

电磁脉冲引起人体血脑屏障开放的生物电磁剂量学

林加金, 周艳, 丁桂荣, 李静

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】目的:对电磁脉冲引起人体血脑屏障开放的生物电磁剂量学进行研究。**方法:**基于典型暴露平台建立人体脑部剂量学研究环境,利用三维数字化人体模型并结合电磁仿真方法对生物电磁剂量进行仿真评估。**结果:**头部中心的电场峰值为1.49 kV/m,与激励电场相比衰减41.6 dB;鼻尖皮肤表面处空气中最大电场幅值为1 795 kV/m;一次脉冲下头部空间的平均吸收率为 4.16×10^{-8} J/kg;重复频率 $1\ 000\ s^{-1}$ 的极端条件下的头部平均比吸收率为 4.16×10^{-5} W/kg。**结论:**局部高强度电场是临床应用中重要的安全隐患,需要结合血脑屏障开放的量效关系研究抑制局部高强度电场的手段,本研究的人体脑部生物电磁剂量数据可用于临床效应的可行性评估。

【关键词】电磁脉冲;血脑屏障;临床应用;剂量;生物安全性

【中图分类号】R318;Q64

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)02-0241-06

Bioelectromagnetic dosimetric study of human blood-brain barrier opening induced by electromagnetic pulse

LIN Jiajin, ZHOU Yan, DING Guirong, LI Jing

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: Objective To analyze the bioelectromagnetic dose of human blood-brain barrier opening induced by electromagnetic pulse. **Methods** A typical exposure platform was used to establish an environment for human brain dosimetric study. The bioelectromagnetic dose was evaluated with electromagnetic simulation method using a 3D digital human model. **Results** The electric field at the centre of the head reached a peak of 1.49 kV/m, and there was a decrease of 41.6 dB from the excitation field. The maximum electric field amplitude on the surface of the nose tip was 1 795 kV/m. The head had an average absorption rate of 4.16×10^{-8} J/kg under one pulse, while under extreme conditions with a repetition frequency of $1\ 000\ s^{-1}$, the average specific absorption rate of the head was 4.16×10^{-5} W/kg. **Conclusion** Local high-intensity electric fields pose significant safety risks in clinical application, and it is necessary to study the means of inhibiting local high-intensity electric field in combination with the dose-effect relationship of blood-brain barrier opening. The human brain bioelectromagnetic doses provided by the study can be used to evaluate the clinical efficacy.

Keywords: electromagnetic pulse; blood-brain barrier; clinical application; dose; biosafety

前言

血脑屏障对循环血液中的各种物质具有严格的选择透过机制,从而保证脑内环境的高度稳定以维持中枢神经系统的正常功能^[1]。血脑屏障在阻止微生物、病毒等异物入侵脑组织发挥保护作用的同时,

也阻止了大部分治疗药物进入脑病变区域^[2-4]。药物有效吸收因血脑屏障的存在而难以实现,严重制约了脑疾患药物治疗的有效实施^[3-4]。如何安全有效地开放血脑屏障,一直是临床医生和研究者关注的焦点^[5-7]。实验研究表明,电磁脉冲(Electromagnetic Pulse, EMP)可导致血脑屏障的通透性可逆性增加^[8-10]。EMP引起血脑屏障开放的研究已在大鼠上实现验证^[11-13],摸索出了一系列参数规律,为大部分治疗药物进入脑病变区域、安全有效地开放血脑屏障提供一种技术途径,有望用于中枢神经系统疾病的临床治疗^[14-15]。然而,由动物对象向人体临床对象逐步过渡的过程中,量效关系^[16]和生物安全性^[17]是

【收稿日期】2023-07-21

【基金项目】国家自然科学基金(31770905,31500679)

【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】李静,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: Jingli0526@126.com

临床技术方案必须解决的关键问题。

本研究以动物实验暴露参数^[18-19]为参考依据,在自研平台上开展人体血脑屏障开放暴露的生物电磁剂量学研究,探究人体暴露条件下体外、体内电场及剂量学特征,对电磁安全性问题进行评估,为EMP引起血脑屏障开放的临床研究提供量效关系和生物安全性评价的基础。

