

# 电磁场暴露中实验动物的热剂量学研究

林加金, 李静, 丁桂荣

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, 陕西 西安 710032

**【摘要】**本文开展了电磁暴露下实验动物的热剂量学特征研究。基于生物热方程和数字化三维大鼠模型建立了电磁剂量和热剂量仿真环境,评估了比吸收率、代谢率和边界条件对温度分布及变化的影响。结果表明:核心温升随全身平均比吸收率(WBASAR)增加而增加;在WBASAR值为4 W/kg的电磁波照射下,中脑和睾丸因趋肤效应具有较高的比吸收率值,导致器官组织的温升明显高于核心温升;在WBASAR值为0.4 W/kg的电磁波照射下,代谢和外界环境突变引起的浅层器官温度变化可达到1 °C,远高于核心温升值。在实验评估中,头部和睾丸等靶器官是关键的热剂量评估对象;在实验设计中,需合理规范实验条件,降低代谢率和热边界条件对热剂量的影响。本研究为生物电磁学实验设计及效应研究提供热剂量学评估基础。

**【关键词】**电磁场;传热学;剂量;温度;边界条件

**【中图分类号】**R318;Q64

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)01-0088-07

## Thermal dose of experimental animals exposed in electromagnetic field

LIN Jiajin, LI Jing, DING Guirong

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

**Abstract:** The study explores the thermal dose of experimental animals exposed in electromagnetic field. The simulation environment containing electromagnetic and thermal doses is established based on the bioheat equation and the three-dimensional rat model, and the effects of specific absorption rate, metabolic rate and boundary condition on temperature distribution and variation are assessed. The result shows that the core temperature rises with increasing whole body average specific absorption rate (WBASAR). At WBASAR of 4 W/kg, the midbrain and testes have higher specific absorption rates due to the skin effect, resulting in a more significant temperature rise in organ tissues than in the core; and at WBASAR of 0.4 W/kg, the temperature variation of the shallow organs caused by the sudden changes of metabolic and external environment reaches 1 °C, which is much larger than that of the core. The experiment demonstrates target organs such as the head and testicles as critical subjects in thermal dose assessment. The experimental conditions should be regulated to reduce the effects of metabolic rate and boundary condition on thermal dose. The study has guiding significance for bioelectromagnetic experimental design and effect evaluation on thermal dose.

**Keywords:** electromagnetic field; heat transfer; dose; temperature; boundary condition

## 前言

在生物电磁学研究中,生物电磁剂量和热剂量是衔接动物研究与人体研究的重要标准量。常见的生物

电磁剂量是用单位质量吸收的电磁功率即比吸收率(Specific Absorption Ratio, SAR)进行衡量的。但从效应研究的本质分析,与温度相关的热剂量才是人体安全阈值制定的基础<sup>[1-2]</sup>。效应研究认为:人体核心温度升高1 °C将导致健康损伤;核心体温升高1 °C对应的人体全身平均比吸收率(Whole Body Average Specific Absorption Ratio, WBASAR)为4 W/kg;在100 kHz~6 GHz频段内,职业和公众标准的生物电磁剂量阈值是4 W/kg的1/10和1/50<sup>[2]</sup>。在早期的电磁损伤阈值效应研究中,都将温度作为剂量评估的基础<sup>[1]</sup>;而在电磁辐射临床应用中,温度也是评估的重要参数<sup>[3-5]</sup>。

**【收稿日期】**2023-08-18

**【基金项目】**国家自然科学基金(31770905);军队后勤科研项目(BKJ19C019)

**【作者简介】**林加金,博士,讲师,研究方向:生物电磁学,E-mail: linjia-jin913@126.com

**【通信作者】**丁桂荣,博士,教授,博士生导师,研究方向:生物电磁学、辐射生物学,E-mail: dingzhao@fmmu.edu.cn

随着手机、蓝牙等移动通信终端设备的拓展应用,常见民用微波频段的生物健康问题已成为公共卫生领域关注的热门话题<sup>[6-8]</sup>。大量的在体动物平台被用于探讨常见民用微波频段对人体健康的影响<sup>[9-10]</sup>。然而,大部分暴露实验及剂量评估一般只关注特定功率密度下SAR的空间分布、全身均值和组织均值等参数<sup>[9,11]</sup>,对于特定靶器官及组织的温升特征却关注较少。从生物电磁学标准的设定来分析,SAR具有一定的可靠性,是引起核心温度升高的关键参数。但从生物传热学角度分析,体温变化还需考虑实验动物的代谢率等内部因素和环境空气温度、相对湿度及空气流动速度等外部因素的影响<sup>[12-14]</sup>。因此,热剂量评估的缺失降低了实验评估的客观性和科学性。基于此,实验室平台必须建立核心和靶器官热剂量学数据。

