

静磁场生物效应的研究进展

李义伟, 王建国

湖南中医药大学中医学院, 湖南 长沙 410208

【摘要】静磁场与生物的相互作用是一个快速发展的研究领域,而静磁场作为一种物理因子,具有非侵入性的特点,可直接作用于生物体,但其对生物体的效应是双重的,既有潜在的治疗作用,亦有其危害性,而机制也有待研究和阐明。本综述从静磁场对氧化应激、生物体细胞、人体功能的影响及抑制肿瘤细胞的作用这4个方面阐述静磁场的生物效应,以提高磁场在医学中的应用价值。

【关键词】静磁场;生物效应;氧化应激;肿瘤;综述

【中图分类号】R312;Q64

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)11-1459-05

Current research progress on biological effects of static magnetic field

LI Yiwei, WANG Jianguo

College of Chinese Medicine, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, China

Abstract: The interaction between static magnetic field (SMF) and biology is a rapidly-developing research area. As a physical factor, static magnetic field is non-invasive and can act on the organism directly. However, its effects are two-fold, with both potential therapeutic effects and pernicious effects, and its mechanism remains to be studied and elucidated. This paper discusses the biological effects of static magnetic fields from the four aspects-the effects of static magnetic field on oxidative stress, biological cells, human body function and its inhibition to tumor cells, with an aim to improve the application value of magnetic field in medicine.

Keywords: static magnetic field; biological effect; oxidative stress; tumor; review

前言

磁场是一种特殊物质,无法用肉眼去感知,用身体去触碰,但却是客观存在的。如今的磁共振成像(MRI)、核磁共振(NMR)光谱以及基于磁悬浮的乘客运输系统等都让人们暴露于磁场的频率增加。磁场分为静磁场和动磁场,静磁场又称为恒磁场,其磁场强度和磁场方向保持不变,按强度大小可分为弱磁场($<1\text{ mT}$)、中磁场($1\text{ mT}\sim 1\text{ T}$)、强磁场($1\sim 5\text{ T}$)和超强磁场($>5\text{ T}$)。静磁场的生物学效应依赖于磁场的各个参数和特定的细胞,是其共同作用的结果。

1 静磁场对氧化应激的影响

氧化应激指机体在内外环境有害刺激条件下,体内产生活性氧自由基(Reactive Oxide Species, ROS)和活性氮自由基所引起的细胞和组织的生理和病理反应,可直接或间接氧化或损伤DNA、蛋白质和脂质,诱发基因的突变、蛋白质变性和脂质过氧化。将小鼠暴露于 1 mT 的静磁场中 50 d ,结果发现向上和向下的磁场皆可使突触体ATP酶、AChE酶、丙二醛(MDA)的浓度升高,而向下的磁场降低了过氧化氢酶的活性,但浓度未增加。MDA作为脂质过氧化作用的标志,提示静磁场促使并增强了小鼠突触体氧化应激反应^[1]。在运用静磁场两级对ROS的研究中,非均质静磁场在暴露 15 min 内可使中性粒细胞的ROS的产量下降,在暴露 45 min 时磁体两级产生的差异最明显,可能为抑制NADPH氧化酶所致,因其为ROS的主要来源^[2],该结果提示尽管静磁场的极在物理上相等,但应用于细胞的的不同可能导致其生物学结果不同。Wang等^[3]研究发现 0.26 T 和

【收稿日期】2020-06-05

【基金项目】湖南省教育厅科学研究项目(60011120)

【作者简介】李义伟,硕士研究生,研究方向:心血管疾病证本质及诊治规律, E-mail: 1249461176@qq.com

【通信作者】王建国,副教授,硕士生导师,研究方向:心血管疾病证本质及诊治规律, E-mail: 707973244@qq.com

0.50 T 的静磁场不会对细胞内腺嘌呤核苷三磷酸(ATP)水平产生任何影响,而对于未分化和分化的肾上腺癌PC12细胞、外周血癌MV4-11细胞、胃肠道间质癌GIST-T1细胞、中国仓鼠卵巢细胞系CHO、永生化的视网膜色素上皮RPE1细胞系,1 T静磁场会使细胞内ATP水平升高,而9 T静磁场则使其降低,同时还伴随基质金属蛋白酶(MMP)水平的降低,提示静磁场诱导的ATP水平变化明显取决于细胞类型、磁场强度和时间。