1 暴露平台基本参数

1.1 电气参数

图1给出了暴露平台电气结构示意图,主要包括高压脉冲源、传输线变压器、有界波模拟器和吸收负

载等4部分。其中,高压脉冲源的核心系统为三级磁压缩型脉冲发生器,高压脉冲源和有界波模拟之间通过传输线变压器进行阻抗变换和电压叠加升压。传输线变压器的阻抗为150Ω,匹配阻抗上可输出幅值90kV、脉宽65ns、上升沿20ns的脉冲高压^[20]。图2给出了脉冲高压的时域和频域分析波形。在频域分析中,高压脉冲的能量主要集中于50MHz以下,吸收负载的阻抗为150Ω。有界波模拟器需要满足的匹配要求为:(1)特征阻抗与150Ω输入源、150Ω负载形成匹配;(2)脉冲信号在空间中实现低衰减激励。

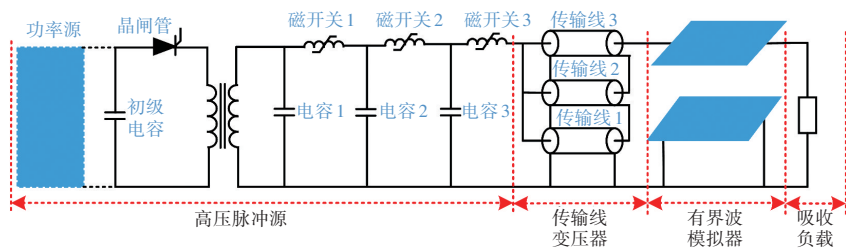


图1 暴露平台电气结构示意图
Figure 1 Electrical structure of the exposure platform

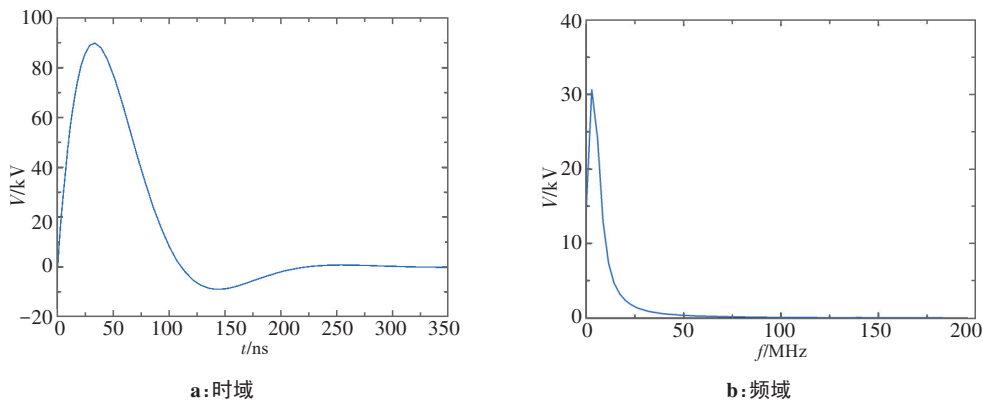


图2 激励脉冲波形
Figure 2 Excitation pulse waveform

1.2 有界波模拟器结构

有界波模拟器的设计结构如图3所示,主要分为工作空间、前过渡段和后过渡段。工作空间为平行板传输线,空间高度为 H_0 ,空间宽度为 W_0 ,空间长度为 L_0 。前过渡段为平行板传输线,空间高度为 H_1 ,空间宽度为 W_1 ,空间长度为 L_1 ;后过渡段为锥角形双极板,空间长度为 L_2 。

对于平行板传输线,在考虑边缘效应的情况下,特征阻抗^[21]可表示为:

$$Z = \frac{376.62 \frac{H}{W}}{\frac{H}{W} + \frac{1}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left[\pi \frac{W}{H} + 1 + \ln \left(\pi \frac{H}{W} + 1 \right) \right] \right\}} \quad (1)$$

