

1~6 GHz 射频暴露平台的设计及剂量特征

杜丹^{1,2} 李静¹ 苗霞¹ 徐胜龙¹ 郭娟¹ 何伟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 西安 710032)

²(陕西中医药大学公共卫生学院 咸阳 712000)

摘要 研制一套宽频谱生物电磁暴露平台,开展了相应暴露条件下的剂量仿真研究。射频暴露平台的频段为1~6 GHz,其基本原理是天线暴露型电磁场,额定功率下目标处的功率密度为63.3~149.0 W/m²。生物电磁剂量仿真研究表明:相对于大鼠,小鼠在1~6 GHz内可以获得更高的全身平均比吸收率,高出约一个数量级;顶部照射和侧向照射对全身平均比吸收率的影响较小,大鼠的差异值最大为0.731 dB,小鼠的差异值最大为0.276 dB,实验动物的全身平均比吸收率存在着频率相关性,对照射方向的改变不敏感;组织比吸收率对照射方向的改变较敏感,峰值频率点略大于全身平均比吸收率的共振频率点;在最大暴露值条件下,对实验动物的最大剂量值进行了评估,大鼠和小鼠的全身平均比吸收率均超过职业标准值0.4 W/kg,其中小鼠的全身平均比吸收率超过损伤阈值4 W/kg。该实验装置可用于通讯和雷达等作业常见频率的在体效应研究。

关键词 射频,暴露,比吸收率,剂量,特征

中图分类号 Q64

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0029

Design and dose characteristics of 1–6 GHz radio frequency exposure platform

DU Dan^{1,2} LI Jing¹ MIAO Xia¹ XU Shenglong¹ GUO Juan¹ HE Wei¹ LIN Jiajin¹

¹(Department of Radiation Biology, 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, a broad-spectrum bioelectromagnetic exposure platform was developed and a dose calculation study under the corresponding exposure conditions was performed. The radio frequency exposure platform was in the frequency band of 1–6 GHz, and its principle was based on antenna-exposed electromagnetic fields. At the rated power, the power density at the target was 63.3–149.0 W/m². Biological electromagnetic dose simulation showed that compared with the rat, the mouse can achieve a whole body average specific absorption rate (WBA SAR) in the range of 1–6 GHz, higher by approximately an order of magnitude. The effect of the top and side irradiation on the WBA SAR was small, with the maximum difference of 0.731 dB and 0.276 dB in the rat and mouse, respectively. Therefore, the WBA SAR of the experimental animals was frequency-dependent and insensitive

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: 杜丹,女,1996年1月出生,2020年7月毕业于陕西中医药大学,现为空军军医大学和陕西中医药大学联合培养硕士研究生,公共卫生专业

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

收稿日期: 初稿 2022-03-16; 修回 2022-05-24

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

First author: DU Dan (female) was born in January 1996, and graduated from Shaanxi University of Chinese Medicine in July 2020. Now she is a graduate student at Air Force Military Medical University and Shaanxi University of Chinese Medicine jointly train postgraduates, majoring in public health

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

Received 16 March 2022; accepted 24 May 2022

to changes in the exposure direction. The tissue-specific absorption rate was more sensitive to changes in the exposure direction, with a peak frequency point slightly greater than the resonance frequency point of the WBA SAR. At the maximum exposure values, the maximum dose values of the laboratory animals were assessed. The WBA SARs of the rat and mouse exceeded the occupational standard of 0.4 W/kg. In addition, the WBA SAR of the mouse exceeded the injury threshold of 4 W/kg. The experimental setup utilized here can be used to investigate *in vivo* effects at frequencies typically applied in occupational operations such as communications and radar.