Amara等^[4]在心肌和骨骼肌的研究中发现联合运用静磁场(128 mT, 30 d)及镉可明显降低心肌中谷胱甘肽过氧化物酶(GPx)和超氧化物歧化酶(CuZn-SOD)、骨骼肌中过氧化氢酶(CAT)的活性,增加MDA的浓度,提示镉的添加显著改变了骨骼肌和心肌的抗氧化酶能力,并诱导了脂质过氧化,比单独暴露于静磁场或镉氧化应激损伤更明显。Amara等^[5]发现亚慢性暴露于静磁场可有效降低大鼠额叶皮层GPx、CuZn-SOD、CAT及海马体中CuZn-SOD、Mn-SOD的活性,且海马体对静磁场的敏感性高于额叶皮质,说明静磁场引起了脑部的氧化应激。Ghodbane等^[6]研究表明静磁场可引起肝脏中CAT的活性增加,并可通过补充硒和维生素E来恢复肝脏CAT活性,但不能最小化肝细胞凋亡;而在小鼠耳蜗中,静磁场会导致噪声暴露后耳蜗的ROS水平升高,同时加快抗氧化酶的活化^[7]。Kurzeja等^[8]发现在用氟离子培养的成纤维细胞中,静磁场(0.4、0.6、0.7 T)可减少由氟离子引起的氧化应激,并使抗氧化酶的活性正常化,同时改变成纤维细胞的能量状态,使细胞内ATP浓度增加、MDA浓度下降,提高细胞对氟离子诱导的氧化应激的耐受性;处于8.5 T静磁场中,暴露3 h后,细胞内的ATP含量降低,可能是由线粒体和DNA双链DNA断裂(Double Strand Breaks, DSB)修复过程介导^[9]。

氧化应激是一种最基本的保护机制,氧化和氧化的平衡是组织和细胞功能协调的基础。静磁场由于磁场强度、作用时间的不同,或者所研究细胞的差异,其结果未完全一致,但是总体来说,静磁场可引起氧化应激,造成脂质过氧化,影响细胞内ATP的浓度。

2 静磁场对细胞的影响

静磁场对细胞的生物学效应主要包括细胞增殖、细胞周期分布、细胞凋亡、细胞的遗传毒性等。

有研究表明6 mT静磁场可通过p53非依赖性途径诱导Jurkat细胞的凋亡,改变细胞周期,而其凋亡

过程的不平衡可能与 Ca^{2+} 通量有关,而 Ca^{2+} 通量取决于静磁场对细胞膜的影响^[10]。300 mT静磁场可抑制人正常结肠组织细胞IL-6的分泌,且暴露72 h后触发了细胞增殖,但并未改变细胞活力^[11]。不均匀静磁场对淋巴细胞有毒性作用,且抑制促炎性细胞因子IL-6、IL-8和TNF- α 的释放,协助抗炎细胞因子IL-10的产生^[12],说明一定强度的静磁场具有抗炎作用。20 mT静磁场使人间充质干细胞的增殖活性降低,其可能的机制为激活了 Na^+/K^+ 通道,提高了细胞外 Na^+/K^+ 浓度及渗透压^[13]。在人脐静脉内皮细胞(HUVEC)的研究中,暴露于5 mT静磁场,且在短时间内(8 h)可促进其增殖;若暴露于135 mT静磁场,作用时间过长(12 h或24 h)则会抑制其增殖,但磁场对HUVEC的凋亡没有影响^[14];暴露于300 mT静磁场4 h内对核和线粒体水平均造成损害,线粒体含量减少,活性氧增加,在暴露48 h及72 h后,未出现明显改变,表明300 mT不会对HUVEC引起永久性DNA损伤^[15]。128 mT静磁场无论方向朝上或朝下都会引起血清中白细胞和淋巴细胞总数、脾脏中粒细胞减少,肾脏发炎及高密度脂蛋白数量增加。就其特异性,向上的静磁场会导致脑水肿并增加脾细胞的流动性,向下的静磁场会致使肝脏炎症,降低血清粒细胞的数量,结果表明静磁场并非同等地影响整个身体系统^[16]。另有研究发现暴露于静磁场不仅会影响人胶质母细胞瘤的细胞大小、形状和方向,还会影响其膜表面^[17];而对于人皮肤成纤维细胞的氧化状态没有负面影响^[18]。