式中, Z 为平行板传输线的阻抗(单位:Ω), H 为传输线的空间高度(单位:m), W 为传输线的空间宽度(单位:m)。平行板传输线的最高可用极限频率^[21]可表示为:

$$f_c = \frac{150}{H} \quad (2)$$

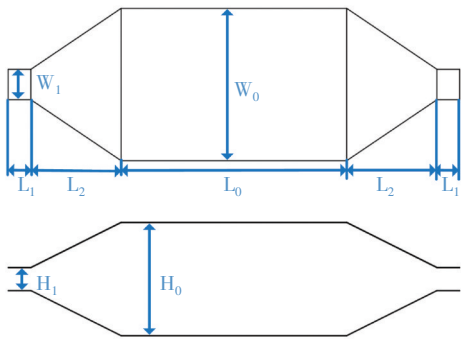


图3 有界波模拟器的结构示意图
Figure 3 Structure of bounded-wave simulator

式中, f_c 为最高可用极限频率(单位: MHz), H 为传输线的空间高度(单位: m)。

式(1)和式(2)表明: 平行板传输线的阻抗与空间高度、宽度的比值 H/W 有关, 最高可用极限频率与空间高度 H 相关。为了满足阻抗匹配和低衰减激励的条件, 经过优化设计, 得到有界波模拟器各结构的尺寸大小, 具体参数如表1所示。其中, 有界波模拟

器的特征阻抗为 $149.6\ \Omega$, 最高可用极限频率为 $300\ \text{MHz}$, 满足暴露平台的匹配要求。

2 有界波模拟器的电磁仿真

2.1 仿真设置

采用生物电磁软件 Sim4life 进行有界波模拟器的电场仿真分析。仿真软件 Sim4life 由瑞士 Zmt Zurich Medtech 集团推出, 可分别通过有限元法和时域有限差分法进行电磁场的低频算法和高频算法计算仿真。基于图3和表1中的结构尺寸参数, 建立有界波模拟器的模型(图4); 求解模块为高频算法模块; 背景环境为空气, 上极板和下极板为导体; 边界条件为理想开放条件; 激励源在图4中输入位置处, 激励条件为图2中的时域波形, 考虑到阻抗匹配条件, 实际激励幅值为图2中幅值的2倍; 吸收负载在图4中的输出位置处, 阻抗为 $150\ \Omega$ 电阻。设置两处观察区域, 观察点位于有界波模拟器内部空间的中心处, 观察盒位于有界波模拟器内部空间中心区域, 尺寸为 $400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm} \times 400\ \text{mm}$ 。

表1 有界波模拟器中各结构的尺寸及参数

Table 1 Dimension and parameter of each structure in the bounded-wave simulator

结构	高度/mm	宽度/mm	长度/mm	阻抗/ Ω	最高可用极限频率/MHz
工作空间	500	675	1 000	149.6	300
前过渡段	100	135	100	149.6	1 500
后过渡段	100~500	135~675	400	149.6	300

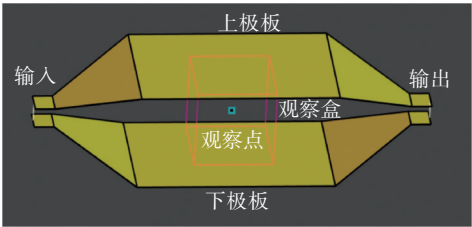


图4 电场仿真建模示意图
Figure 4 Electric field simulation modeling

2.2 电场激励特性

经过电磁仿真运算, 对仿真结果进行分析, 图5给出了观察点处的电场时域波形, 并与激励电压波形进行比对。可以看出, 电场激励主要集中于上下极板间的Y方向上。激励电场波形与激励电压波形保持一致, 时间位移是由空间距离导致的时延。

此外, 对电场的理论值也进行了估算。在阻抗匹配条件下, 平行板传输线的空间电场峰值可表示为:

$$E_{\max} = \frac{U_p}{H} \tag{3}$$

式中, E_{\max} 为电场的理论峰值(单位: kV/m), U_p 为极板电压值(单位: kV), H 为上下极板之间的距离(单位: m), U_p 为 $90\ \text{kV}$, H 为 $0.5\ \text{m}$ 。