在热剂量学研究方面,意大利的Bernardi等<sup>[15]</sup>通过仿真研究明确了SAR对人体核心温升的影响;日本的Oizumi等<sup>[16]</sup>开展了人体与实验动物的热剂量学研究,探究了生物体核心温升和眼部温升的影响因素。在国内研究方面,尽管众多课题组都开展了生物电磁学研究<sup>[17-19]</sup>,但对于实验室热剂量学的研究却鲜有报道。本文依据自研的1~6 GHz电磁暴露平台<sup>[20]</sup>,采用仿真计算方法,以实验大鼠为研究对象,探究了电磁暴露下实验动物的温度分布及变化规律,分析了不同激励及边界条件下实验动物的热剂量学特征,期望为生物电磁学实验设计及效应研究提供剂量学评估基础。

## 1 材料和方法

### 1.1 生物体传热理论

在1948年由Pennes提出的生物热方程(Pennes Bioheat Equation, PBE)是目前最广泛使用的热生物模拟模型<sup>[21-22]</sup>。基本原理可表述为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho Q + \rho S - \rho_b c_b \rho \omega (T - T_b) \quad (1)$$

其中, $\rho$ 为组织的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $c$ 为组织的比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ , $T$ 为组织温度(K), $t$ 为时间(s), $k$ 为热导率 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ , $Q$ 为组织的代谢率( $\text{W}/\text{kg}$ ), $S$ 为电磁场产生的SAR( $\text{W}/\text{kg}$ ), $\omega$ 为灌注率 $[\text{mL}/(\text{s} \cdot \text{mL})]$ , $\rho_b$ 为血液的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $c_b$ 为血液的比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ , $T_b$ 为动脉血温度(K), $\rho_b \cdot c_b \cdot \rho \cdot \omega$ 统称为传热率;代谢率、比热容、热导率、密度和灌注率等都是组织特有的量。

PBE方程解释了生物传热学中热源的来源及对温度的影响。在模型中,生物系统中产生的热通过热扩散的方式在模拟区域内扩散。PBE方程中有3种类型的热源。第一项 $\rho \cdot Q$ ,机体代谢过程构成了一个

连续的热源,该热源对每个组织都是特定的,并且假定在每个单独的组织域内都是均匀的。第二项 $\rho \cdot S$ ,来自外部施加的电磁场或其他来源的沉积能量构成了一个不均匀的、局部、潜在的、不连续的热源。第三项为血液循环 $\rho_b \cdot c_b \cdot \rho \cdot \omega (T - T_b)$ ,血液循环作为一个均匀、连续的、具有组织特性的热源。

### 1.2 热边界条件

实验动物的PBE中,空气和组织的热边界满足第三类边界条件,换热项包括热传导、黑体辐射传热、蒸发和呼吸等因素<sup>[23]</sup>。边界条件满足下式:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T_s - T_e) + \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_e^4) + F_B \quad (2)$$

其中, $k$ 为热导率 $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ , $T$ 是组织温度(K), $n$ 为组织-空气换热表面的外法线, $h_c$ 为热传导系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ , $T_s$ 为皮肤表面温度(K), $T_e$ 为外界环境温度(K), $\varepsilon$ 为黑体辐射的发射率(%), $\sigma$ 为斯特藩-玻尔兹曼常数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$ , $F_B$ 为因蒸发、呼吸等因素产生的热损失通量( $\text{W}/\text{m}^2$ )。

由于皮肤表面温度与外界环境温度相差较小,经过递推,黑体辐射传热可转化为下式:

$$\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_e^4) = \varepsilon \sigma (T_s - T_e) (T_s + T_e) (T_s^2 + T_e^2) \approx 4\varepsilon \sigma T_s^3 (T_s - T_e) \quad (3)$$

因此,边界条件可简化为

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = (h_c + h_r) (T_s - T_e) + F_B \quad (4)$$

其中, $h_r \approx 4\varepsilon \sigma T_s^3$ , $h_r$ 为黑体辐射的等效传导系数 $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ 。

热传导系数 $h_c$ 随温度、运动状态和风速等因素变化<sup>[24]</sup>,在风速小于0.15 m/s的静止状态下 $h_c$ 可取5.1  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。对于黑体辐射,常温条件下 $h_r$ 可取5.4  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