在对大鼠胚胎脊髓神经细胞的研究中,50~200 mT静磁场抑制细胞的分化与增殖,降低超氧化物歧化酶(Super Oxide Dismutase, SOD)活力与蛋白质相对含量,增加MDA的浓度,致使发育期神经系统损伤,可能的机制为脂质过氧化的激活^[19];对于成骨细胞,8、50 mT组的钙离子浓度降低率与加载时间成反比,而160 mT组的钙离子浓度降低率与加载时间成正比,其原因可能是负反馈调节能力有限或尚未完全激发^[20]。周翠红等^[21]研究表明一定强度的静磁场可促进大鼠骨髓间充质干细胞的增殖活力,使其增殖速度与增殖指数提高,降低 G_0/G_1 期的细胞比例,其机制可能为加速细胞周期,降低静息期细胞的比例。施万细胞暴露于0.05 mT静磁场中无任何改变,而在0.1 mT的弱恒磁场增殖明显提高,当磁场强度大于0.15 mT时,其增殖受到抑制^[22];骨骼肌细胞在180、280 mT的静磁场环境中增殖明显,形态正常,处于360 mT静磁场中,暴露36 h内增殖更为显著,但至60 h时部分细胞坏死,且细胞形态发生改变^[23]。

磁场对于细胞的作用具有明显的磁场强度依赖性,或者不同的细胞类型对于磁场强度的敏感度亦不同,甚至磁场的方向都具有特异性。探索磁场强度与细胞作用的最大值,开辟磁场在医学科研中的运用是今后的一个发展方向。