KEYWORDS Radio frequency, Exposure, Specific absorption rate, Dose, Characteristics

CLC Q64

射频(Radio frequency, RF)表示可以辐射到空间的电磁频率,频率范围为300 kHz~300 GHz。射频辐射广泛应用于广播、电视、通信、交通运输、电力、医疗、科研等领域。近些年来,随着第4代通讯^[1]的普及和第5代通讯的推广^[2],射频辐射已成为威胁人员健康^[3-4]的重要环境因素之一^[5-6]。流行病学调查发现,射频辐射对通讯和雷达等职业人群有较大的负面影响^[7-9],特别是在神经、生殖等人体系统方面。因此,随着通讯系统的升级和对职业人群健康的关注,开展宽频谱条件下的复杂电磁环境对生物体的影响已成为作业人群健康维护研究的重点。传统的实验室研究主要集中于800~2 450 MHz频段。如Maskey^[10]采用喇叭天线设计了835 MHz暴露装置,大鼠的体内全身平均比吸收率(Whole body average specific absorption rate, WBA SAR)为1.6 W/kg; Kesari^[11]设计了2 450 MHz暴露装置,大鼠体内的WBA SAR为0.11 W/kg。传统射频暴露平台的暴露频率点单一^[12-13]且频率上限值较低^[14-15],频率点一般为800 MHz、900 MHz、1 800 MHz、2 450 MHz。此外,传统暴露平台一般只关注WBA SAR数据,而对于作用靶点的组织比吸收率(Tissue specific absorption rate, TSAR)涉及较少。

为开展宽频谱条件下射频生物效应研究,我们研制一套宽频谱生物电磁暴露平台,并开展相应暴露条件下的剂量评估是生物效应研究的首要条件。本工作基于通讯和雷达等职业作业的常见暴露频率,建立了1~6 GHz宽频谱射频暴露平台,测定了暴露功率密度、对实验动物的WBA SAR、TSAR等剂量参数进行了模拟仿真研究。

1 平台设计及暴露参数

1.1 平台设计

暴露平台主要包括信号源、功放器、天线等。其中,功放器型号为BLMA0860-100,输出频段为

800 MHz~6 GHz,最大输出功率50 dBm;天线为双脊喇叭天线,型号为XJT-DR10180,可用频段为1~18 GHz,天线对角长度(D)为280 mm。图1为暴露平台的设计示意图,其中,天线辐射的极化方向为垂直极化。

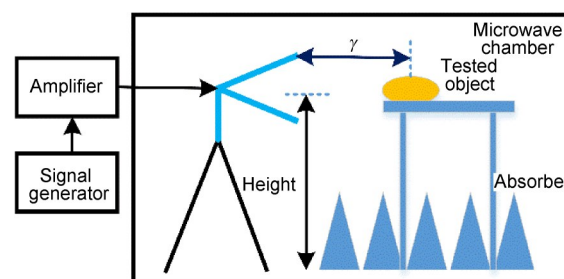


图1 暴露平台的设计示意图
Fig.1 Design diagram of exposed platform

依据天线远场的产生条件^[16],在天线尺寸 $D < \lambda/2$ 时,则近场/远场的分界距离由式(1)确定,在 $D > \lambda/(2\pi)$ 时,分界距离见式(2)。

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

$$r = \frac{D}{2\pi} \quad (2)$$

式中: r 为分界距离,m; λ 为电磁波波长,m; D 为天线尺寸,m。

考虑目标处的实际暴露尺寸限制,目标处与天线口面的距离设置为70 cm,满足以上远场条件。

1.2 暴露参数

辐射场的暴露参数主要包括功率密度和半功率波束宽度等。其中,半功率波束宽度也称3 dB波束宽度或半功率角,在这个区域内天线的相对辐射功率大于二分之一。在本实验系统中,各频段处双脊喇叭天线波瓣图的半功率波束宽度 θ 可由式(3)预估^[17]。

$$\theta = \left(32\,000 / \left(10^{\frac{G}{10}} \right) \right)^{0.5} \quad (3)$$

式中: G 为天线的增益,dBi; θ 为半功率波束宽度,°。

采用森馥综合场强仪 SEM600 对暴露平台目标处的功率密度进行了测试,测试时功放器输出功率为 44 dBm 左右,在 50 dBm 额定功率下的辐射场强度可依据低功率下的测试功率进行递推计算。

表 1 给出了辐射场的天线增益、半功率波束宽

度、测试功率密度和额定功率密度参数。在 1~6 GHz 下,70 cm 处的额定功率密度为 63.3~149.0 W/m²。由于天线增益随频率变化,因此,目标处的功率密度也随之变化,其中,4 GHz 附近可以获得较高的功率密度。

