

# 实验动物体重差异引起的电磁剂量差异和不确定性

孙艺宸<sup>1</sup> 杜丹<sup>1,2</sup> 李静<sup>1</sup> 林加金<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(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)

<sup>2</sup>(陕西中医药大学公共卫生学院 咸阳 712000)

**摘要** 本文开展了实验动物体重差异引起的生物电磁剂量差异及不确定性评估研究。利用生物电磁仿真软件和三维数字化模型建立了平面波激励下实验大鼠的电磁剂量仿真环境,研究频段为0.1~6 GHz。结果表明:在体重扰动条件下,实验大鼠的体重和全身平均比吸收率值呈线性关系;在共振频率点以下,线性关系为正相关;在共振频率点以上,线性关系为负相关;在1~6 GHz区域内,线性拟合的拟合度接近于1。对实验大鼠的剂量不确定性进行了探究,提出了一种拟合计算评估法。结合实验设计案例,对拟合计算评估法的计算流程、计算量、评估准确度进行了对比研究,该评估方法具有准确率高、建模计算量小等特点。本研究对于生物电磁学实验设计及剂量评估具有一定的指导意义。

**关键词** 差异,不确定性,比吸收率,剂量,电磁辐射

**中图分类号** Q64

**DOI:** 10.11889/j.1000-3436.2022-0115

## Variations and uncertainty in electromagnetic dose caused by weight differences of experimental animals

SUN Yichen<sup>1</sup> DU Dan<sup>1,2</sup> LI Jing<sup>1</sup> LIN Jiajin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>(Department of Radiation Biology, Faculty of Preventive Medicine, Air Force Medical University, Xi'an 710032, China)

<sup>2</sup>(School of Public Health, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang 712000, China)

**ABSTRACT** In this study, the biological electromagnetic dose variations and uncertainty caused by body weight differences in experimental animals were evaluated. An electromagnetic dose simulation environment of experimental rats under plane wave excitation was established using bio-electromagnetic simulation software and a three-dimensional digital model. The study frequency band was 0.1–6 GHz. The results showed that there was a linear relationship between the body weight of experimental rats and the whole-body average specific absorption rate under conditions of body weight disturbance. Below the resonant frequency point, the linear relationship was positive, whereas above the resonant frequency point, the linear relationship was negative. In the 1–6 GHz region, the degree of the linear fit was close to 1. The dose uncertainty for the experimental rats was investigated and a fitting calculation method was proposed. Combined with the experimental design case, the calculation process, calculation amount, and evaluation accuracy of the fitting calculation evaluation method were compared. The

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: 孙艺宸,男,1999年11月出生,空军军医大学基础医学院学员,临床医学专业

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

收稿日期: 初稿 2022-10-27; 修回 2022-12-05

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

First author: SUN Yichen (male) was born in November 1999. Now he is a undergraduate student at Basic Medical Science Academy of Air Force Military Medical University, majoring in clinical medicine

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

Received 27 October 2022; accepted 05 December 2022

evaluation method had high accuracy and a low modeling calculation amount. The results of this study have certain guiding significance for the experimental design and dose evaluation of bioelectromagnetics.

**KEYWORDS** Variation, Uncertainty, Specific absorption rate, Dose, Radiofrequency

**CLC** Q64

在生物电磁学研究中,剂量学是生物效应评价的重要量化参数。实验室评估<sup>[1-2]</sup>和数值仿真<sup>[3-5]</sup>是主要的剂量学研究手段。随着时域有限差分法(Finite-difference time-domain, FDTD)的不断优化<sup>[6-7]</sup>和计算机虚拟建模技术<sup>[8-9]</sup>的不断提升,实验动物和人体的数值仿真评估是生物电磁学研究中重要的剂量学评估方法。在数值仿真评估中,动物体内剂量值取决于许多外部和内部参数,如辐射频率、极性、体型尺寸、姿态、性别等。在基于组织解剖学和计算虚拟建模的基础上,精准的剂量学信息是准确解释和验证实验结果的基本前提。然而,在诸多研究中,剂量评估往往只提供近似的全身吸收值,而不提供不确定性的统计信息。因此,不确定性分析的缺失降低了部分生物电磁学研究的科学价值和意义。