3 静磁场抑癌作用的研究

癌症是不可逆的,只能通过放化疗或者药物靶向治疗来抑制肿瘤的生长,控制病情的发展,减轻病人的痛苦。磁场和化疗药物的联合应用可提高治疗效果,减少药物剂量,从而减少副作用,提高患者的生存质量。在12种不同细胞系的研究中,0.2~1.0 T的向上磁场可有效减少人类胃肠道间质癌细胞系(GIST-T1)、人类肺癌细胞系(PC9)、人类肺癌细胞系(A549)、人类结肠癌细胞(HCT116)、人类乳腺癌细胞(MCF7)的数量,且可抑制裸鼠中的GIST-T1肿瘤生长,但向下的磁场无明显作用^[24]。低频磁场(LF-MF)可增加黑色素瘤转移小鼠模型的小鼠存活率并抑制B16-F10的增殖,还可调节免疫细胞和细胞因子的产生,从而调节免疫反应,改善黑色素瘤小鼠的免疫功能^[25]。Zhang等^[26]研究表明1 T静磁场对细胞周期或细胞死亡没有明显影响,而在更高的细胞密度下,可有效减少鼻咽癌细胞(CNE-2Z)、结肠癌细胞(HCT116)、皮肤癌细胞(A431)、肺癌细胞(A549)、乳腺癌细胞(MCF7)以及前列腺癌PC3细胞的数量,可能的机制为EGFR-Akt-mTOR途径的激活;Zhang等^[27]还发现1 T静磁场可以提高mTOR抑制剂Torin2的抗肿瘤功效,抑制鼻咽癌CNE-2Z细胞的增殖,抑制mTOR抑制剂诱导的EGFR和Akt反馈再激活。对于人类早幼粒细胞白血病细胞(K562),阿霉素和紫杉醇皆为常用化学治疗剂,而联合静磁场可增强化疗药物对细胞的毒性作用,较单用疗效更佳,静磁场可使细胞停滞在G2/M期,导致DNA损伤,这可能由P-gp表达的下降或细胞通透性的改变引起^[28-29];0.25、0.3 T静磁场可控制K562细胞的生长,降低细胞增殖活力,诱导细胞分化,破坏其细胞膜结构,从而抑制原癌基因的表达^[30];而在8.8 T静磁场中,随着暴露时间延长,K562细胞DNA损伤加剧,其原因为DNA解链断裂-交联和断裂并存的损伤模式^[31]。胡丽芳等^[32]发现0.2~0.4 T静磁场可能通过改变细胞周期抑制人白血病细胞JurkatcloneE6-1和小鼠白血病细胞L1210的增殖;同时该磁场强度促进乳腺癌细胞MCF-7的生长,减缓肝癌细胞HepG2的生长;对于细胞的黏附能力,SMMC-7721细胞黏附增加,乳腺癌细胞MCF-7黏附降低(SMMC-7721细胞的黏附能力受到抑制,而乳腺癌细胞MCF-7的黏附能力增加)^[33]。

静磁场的抑癌作用分为两个方面:(1)直接作用于癌细胞。应考虑磁场强度、暴露时间和肿瘤细胞的特异性,从而提高磁场抑癌作用的敏感性与准确性。(2)与化疗药物相结合。如何联合静磁场减少药物的剂量,又更好地发挥药物的功效是需要深入研究的一个方向。

4 其他研究

除了对于细胞的研究,还有一些针对高血压模型大鼠、心脏功能或者实质器官的发现。如亚慢性暴露于1 mT的磁场环境中会使肝脏中的锌、铜含量降低,而大脑中的锌含量增加、铜含量减少,在脾脏中的锌含量减少、铜含量保持不变,其结果可能归因于静磁场的保护作用^[34];暴露于128 mT静磁场连续15 d会导致肝脏重量、胰岛素浓度、血浆乳酸盐水平降低,葡萄糖、胆固醇、磷脂水平增加,其结果提示静磁场对葡萄糖和脂质代谢具有时间依赖性^[35];暴露于600 mT静磁场连续7 d会降低外周血淋巴细胞百分率、血小板数目及血清代谢酶AST、LDH、CKMB的水平,使血浆氨基酸和单胺类递质代谢紊乱^[36]。在对心脏功能的研究中,0.09 T的静磁场能降低大鼠心肌梗死面积,减少MDA、cAMP、cGMP的浓度及ST段偏移的水平、T波倒置率,同时增加Mg²⁺及ATP的浓度,其机制可能为抑制脂质过氧化进程而保护心肌^[37-38];雷红玮等^[39]采用高能磁场(8~10 T)刺激蟾蜍心脏,结果发现心脏收缩的强度增加,使衰弱的心脏恢复节律性的心房与心室交替收缩,还可使心肌细胞的电生理活性得到改变;但徐新萍等^[40]研究表明600 mT静磁场会导致心肌细胞变性坏死,心脏血管扩张、淤血,并有血浆蛋白及红细胞产生,提示磁场使心脏功能和结构损伤,并随着时间推移加重。

对于高血压模型动物,0.1~0.2 T静磁场对家兔具有降压作用,可归因于对中枢神经系统的抑制,并降低了全血黏度^[41];180 mT静磁场可明显降低自发性高血压大鼠的血压值及血流变高切、血浆粘度,在一定程度上抑制高血压引起的中风、脑水肿^[42]。姜淑卿等^[43]发现暴露于180、220 mT静磁场6个月对大鼠无任何毒副作用;同样180 mT静磁场使中老年小鼠的生存质量提高,延缓其体重的减轻,控制其食量,改善其精神及毛发状况,提示磁场可能延缓衰老及延长寿命^[44]。