表 1 辐射场基本参数
Table 1 Basic parameters of radiation field

频率 / GHz	天线增益 / dBi	半功率波束宽度 $\theta / (^\circ)$	测试功率密度 / (W·m ⁻²)	额定功率密度 / (W·m ⁻²)
Frequency	Antenna gain	Half power beam width	Tested power density	Rated power density
1	7.5	75.9	22.6 (@44.6 dBm)	84.3
2	12	45.0	30.3 (@43.9 dBm)	122.4
3	13.3	38.9	36.2 (@43.9 dBm)	146.2
4	13.5	38.1	37.3 (@44.0 dBm)	149.0
5	13	40.3	22.1 (@44.5 dBm)	83.4
6	12	45.0	16.2 (@44.2 dBm)	63.3

2 实验动物剂量学特点

2.1 剂量学仿真条件

对实验室常用的辐射动物进行了比吸收率的剂量仿真研究。仿真环境为 Sim4Life 生物电磁仿真软件,动物为大鼠/小鼠模型。其中,大鼠性别为雄性,类型为 Sprague dawley,长度为 185 mm,质量为 198 g,组织数目为 52 种;小鼠为雄性,类型为 Nude normal,长度为 86 mm,质量为 28 g,组织数目为 43 种。

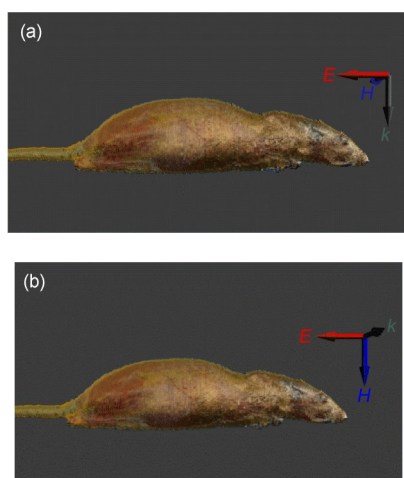


图 2 长轴极化下不同照射方向的示意图:
(a)顶部照射方向;(b)侧向照射方向

Fig.2 Schematic diagram of different irradiation directions under long axis polarization: (a) top direction; (b) side direction

文献[18]研究表明,电场极化方向沿动物长轴方向可以获得较高的比吸收率值。本文对比研究了

长轴极化下背部照射和侧面照射对比吸收率的影响。平面波极化方向及入射方向的具体设置条件如图 2 所示。在仿真中,平面波的激励电场场强为 1 V/m;边界条件为理想吸收边界。

比吸收率(Specific absorption ratio, SAR)是用来衡量生物体内能量沉积速率的重要量,是射频生物学的标准剂量。SAR 值与生物体内的电场均方值 E 相关,见式(4)。

$$\text{SAR} = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (4)$$

式中: σ 为组织的电导率, Ωm ; ρ 为组织的质量密度,kg/m³; E 为电场均方值,V/m;SAR 为比吸收率,W/kg。

2.2 实验动物全身平均比吸收率

WBA SAR 是指生物体全身比吸收率的均值。表 2 给出了不同照射方向、不同照射动物对 WBA SAR 值仿真结果。其中,不同方向上的比吸收率差异 V 可表达为式(5)。

$$V = 10 \lg (\text{SAR}_1 / \text{SAR}_2) \quad (5)$$

式中: SAR_1 和 SAR_2 为不同条件下的比吸收率值,W/kg; V 为比吸收率差异,dB。

分析表 2 数据可知:(1)相对于大鼠,小鼠在 1~6 GHz 内可以获得更高的 WBA SAR 值,高出约一个数量级;(2)在长轴极化条件下,顶部照射和侧向照射对 WBA SAR 的影响较小,大鼠的差异值最大为 0.731 dB,小鼠的差异值最大为 0.276 dB。

表2 不同照射方向、不同照射动物的全身平均比吸收率
Table 2 Specific absorption rate of animals exposed in different directions (W·kg⁻¹)

