: review and future directions[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021, **63**(5): 1619-1630. DOI: 10.1109/TEMPC.2021.3109249.
- 18 赵雪龙, 王长振, 周红梅, 等. P-X 频段微波暴露人体比吸收率(SAR)仿真研究[J]. 微波学报, 2020, **36**(S1): 420-423.
- ZHAO Xuelong, WANG Changzhen, ZHOU Hongmei, *et al.* Simulation on specific absorption rate(SAR) of human body exposed to P-X band microwave[J]. Journal of Microwaves, 2020, **36**(S1): 420-423.
- 19 李从胜. 准静态场至 S 波段电磁波与人体耦合典型场景的 FDTD 研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- LI Congsheng. FDTD study on typical scenes of quasi-static field to S-band electromagnetic wave coupling with human body[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2015.
- 20 Gong Y J, Capstick M, Kuehn S, *et al.* Life-time dosimetric assessment for mice and rats exposed in reverberation chambers of the 2-year NTP cancer bioassay study on cell phone radiation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, **59** (6): 1798-1808. DOI: 10.1109/TEMPC.2017.2665039.
- 21 Shi J J, Chakarothai J, Wang J Q, *et al.* Dosimetry and verification for 6-GHz whole-body non-constraint exposure of rats using reverberation chamber[J]. IEICE Transactions on Communications, 2015, **E98.B**(7): 1164-

1172. DOI: 10.1587/transcom.e98.b.1164.
- 22 杜丹, 李静, 苗霞, 等. 1~6 GHz 射频暴露平台的设计及剂量特征[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(4): 040701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0029.
- DU Dan, LI Jing, MIAO Xia, *et al.* Design and dose characteristics of 1~6 GHz radio frequency exposure platform[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, **40**(4): 040701. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0029.
- 23 童嘉锴, 齐红新, 王向晖, 等. 宽频电磁脉冲辐照大鼠体内电场分布的仿真计算[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(2): 020702. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0212.
- TONG Jiakai, QI Hongxin, WANG Xianghui, *et al.* Simulation calculation of electric field distribution in rats irradiated using broadband electromagnetic pulse[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, **40**(2): 020702. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2021-0212.
- 24 Bailey W H, Bodemann R, Bushberg J, *et al.* Synopsis of IEEE std C95.1™-2019 “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 hz to 300 GHz” [J]. IEEE Access, 2019, **7**: 171346-171356. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2954823.
- 25 Conil E, Hadjem A, Gati A, *et al.* Influence of plane-wave incidence angle on whole body and local exposure at 2 100 MHz[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, **53**(1): 48-52. DOI: 10.1109/TEMPC.2010.2061849.