在实验室剂量评估的不确定性研究方面,文献[10]对剂量不确定性的来源进行了分析和归纳,典型的不确定性包括曝光装置、动物模型、动物自身等<sup>[11-13]</sup>。在实验室研究中,文献[14]对极化方向、临近关系等因素引起的差异和不确定性都进行了探讨,为实验设计提供了理论指导,具有重要的实践意义。对于样本量较大的在体暴露实验,在相同的

曝光装置和动物模型情况下,暴露组内实验动物的体重及尺寸差异,是引起个体剂量差异和整体剂量不确定性的的重要因素。然而,对于体重引起的剂量差异及不确定性研究却鲜有关注。本文以常见的实验大鼠<sup>[15]</sup>为研究对象,探究体重差异引起的剂量差异及不确定性,为生物电磁学效应研究及实验设计提供剂量评估。

## 1 仿真环境

仿真环境为Sim4Life生物电磁仿真软件,图1给出了建模的主要示意图。动物模型为SD大鼠模型,性别为雄性,类型为Sprague dawley,标称身体长度(不含尾巴)为185 mm,标称质量为198 g,建模网格精度为1 mm,组织数目为52种,各组织参数参考IT'IS数据库。激励源为平面波激励,平面波的空间区域尺寸为400 mm×80 mm×80 mm,大鼠全部置于平面波空间内。按照实验室经验<sup>[16]</sup>,平面波从大鼠的顶部进行照射,沿E轴方向极化。平面波的激励频率分别设定为0.1 GHz、0.5 GHz、1 GHz、2 GHz、3 GHz、4 GHz、5 GHz和6 GHz;激励电场场强均为1 V/m。边界条件为理想吸收边界。网格划分长度为0.5 mm。

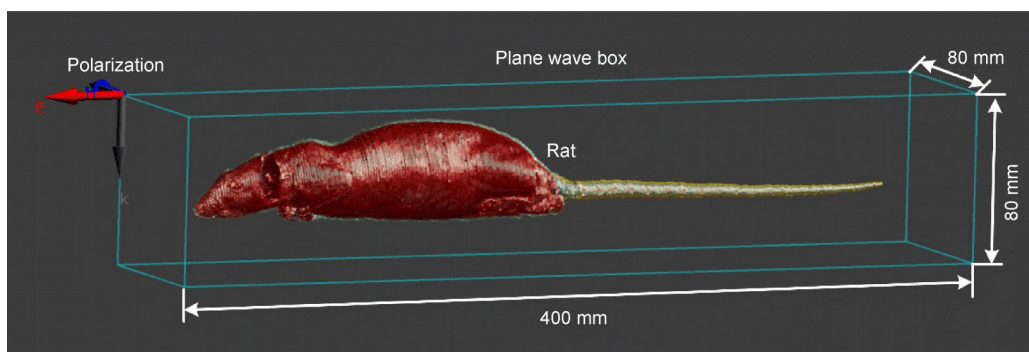


图1 剂量仿真环境  
Fig.1 Dose simulation environment

## 2 剂量差异

### 2.1 体重差异设定

采用Sim4Life软件的建模缩放功能,对导入的

SD大鼠进行缩放,可建立不同体重及大小的动物模型。缩放系数分别为0.950、0.975、1.000、1.025和1.050。表1给出了经缩放后动物模型的体重及体长数据。其中,体长和缩放系数呈一次线性变化关系,体重和缩放系数呈三次立方变化关系。

表1 体重、体长与缩放系数的关系  
Table 1 Relationship between body weight, body length and scaling coefficient

序号 No.	缩放系数 Scaling coefficient	体重 / g Body weight	体长 / mm Body length
1	0.950	200.7	175.8
2	0.975	217.0	180.5
3	1.000	233.9	185.0
4	1.025	251.9	189.6
5	1.050	270.7	194.3

2.2 基本结果

比吸收率(Specific absorption ratio, SAR, 以  $R_{SA}$  表示)是用来衡量生物体内能量沉积速率的重要量,是生物电磁学研究的标准剂量。SAR 值同生物体内的电场均方值  $E$  相关,见式(1)。

$$R_{SA} = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为组织的电导率,  $\Omega\text{m}$ ;  $\rho$ 为组织的质量密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $E$ 为电场均方值,  $\text{V}/\text{m}$ ; SAR 为比吸收率,