频率 / GHz Frequency	大鼠 Rat			小鼠 Mouse		
	顶向照射 WBA SAR	侧向照射 WBA SAR	差异/dB	顶向照射 WBA SAR	侧向照射 WBA SAR	差异/dB
	WBA SAR & top	WBA SAR & side	Variation	WBA SAR & top	WBA SAR & side	Variation
1	1.43×10 ⁻⁴	1.45×10 ⁻⁴	0.096	2.07×10 ⁻⁴	2.14×10 ⁻⁴	0.276
2	8.67×10 ⁻⁵	8.72×10 ⁻⁵	0.045	3.18×10 ⁻⁴	3.07×10 ⁻⁴	0.037
3	6.89×10 ⁻⁵	6.56×10 ⁻⁵	-0.430	3.20×10 ⁻⁴	3.56×10 ⁻⁴	0.108
4	5.83×10 ⁻⁵	5.51×10 ⁻⁵	-0.483	2.56×10 ⁻⁴	2.59×10 ⁻⁴	0.010
5	5.42×10 ⁻⁵	5.03×10 ⁻⁵	-0.650	2.24×10 ⁻⁴	2.24×10 ⁻⁴	0.001
6	5.06×10 ⁻⁵	4.66×10 ⁻⁵	-0.731	1.97×10 ⁻⁴	1.97×10 ⁻⁴	0.000

2.3 主要组织器官的组织比吸收率

文献[19]采用综述的方式归纳了射频对人体健康的影响,人体对射频较敏感的器官主要包括眼睛、脑部和雄性睾丸等。在激励电场场强1 V/m、边界条件为理想吸收边界的暴露条件下,探究了不同照射方向下不同照射动物的主要器官组织比吸收率(TSAR)特点。表3和表4分别给出了大鼠和小鼠

主要组织器官的TSAR值结果。结果表明:在长轴极化下,顶部照射和侧向照射的TSAR存在明显差异。其中,大鼠晶状体的差异相对最大值可达到5.96 dB,大鼠睾丸的差异最大值可达到4.64 dB,大鼠大脑半球的差异最大值可达到11.02 dB;小鼠眼部的差异最大值可达到10.73 dB,小鼠睾丸的差异最大值可达到2.71 dB,小鼠脑部的差异最大值可达到8.06 dB。

表3 大鼠的主要组织器官在不同照射条件下的TSAR值
Table 3 TSAR difference of tissues and organs of rat under different irradiation conditions (W·kg⁻¹)

频率 /GHz Fre- quency	晶状体 Lens			睾丸 Testis			大脑半球 Cerebral hemisphere		
	顶向照射	侧向照射	差异/ dB	顶向照射	侧向照射	差异/ dB	顶向照射	侧向照射	差异/ dB
	TSAR	TSAR	Variation	TSAR	TSAR	Variation	TSAR	TSAR	Variation
	TSAR & top	TSAR & side		TSAR & top	TSAR & side		TSAR & top	TSAR & side	
1	1.73×10 ⁻⁵	2.74×10 ⁻⁵	-4.02	7.63×10 ⁻⁵	5.78×10 ⁻⁵	2.41	9.58×10 ⁻⁵	1.01×10 ⁻⁴	-0.47
2	1.24×10 ⁻⁴	6.25×10 ⁻⁵	5.96	1.52×10 ⁻⁴	2.59×10 ⁻⁴	-4.64	2.72×10 ⁻⁴	2.03×10 ⁻⁴	2.54
3	1.44×10 ⁻⁴	1.38×10 ⁻⁴	0.36	2.08×10 ⁻⁴	2.23×10 ⁻⁴	-0.61	1.73×10 ⁻⁴	1.31×10 ⁻⁴	2.43
4	2.38×10 ⁻⁴	1.59×10 ⁻⁴	3.52	1.25×10 ⁻⁴	1.76×10 ⁻⁴	-2.96	1.20×10 ⁻⁴	8.15×10 ⁻⁵	3.37
5	1.59×10 ⁻⁴	1.28×10 ⁻⁴	1.91	9.85×10 ⁻⁵	1.28×10 ⁻⁴	-2.26	1.63×10 ⁻⁴	7.09×10 ⁻⁵	7.24
6	1.83×10 ⁻⁴	1.44×10 ⁻⁴	2.07	6.75×10 ⁻⁵	1.01×10 ⁻⁴	-3.48	1.85×10 ⁻⁴	5.20×10 ⁻⁵	11.02