### 1.3 数字化建模

采用Sim4Life生物电磁仿真软件开展了电磁及热学仿真,图1给出了建模环境示意图。三维数字化动物模型为Sim4Life提供的大鼠模型,性别为雄性,类型为SD(Sprague dawley),SD大鼠是生物电磁学研究中常用的动物类型;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。

在电磁仿真设置中,算法为高频电磁时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)。各组织电磁参数参考瑞士的ITIS(the Foundation for Research on Information Technologies in Society)数据库<sup>[25]</sup>。激励源为平面波激励,平面波的空间区域(如图1中的平面波方框所示)尺寸为 $(400 \times 80 \times 80) \text{ mm}^3$ ,大鼠全部置于平面波空间内。按照实验室评估经

验<sup>[20]</sup>,平面波从大鼠的顶部进行照射,沿E轴方向极化,激励频率为2.4 GHz;电磁激励中网格划分长度为1 mm;平面波空间与外部空间之间的边界(如图1中电磁边界所示)为理想匹配边界(Perfectly Match Layer, PML);采用图形处理器(Graphics Processing Unit, GPU)加速技术提升运算速率。

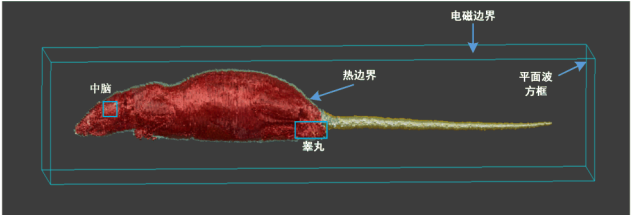


图1 剂量仿真环境  
Figure 1 Dose simulation environment

在热学设置中,仿真条件为瞬态。各组织的热学参数参考 IT'IS 数据库;各组织的初始温度为 37 °C;热学激励源采用内部关联式激励,即电磁仿真的 SAR 值结果作为式(1)中的  $S$  热源;热学仿真的网格划分长度为 1 mm;动物组织与空气的界面为热学边界(图1),设置为第三类边界条件,综合热传系数( $h_e+h_r$ )为 10.5 W/(m<sup>2</sup>·K),空气温度  $T_e$  为 25 °C,热损失通量  $F_B$  为 5 W/m<sup>2</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SAR 与体温的关系

SAR 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值  $E$  相关:

$$SAR = \frac{\sigma_e \cdot E^2}{\rho_m} \tag{5}$$

其中,  $\sigma_e$  为组织的电导率(Ω·m);  $\rho_m$  为组织的质量密度(kg/m<sup>3</sup>);  $E$  为电场值(V/m); SAR 为比吸收率(W/kg)。

WBASAR 是 SAR 按体质量进行平均计算,组织比吸收率(Tissue Specific Absorption Ratio, TSAR)则是各组织的平均比吸收率。

核心温度是指机体深部的温度。在不考虑下丘脑温度调节机制的情况下,探究了实验动物核心温度变化和 WBASAR 值之间的关系,仿真时设置的 WBASAR 值分别为 0.5、1.0、2.0、3.0 和 4.0 W/kg。经过 30 min、2.4 GHz 的平面电磁波的全身照射后,核心温度明显升高,核心温升量随 WBASAR 值增加而增加(图2)。

探究了大鼠体内 SAR 值和温升随纵向(从头

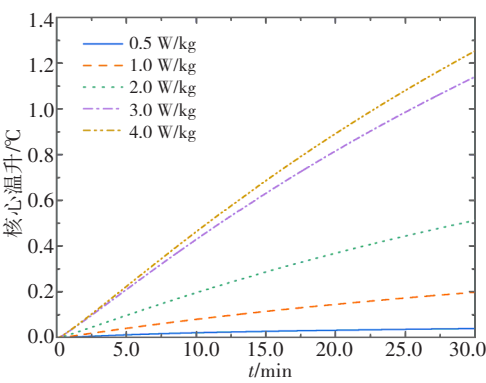


图2 核心温升和WBASAR的关系  
Figure 2 Relationship between core temperature rise and WBASAR

至尾)位置分布的情况,图3给出了 WBASAR 值为 4.0 W/kg 时 SAR 值和温升分布示意图。SAR 值的分布呈多峰状,体表的峰值由趋肤效应引起,体中的峰值由组织间的参数差异引起;整体而言,体表的峰值明显高于体中峰值。温升的分布相对均匀,体中的核心温升随空间变化较缓慢,但体表处的温升明显高于核心温升。