$\text{W}/\text{kg}$ 。

比吸收率可分为全身平均比吸收率(Whole body average SAR, WBASAR)和组织器官比吸收率等。在不针对某个组织或器官进行专项研究的情况下,全身平均比吸收率(WBASAR)是剂量学关注的重要参数。

在采用缩放建模的条件下,开展了体重扰动情况下、主要频率点处实验大鼠的WBASAR值仿真。表2给出了0.1~6 GHz下、不同体重大鼠的WBASAR仿真结果。

表2 0.1~6 GHz不同体重大鼠的WBASAR  
Table 2 WBASAR of rats of different weight at 0.1~6 GHz

体重 / g Body weight	WBASAR 值 / ( $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) WBASAR value							
	0.1 GHz	0.5 GHz	1 GHz	2 GHz	3 GHz	4 GHz	5 GHz	6 GHz
200.7	$1.42\times 10^{-5}$	$7.47\times 10^{-5}$	$8.36\times 10^{-5}$	$5.75\times 10^{-5}$	$4.56\times 10^{-5}$	$3.92\times 10^{-5}$	$3.71\times 10^{-5}$	$3.48\times 10^{-5}$
217.0	$1.42\times 10^{-5}$	$7.84\times 10^{-5}$	$7.97\times 10^{-5}$	$5.51\times 10^{-5}$	$4.39\times 10^{-5}$	$3.78\times 10^{-5}$	$3.57\times 10^{-5}$	$3.36\times 10^{-5}$
233.9	$1.42\times 10^{-5}$	$8.23\times 10^{-5}$	$7.62\times 10^{-5}$	$5.27\times 10^{-5}$	$4.23\times 10^{-5}$	$3.66\times 10^{-5}$	$3.44\times 10^{-5}$	$3.24\times 10^{-5}$
251.9	$1.43\times 10^{-5}$	$8.59\times 10^{-5}$	$7.30\times 10^{-5}$	$5.06\times 10^{-5}$	$4.09\times 10^{-5}$	$3.55\times 10^{-5}$	$3.33\times 10^{-5}$	$3.13\times 10^{-5}$
270.7	$1.43\times 10^{-5}$	$8.99\times 10^{-5}$	$6.99\times 10^{-5}$	$4.86\times 10^{-5}$	$3.94\times 10^{-5}$	$3.44\times 10^{-5}$	$3.22\times 10^{-5}$	$3.01\times 10^{-5}$

2.3 剂量规律特点分析

对§2.2 WBASAR值数据进行了分析。图2给出了各频率点处不同体重的WBASAR数据图,可以看出:(1)在0.1 GHz和0.5 GHz处, WBASAR值随体重而增加;(2)1~6 GHz处, WBASAR值随体重增加而减小。分析其特点,主要是与共振频率相关。根据文献[17]的研究结论,实验动物的WBASAR值存在共振频率,其共振频率点满足式(2)。

$$Lf \approx 0.4c \quad (2)$$

式中: $L$ 为动物长轴的长度,  $\text{m}$ ;  $f$ 为共振频率,  $\text{Hz}$ ;  $c$ 为光速( $3\times 10^8 \text{ m}/\text{s}$ )。

本文中大鼠的基准长度为185 mm,相应的共振频率点在0.65 GHz附近。在共振频率点以下,

WBASAR值明显随体重而增加;在共振频率点以上, WBASAR值明显随体重增加而减小。进一步采用最小二乘法对不同体重的WBASAR值数据进行了拟合。从图2可知, WBASAR值和体重值具有较好的一次拟合趋势。表3给出了详细的一次拟合参数,包括截距、斜率和拟合度。由统计数据可知,1~6 GHz区域内的拟合度约0.99,接近理想值1,线性拟合较好。以上结果表明:在体重扰动条件下,实验大鼠的体重和WBASAR值呈线性关系;在共振频率点以下,线性关系为正相关,从量效关系分析,大鼠体重的微弱增加会提升生物学效应;在共振频率点以上,线性关系为负相关,从量效关系分析,大鼠体重的微弱增加会减弱生物学效应;此外,在1~6 GHz频率区域内,线性拟合的拟合度接近于1。

