

doi: 10.13241/j.cnki.pmb.2017.28.002

1840MHz 电磁辐射对雄性 SD 大鼠性激素的影响 及其抗氧化损伤作用研究 *

袁 梦¹ 林艳云² 郭奇彦² 高 鹏² 苗 霞²
郎海洋² 张锦鹏³ 袁堉琨¹ 刘军叶^{2Δ} 曾丽华^{2Δ}

(1 第四军医大学军事预防医学系本科学员 陕西 西安 710032;

2 第四军医大学军事预防医学系放射医学教研室 陕西 西安 710032; 3 第四军医大学临床医学专业本科学员 陕西 西安 710032)

摘要 目的:探讨 1840MHz 电磁辐射对雄性 SD 大鼠性激素分泌的影响及其抗氧化损伤作用。**方法:**将 48 只成年雄性 SD 大鼠按体质量随机分为 8 组,即 2 组假辐照组和 6 组辐照组,辐照组给予频率为 1840MHz,比吸收率(SAR)分别为 0.2、0.5、1.5 W/kg 的电磁辐射,连续辐照 1 周或 3 周(5 d/周,30 min/d)。辐照后立即麻醉 SD 大鼠并进行心脏采血,分离血清,采用放射免疫法测量血清中卵泡刺激素(FSH)、生长激素(GH)、促性腺激素释放激素(GnRH)、黄体生成素(LH)、睾酮(T)的浓度。睾丸组织称重并给予多聚甲醛固定,石蜡包埋切片后采用苏木精-伊红(HE)染色,用显微镜观察睾丸组织形态结构,采用免疫组织化学法观测睾丸组织内热休克蛋白 70(HSP70)和 DNA 氧化损伤的标志物 8-OHdG 的分布及表达情况。**结果:**与对照组相比,辐照组大鼠睾丸组织结构无显著损伤,但是经比吸收率为 0.2 W/Kg 和 0.5 W/Kg 的电磁辐射辐照 3 周(5 d/周,30 min/d)后,辐照组 FSH, GnRH, LH 水平降低,差异具有统计学意义($p < 0.05$),睾丸组织中 HSP70 和 8-OHdG 的表达无明显改变。**结论:**1840MHz 电磁辐射对雄性 SD 大鼠睾丸的形态结构无明显影响,而睾丸的部分生殖内分泌功能改变,没有引起大鼠睾丸组织明显的氧化应激损伤。

关键词:1840MHz 电磁辐射;SD 大鼠;睾丸;抗氧化损伤

中图分类号:Q64;Q492.4;R-33 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2017)28-5406-06

Effects of 1840 MHz Radiation-frequency Electromagnetic Radiation on the Sex Hormone Secretion of Male SD Rats and Its Anti-oxidative Damage Effect*

YUAN Meng¹, LIN Yan-yun², GUO Qi-yan², GAO Peng²,

MIAO Xia², LANG Hai-yang², ZHANG Jin-peng³, YUAN Yu-kun¹, LIU Jun-ye^{2Δ}, ZENG Li-hua^{2Δ}

(1 School of Public Health, Fourth Military Medical University, Xi'an, Shaanxi, 710032, China;

2 Department of Radiation Medicine, Fourth Military Medical University, Xi'an, Shaanxi, 710032, China

3 Clinical Medicine Specialty, Fourth Military Medical University, Xi'an, Shaanxi, 710032, China)

ABSTRACT Objective: To investigate the effects of 1840 MHz radiation-frequency electromagnetic radiation on the sex hormone secretion and anti-oxidative damage of male SD rats. **Methods:** 48 SD rats were divided into eight groups: two sham exposure groups (control group) and six exposure groups. The exposure groups were exposed to 1840MHz, with SAR (Specific absorption rate) of 0.2, 0.5, 1.5 W/kg, for 3 or 5 weeks of 5 d/week and 30 min/d. The SD rats were anesthetized and put to execution after exposure immediately. Testis and blood of heart were collected and the testis was fixed by paraformaldehyde. Hematoxylin-eosin (HE) staining combined with microscope to observe the morphology of left testicular tissue. The right testis were stained in immunocytochemistry to observe the distribution of heat shock protein 70 (HSP70) and 8-OHdG which is a kind of DNA oxidative damage marker. Radioimmunoassay was used to detect in the concentration of FSH, GH, GnRH, LH and Testosterone. **Results:** Compared with the control group, the morphology and the distribution of HSP70 and 8-OHdG in testicular tissue didn't have any extremely difference in every exposure group. But after radiation of 1840MHz, with SAR of 0.2, 0.5 W/kg for 3 weeks of 5 d/week and 30 min/d, the levels of FSH, GnRH and LH in the irradiated group were lower than those in control group and the difference was statistically significant ($p < 0.05$). **Conclusions:** After the exposure of 1840 MHz radiation, the morphology change of testis didn't induced, but the reproductive endocrine function of testis changed a lot to some content, while it couldn't induce the oxidative damage of testis.