磁场可双向调节心脏功能,既可抑制脂质过氧化,保护心肌,恢复心脏的收缩,也可造成心脏的损伤,具体取决于磁场强度;而对于血浆的各项成分,由于其特异性亦会产生不同的结果。由此说明,磁场并非同等地影响整个身体功能。

5 小结

磁场的生物效应是多重的,对于氧化应激效应、细胞增殖,既可抑制也可激活、触发;而对于癌细胞,基本上可减少细胞数量,降低其细胞活力,辅助化疗药,提高临床治疗效果。磁场的作用原理为产生感应电流,引起体内离子分布、移动,改变膜电位,从而改变细胞膜的通透性,对细胞产生影响;也可刺激神经末梢,从而调节神经功能。但是磁场效应的研究还存在以下几个问题:(1)如何精确地划分磁场强度,尽管已将静磁场分为5级,但是跨度太大,实验结果相差悬殊;(2)如何有效地结合磁场强度和暴露时间,减少实验误差;(3)对于细胞类型,应运用多种磁场强度探讨磁场的作用,挖掘最具有敏感性的值,以提供更加精确统一的结果;(4)磁场的抗癌作用对于化疗药物来说是联合还是协同,一定强度的磁场是否会对人体产生影响,又是否能减轻药物的副作用是医学伦理的基本要求。磁场具有治疗作用,但是其不良反应依旧存在,如何更好地运用于临床,还需要不断重复研究,从而建立磁场的运用模式。