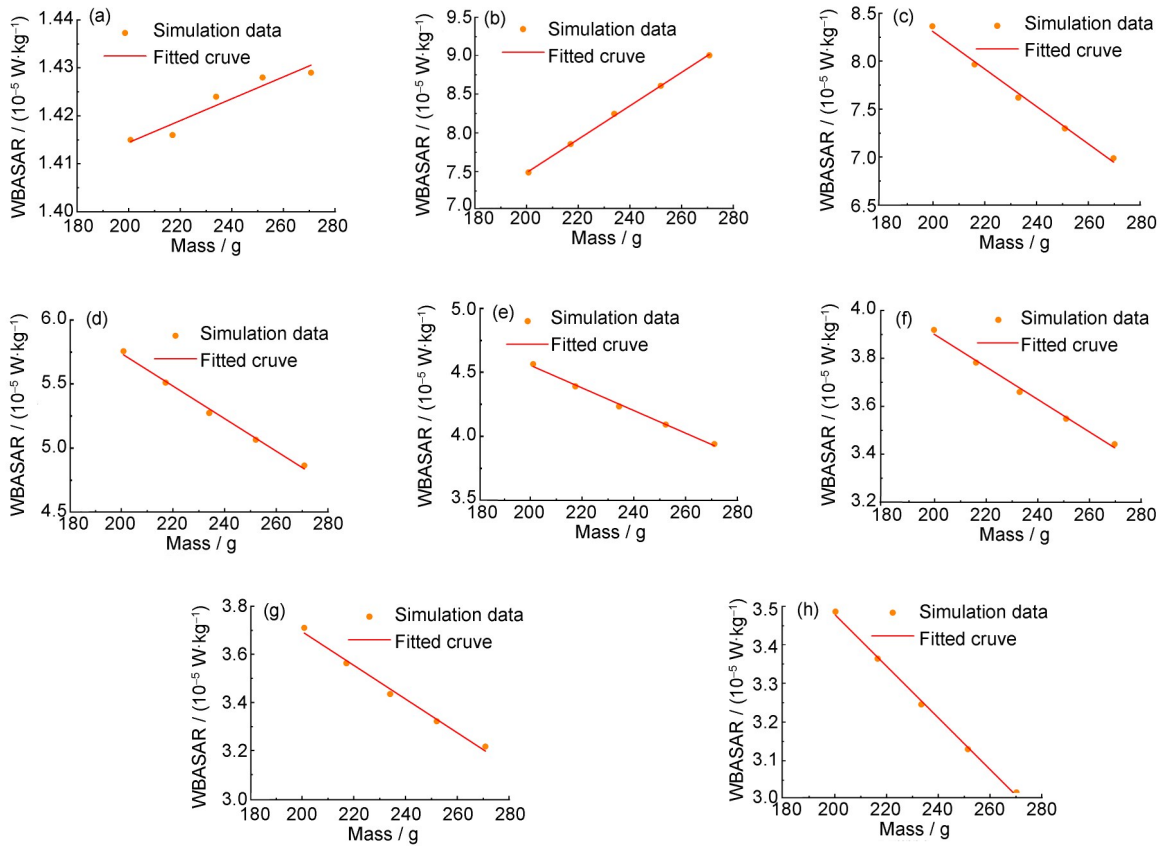


图2 WBASAR值和体重的关系：  
 (a) 0.1 GHz; (b) 0.5 GHz; (c) 1 GHz; (d) 2 GHz; (e) 3 GHz; (f) 4 GHz; (g) 5 GHz; (h) 6 GHz  
**Fig.2** Relationship between WBASAR value and body weight:  
 (a) 0.1 GHz; (b) 0.5 GHz; (c) 1 GHz; (d) 2 GHz; (e) 3 GHz; (f) 4 GHz; (g) 5 GHz; (h) 6 GHz

表3 线性拟合的基本数据  
**Table 3** Specific absorption rate of animals exposed in different directions