* 基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB503704);国家自然科学基金项目(51677189,51437008);

陕西省自然科学基金项目(2015JM8454)

作者简介:袁梦(1996-),男,目前就读于第四军医大学,预防医学专业,E-mail: 2802052029@qq.com

Δ 通讯作者:曾丽华,博士,副教授,E-mail: zengzou@fmmu.edu.cn;刘军叶,博士,教授,E-mail: junyeliu@fmmu.edu.cn,

电话:13571942595

(收稿日期:2017-03-31 接受日期:2017-04-26)

Key words: 1840 MHz radiation-frequency electromagnetic radiation; SD rat; Testicle; Anti-oxidative damage

Chinese Library Classification (CLC): Q64; Q492.4; R-33 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2017)28-5406-06

前言

随着无线网络技术的蓬勃发展,日常接触的电子产品在我们的生活带来便利的同时,也产生了电磁辐射^[1]。智能电子设备、移动基站、Wi-Fi 路由器等日常接触的辐射源是否会对机体健康造成影响成为人们关注的焦点^[2-4]。生殖系统是电磁辐射的重要的敏感器官之一,常被作为观测电磁辐射效果的靶器官^[5]。暴露于电磁辐射可能导致精子数目减少,精子活动度下降,顶体酶反应受抑制,血清 GSH 水平降低,睾丸间质细胞系细胞增殖被抑制等^[6-9]。而氧化应激被认为是电磁辐射对生殖内分泌功能造成损伤的重要机制^[10]。但也有研究显示电磁辐射暴露不会对机体的生殖内分泌功能造成显著损伤^[11,12]。研究结果的不同可能与研究对象和辐照参数的选择不同有关。目前常用的智能手机和无线网络 (WiFi) 所产生的电磁辐射频率在 850MHz~2400 MHz 之间^[13]。

为了明确电磁辐射对性激素分泌的影响及其抗氧化损伤作用,本研究选用频率为 1840MHz,比吸收率分别为 0.2、0.5、1.5W/kg 的电磁辐射对成年雄性 SD 大鼠连续照射 3 周或 5 周,5 天/周,30 min/天,光镜下观察大鼠睾丸组织形态结构,检测血清性激素浓度水平和睾丸组织抗氧化损伤标志物的表

达与分布情况。

1 材料与方法

1.1 材料

成年 SD 大鼠 48 只(8 周龄)由第四军医大学实验动物中心提供(许可证号为 scxk(军)2007-007)。水合氯醛(上海化学试剂分装厂)、多聚甲醛(北京雷根生物技术有限公司)、鼠抗 8-OHdG 单克隆抗体(美国,Abcam)、兔抗大鼠 HSP70 单克隆抗体(Santa Cruz Co)、PV-9002 免疫组化染色试剂盒(北京中杉金桥)、射频电磁辐射发生器(华东师范大学)、低温高速离心机(德国,BIOFUGE)、光学显微镜(德国,Leica)、石蜡切片机(德国,Leica)、全自动组织包埋机(常州华利电子)。

1.2 实验方法

1.2.1 动物分组和处理 将 SD 大鼠按体质量随机分成 2 组对照组(假辐照组)和 6 组辐照组,各辐照组 SD 大鼠使用射频辐射发生器(见图 1),分别给予频率为 1840 MHz, SAR 分别为 0.2、0.5、1.5 W/kg 的射频电磁辐射连续照射 1 周或 3 周,每周五天,每天上午 8:00~8:30,每次辐照 30 min,对照组在关闭仪器后在相同位置放置 30 min。

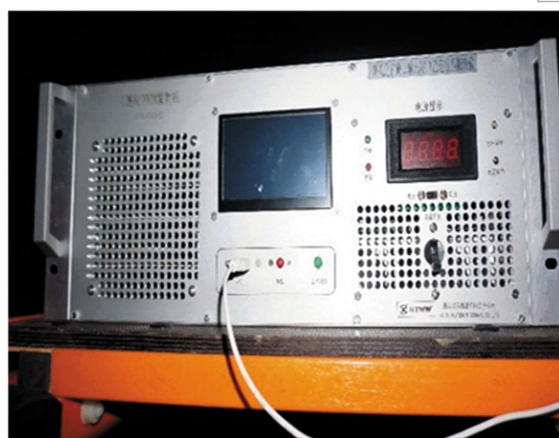


图 1 1840 MHz 电磁辐射发生器

Fig.1 1840MHz radio frequency electromagnetic radiation machine

1.2.2 实验标本的制备 最后一次辐照 SD 大鼠后立即腹腔注射水合氯醛进行深度麻醉,心脏采血,将获得的血液标本放置于 4℃ 冰箱中保存,4 h 后放入离心机,以 4℃,4000 rpm 离心 15 min,离心后的血清放入 -20℃ 的冰箱中保存。切开 SD 大鼠的阴囊,取出睾丸并称重,将睾丸置于多聚甲醛溶液中固定 24 小时后进行石蜡包埋。