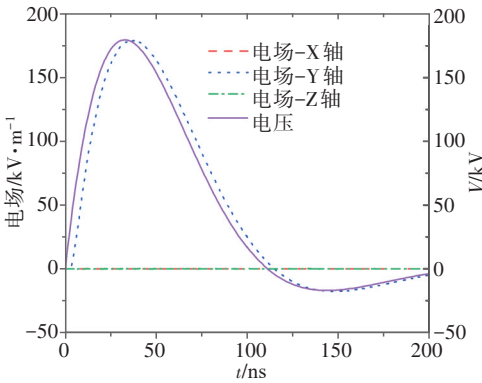


图5 中心点处时域波形及对比
Figure 5 Time domain waveform of the center point and the comparison

图 5 中上下极板之间的电场峰值为 179.3 kV/m；电场的理论峰值 E_{\max} 为 180 kV/m。经计算,电场峰值的仿真值与理论值的差值为 0.03 dB。以中心点处判断,有界波模拟器电场激励的衰减较小,符合设计预期。

2.3 电场均匀性

考虑到实际暴露对象的尺寸,对图 4 中观察盒内的电场均匀性进行比较分析。其电场均匀性可表示为:

$$C = 20\lg\left(\frac{E_i}{E_m}\right)$$

(4)

式中, C 为电场均匀性系数(单位: dB), E_i 为观察点处电场幅值(单位: kV/m), E_m 为观察区域内的电场最大值(单位: kV/m)。

以观察盒的观察点为位置原点, 设定坐标为 (0, 0, 0)。图 6 给出以观察点为位置原点, X、Y、Z 3 个方向上的电场均匀性。可以看出, 在 X 方向上原点处的幅值最大, 均匀系数最大为 -0.45 dB; 在 Y 方向上两端处的幅值最大, 均匀系数最大为 -0.17 dB; 在 Z 方向上两端处的幅值最大, 均匀系数最大为 -0.04 dB。以观察盒内空间的分析结果判断, 有界波模拟器暴露目标区域内的电场均匀性较好, 远低于 IEC-61000-4 标准^[22]中 6 dB 的阈值标准, 符合设计预期。

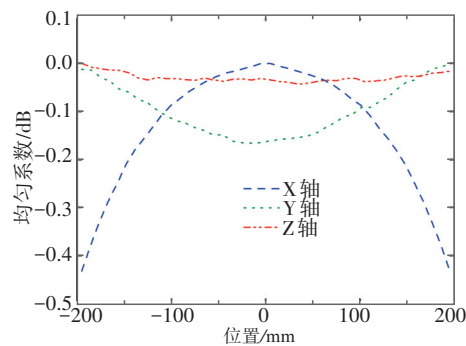


图 6 观察盒内电场均匀性系数
Figure 6 Uniform coefficient of the electric field in the observed box

3 人体暴露仿真

3.1 人体仿真环境

利用 Sim4life 软件提供的 Duke 人体模型建立了三维电磁仿真环境。Duke 模型的性别为男性, 年龄 34 岁, 身高 1.77 m, 体质量 70.2 kg, 模型尺寸精度为 0.5 mm, 含有 319 种器官组织, 各生物组织的电参数可调用内部 ITIS 数据库。图 7 给出了加载人体模型的暴露平台电磁仿真示意图, Duke 的头部暴露于有界波模拟器中, 头部中心与有界波模拟器的中心(观