频率 / GHz	截距 / (W·kg <sup>-1</sup> ) Intercept		斜率 / (W·kg <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ) Slope		拟合度
Frequency	数值 Value	标准差 Standard error	数值 Value	标准差 Standard error	Degree of fitting
0.1	1.37×10 <sup>-5</sup>	9.31×10 <sup>-8</sup>	2.28×10 <sup>-9</sup>	3.94×10 <sup>-10</sup>	0.890
0.5	3.13×10 <sup>-5</sup>	8.17×10 <sup>-7</sup>	2.17×10 <sup>-7</sup>	3.46×10 <sup>-9</sup>	0.999
1	1.22×10 <sup>-5</sup>	2.13×10 <sup>-6</sup>	-1.95×10 <sup>-7</sup>	9.04×10 <sup>-9</sup>	0.991
2	8.28×10 <sup>-5</sup>	1.29×10 <sup>-6</sup>	-1.27×10 <sup>-7</sup>	5.47×10 <sup>-9</sup>	0.993
3	6.32×10 <sup>-5</sup>	7.60×10 <sup>-7</sup>	-8.83×10 <sup>-8</sup>	3.22×10 <sup>-9</sup>	0.995
4	5.26×10 <sup>-5</sup>	7.49×10 <sup>-7</sup>	-6.77×10 <sup>-8</sup>	3.17×10 <sup>-9</sup>	0.991
5	5.10×10 <sup>-5</sup>	9.37×10 <sup>-7</sup>	-7.00×10 <sup>-8</sup>	3.97×10 <sup>-9</sup>	0.987
6	4.82×10 <sup>-5</sup>	4.21×10 <sup>-7</sup>	-6.70×10 <sup>-8</sup>	1.78×10 <sup>-9</sup>	0.997

### 3 不确定性计算

剂量不确定性的定义是对所有动物和整个研究周期期间评估的WBASAR值的置信区间的描述。主要关注的参数有均值、标准差和离散系数等。

对于含有  $n$  个实验动物的待评估组,其个体体重为  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ , 实验动物的个体WBASAR值为  $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。剂量均值  $\bar{y}$  可按式(3)计算。

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (3)$$

剂量标准差  $s(y_k)$  可按式(4)计算。

$$s(y_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

剂量离散系数是标准差与均值之比,用  $C_v(y_k)$  表示,可按式(5)计算。

$$C_v(y_k) = \sqrt{\frac{s(y_k)}{\bar{y}}} \quad (5)$$

对单组实验大鼠进行暴露实验, 给定了暴露参数和实验样本的体重, 根据实验设计要求, 在不考虑其他因素情况下, 需要对实验动物的剂量不确定性进行分析。

### 3.1 常规仿真评估

对实验动物的剂量不确定性进行分析, 常规的计算方法是: 先建模计算单个实验动物的剂量, 再对  $n$  个建模计算的剂量值进行统计, 按式(3)、(4)、(5)统计计算得到剂量的均值、标准差和离散系数信息。在统计中单个动物的剂量值  $y_i$  来自于建模仿真的结果。具体评估流程可简化为图3。

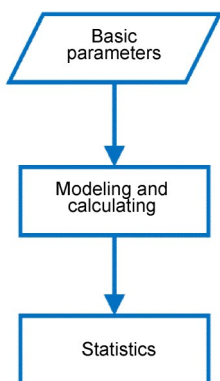


图3 常规仿真评估的流程示意图  
Fig.3 Flow chart of general simulation evaluation

### 3.2 拟合计算评估

由§2.3结论可知, 对于实验大鼠体重的扰动, 相应的WBASAR值与体重值呈线性关系。因此, 对于较大样本量中实验大鼠的剂量不确定性评估, 可依据线性拟合参数进行递推。拟合计算评估的计算流程图见图4。在计算流程中, 有两个并行步骤。

第一个并行步骤是对体重原始数据进行不确定性分析, 根据体重  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  的信息, 统计计算体重的不确定性参数, 主要包括体重均值  $\bar{x}$ 、标准差  $s(x_k)$  和离散系数  $C_v(x_k)$ , 各参数定义可参照公式(1)~(3)。

第二个并行步骤是小样本量范围下的数据拟合, 可采用最小二乘法对WBASAR值  $y$  和体重值  $x$  进行拟合, 得到WBASAR值和体重的关系, 如式(6)。

$$y = kx + b \quad (6)$$

式中:  $k$  为拟合的斜率;  $b$  为截距。

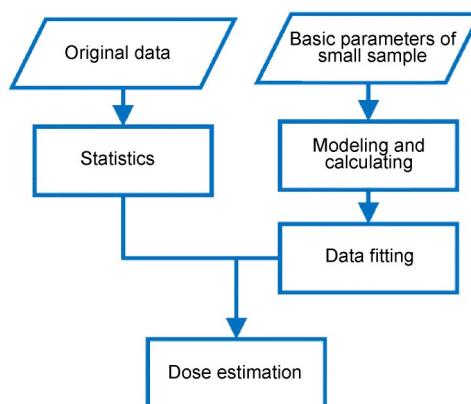


图4 拟合计算评估的流程示意图  
Fig.4 Flow chart of fitting calculation evaluation

经原始体重统计和线性拟合后, 可依据不确定度的传递原理, 进一步得到WBASAR值的不确定性参数: 均值  $\bar{y}$ 、标准差  $s(y_k)$  和离散系数用  $C_v(y_k)$ 。具体递推关系见式(7)~(9)。