1.2.3 HE 染色 将经过多聚甲醛固定的左侧睾丸组织,梯度酒精、二甲苯脱水、透明、浸蜡、包埋、厚度 4 mm 冠状位切片、常规苏木精-伊红(HE)染色后,在光学显微镜下观察曲细精管形态结构。

1.2.4 放射免疫法测血清性激素水平 将 -20℃ 冰箱中的大鼠血清样本取出,根据试剂盒说明书要求进行操作,采用放射免疫法测量样本血清中睾酮、促性腺激素释放激素、黄体生成素和卵泡刺激素的水平。

1.2.5 免疫组织化学法检测 HSP70 和 8-OHdG 将多聚甲醛固定的右侧睾丸组织免疫组化石蜡切片常规脱蜡、水化,3%过氧化氢溶液室温孵育 15 min 阻断内源性过氧化物酶,微波中高火加热 10 min 抗原修复。分别滴加兔抗大鼠 HSP70 单克隆抗体(1:100)和鼠抗 8-OHdG 单克隆抗体(1:100),4℃ 过夜。按照 PV-9002 试剂盒说明书分别滴加聚合物辅助剂和辣根酶标抗

小鼠/兔 IgG。经 DAB 显色,苏木素复染、梯度酒精脱水、二甲苯透明后,中性树胶封片,光学显微镜下观察。以 PBS 代替一抗作阴性对照。滴加兔抗大鼠 HSP70 单克隆抗体的切片,以细胞中出现棕黄色颗粒为染色阳性细胞,滴加鼠抗 8-OHdG 单克隆抗体的切片,以细胞中出现棕黄色染色为阳性细胞,每组切片使用 HPIAS-1 000 病理图文分析系统对随机挑选的 5 个视野测定积分光密度。

1.3 统计学分析

应用 SPSS17.0 统计分析软件处理数据,多组之间计量资料对比采用方差分析,两组计量资料之间比较采用 Dunnett-t

检验,以 $p < 0.05$ 时认为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 各组睾丸组织结构的比较

20 倍光学显微镜下观察 SD 大鼠生精小管 HE 染色结果:对照组睾丸曲细精管内各级生精细胞经精母细胞排列整齐、有序,辐照组大鼠睾丸曲细精管排列依然整齐、间质细胞、小管上皮与基膜形态完整,说明 1840 MHz 不同功率密度(0.2、0.5、1.5 W/kg)暴露(30 min/d, 5 d/week, RF1 周/3 周)后大鼠睾丸组织结构在光镜下无显著损伤(见图 2)。

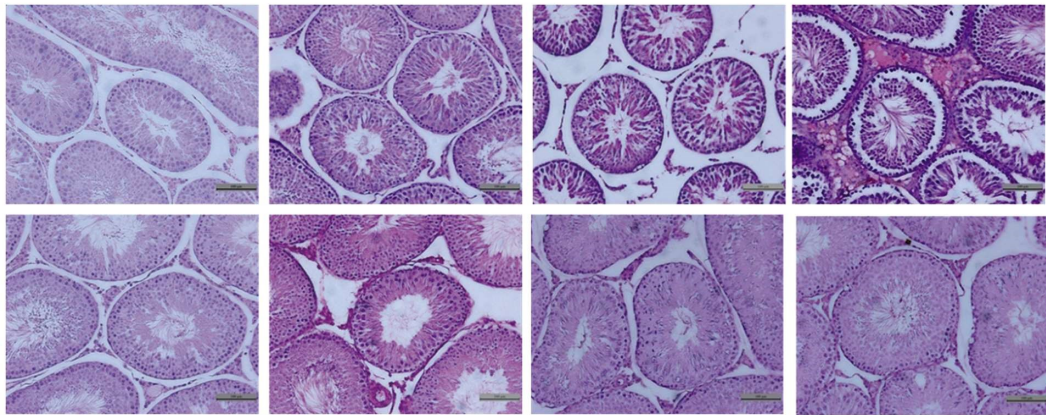


图 2 1840MHz 射频电磁辐射对大鼠睾丸形态结构的影响

Fig.2 Effect of 1840MHz RF exposure on the diameter of seminiferous tubules in SD rats

2.2 各组血清性激素水平的变化比较

1840 MHz, SAR 为 0.2、0.5、1.5 W/kg (30 min/d, 5 d/week) 连续辐照 1 周或 3 周, GnRH、T 等性激素随着辐照功率密度的增加和时间的延长出现不同程度的改变 (见图 3)。采用 1840 MHz、功率密度为 0.2 W/kg 和 0.5 W/kg 的射频电磁辐射连续辐照 3 周后,辐照组 SD 大鼠血清 FSH 浓度均显著低于假辐照组,差异具有统计学意义(SAR=0.2 W/kg 时, $P < 0.05$, SAR=0.5