表4 小鼠的主要组织器官在不同照射条件下的TSAR值
Table 4 TSAR difference of tissues and organs of mouse under different irradiation conditions (W·kg⁻¹)

频率 / GHz Fre- quency	眼部 Eye			睾丸 Testis			脑部 Brain		
	顶向照射	侧向照射	差异/ dB	顶向照射	侧向照射	差异/ dB	顶向照射	侧向照射	差异/ dB
	TSAR	TSAR	Variation	TSAR	TSAR	Variation	TSAR	TSAR	Variation
	TSAR & top	TSAR & side		TSAR & top	TSAR & side		TSAR & top	TSAR & side	
1	2.29×10 ⁻⁴	2.36×10 ⁻⁴	-0.25	2.91×10 ⁻⁴	2.99×10 ⁻⁴	-0.23	3.36×10 ⁻⁴	3.48×10 ⁻⁴	-0.30
2	4.32×10 ⁻⁵	1.49×10 ⁻⁴	-10.73	4.75×10 ⁻⁴	4.88×10 ⁻⁴	-0.24	1.16×10 ⁻⁴	2.94×10 ⁻⁴	-8.06
3	5.34×10 ⁻⁴	7.98×10 ⁻⁴	-3.49	6.16×10 ⁻⁴	7.91×10 ⁻⁴	-2.17	7.91×10 ⁻⁴	8.38×10 ⁻⁴	-0.49
4	5.61×10 ⁻⁴	4.26×10 ⁻⁴	2.39	5.74×10 ⁻⁴	7.57×10 ⁻⁴	-2.40	9.36×10 ⁻⁴	6.83×10 ⁻⁴	2.74
5	6.61×10 ⁻⁴	4.48×10 ⁻⁴	3.37	4.12×10 ⁻⁴	5.62×10 ⁻⁴	-2.71	4.19×10 ⁻⁴	6.83×10 ⁻⁴	-4.24
6	5.18×10 ⁻⁴	4.87×10 ⁻⁴	0.54	3.85×10 ⁻⁴	3.72×10 ⁻⁴	0.29	4.40×10 ⁻⁴	4.37×10 ⁻⁴	0.07

3 分析讨论

3.1 WBA SAR的频率相关性

根据文献[20]的研究结论,全身平均比吸收率存在着共振频率,共振频率点需满足式(6)。

$$L/\lambda \approx 0.4 \quad (6)$$

式中: L 为动物长轴的长度, m ; λ 为入射电磁波的波长, m 。

本文中大鼠的长度为185 mm,小鼠的长度为86 mm;相应的共振频率点分别为0.65 GHz和1.4 GHz。依据2.2节和2.3节的数据,图3给出了大

鼠和小鼠分别在顶部和侧向照射下的比吸收率随频率变化的趋势。对于WBA SAR而言,具有明显的规律性。对于大鼠,1~6 GHz超过0.65 GHz的共振频率点,WBA SAR值随频率升高而缓慢降低;对于小鼠,共振频率点1.4 GHz落在1~6 GHz区间内,WBA SAR值存在着明显的峰值拐点,但略大于1.4 GHz,大约在2~3 GHz区间内。表2的对比结果也表明,顶部照射和侧向照射对WBA SAR值影响较小,大鼠的差异值最大为0.731 dB,小鼠的差异值最大为0.276 dB,可忽略不计。因此,以上结果表明,在长轴极化下,实验动物的WBA SAR值存在着频率相关性,WBA SAR值对照射方向的改变不敏感。