$$\bar{y} = k\bar{x} + b \quad (7)$$

$$s(y_k) = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 s(x_k)} = |k|s(x_k) \quad (8)$$

$$C_v(y_k) = \frac{|k|s(x_k)}{k\bar{x} + b} \quad (9)$$

### 3.3 对比讨论

实验设计中分别采用单个计算法和拟合计算法对一组实验剂量值进行了统计评估: 暴露功率密度为  $5 \text{ W/m}^2$ , 暴露频率为  $2.4 \text{ GHz}$ , 样本量为 12。采用单个计算法建立了相应的仿真模型; 经仿真计算, 得到了每个体重下的WBASAR值, 结果数据如表4所示。经统计, 采用单个计算法的剂量统计值为  $(1.79 \times 10^{-1} \pm 6.39 \times 10^{-3}) \text{ W/kg}$ , 分散系数为  $3.57 \times 10^{-2}$ 。

按照图4的流程图, 采用拟合计算法对剂量进行了统计评估。首先, 对体重原始数据进行不确定性分析; 其次, 开展了小样本量范围下的数据拟合, 拟合度为 0.995, 接近理想值 1; 最后, 按照式(7)~(9), 由原始体重统计和线性拟合数据, 得到WBASAR值的不确定性参数。递推法的计算过程和结果参数见表5。采用拟合计算法的剂量统计值为  $(1.79 \times 10^{-1} \pm 6.50 \times 10^{-3}) \text{ W/kg}$ , 分散系数为  $3.62 \times 10^{-2}$ 。以上评估结果表明: 拟合计算法和单个计算法对实验动物剂量评估的相对误差小于 1%, 评估计算的契合度较高。从计算量分析, 剂量计算的主要工作量在于建模计算, 对于单个计算法需要建模计算  $n$

次,拟合算法的建模次数是拟合小样本量的个数  $m$ (一般可取为5)。因此,当实验样本量  $n$ 较大时,采用拟合算法在保证评估精度的同时可有效降低建模计算的次数,进而减少剂量评估工作的时间。

**表4 单个计算法的剂量数据**  
**Table 4 Dose data of single calculation method**

序号 No.	体重 / g Body weight	WBASAR 值 / (W·kg <sup>-1</sup> ) WBASAR value
1	212.4	1.88×10 <sup>-1</sup>
2	257.2	1.70×10 <sup>-1</sup>
3	223.8	1.83×10 <sup>-1</sup>
4	227.6	1.81×10 <sup>-1</sup>
5	246.5	1.74×10 <sup>-1</sup>
6	244.7	1.75×10 <sup>-1</sup>
7	241.2	1.76×10 <sup>-1</sup>
8	217.9	1.85×10 <sup>-1</sup>
9	261.9	1.69×10 <sup>-1</sup>
10	245.4	1.75×10 <sup>-1</sup>
11	221.4	1.84×10 <sup>-1</sup>
12	213.3	1.87×10 <sup>-1</sup>

**表5 拟合递推法的基本数据**  
**Table 5 Basic data of fitting recurrence method**

原始体重 Original weight			拟合值 Fitted value			拟合评估 Fitting evaluation		
均值 / g Mean value	标准差 / g Standard deviation	离散系数 Discrete coefficient	斜率 / (W·kg <sup>-1</sup> ·g <sup>-1</sup> ) Slope	截距 / (W·kg <sup>-1</sup> ) Intercept	拟合度 Degree of fitting	均值 / (W·kg <sup>-1</sup> ) Mean value	标准差 / (W·kg <sup>-1</sup> ) Standard deviation	离散系数 Discrete coefficient
234.4	16.4	6.99×10 <sup>-2</sup>	-3.96×10 <sup>-4</sup>	2.72×10 <sup>-1</sup>	9.95×10 <sup>-1</sup>	1.79×10 <sup>-1</sup>	6.50×10 <sup>-3</sup>	3.62×10 <sup>-2</sup>