W/kg 时, $P < 0.01$)。

采用 1840 MHz、功率密度为 0.2、0.5 W/kg 的射频电磁辐射辐照 1 周或 3 周后,辐照组 SD 大鼠血清 GH 浓度低于假辐照组,功率密度为 1.5 W/kg 的射频电磁辐射辐照 1 周后,辐照组血清 GH 浓度高于假辐照组,但差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。

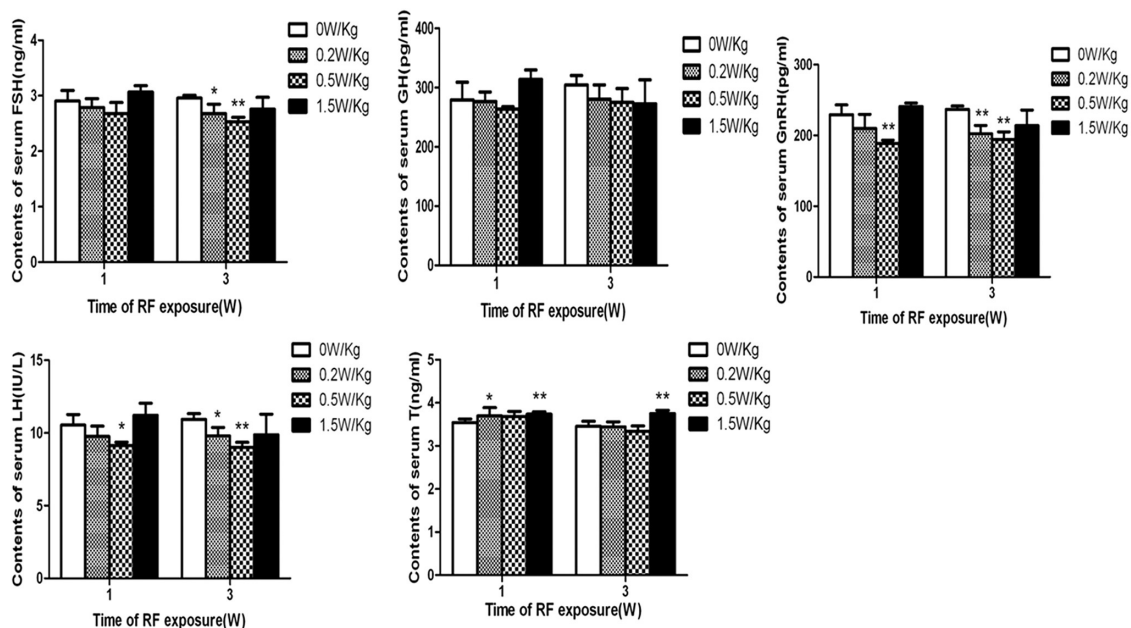


图 3 1840MHz 电磁辐射对大鼠血清 FSH、GH、GnRH、LH、T 水平的影响

Fig.3 Effect of 1840MHz RF exposure on the serum FSH, GH, GnRH, LH, T secretion in SD rats

采用 1840 MHz、功率密度为 0.5 W/kg 的射频电磁辐射照射 1 周后, 辐照组 SD 大鼠血清 GnRH 浓度显著低于假辐照组, 差异具有统计学意义($P<0.01$); 采用 1840 MHz 功率密度为 0.2 W/kg 和 0.5 W/kg 的射频电磁辐射, 连续辐照 3 周后, 辐照组血清 GnRH 浓度显著低于假辐照组, 差异具有统计学意义($P<0.01$)。

采用 1840 MHz、功率密度为 0.5 W/kg 的射频电磁辐射照射 1 周后, 辐照组 SD 大鼠血清 LH 浓度显著低于假辐照组, 差异具有统计学意义($P<0.05$); 采用 1840 MHz 功率密度为 0.2 W/kg 和 0.5 W/kg 的射频电磁辐射, 连续辐照 3 周后, 辐照组血清 LH 浓度显著低于假辐照组, 差异具有统计学意义($SAR=0.2$ W/kg 时 $P<0.05$, $SAR=0.5$ W/kg 时 $P<0.01$)。

采用 1840 MHz、功率密度为 0.2 W/kg 和 1.5 W/kg 的射频电磁辐射照射 1 周后, 辐照组 SD 大鼠血清睾酮浓度显著高于假辐照组, 差异具有统计学意义($P<0.05$)。采用 1840 MHz、功率密度为 1.5 W/kg 的射频电磁辐射照射 3 周后, 辐照组血清睾酮浓度显著高于假辐照组, 差异具有统计学意义($P<0.01$)。