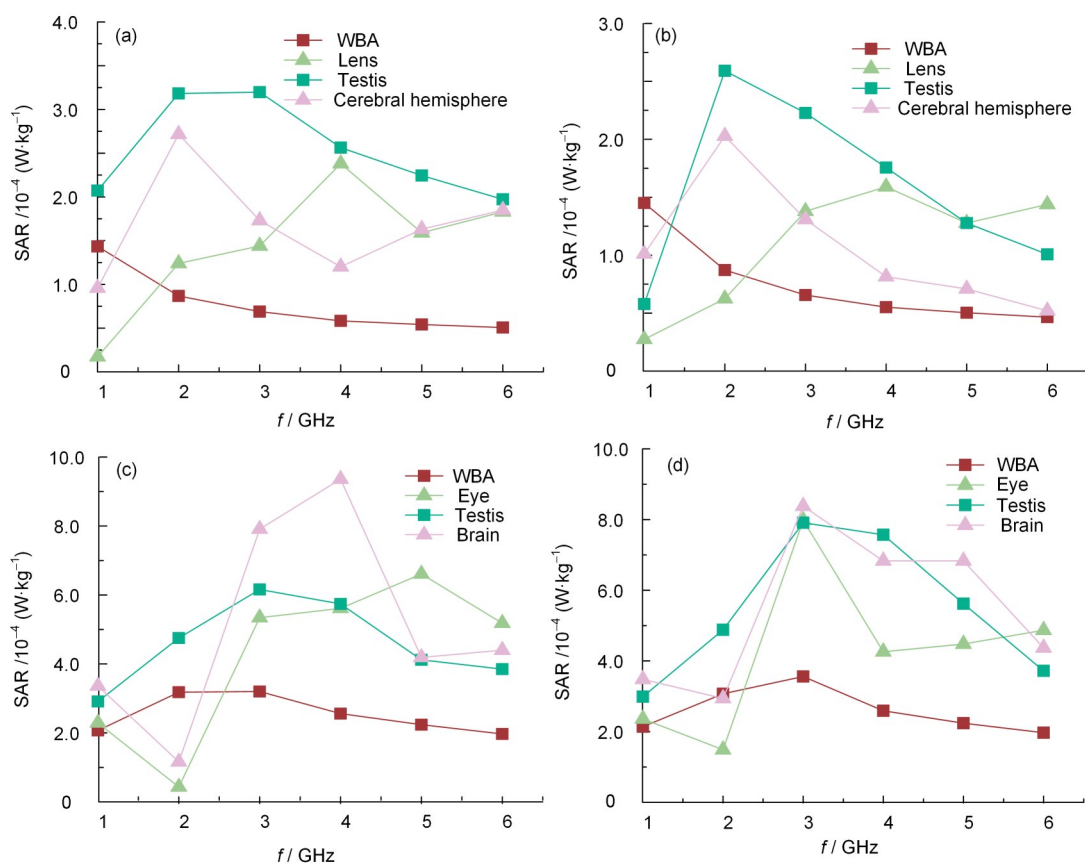


图3 比吸收率随频率变化趋势:(a)大鼠顶部照射;(b)大鼠侧向照射;(c)小鼠顶部照射;(d)小鼠侧向照射
Fig.3 Variation trend of SAR with frequency: (a) rat & top; (b) rat & side; (c) mouse & top; (d) mouse & side

3.2 TSAR的照射条件分散性

对于局部组织器官而言,TSAR的特点存在着明显差异。对于大鼠,尽管WBA SAR值随频率增加而减小,TSAR值也存在着明显的峰值拐点,主要位于2~4 GHz区间内。而对于小鼠,TSAR的峰值频率点要略高于WBA SAR的共振频率点,且在峰值频率点前还存在着极低值拐点。表3和表4的结果差

异对比值也表明,不同照射条件下,实验动物的主要组织器官的TSAR值差异大多大于3 dB。因此,以上结果表明,在长轴极化下,TSAR值对照射方向的改变较敏感;TSAR值的峰值频率点略大于WBA SAR的全身共振频率点。

3.3 实验室评估

在国际标准中,人体损伤阈值被定义在全身平

均比吸收率为4 W/kg;职业标准阈值被定义在全身平均比吸收率为0.4 W/kg;公众标准阈值被定义在全身平均比吸收率为0.08 W/kg。暴露实验必须要预先给出全身平均比吸收率的数值。

本研究在最大暴露值条件下,可以对不同实验动物的剂量值进行评估。估算公式见式(7)。

$$SAR_{Max} = SAR_s \cdot \frac{P_{Max}}{P_s} \quad (7)$$

式中: SAR_{Max} 为预估剂量, W/kg; SAR_s 为仿真剂量, W/kg; P_{Max} 为最大暴露功率密度, W/m², P_s 为仿真功率密度, W/m²; SAR_s 、 P_{Max} 、 P_s 均为已知值。