察点)重合, 面部朝向接地极板。可按照第 2.1 节中的设置参数开展电磁仿真。

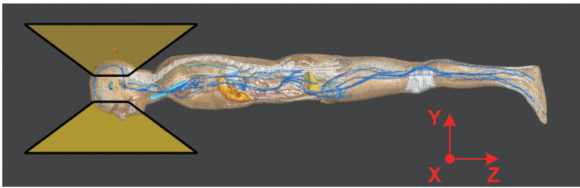


图 7 加载人体模型的建模示意图
Figure 7 Loading human model

3.2 电场特征

以图 2 中的时域波形作为激励, 模拟高压脉冲激励下人体模型的瞬态过程。图 8 给出头部中心处电场时域波形。与图 5 中的空间暴露电场对比, 电场方向发生散射, 暴露电场只有上下极板的 Y 方向激励, 体内电场除了 Y 方向外, X 和 Z 方向均有散射电场分量。此外, 头部中心的电场峰值为 1.49 kV/m, 与激励电场相比衰减 41.6 dB。为分析暴露空间内的电场分布特征, 采用谐振激励进行电磁模拟仿真, 激励频率为 10 MHz, 激励电压为 180 kV。图 9 给出头部附近的二维电场空间分布。由图 9 可知, 在人体鼻尖空气附近产生明显的电场增强现象。通过划线法取样, 得到鼻尖处附近一维电场分布, 如图 10 所示, 空间最大电场幅值为 1 795 kV/m。

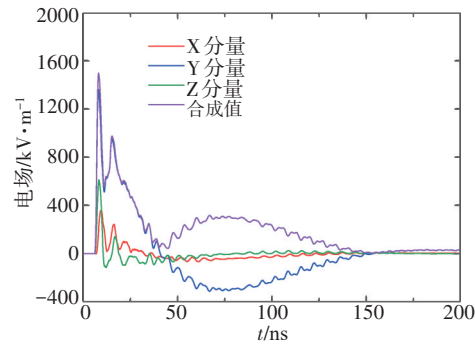


图 8 头部中心点处电场时域波形
Figure 8 Time domain waveform of electric field at the center point of the head

3.3 能量沉积特征

对电磁脉冲作用下头部空间的能量吸收值进行仿真计算, 得到一次脉冲作用下各主要组织的能量吸收值, 如图 11 所示。进一步地, 对一次脉冲下能量的吸收率 (Specific Absorption, SA)^[23]进行计算。其中, 吸收率可定义为单位质量下吸收的能量:

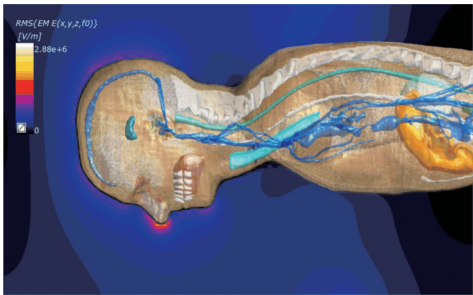


图9 头部附近电场二维分布

Figure 9 Two-dimensional distribution of electric field near the head

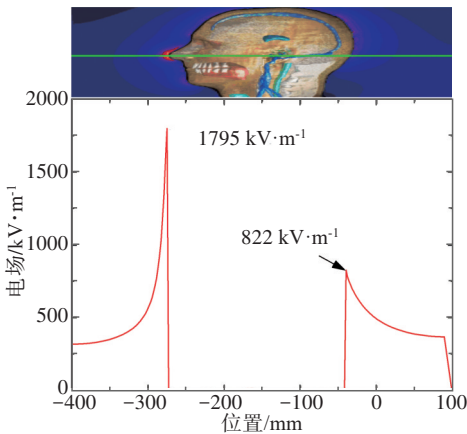


图10 头部附近电场一维分布

Figure 10 One-dimensional distribution of electric field near the head

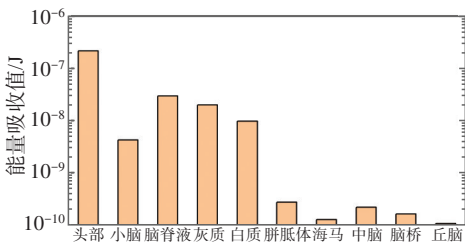


图11 头部主要组织的能量吸收值

Figure 11 Energy absorption of the main tissues in the head

$$SA = \frac{dW}{dm}$$

(5)

式中,SA为吸收率(单位:J/kg),W为吸收的能量值(单位:J),m为质量(单位:kg)。

图12给出了头部空间主要组织的吸收率值信息。头部空间的平均吸收率为 4.16×10^{-8} J/kg。在主要的脑组织中,脑脊液的吸收率最大,为 1.23×10^{-7} J/kg;其余组织的吸收率均低于头部空间的平均吸收率值。