2.3 各组睾丸组织 HSP70 蛋白和抗氧化损伤标志物的表达比较

在频率为 1840 MHz, 比吸收率(SAR)分别为 0.2、0.5、1.5 W/kg 的辐照条件下, 连续辐照 1 周或 3 周(5 d/周, 30 min/d), 辐照组和对照组 HSP70(见图 4)和 DNA 抗氧化损伤的标志物 8-OHdG(见图 5)在大鼠睾丸组织中的分布无明显差异, 表达无异常变化(见图 6)。

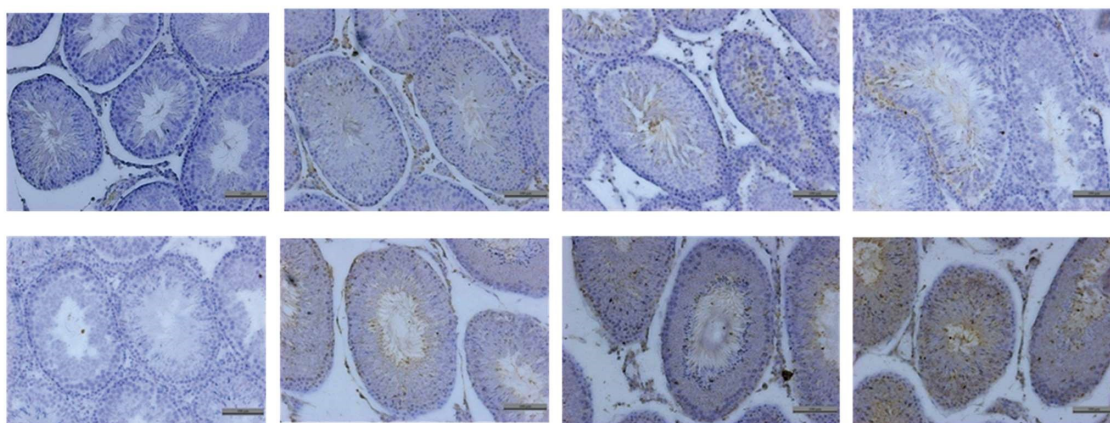


图 4 1840MHz 射频电磁辐射对大鼠睾丸组织 HSP70 表达的影响

Fig.4 Effect of 1840MHz exposure on HSP70 protein expression in testis of SD rats

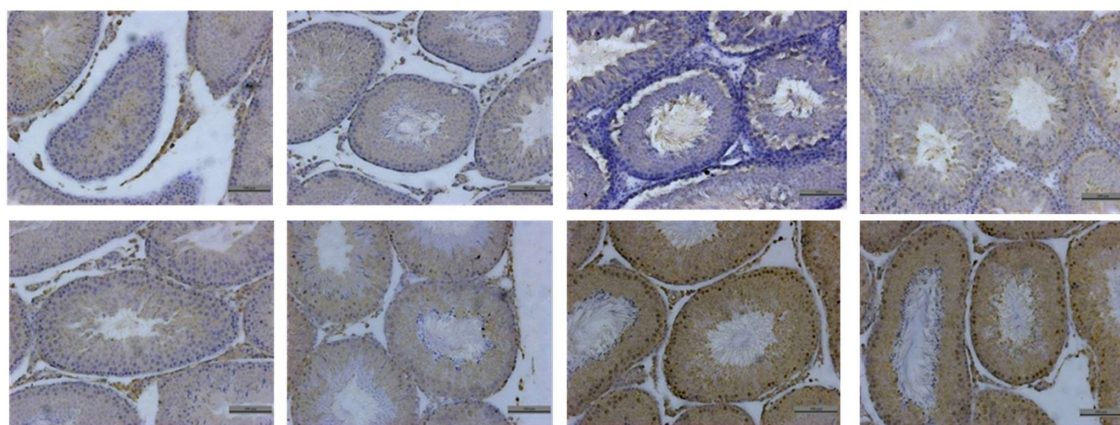


图 5 1840MHz 射频电磁辐射对大鼠睾丸组织 8-OHdG 表达的影响

Fig.5 Effect of 1840MHz exposure on 8-OHdG expression in testis of SD rats

3 讨论

睾丸作为男性主生殖器官具有产生精子和分泌雄性激素的双重功能, 主要由间质细胞和曲细精管组成, 前者可合成并分泌雄激素, 而曲细精管是精子的生成部位, 其管壁由支持细胞和生精细胞组成。据相关文献报道, 一定的强度的射频电磁辐射可引起睾丸结构和功能的改变, 进而引起机体的生殖功能异常。Odac E^[14]等研究发现频率为 900MHz 的电磁辐射连续辐