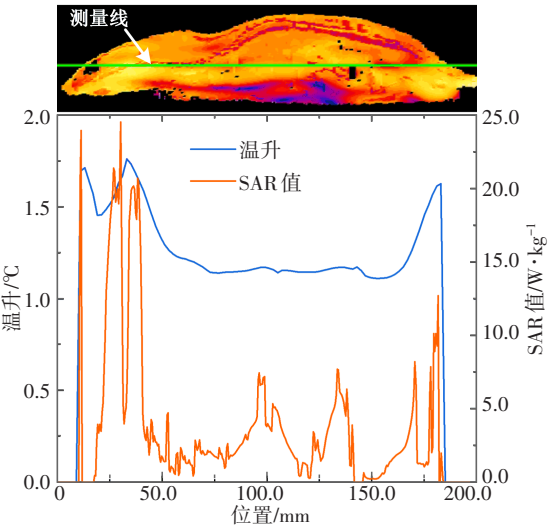


图3 SAR值和温升随纵向位置分布  
Figure 3 Distribution of SAR and temperature rise with longitudinal location

以上信息表明:电磁波辐射引起的能量沉积是引起实验动物温升的重要因素,核心温升随 WBASAR 值增加而增加;体表处因趋肤效应具有较高的 SAR 值,导致体表温升明显高于核心温升。

### 2.2 代谢率对体温的影响

代谢是生物体内所发生的用于维持生命的一系列有序的化学反应总称,是构成生物传热的重要来



源<sup>[26]</sup>。影响生物体代谢的因素有皮肤温度和湿度、空气温度、相对湿度、风速、运动状态和神经反馈等。如周围环境的空气温度以及平均辐射温度越高,环境向人体传递的热量就越大,此时温度感受系统就会发出热的信号,为保持热舒适,就需要相对低的代谢率;当空气温度以及平均辐射温度较低,人体向环境散热,为避免冷感的产生,就需要加强机体的代谢功能,增大代谢率<sup>[26]</sup>;在运动及紧张情况下,身体会增加代谢率。以人体为例,静卧时的全身代谢率大约为33~41 W/m<sup>2</sup>,走路时的全身代谢率大约为116~221 W/m<sup>2</sup>,剧烈运动时的全身代谢率可达到314~357 W/m<sup>2</sup><sup>[27]</sup>。

为研究代谢率对电磁暴露过程中温度变化的影响,以基础代谢率为标准,在热学仿真中对各组织代谢率参数进行了缩放,缩放系数为0.75~5。

对核心体温、睾丸中心点处温度和中脑中心点

处温度进行了对比,结果如图4所示。参照1.3节中的三维模型图,从生物结构特点来看,睾丸位于身体边缘,中脑位于脑部中部。当缩放系数为1、即动物处于基础代谢率时,照射前的核心、中脑和睾丸的初始温度分别为37.0、36.7和35.2 °C;中脑和睾丸温度随着代谢率增加而略有上升,如代谢率缩放系数为2时,中脑和睾丸的初始温度分别为36.9和35.4 °C。在WBASAR值为4 W/kg的电磁波照射下,中脑的TSAR值为9.6 W/kg,睾丸组织TSAR值为7.3 W/kg。照射30 mins后,尽管代谢率缩放系数不同,各监测点的温升大小不变。核心体温变化量为1.25 °C,中脑温度变化量为1.52 °C,睾丸温度变化量为1.65 °C。温升的变化趋势与图3的结果一致,即体表处因趋肤效应具有较高的SAR值、导致体表温升明显高于核心温升。

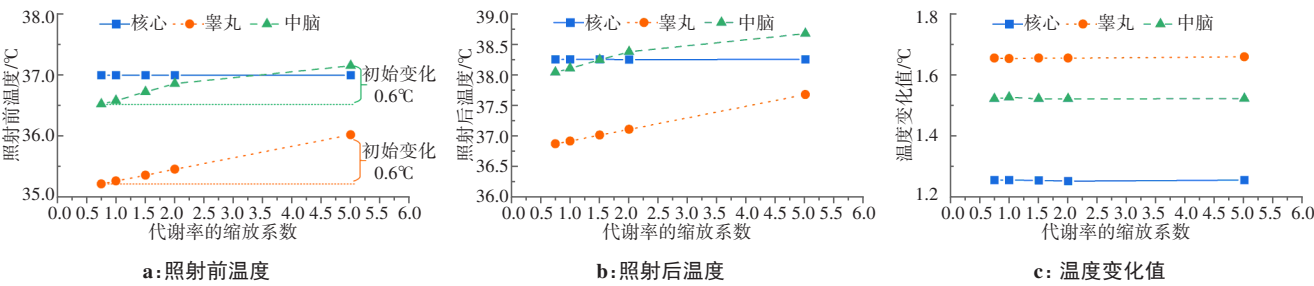


图4 当WBASAR值为4 W/kg时温升和代谢率之间的关系

Figure 4 Relationship between temperature rise and metabolic rate at WBASAR of 4 W/kg