#### 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,对于评价生物效应具有重要的价值。对于群体实验,由实验动物体重差异引起的剂量差异以及不确定性评估是影响实验设计评估的重要因素。本文利用专业化生物电磁仿真平台开展了0.1~6 GHz下大鼠的剂量差异和不确定性研究。研究表明:在扰动条件下,大鼠体重和全身平均比吸收率(WBASAR)呈线性关系;在共振频率点以上,线性拟合的拟合度接近1。对于较大样本量中实验大鼠不确定性评估,可采用常规仿真评估法和拟合计算评估法进行评估。结合实验设计案例,对2种方法下的剂量评估进行了对比,分析了剂量差异及不确定性计算结果的特点;拟合计算评估法可依据线性拟合参数进行递推,避免了单个体重模型的多次重复建模仿真,进而降低评估过程的计

算量,评估方法准确率高、建模计算量小。本研究发现对于生物电磁学实验设计及剂量评估具有一定的指导意义,对于多组别、大样本量的剂量不确定性评估,采用拟合计算方法可降低计算的工作量、提升评估的时间效率。

**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;孙艺宸完成了剂量仿真及评估工作;牡丹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

- 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/

- temc.2021.3109249.
- 2 Kim J, Lee K, Kim B, *et al.* Numerical and experimental assessments of focused microwave thermotherapy system at 925 MHz[J]. ETRI Journal, 2019, **41**(6): 850-862. DOI: 10.4218/etrij.2018-0088.
  - 3 林燕平, 逯迈, 刘曦, 等. 基于动物模型的磁感应热疗电磁场与温度场分布的研究[J]. 生物医学工程研究, 2019, **38**(1): 16-21. DOI: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2019.01.04.  
LIN Yanping, LU Mai, LIU Xi, *et al.* Study on electromagnetic field and temperature field distribution in animal model during magnetic induction hyperthermia[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2019, **38**(1): 16-21. DOI: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2019.01.04.
  - 4 Chakarothai J, Shi J J, Wang J Q, *et al.* Numerical techniques for SAR assessment of small animals in reverberation chamber[J]. IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 2015, **4**(1): 57-66. DOI: 10.1109/MEMC.2015.7098514.
  - 5 Bamba A, Joseph W, Vermeeren G, *et al.* A formula for human average whole-body SAR<sub>wb</sub> under diffuse fields exposure in the GHz region[J]. Physics in Medicine and Biology, 2014, **59**(23): 7435-7456. DOI: 10.1088/0031-9155/59/23/7435.
  - 6 Chakarothai J, Wake K, Watanabe S. Convergence of a single-frequency FDTD solution in numerical dosimetry [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, **64**(3): 707-714. DOI: 10.1109/TMTT.2016.2518661.
  - 7 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
  - 8 Rashed E A, Gomez-Tames J, Hirata A. Human head skin thickness modeling for electromagnetic dosimetry[J]. IEEE Access, 7: 46176-46186. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2904743.
  - 9 Dahdouh S, Varsier N, Nunez Ochoa M A, *et al.* Infants and young children modeling method for numerical dosimetry studies: application to plane wave exposure[J]. Physics in Medicine and Biology, 2016, **61**(4): 1500-1514. DOI: 10.1088/0031-9155/61/4/1500.
  - 10 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.
  - 11 Gajsek P, Hurt W D, Zirriax J M, *et al.* Parametric dependence of SAR on permittivity values in a man model[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2001, **48**(10): 1169-1177. DOI: 10.1109/10.951520.
  - 12 Conil E, Hadjem A, Gati A, *et al.* Influence of plane-wave incidence angle on whole body and local exposure at 2100 MHz[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, **53**(1): 48-52. DOI: 10.1109/TEMC.2010.2061849.
  - 13 Iskra S, McKenzie R, Cosic I. Factors influencing uncertainty in measurement of electric fields close to the body in personal RF dosimetry[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2010, **140**(1): 25-33. DOI: 10.1093/rpd/ncp309.
  - 14 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.
  - 15 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.
  - 16 Kitchen R. RF and microwave radiation safety[M]. 2nd ed. Woburn MA: Newnes, 2001: 60-62.
  - 17 Lin J C. Electromagnetic fields in biological systems[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012: 24.