【参考文献】

- [1] DINČIĆ M, KRSTIĆ D Z, ČOLOVIĆ M B, et al. Modulation of rat synaptosomal ATPases and acetylcholinesterase activities induced by chronic exposure to the static magnetic field[J]. *Int J Radiat Biol*, 2018, 94(11): 1062-1071.
- [2] PONIEDZIAŁEK B, RZYMSKI P, KARCZEWSKI J, et al. Reactive oxygen species (ROS) production in human peripheral blood neutrophils exposed *in vitro* to static magnetic field[J]. *Electromagn Biol Med*, 2013, 32(4): 560-568.
- [3] WANG D M, WANG Z, ZHANG L, et al. Cellular ATP levels are affected by moderate and strong static magnetic fields [J]. *Bioelectromagnetics*, 2018, 39(5): 352-360.
- [4] AMARA S, GARREL C, FAVIER A, et al. Effect of static magnetic field and/or cadmium in the antioxidant enzymes activity in rat heart and skeletal muscle[J]. *Gen Physiol Biophys*, 2009, 28(4): 414-419.
- [5] AMARA S, DOUKI T, GAREL C, et al. Effects of static magnetic field exposure on antioxidative enzymes activity and DNA in rat brain[J]. *Gen Physiol Biophys*, 2009, 28(3): 260-265.
- [6] GHODBANE S, AMMARI M, LAHBIB A, et al. Static magnetic field exposure-induced oxidative response and caspase-independent apoptosis in rat liver: effect of selenium and vitamin E supplementations[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2015, 22(20): 16060-16066.
- [7] POLITAŃSKI P, RAJKOWSKA E, PAWLACZYK-ŁUSZCZYŃSKA M, et al. Static magnetic field affects oxidative stress in mouse cochlea [J]. *Int J Occup Med Environ Health*, 2010, 23(4): 377-384.
- [8] KURZEJA E, SYNOWIEC-WOJTAROWICZ A, STEC M, et al. Effect of a static magnetic fields and fluoride ions on the antioxidant defense system of mice fibroblasts[J]. *Int J Mol Sci*, 2013, 14(7): 15017-15028.
- [9] ZHAO G, CHEN S, WANG L, et al. Cellular ATP content was decreased by a homogeneous 8.5 T static magnetic field exposure: role of reactive oxygen species [J]. *Bioelectromagnetics*, 2011, 32(2): 94-101.
- [10] AHMADIANPOUR M R, ABDOLMALEKI P, MOWLA S J, et al. Static magnetic field of 6 mT induces apoptosis and alters cell cycle in p53 mutant Jurkat cells[J]. *Electromagn Biol Med*, 2013, 32(1): 9-19.
- [11] GRUCHLIK A, WILCZOK A, CHODUREK E, et al. Effects of 300 mT static magnetic field on IL-6 secretion in normal human colon myofibroblasts[J]. *Acta Pol Pharm*, 2012, 69(6): 1320-1324.
- [12] VERGALLO C, DINI L, SZAMOSVÖLGYI Z, et al. *In vitro* analysis of the anti-inflammatory effect of inhomogeneous static magnetic field-exposure on human macrophages and lymphocytes[J]. *PLoS One*, 2013, 8(8): e72374.
- [13] DU L L, FAN H Y, MIAO H S, et al. Extremely low frequency magnetic fields inhibit adipogenesis of human mesenchymal stem cells [J]. *Bioelectromagnetics*, 2014, 35(7): 519-530.
- [14] 张杰, 陆洪英, 金成文, 等. 恒磁场对人脐静脉内皮细胞增殖、凋亡及分泌功能的影响[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2011, 33(10): 742-745.
ZHANG J, LU H Y, JING C W, et al. Effects of a static magnetic field on proliferation, apoptosis and secretion in human umbilical cord endothelial cells [J]. *Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2011, 33(10): 742-745.
- [15] POTENZA L, MARTINELLI C, POLIDORI E, et al. Effects of a 300 mT static magnetic field on human umbilical vein endothelial cells[J]. *Bioelectromagnetics*, 2010, 31(8): 630-639.
- [16] MILOVANOVICH I D, ČIRKOVIĆ S, DE LUCA S R, et al. Homogeneous static magnetic field of different orientation induces biological changes in subacutely exposed mice[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, 23(2): 1584-1597.
- [17] TEODORI L, ALBERTINI M C, UGUCCIONI F, et al. Static magnetic fields affect cell size, shape, orientation, and membrane surface of human glioblastoma cells, as demonstrated by electron, optic, and atomic force microscopy[J]. *Cytometry A*, 2006, 69(2): 75-85.
- [18] PAWŁOWSKA-GÓRAL K, KIMSADUDEK M, SYNOWIEC-WOJTAROWICZ A, et al. Effect of static magnetic fields and phloretin on antioxidant defense system of human fibroblasts [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, 23(15): 14989-14996.
- [19] 端礼荣, 张志坚, 姜平, 等. 稳恒磁场对大鼠胚胎脊髓神经细胞影响 [J]. *中国公共卫生*, 2004, 20(7): 821-822.
DUAN L R, ZHANG Z J, JIANG P, et al. Effect of static magnetic field on fringe of rat embryonic spinal cord neurons [J]. *Chinese Journal of Public Health*, 2004, 20(7): 821-822.
- [20] 王胜国, 周力, 陈扬熙, 等. 不同强度静磁场对成骨细胞细胞内钙离子浓度的影响[J]. *第三军医大学学报*, 2010, 32(23): 2515-2518.
WANG S G, ZHOU L, CHEN Y X, et al. Effect of static magnetic field at different strengths on Ca^{2+} concentration in rat primarily cultured osteoblasts[J]. *Acta Academiae Medicinae Militaris Tertiae*, 2010, 32(23): 2515-2518.
- [21] 周翠红, 张小云, 张宇, 等. 不同强度静磁场间歇曝磁对骨髓间充质干细胞增殖及细胞周期的影响[J]. *中国骨质疏松杂志*, 2014(1): 105-109.
ZHOU C H, ZHANG X Y, ZHANG Y, et al. Effect of different intensity static magnetic field on cell proliferation and cell cycle by bone marrow mesenchymal stem cells [J]. *Chinese Journal of Osteoporosis*, 2014(1): 105-109.
- [22] 魏凌云, 王锐英, 唐际存. 磁场对大鼠施万细胞增殖的影响[J]. *广东医学*, 2015, 36(15): 2340-2342.
WEI L Y, WANG R Y, TANG J C. Effect of magnetic field on Schwann