以上结果表明,在照射前,脑部和睾丸等关键器官因代谢率变化而产生初始温度的差异,代谢率越高、初始温度就越高;但代谢率不改变照射后核心和器官的温度变化。

### 2.3 实验环境对体温的影响

由1.2节的式(4)可知,在PBE的边界限制条件中,影响生物传热过程的参数有4个:热传导系数 $h_c$ ,外界环境温度 $T_e$ ,因蒸发、呼吸等因素产生的热损失通量 $F_b$ 和黑体辐射的等效传导系数 $h_r$ 。黑体辐射的等效传导系数 $h_r$ 相对固定,随其他因素变化较小,一般取5.4 W/(m<sup>2</sup>·K)。参照人体传导系数随运动状态和风速变化值<sup>[27]</sup>,热传导系数 $h_c$ 变化范围可取4.5~12 W/(m<sup>2</sup>·K)。考虑非理想的实验环境,外界环境温度 $T_e$ 的变化范围可取15~30 °C。参照人体蒸发和呼吸量,热损失通量 $F_b$ 一般为全身代谢率的20%,在仿真实验中大鼠全身代谢率的20%约为5 W/m<sup>2</sup>,因温度、风速、皮肤含湿量等参数变化,热损失通量 $F_b$ 的变化范围取2.5~20 W/m<sup>2</sup>。

研究了边界条件改变引起的实验动物体温的变化,图5、图6和图7给出了各监测点温度随参数变化的情况。如图5所示,热传导系数 $h_c$ 影响中脑和睾丸等关键器官的初始温度, $h_c$ 越大、初始温度越低,而 $h_c$ 对温升变化影响微弱;如图6所示,外界环境温度 $T_e$ 越高,中脑和睾丸等关键器官的初始温度越高,但对温升变化的影响可忽略;如图7所示,中脑和睾丸等关键器官的初始温度随热损失通量 $F_b$ 增加而降低,温升随 $F_b$ 变化的影响可忽略。

以上结果表明,热传导、热损失通量等边界因素引起的耗散项影响照射前生物体的温度分布。睾丸在身体结构的边缘,在图5a、图6a和图7a中可见其初始温度随外界参数变化较大。中脑在身体内部,在图5a、图6a和图7a中可见其初始温度也随外界参数变化,但变化程度弱于睾丸。核心和睾丸、中脑等关键器官在照射后的温升随外界参数变化较小,可见SAR是影响温升的主要因素。

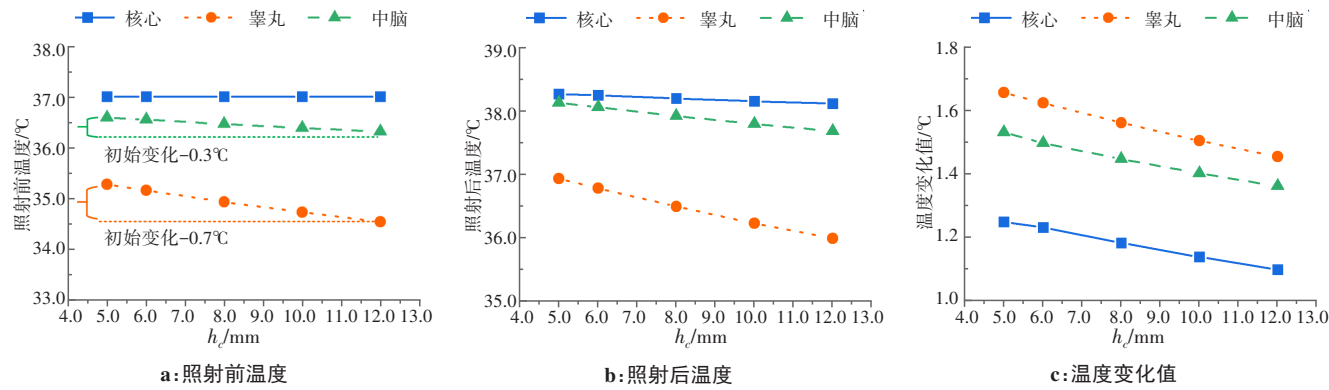


图 5 当 WBASAR 值为 4 W/kg 时热传导系数  $h_c$  对实验动物体温的影响

Figure 5 Effects of heat conductivity coefficient  $h_c$  on body temperature of experimental animals at WBASAR of 4 W/kg