照成年雄性大鼠 30 天(1h/1d)后, 辐照组大鼠睾丸曲细精管基底膜出现空泡和间质水肿, 生精小管直径和上皮的厚度有不同程度的缩小。Hanc H^[15]等使用频率为 900 MHz 的电磁辐射对 13-21 天的 NEMFG 孕鼠进行辐照, 产后 21 天取幼鼠睾丸, 与对照组相比, 实验组生精小管基底膜和上皮细胞不规则, 管腔内存在未成熟的生殖细胞, 生精小管直径和上皮细胞的厚度都有不同程度的缩小。在本次研究中, 对照组 SD 大鼠的睾丸曲细精管内各级生精细胞经精母细胞排列整齐、有序, 实验组大

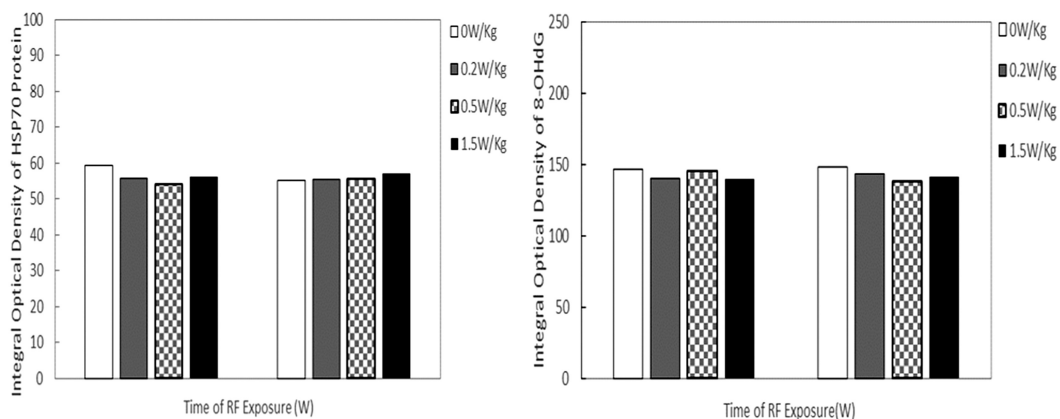


图 6 1840MHz 射频电磁辐射对大鼠睾丸组织 HSP70 蛋白和 8-OHdG 表达的影响

Fig.6 Effect of 1840MHz exposure on HSP70 protein and 8-OHdG expression in testis of SD rats

鼠的睾丸曲细精管排列依然整齐、间质细胞、小管上皮与基膜形态完整,可能是辐照参数对靶器官不够敏感导致损伤效应不明显。

睾酮作为睾丸中合成和分泌最多的激素,其生理功能主要为维持生精,促进生殖器官发育,维持雄性副性征和促进新陈代谢。林艳云^[16]等研究显示小鼠睾丸间质细胞经 24 小时,频率为 1950 MHz 的辐照后的 6 和 24 小时,辐照组细胞上清液中睾酮含量明显低于对照组。王亚峰^[17]等使用场强为 200 kV/m、脉冲数 400 个的电磁脉冲(EMP)辐照 BALB/c 小鼠,每天一次,持续两周,在照后 1、7 和 28 天血清睾酮水平明显降低。

下丘脑分泌的促性腺激素释放激素可刺激或抑制垂体促性腺激素的分泌,同时受到睾丸激素的负反馈调节。腺垂体合成和分泌 LH 和 FSH。LH 促进间质细胞合成和分泌睾酮,FSH 作用于支持细胞产生抑制素。睾丸的生精过程受到 FSH 和睾酮的双重调节,LH 通过促进睾酮的合成和分泌而间接调节精子的生成。FSH 起着始动生精的作用,而睾酮则有维持生精的作用。Li Hua Zeng^[18]等在研究中发现使用 4×10^5 的电磁脉冲辐照 SD 大鼠,辐照组大鼠照后 12 和 24 小时 LH 显著低于对照组($p < 0.05$),辐照后 6 小时,辐照组的血清睾酮浓度高于对照组($p < 0.05$),辐照后 1 周,辐照组的血清睾酮浓度低于对照组($p < 0.05$)。本次研究中采用频率为 1840MHz、功率密度为 0.2 W/kg 和 1.5 W/kg 的射频电磁辐射辐照 1 周后,辐照组大鼠的血清睾酮浓度显著高于假辐照组,差异具有统计学意义($P < 0.05$)。采用 1840MHz、功率密度为 1.5 W/kg 的射频电磁辐射辐照 3 周后,辐照组血清睾酮浓度显著高于假辐照组,差异具有统计学意义($P < 0.01$)。研究结果说明在该参数下的射频电磁辐射可以影响大鼠睾丸的部分生殖内分泌功能。