表5给出了最大暴露值条件下的WBA SAR评估值。大鼠和小鼠的WBA SAR均超过职业标准,其中小鼠的WBA SAR超过了损伤阈值4 W/kg。

表5 最大暴露值条件的WBA SAR评估值
Table 5 WBA SAR evaluation value for maximum exposure condition (W·kg⁻¹)

频率/ GHz	最大暴露值	大鼠顶向 WBA SAR	大鼠侧向 WBA SAR	小鼠顶向 WBA SAR	小鼠侧向 WBA SAR
Frequency	Maximum exposure value	WBA SAR of rat & top	WBA SAR of rat & side	WBA SAR of mouse & top	WBA SAR of mouse & side
1	84.3	4.6	4.6	6.6	6.8
2	122.4	4.0	4.0	14.6	14.1
3	146.2	3.8	3.6	17.6	19.6
4	149.0	3.3	3.1	14.4	14.6
5	83.4	1.7	1.6	7.1	7.0
6	63.3	1.2	1.1	4.7	4.7

4 结论

对于建立的1~6 GHz宽频谱生物电磁暴露平台开展了剂量研究和评估,探讨了暴露频段内实验动物的剂量学特征。研究表明:在长轴极化下,实验动物的全身平均比吸收率存在着频率相关性,对照射方向的改变不敏感;组织比吸收率对照射方向的改变较敏感,峰值频率点略大于全身平均比吸收率的共振频率点;在最大暴露值条件下,大鼠和小鼠的全身平均比吸收率均超过职业标准,其中小鼠的全身平均比吸收率已超过4 W/kg的损伤阈值。相对于传统文献报道的实验装置,该暴露平台具有频率上限值高、频谱范围宽等特点;在剂量评估方面,对主要靶点器官的组织比吸收率进行了计算和对比。该实验装置可用于通讯和雷达等职业作业常见频率的在体效应研究;实验动物的体内剂量可依据仿真计算的基本数据进行推算评估。

作者贡献说明 林加金和牡丹提出了研究思路 and 实验方案;徐胜龙和何伟完成了实验场的建立和测量;苗霞和郭娟为剂量仿真提供了指导;林加金和李静完成了剂量仿真及评估工作。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

- 李兴. 4 G移动通信系统的主要特点和关键技术[J]. 现代工业经济和信息化, 2018, 8(5): 63-64. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2018.05.25.
LI Xing. Main characteristics and key technologies of 4 G mobile communication system[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2018, 8(5): 63-64. DOI: 10.16525/j.cnki.14-1362/n.2018.05.25.
- 刘勇. 5 G移动通信技术下传输的关键技术及发展趋势[J]. 通信电源技术, 2020, 37(12): 150-152. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2020.12.050.
LIU Yong. Key technology and development trend of transmission in 5 G mobile communication technology [J]. Telecom Power Technology, 2020, 37(12): 150-152. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2020.12.050.
- 王澜, 韩布新. 当代电磁辐射对身心健康影响的研究概况[J]. 工业卫生与职业病, 2021, 47(4): 344-349. DOI: 10.13692/j.cnki.gywsyzyb.2021.04.024.
WANG Lan, HAN Buxin. Research on the physical and mental health effects of electromagnetic radiation[J]. Industrial Health and Occupational Diseases, 2021, 47 (4): 344-349. DOI: 10.13692/j. cnki. gywsyzyb. 2021. 04.024.
- 廖诗瑶, 王丽峰. 电磁辐射对学习记忆的影响及其机制