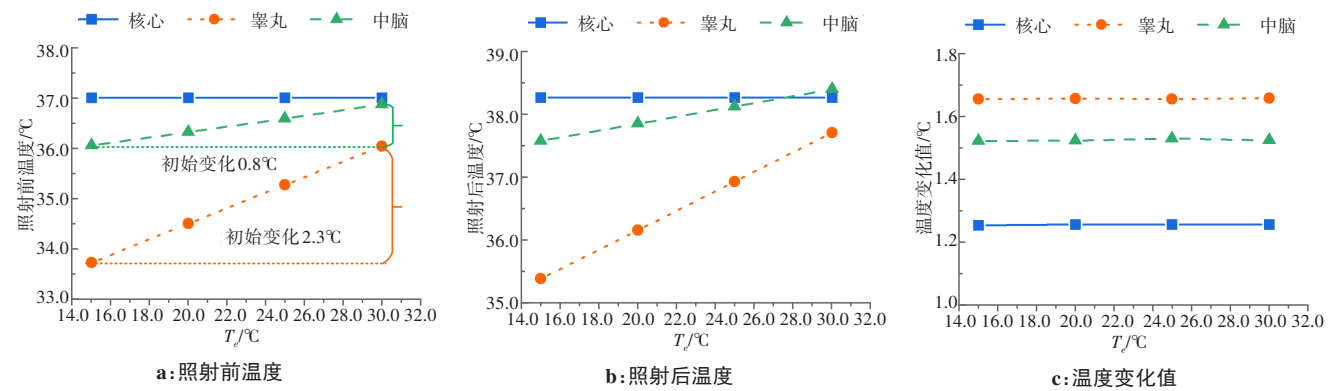


图 6 当 WBASAR 值为 4 W/kg 时外界环境温度  $T_e$  对实验动物体温的影响

Figure 6 Effects of ambient temperature  $T_e$  on body temperature of experimental animals at WBASAR of 4 W/kg

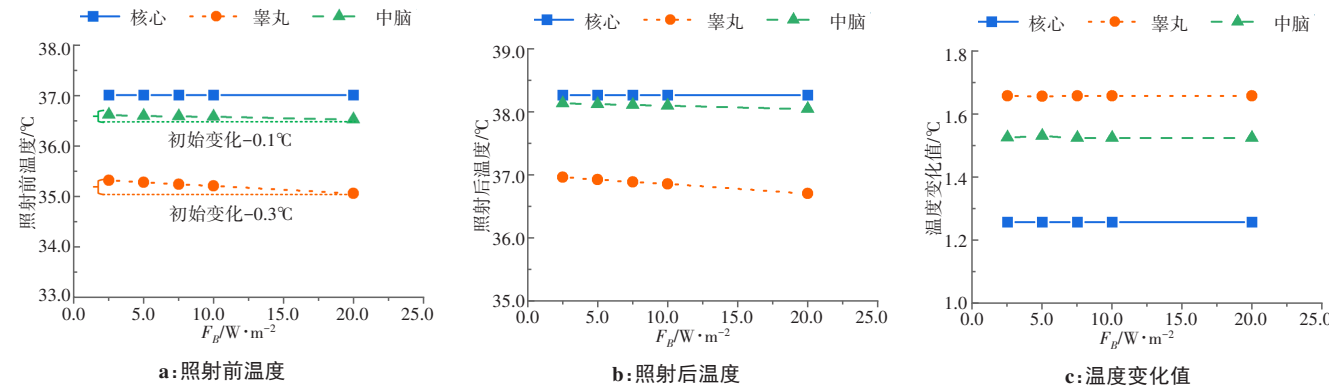


图 7 当 WBASAR 值为 4 W/kg 时热损失通量  $F_B$  对实验动物体温的影响

Figure 7 Effects of heat loss flux  $F_B$  on body temperature of experimental animals at WBASAR of 4 W/kg

2.4 讨论

在生物电磁学标准中,在射频 100 kHz~6 GHz 频段内,电磁标准的阈值是以人体核心体温升高 1 °C 作为评判依据,相应的 WBASAR 为 4 W/kg。本文以实验室环境和实验大鼠作为仿真模拟对象,验证了 SAR 和核心温升之间的关系,2.1 节的结果表明,电磁