3.4 电磁健康标准比对

在生物电磁标准中,比吸收率(Specific Absorption Rate, SAR)是判断电磁暴露安全的标准

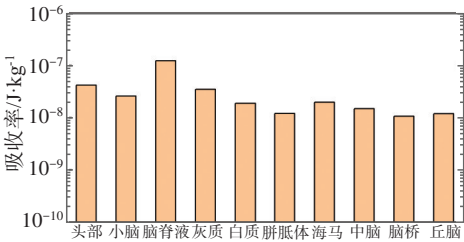


图12 头部主要组织的吸收率

Figure 12 Absorption rate of the main tissues in the head

值。依据电磁脉冲的特征,比吸收率^[23]可由下式表达:

$$SAR = \frac{n}{t} \cdot SA = PR \cdot SA$$

(6)

式中,SAR为比吸收率(单位:W/kg),n为脉冲个数,t为暴露的整体时间(单位:s),PR为脉冲重复频率(单位:s⁻¹),SA为一次脉冲下的能量吸收率(单位:J/kg)。

由于大功率半导体开关性能的限制,本次研究中电磁脉冲装置的最大脉冲重复频率为1 000 s⁻¹。经估算,头部空间的平均比吸收率为 4.16×10^{-5} W/kg。对于公众而言,比吸收率的限制值为0.08 W/kg。因此,由于重复频率限制,比吸收率值远低于公众的人体安全限制。

4 结 论

目前电磁脉冲引起血脑屏障开放的机制正在探究过程中,而在技术路线可行性研究方面一直缺少系统性研究^[24-25]。从生物电磁剂量学角度分析,首要问题是阐明电磁脉冲暴露条件下人体脑部的剂量学规律^[16],但相关研究鲜有文献报道。本研究基于典型暴露平台对人体脑部的剂量学规律进行初步挖掘,利用三维数字化人体模型并结合电磁仿真方法对生物电磁剂量学进行仿真评估。

对基于有界波模拟器的暴露平台进行分析,其阻抗、电场激励和电场均匀性等特性均满足人体实验的要求。在幅值90 kV、脉宽65 ns、上升沿20 ns的脉冲高压下对人体暴露进行仿真。电场的评估表明,头部中心的电场峰值为1.49 kV/m,与激励电场相比衰减41.6 dB;体内能量沉积的评估表明,一次脉冲下头部空间的平均吸收率为 4.16×10^{-8} J/kg;此外,本研究还给出头部主要组织的吸收率数据(图12)。在临床应用的量效评估方面,可以结合本研究的剂量结果和动物实验的“剂量-效应”数据^[14, 19, 25]进行对比,进一步评估电磁脉冲引起人体血脑屏障开放技术的临床可行性。

电磁安全性也是临床应用评估的重要因素。尽管第3.4节中电磁健康标准评估表明,比吸收率值远

低于公众的人体安全限制。但空间电场仿真分析发现,在高压电场脉冲激励下,人体鼻尖因几何结构的凸起,产生明显的场增强现象。在大鼠实验中,常见的暴露电场峰值为50~400 kV/m^[19]。在本次研究中,暴露电场峰值180 kV/m条件下,局部场强为1 795 kV/m,到达MV/m级别。根据纳秒脉冲气体的放电实验研究结果,在高强度场强下存在边缘电晕放电现象和高压击穿问题^[26-27],可能将高压脉冲能量以电击穿的形式传递至暴露人体^[28],对人体造成损伤。因此,局部高强度电场是临床应用中重要的安全隐患,在下一步研究中,需要结合血脑屏障开放的量效关系研究抑制局部高强度电场的手段。