- 研究进展[J]. 中国体视学与图像分析, 2018, **23**(3): 290-296. DOI: 10.13505/j.1007-1482.2018.23.03.010.
- LIAO Shiyao, WANG Lifeng. Research on the influence of electromagnetic radiation on learning memory and its mechanism[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2018, **23**(3): 290-296. DOI: 10.13505/j.1007-1482.2018.23.03.010.
- 5 候鹏飞, 屈明玥, 朱晓博, 等. 电磁辐射对暴露人群神经功能的影响[J]. 职业与健康, 2017, **33**(7): 999-1003. DOI: 10.13329/j.cnki.zyyjk.2017.0306.
 - HOU Pengfei, QU Mingyue, ZHU Xiaobo, *et al.* Effect of electromagnetic radiation on nerve function of exposed people[J]. Occupation and Health, 2017, **33**(7): 999-1003. DOI: 10.13329/j.cnki.zyyjk.2017.0306.
 - 6 崔亮, 左红艳, 王德文, 等. 微波辐射致大鼠海马损伤的磁共振影像学特征与其生物效应间关联性的研究[J]. 体视学与图像分析, 2017, **22**(1): 77-86. DOI: 10.13505/j.1007-1482.2017.22.01.012.
 - CUI Liang, ZUO Hongyan, WANG Dewen, *et al.* Study on the correlation between magnetic resonance imaging characteristics and biological effects of rat hippocampus injury induced by microwave radiation[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2017, **22**(1): 77-86. DOI: 10.13505/j.1007-1482.2017.22.01.012.
 - 7 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**(99): 171346-171356. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2954823.
 - 8 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)[J]. Health Physics, 2020, **118**(5): 483-524. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
 - 9 Greenebaum B, Barnes F S. Bioengineering and biophysical aspects of electromagnetic fields[M]. London: CRC Press, 2018. DOI: 10.1201/9781315221540.
 - 10 Maskey D, Kim M, Aryal B, *et al.* Effect of 835 MHz radiofrequency radiation exposure on calcium binding proteins in the hippocampus of the mouse brain[J]. Brain Research, 2010, **1313**(1): 232-241. DOI: 10.1016/j.brainres.2009.11.079.
 - 11 Kesari K K, Behari J, Kumar S. Mutagenic response of 2.45 GHz radiation exposure on rat brain[J]. International Journal of Radiation Biology, 2010, **86**(4): 334-343. DOI: 10.3109/09553000903564059.
 - 12 Paffi A, Merla C, Pinto R, *et al.* Microwave exposure systems for *in vivo* biological experiments: a systematic review[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2013, **61**(5): 1980-1993. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2246183.
 - 13 Gong Y J, Capstick M, Tillmann T, *et al.* Desktop exposure system and dosimetry for small scale *in vivo* radiofrequency exposure experiments[J]. Bioelectromagnetics, 2016, **37**(1): 49-61. DOI: 10.1002/bem.21950.
 - 14 Li C S, Yang L, Lu B S, *et al.* A reverberation chamber for rodents' exposure to wideband radiofrequency electromagnetic fields with different small-scale fading distributions[J]. Electromagnetic Biology and Medicine, 2016, **35**(1): 30-39. DOI: 10.3109/15368378.2014.960086.
 - 15 张杰, 王向晖, 齐红新, 等. 电磁生物效应辐照和检测系统及其应用[J]. 辐射防护, 2015, **35**(6): 373-380.
 - ZHANG Jie, WANG Xianghui, QI Hongxin, *et al.* Irradiating and detecting systems applied in bioelectromagnetic study and its applications[J]. Radiation Protection, 2015, **35**(6): 373-380.
 - 16 卫 A. 韦斯顿. 电磁兼容原理与应用——方法、分析、电路、测量[M]. 杨自佑, 彭聪, 陈倩. 译. 第3版. 北京: 机械工业出版社, 2020: 35-36.
 - Weston D A. Electromagnetic compatibility principles and applications — methods, analysis, circuits, measurements[M]. YANG Ziyu, PENG Cong, CHEN Qian, tran. 3rd edition. Beijing: Machinery Industry Press, 2020: 35-36.
 - 17 聂在平. 天线工程手册[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2014: 10-11.
 - NIE Zaiping. Antenna engineering manual[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2014: 10-11.
 - 18 Kitchen R. RF and microwave radiation safety[M]. Woburn, MA: Newnes, 2001: 60-62.
 - 19 胡海翔, 李光伟. 电磁辐射对人体的影响及防护[M]. 北京: 人民军医出版社, 2015: 142-168.
 - HU Haixiang, LI Guangwei. The influence of electromagnetic radiation on the human body and its protection[M]. Beijing: People's Military Medical Publishing House, 2015: 142-168.
 - 20 Lin J C. Electromagnetic fields in biological systems[M]. Boca Raton: Taylor & Francis, 2012: 24.