波辐射引起的能量沉积是引起实验动物温升的重要因素,核心温升随 WBASAR 值增加而增加。因此,研究结果与标准规范的制定具有一致性。但研究结果也表明,体表处因趋肤效应具有较高的 SAR 值,导致体表温升明显高于核心温升。本文研究中选用中脑和睾丸分别作为神经系统和生殖系统中的典型组织,

对这两种组织的热剂量学也进行了仿真研究。对于生物电磁学研究而言,生殖系统和神经系统是较为敏感的器官,除了组织敏感性外,更高的温升可能是照射敏感因素之一。

2.2节和2.3节的研究结果也表明,在照射过程中外界环境和体内代谢率对生物体温升的影响可忽略,但外界环境和体内代谢率改变了照射前的初始体温分布。具体而言,高代谢、高环境温度和低耗散增加了生物体浅层器官的初始温度,而低代谢、低环境温度和低耗散降低了生物体浅层器官的初始温度。因此,在极端的高代谢、高环境温度和低耗散条件下,外界环境可能增加负面效应的影响,如高温和电磁波混合暴露会增加对生殖系统的影响。而极端的高代谢、高环境温度和低耗散条件下,外界环境可能减弱负面效应甚至增加有益的效应,如低温条件可能降低电磁波暴露对神经系统功能的影响。因此,从热学角度而言,生物体内部因素和外部环境因素在效应评估过程中是不可忽视的,需要合理设计暴露平台,合理评估各因素对生物体热学剂量的影响。

本文在2.1节中也研究了低WBASAR值下核心体温的升高情况,WBASAR值0.4 W/kg(职业环境限制阈值)条件下,生物体核心温升在0.1℃量级,因此,在职业环境限制阈值以下的暴露环境中,生物体核心温升较微弱。而图2和图3的结果表明,代谢和外界环境的突变引起的浅层器官初始温度变化值可能达到1℃,远大于低WBASAR值时核心体温的变化值。因此,在电磁暴露值和SAR值较低时,代谢和外界环境突变产生的效应影响比电磁辐射的效应影响更大,在实验室效应评估中更值得关注。

### 3 结论

本文从PBE生物热方程出发,探讨了电磁暴露下实验动物的温度分布及变化规律,分析了不同激励及边界条件下实验动物的热剂量学特征。结果表明:在考虑生物电磁学标准规范及生物体核心体温变化的前提下,SAR被设定为电磁生物学效应评估的重要标准这一假设是确定的;中脑和睾丸因趋肤效应在暴露中具有更高的温升,可能是神经系统和生殖系统照射敏感的重要因素;此外,代谢率和外界环境参数影响生物体浅层器官的温度分布,可能影响效应实验的评估结果。因此,在生物电磁学效应研究的暴露平台设计中,除了电磁剂量外,生物体热剂量是重要的剂量评估量;头部和睾丸等靶器官是关键的热剂量评估对象;在平台设计中需要规范实验条件,降低环境温度、湿度、风速、实验动物运动和紧张状态等因素对热代谢率和热边界条件的影响。