氧化应激损伤被认为是射频电磁辐射损伤雄性生殖内分泌功能的机制之一^[19] 8-OHdG 是一种 DNA 抗氧化损伤的标志物,可用于评估体内氧化损伤和修复的程度以及抗氧化能力的变化^[20,21]。热休克蛋白作为细胞应对外来刺激所产生的保持自身稳定的物质,是常用的分子毒理学研究的生物标志物^[22,23]。吴涛^[24]等研究发现,使用频率为 1840MHz,比吸收率为 0.2、0.5、1.5 W/kg 的射频电磁辐射辐照雄性 SD 大鼠 3 周 (5 d/1 w, 30 min/d)后,辐照组睾丸并没有明显的氧化损伤,但睾丸组织内能量代谢酶和部分抗氧化酶活性下降。王小华^[25]等采用峰值

功率密度为 129 W/cm² 的微波,一次全身辐照昆明鼠 30 min 致其死亡。与对照组相比,辐照组小鼠 HSP70 mRNA 和蛋白水平表达显著上调,差异具有极显著统计学意义($P < 0.01$)。本次研究中,辐照组大鼠热休克蛋白 70 和 DNA 抗氧化损伤的标志物 8-OHdG 在睾丸组织中的表达和分布无明显改变,可能是由辐照参数不同导致本次研究中辐照没有引起睾丸组织的氧化应激损伤。

综上所述,频率为 1840MHz 的射频电磁辐射未对大鼠睾丸组织造成明显的形态结构损伤,但可以影响睾丸的部分生殖内分泌功能,没有引起大鼠睾丸组织明显的氧化应激损伤。本次研究并没有对电磁辐射产生的其他可能对睾丸组织造成损伤的机制进行探索,因此无法排除其他机制对 SD 大鼠性激素合成与分泌的影响,在下一步研究中需要进一步对损伤机制进行深入研究。

参考文献(References)

- [1] 程小兰,胡军武.电磁辐射的污染与防护[J].放射学实践,2014,29(6): 711-714
Cheng Xiao-lan, Hu Jun-wu. Empoison and pollution of electromagnetic radiation[J]. Radiologic Practice J, 2014, 29(6): 711-714
- [2] Verloock L, Joseph W, Goemine F, et al. Assessment of radio frequency exposures in schools, homes, and public places in Belgium [J]. Health Physics, 2014, 107(6): 503-515
- [3] 周兢程,林艳云,陈克亮,等. 射频电磁辐射对大鼠脑组织胆碱能标志物的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报, 2017, 35(1): 010202
Zhou Jing-cheng, Lin Yan-yun, Chen Ke-liang, et al. Effects of radiation-frequency electromagnetic radiation on cholinergic neuronal markers of SD rat brain [J]. J Radiat Res Radiat Process, 2017, 35(1): 010202
- [4] Buckus R, Strukcinskiene B, Raistenskis J, et al. Modelling and assessment of the electric field strength caused by mobile phone to the human head[J]. Vojnosanit Pregl, 2016, 73(6): 538-543
- [5] Mortazavi S M J, Rahimi S, Talebi A, et al. Survey of the Effects of Exposure to 900MHz Radiofrequency Radiation Emitted by a GSM Mobile Phone on the Pattern of Muscle Contractions in an Animal Model[J]. J Biomed Phys Eng, 2015, 5(3): 121-132
- [6] Lewis RC, Ml nguez-Alarcó n L, Meeker JD, et al. Self-reported mobile phone use and semen parameters among men from a fertility