【参考文献】

- [1] Vijay KS, Ritika S. Drug delivery through blood brain barrier: taming the bottleneck in CNS therapeutics[J]. *Int J Med Sci*, 2018, 7(2): 1653-1656.
- [2] Rodriguez A, Tatter SB, Debinski W. Neurosurgical techniques for disruption of the blood-brain barrier for glioblastoma treatment[J]. *Pharmaceutics*, 2015, 7(3): 175-187.
- [3] 王伯松, 郭安臣, 王群. 体外血脑屏障模型的研究进展及其在新药研发中的作用[J]. *中国医药指南*, 2019, 17(14): 54-58.
Wang BS, Guo AC, Wang Q. The development of the BBB model in vitro and its effect on drug discovery[J]. *Guide of China Medicine*, 2019, 17(14): 54-58.
- [4] 程刚, 郑金红, 李国臣, 等. 药物血脑屏障通透性体外模型及评价方法的研究进展[J]. *中国现代药物应用*, 2022, 16(11): 178-183.
Cheng G, Zheng JH, Li GC, et al. Research advances in vitro model and evaluation methods of blood-brain barrier drug permeation[J]. *Chinese Journal of Modern Drug Application*, 2022, 16(11): 178-183.
- [5] 罗凯旋, 林爱金, 陈莱弦, 等. 聚焦超声消融及开放血脑屏障治疗脑部疾病的研究进展[J]. *临床超声医学杂志*, 2020, 22(6): 448-451.
Luo KX, Lin AJ, Chen MX, et al. Research progress of focused ultrasound thermal ablation and focused ultrasound induced opening of the blood-brain barrier in the treatment of cerebral diseases[J]. *Journal of Clinical Ultrasound in Medicine*, 2020, 22(6): 448-451.
- [6] 高旅, 尚菁, 史正刚, 等. 基于血脑屏障的药物转运体研究进展[J]. *山西医药杂志*, 2020, 49(4): 412-414.
Gao L, Shang J, Shi ZG, et al. Research progress on drug transporters based on blood-brain barrier[J]. *Shanxi Medical Journal*, 2020, 49(4): 412-414.
- [7] 刘静, 解辉. 血脑屏障开放方法的研究进展[J]. *沈阳医学院学报*, 2019, 21(2): 175-179.
Liu J, Xie H. Advances in research on methods of blood-brain barrier opening[J]. *Journal of Shenyang Medical College*, 2019, 21(2): 175-179.
- [8] Qiu LB, Zhou Y, Wang Q, et al. Synthetic gelatinases inhibitor attenuates electromagnetic pulse-induced blood-brain barrier disruption by inhibiting gelatinases-mediated ZO-1 degradation in rats[J]. *Toxicology*, 2011, 285(1-2): 31-38.
- [9] 邱联波, 丁桂荣, 谭娟, 等. 电磁脉冲致大鼠血脑屏障通透性增加过程中actin的作用[J]. *中华疾病控制杂志*, 2010, 14(6): 520-523.
Qiu LB, Ding GR, Tan J, et al. The role of actin in the electromagnetic pulse induced blood-brain barrier opening[J]. *Chinese Journal of Disease Control & Prevention*, 2010, 14(6): 520-523.
- [10] Qiu L, Ding G, Li K, et al. The role of protein kinase C in the opening of blood-brain barrier induced by electromagnetic pulse[J]. *Toxicology*, 2010, 273(1): 29-34.
- [11] Gao P, Chen Q, Hu J, et al. Effect of ultra-wide-band electromagnetic pulses on blood-brain barrier permeability in rats[J]. *Mol Med Rep*, 2020, 22(4): 2775-2782.
- [12] Li HJ, Guo LM, Yang LL, et al. Electromagnetic-pulse-induced activation of p38 MAPK pathway and disruption of blood-retinal barrier[J]. *Toxicol Lett*, 2013, 220(1): 35-43.
- [13] Li CS, Yang L, Li CH, et al. Dosimetric variability of the rats' exposure to electromagnetic pulses[J]. *Electromagn Biol Med*, 2015, 34(1/4): 334-343.
- [14] 陈琴. 不同参数电磁脉冲和脉冲磁场对大鼠血脑屏障通透性影响[D]. 西安: 空军军医大学, 2019.
Chen Q. Effects of EMP and PMF with different parameters on BBB permeability in rats[D]. Xi'an: Air Force Military Medical University, 2019.
- [15] 赵逸彬, 陈媛媛, 张江松, 等. 不同频率疏密波电针对脑缺血再灌注恢复期大鼠血脑屏障开放的影响[J]. *中华中医药杂志*, 2019, 34(8): 3422-3426.