### 【参考文献】

- [1] Bailey WH, Harrington T, Hirata A, 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.
- [2] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)[J]. Health Phys, 2020, 118(5): 483-524.
- [3] 高宏建,王笑茹,吴水才,等. 肝肿瘤温控射频消融温度分布的有限元建模[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(1): 75-81.  
Gao HJ, Wang XR, Wu SC, et al. Finite element modeling of temperature distribution during temperature-controlled radiofrequency ablation of liver tumor [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(1): 75-81.
- [4] 赵妍妍,许雅思,吴琼,等. 肿瘤热疗研究进展[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2021, 30(8): 862-866.  
Zhao YY, Xu YS, Wu Q, et al. Research progress on tumor hyperthermia[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2021, 30(8): 862-866.
- [5] 张烨,钱志余,郭金涛,等. 肿瘤微波热消融有效毁损区域温度场分布的仿真研究[J]. 生物物理学报, 2012, 28(9): 763-770.  
Zhang Y, Qian ZY, Guo JT, et al. Simulation on temperature distribution of effective lesion area for tumor microwave ablation thermotherapy[J]. Acta Biophysica Sinica, 2012, 28(9): 763-770.
- [6] Negi P, Singh R. Association between reproductive health and nonionizing radiation exposure[J]. Electromagn Biol Med, 2021, 40(1): 92-102.
- [7] Stam R. Occupational exposure to radiofrequency electromagnetic fields[J]. Ind Health, 2022, 60(3): 201-215.
- [8] 夏红杰,王德文. 微波电磁辐射对生物体的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2008, 26(5): 261-266.  
Xia HJ, Wang DW. Effects of electromagnetic radiation on organism [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2008, 26(5): 261-266.
- [9] Hirata A, Diao Y, 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.
- [10] Paffi A, Apollonio F, Lovisolo GA, et al. Considerations for developing an RF exposure system: a review for in vitro biological experiments [J]. IEEE Trans Microw Theory, 2010, 58(10): 2702-2714.
- [11] Paffi A, Merla C, Pinto R, et al. Microwave exposure systems for *in vivo* biological experiments: a systematic review [J]. IEEE Trans Microw Theory, 2013, 61(5): 1980-1993.
- [12] 赵阳,端木琳,李祥立,等. 数值人体模型的建立方法及其研究发展综述[J]. 建筑热能通风空调, 2010, 29(1): 20-25.  
Zhao Y, Duan ML, Li XL, et al. Literature review and development of the numerical human thermal model [J]. Building Energy & Environment, 2010, 29(1): 20-25.
- [13] Coccarelli A, Boileau E, Parthimos D, et al. An advanced computational bioheat transfer model for a human body with an embedded systemic circulation[J]. Biomech Model Mechanobiol, 2016, 15(5): 1173-1190.
- [14] Fiala D, Lomas KJ, Stohrer M. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions[J]. Int J Biometeorol, 2001, 45(3): 143-159.
- [15] Bernardi P, Cavagnaro M, Pisa S, et al. Specific absorption rate and temperature elevation in a subject exposed in the far-field of radio-frequency sources operating in the 10-900-MHz range[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2003, 50(3): 295-304.
- [16] Oizumi T, Laakso I, Hirata A. FDTD analysis of temperature elevation in the lens of human and rabbit models due to near-field and far-field exposures at 2.45 GHz[J]. Radiat Prot Dosimetry, 2013, 155(3): 284-291.
- [17] 彭瑞云. 电磁辐射致脑损伤与防护若干问题的思考[J]. 军事医学, 2011, 35(5): 321-325.  
Peng RY. Potential solutions to brain injury induced by electromagnetic radiation and its protection[J]. Bulletin of the Academy of Military Medical Sciences, 2011, 35(5): 321-325.
- [18] 齐欣哲,逯迈. 射频美容电极在脑中电磁场和比吸收率分布研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(4): 491-497.  
Qi XZ, Lu M. Distributions of electromagnetic field and specific

- absorption ratio caused by radiofrequency cosmetic electrode in human brain[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(4): 491-497.
- [19] 高蒙, 彭怀禹, 王向晖, 等. 长期1.8 GHz电磁辐射对大鼠学习认知能力的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, 39(4): 17-23.  
Gao M, Peng HY, Wang XH, et al. Effect of long-term 1.8 GHz combined electromagnetic radiation on the learning and cognitive ability of rats [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, 39(4): 17-23.
- [20] 牡丹, 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): 68-74.  
Du D, Li J, Miao X, 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): 68-74.
- [21] Kono T, Naruse Y, Yamada J, et al. Exchange of heat radiation between human body and urban environment: characterization in visible, near-infrared, and far-infrared regions[J]. Appl Sci, 2022, 12(20): 10412.
- [22] Cvetković M, Poljak D, Hirata A. The electromagnetic-thermal dosimetry for the homogeneous human brain model[J]. Eng Anal Bound Elem, 2016, 63: 61-73.
- [23] 苗逢雨. 中等强度运动后空气流动对人体热舒适的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020: 2-21.  
Miao FY. Effects of air movement on thermal comfort after moderate exercise[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020: 2-21.
- [24] 周浩. 人体皮肤温度影响因素实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013: 16-18.  
Zhou H. Experimental study on the influence factors of human skin temperature [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013: 16-18.
- [25] Hasgall PA, Di Gennaro F, Baumgartner C, et al. IT'IS database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues[EB/OL]. (2022-02-22). [2023-05-17]. <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/overview/>.
- [26] 殷婷. 代谢率对人体热舒适影响的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017: 15-19.  
Yin T. Study on the effect of metabolic rate under the condition of thermal comfort[D]. Changsha: Hunan University, 2017: 15-19.
- [27] Datta A. Biological and bioenvironmental heat and mass transfer[M]. Portland: Ringgold Inc, 2002: 26-106.

(编辑: 薛泽玲)