- clinic[J]. *Reprod Toxicol*, 2017, 67: 42-47
- [7] 曾丽华, 郭国祯, 任东青, 等. 高功率微波辐照对雄性大鼠生殖细胞的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(8): 1267-1271
- Zeng Li-hua, Guo Guo-zhen, Ren Dong-qing, et al. High power microwave irradiation effects on sperm cells of male rats [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2005, 17(8): 1267-1271
- [8] Liu K, Li Y, Zhang G, et al. Association between mobile phone use and semen quality: a systemic review and meta-analysis [J]. *Andrology*, 2014, 22(4): 491-501
- [9] 林艳云, 李康樗, 杜乐, 等. 1950 MHz 射频电磁辐射对小鼠睾丸间质细胞系细胞增殖的影响 [J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2015, 33: 010203(6)
- Lin Yan-yun, Li Kang-chu, Du Le, et al. Effects of 1950 MHz electromagnetic radiation on leydig cells proliferation[J]. *J Radiat Res Radiat Process*, 2015, 33: 010203(6)
- [10] Qi Liu, Tianlei Si, Xiaoyun Xu, et al. Electromagnetic radiation at 900 MHz induces sperm apoptosis through bcl-2, bax and caspase-3 signaling pathways in rats[J]. *Reproductive Health*, 2015, 12: 65
- [11] Nakatani-Enomoto, Okutsu, Suzuki, et al. Effects of 1950 MHz W-CDMA-like signal on human spermatozoa[J]. *Bioelectromagnetics*, 2016, 37(6): 373-381
- [12] Lee HJ, Jin YB, Kim TH, et al. The effects of simultaneous combined exposure to CDMA and WCDMA electromagnetic fields on rat testicular function[J]. *Bioelectromagnetics*, 2012, 33(4): 356-364
- [13] Deepinder F, Makker K, Agarwal A. Cell phones and male in-fertility: dissecting the relationship [J]. *Reproductive Biomedicine Online*, 2007, 15(3): 266-270
- [14] Odacı E, Özyılmaz C. Exposure to a 900 MHz electromagnetic field for 1 hour a day over 30 days does change the histopathology and biochemistry of the rat testis[J]. *Int J Radiat Biol*, 2015, 91(7): 547-54
- [15] Hancı H, Odacı E, Kaya H, et al. The effect of prenatal exposure to 900-MHz electromagnetic field on the 21-old-day rat testicle [J]. *Reprod Toxicol*, 2013, 42: 203-209
- [16] 林艳云, 李康樗, 杜乐, 等. 1950MHz 射频电磁辐射对小鼠睾丸间质细胞睾酮分泌的影响[J]. *高电压技术*, 2014, 40(12): 3854-3859
- Lin Yan-yun, Li Kang-chu, Du Le, et al. Effects of 1950 MHz electromagnetic radiation on leydig cells proliferation [J]. *J Radiat ResRadiat Process*, 2014, 40(12): 3854-3859
- [17] 王亚峰, 曾丽华, 郭国祯等. 电磁脉冲暴露对雄性 BALB/c 小鼠生殖系统发育的影响 [J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2013, 31(5): 201-206
- Wang Ya-feng, Zeng Li-hua, Guo Guo-zhen, et al. Effects of electromagnetic pulse exposure on the development of reproductive system of the BALB/c mice [J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2013, 31(5): 201-206
- [18] LiHua Zeng, XiTuan Ji, YanJun Zhang, et al. MnSOD expression inhibited by electromagnetic pulse radiation in the rat testis [J]. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2011, 30(4): 205-218
- [19] ManeeshMailankot, Anil P Kunnath, Jayalekshmi H, et al. Radio frequency electromagnetic radiation (RF-EMR) from GSM (0.9/1.8GHz) mobile phones induces oxidative stress and reduces sperm motility in rats[J]. *CLINICS*, 2009, 64(6): 561-565
- [20] 王晓峰, 楼建林, 邢鸣鸾, 等. 六价铬致小鼠 DNA 损伤及肝肾氧化应激的实验研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(11): 1860-1864
- Wang Xiao-feng, Lou Jian-lin, Xing Ming-luan, et al. Hexavalent chromium-induced DNA damage in peripheral blood lymphocytes and oxidative stress in the liver and kidney[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11): 1860-1864
- [21] 朱欣, 徐立红. 三丁基锡引起人羊膜细胞氧化损伤及 DNA 损伤的研究[J]. *癌变、畸变、突变*, 2008, 20(4): 299-302
- Zhu Xin, Xu Li-hong. Study of Oxidative Damage and DNA Damage in FL Cells Induced by Tributyltin [J]. *Carcinogenesis, Teratogenesis & Mutagenesis*, 2008, 20(4): 299-302
- [22] SC Gupta, A Sharma, M Mishra, et al. Heat shock proteins in toxicology: how close and how far? [J]. *Life Sci*, 2010, 86 (11-12): 377-384
- [23] MJ Misa-Agustiño, JM Leiro-Vidal, JL Gomez-Amoza, et al. EMF radiation at 2450 MHz triggers changes in the morphology and expression of heat shock proteins and glucocorticoid receptors in rat thymus[J]. *Life Sciences*, 2015, 127: 1-11
- [24] 吴涛, 林艳云, 郭奇彦, 等. 1.84 GHz 射频电磁辐射对 SD 大鼠睾丸能量代谢酶的影响及其抗氧化损伤作用[J]. *高电压技术*, 2016, 42(8): 1-6
- Wu Tao, Lin Yan-yun, Guo Qi-yan, et al. Effects of 1.84 GHz Radiation-frequency Electromagnetic Radiation on Energy Metabolism and Anti-oxidative Damage of Male SD Rat Testis [J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(8): 1-6
- [25] 王小华, 刘明树, 刘淑芳, 等. 致死剂量微波辐照后小鼠肝超微结构及 HSP70 表达的变化[J]. *局解手术学杂志*, 2016, 08: 555-558
- Wang Xiao-hua, Liu Ming-shu, Liu Shu-fang, et al. Ultrastructural changes and HSP70 expression in mice liver after microwave irradiation with lethal dose [J]. *Journal of Regional Anatomy and Operative Surgery*, 2016, 08: 555-558