Zhao YB, Chen YY, Zhang JS, et al. Effects of different frequency of the electro-acupuncture on the opening of the blood-brain barrier of cerebral ischemia-reperfusion recovery rats[J]. *China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy*, 2019, 34(8): 3422-3426.
- [16] Stam R. Electromagnetic fields and the blood-brain barrier[J]. *Brain Res Rev*, 2010, 65(1): 80-97.
- [17] 许迎新. 医疗设备电气安全特性的测试与评价[J]. *中国医疗设备*, 2010, 25(1): 53-54.
Xu YX. Electrical safety testing and evaluation in medical equipment[J]. *Journal Press of China Medical Devices*, 2010, 25(1): 53-54.
- [18] Li K, Zhang K, Xu S, et al. EMP-induced BBB-disruption enhances drug delivery to glioma and increases treatment efficacy in rats[J]. *Bioelectromagnetics*, 2018, 39(1): 60-67.
- [19] 高鹏. 不同参数电磁辐射对血脑屏障通透性的影响[D]. 西安: 空军军医大学, 2017.
Gao P. Effects of electromagnetic radiation with different parameters on the permeability of blood brain barrier[D]. Xi'an: Air Force Military Medical University, 2019.
- [20] 林加金. 平板PFN-层叠Blumlein型长脉冲发生器的关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
Lin JJ. Study on key technologies of plate PFN and stacked Blumleins based long-pulse power generator[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2014.
- [21] 谢霖霖, 吴伟, 朱湘琴. 分布式负载垂直极化有界波电磁脉冲模拟器外泄场的规律分析[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(5): 98-107.
Xie LS, Wu W, Zhu XQ. Regularity analysis of leakage-field from vertically polarized bounded wave electromagnetic pulse simulator with distributed load[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(5): 98-107.
- [22] 陈传好, 吴志平. ISO 10605: 2008+A1: 2014 with IEC 61000-4-2: 2008标准差异研究及应用[J]. *环境技术*, 2020, 38(2): 214-218.
Chen CH, Wu ZP. Analysis and application of differences between ISO 10605: 2008+A1: 2014 and IEC 61000-4-2: 2008[J]. *Environmental Technology*, 2020, 38(2): 214-218.
- [23] 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.
- [24] 丁桂荣, 邱联波, 王晓武, 等. 紧密连接蛋白ZO-1参与电磁脉冲诱导的大鼠血脑屏障通透性增加[J]. *生物物理学报*, 2009, 25(S1): 449-450.
Ding GR, Qiu LB, Wang XW, et al. Tight-junction protein ZO-1 participates in the increase of blood-brain barrier permeability induced by electromagnetic pulse in rats[J]. *Chinese Journal of Biophysics*, 2009, 25(S1): 449-450.
- [25] 高蒙. 电磁脉冲参量与大鼠血脑屏障通透性的规律研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2022.
Gao M. Study on electromagnetic pulse parameters and blood-brain barrier permeability in rats[D]. Shanghai: East China Normal University, 2022.
- [26] 胡文, 李黎, 刘云龙, 等. 纳秒脉冲激励下大气压空气弥散放电电流特性的实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(16): 4263-4270.
Hu W, Li L, Liu YL, et al. Experimental study on current characteristics of nanosecond-pulse diffuse discharge in atmospheric pressure air[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2015, 35(16): 4263-4270.
- [27] 邵涛, 袁伟群, 孙广生, 等. 常压重频纳秒脉冲气体放电试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(8): 161-166.
Shao T, Yuan WQ, Sun GS, et al. Experimental study of repetitively nanosecond-pulse breakdown in atmospheric air[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(8): 161-166.
- [28] Barnes F, Greenebaum B. Biological and medical aspects of electromagnetic fields[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019: 439-453.

(编辑: 陈丽霞)