- cells[J]. Guangdong Medical Journal, 2015, 36(15): 2340-2342.
- [23] 王丽艳,许艳华,林珠.静磁场作用下骨骼肌细胞形态学变化的研究[J].重庆医学,2012,41(4): 320-321.
WANG L Y, XU Y H, LIN Z. Study of morphological changes in rats maxillofacial skeletal muscle cells after exposed in static magnetic fields[J]. Chongqing Medicine, 2012, 41(4): 320-321.
- [24] TIAN X F, WANG D M, ZHA M, et al. Magnetic field direction differentially impacts the growth of different cell types [J]. Electromagn Biol Med, 2018, 37(2): 114-125.
- [25] NIE Y Z, DU L L, MOU Y B, et al. Effect of lowfrequency magnetic fields on melanoma: tumor inhibition and immune modulation[J]. BMC Cancer, 2013, 13: 582.
- [26] ZHANG L, JI X M, YANG X X, et al. Cell type- and density-dependent effect of 1 tstatic magnetic field on cell proliferation[J]. Oncotarget, 2017, 8(8): 13126-13141.
- [27] ZHANG L, YANG X X, LIU J J, et al. 1 T moderate intensity static magnetic field affects Akt/mTOR pathway and increases the antitumor efficacy of mTOR inhibitors in CNE-2Z cells[J]. Sci Bull, 2015, 60: 2120-2128.
- [28] QI H, CHEN W F, AI X, et al. Effects of amoderate-intensity static magnetic field and adriamycin on K562 cells[J]. Bioelectromagnetics, 2011, 32(3): 191-199.
- [29] SUN R G, CHEN W F, QI H, et al. Biologic effects of SMF and paclitaxel on K562 human leukemia cells [J]. Gen Physiol Biophys, 2012, 31(1): 1-10.
- [30] 宋国丽,苏海静,张小云,等.不同强度的静磁场对K562细胞的作用[J].中国康复医学杂志,2009,24(3): 204-207.
SONG G L, SU H J, ZHANG X Y, et al. Effects of static magnetic fields of different intensities on K562 leukemia cells[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2009, 24(3): 204-207.
- [31] 张坤,陈文芳,宋发奎,等.静磁场对入白血病细胞K562 DNA的损伤模式研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(12): 155-161.
ZHANG K, CHEN W F, SONG F K, et al. Damaging mode of human leukemia cell K562 DNA by static magnetic field[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(12): 155-161.
- [32] 胡丽芳,骞爱荣,杨鹏飞,等.中等强度静磁场对白血病细胞增殖和细胞周期的影响[J].第四军医大学学报,2009,30(5): 397-400.
HU L F, QIAN A R, YANG P F, et al. Effects of moderate static magnetic field on cell proliferation and cell cycle of leukemia cells[J]. Journal of the Fourth Military Medical University, 2009, 30(5): 397-400.
- [33] 曹建平,骞爱荣,张维,等.0.2-0.4T静磁场对肿瘤细胞生长和黏附功能的影响[J].世界华人消化杂志,2010,18(13): 1337-1343.
CAO J P, QIAN A R, ZHANG W, et al. Effects of exposure to static magnetic fields (0.2-0.4 T) on the growth and adhesion of tumor cells [J]. World Chinese Journal of Digestology, 2010, 18(13): 1337-1343.
- [34] DE LUCA S R, ILIĆ A Ž, JANKOVIĆ S, et al. Subchronic exposure to static magnetic field differently affects zinc and copper content in murine organs[J]. Int J Radiat Biol, 2016, 92(3): 140-147.
- [35] LAHBIB A, ELFERCHICHI M, GHODBANE S, et al. Time-dependent effects of exposure to static magnetic field on glucose and lipid metabolism in rat[J]. Gen Physiol Biophys, 2010, 29(4): 390-395.
- [36] 赵黎,彭瑞云,高亚兵,等.静磁场辐射对大鼠外周血细胞、血清代谢酶和血浆递质的影响[J].军事医学,2011,35(5): 382-385.
ZHAO L, PENG R Y, GAO Y B, et al. Effects of the static magnetic field on rats' peripheral blood, serum metabolic enzyme and blood plasma transmitter [J]. Military Medical Sciences, 2011, 35(5): 382-385.
- [37] 赵锐,赵不非,易绍林,等.磁场对急性心肌梗死大鼠心肌的保护作用[J].中华物理医学与康复杂志,2006,28(11): 730-733.
ZHAO R, ZHAO B F, YI S L, et al. The protective effects of a magnetic field in acute myocardial infarction[J]. Chinese Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 2006, 28(11): 730-733.
- [38] 赵锐,杨桂珠,王海鹏,等.动物实验性急性心肌梗死大鼠在磁场作用下心肌的病理改变[J].中国地方病防治杂志,2007,22(3): 215-217.
ZHAO R, YANG G Z, WANG H P, et al. Myocardium of pathological alter in magnetic field for experimental AMI myocardium rats[J]. Chinese Journal of Control of Endemic Disenaces, 2007, 22(3): 215-217.
- [39] 雷红玮,王旭.高能磁场刺激对蟾蜍心脏搏动影响的生物学研究[J].生命科学仪器,2007,5(8): 14-18.
LEI H W, WANG X. Biological effects of the magnetic stimulation on the toad heart[J]. Life Science Instrument, 2007, 5(8): 14-18.
- [40] 徐新萍,李杨,王少霞,等.静磁场辐射对大鼠心脏功能和结构的影响研究[J].军事医学,2011,35(5): 379-381.
XU X P, LI Y, WANG S X, et al. Effects of static magnetic field radiation on the structure and function of rats' hearts [J]. Military Medical Sciences, 2011, 35(5): 379-381.
- [41] 唐文春,徐晚波,安继红,等.磁场对家兔急性实验性高血压的影响[J].郑州大学学报(医学版),2002,37(4): 486-488.
TANG W C, XU X B, AN J H, et al. Influence of magnetic field on acute experimental hypertension in rabbits[J]. Journal of Zhengzhou University (Medical Sciences), 2002, 37(4): 486-488.
- [42] 方志财,竹剑平,杨锋,等.静磁场对预防自发性高血压(SHR)大鼠中风的影响[J].中国医药科学,2016,6(23): 28-32.
FANG Z C, ZHU J P, YANG F, et al. Effect of static magnetic field in prevention of spontaneously hypertensive (SHR) rats [J]. China Medicine and Pharmacy, 2016, 6(23): 28-32.
- [43] 姜淑卿,张静姝,何宁,等.磁场对大鼠亚慢性毒性的研究[J].中华劳动卫生职业病杂志,2012,30(10): 776-777.
JIANG S Q, ZHANG J S, HE N, et al. Study on subchronic toxicity of magnetic field in rats[J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2012, 30(10): 776-777.
- [44] 廖钟财,竹剑平,方志财,等.静磁场对中老年小鼠生存期的影响分析[J].医药前沿,2019,9(1): 164-165.
LIAO Z C, ZHU J P, FANG Z C, et al. Effect of static magnetic field on survival of middle-aged and elderly mice[J]. Journal of Frontiers of Medicine, 2019, 9(1): 164-165.

(编辑:薛泽玲)