

高频电磁辐射对小鼠情绪-认知行为的损伤作用

孙立君¹, 高艳², 郭颖³, 张成岗², 张有志¹, 李云峰^{1*}

(1. 神经精神药理学北京市重点实验室, 军事医学研究院毒物药物研究所, 北京 100850; 2. 军事医学研究院辐射医学研究所, 北京 100850; 3. 解放军总医院, 北京 100853)

【摘要】 **目的** 探索高频电磁辐射造成小鼠情绪-认知行为损伤模型的建立方法, 为辐射损伤机制及防护研究提供实验基础。**方法** 高频电磁混响室可产生持续而均匀的电磁辐射波, 小鼠分别暴露于高频电磁辐射箱 1 d、3 d 和 7 d, 进行系列行为学检测, 观察辐射组小鼠在自主活动、焦虑样行为、抑郁样行为以及认知功能的改变。**结果** 高频电磁辐射(频率 3 GHz, SAR 值为 4 W/kg)暴露每天 4 h, 连续暴露 7 d, 不影响小鼠的自主活动, 却可导致辐射组小鼠进入开场中央区的次数($P < 0.05$)和时间($P < 0.05$)显著减少; 与未暴露组相比, 辐射组小鼠显著降低在高架十字迷宫实验中进入开臂的次数($P < 0.05$)和时间百分比($P < 0.01$); 同时此剂量的电磁辐射暴露也显著增加小鼠在强迫游泳和悬尾实验中的不动时间($P < 0.01, P < 0.05$); 并且辐射暴露组比未暴露组小鼠显著降低在新物体识别实验中对新物体的区分指数($P < 0.001$)。**结论** 持续高频电磁辐射(频率为 3 GHz, SAR 值为 4 W/kg)可时间依赖地导致小鼠焦虑样-抑郁样行为以及认知功能损伤, 这为相关防治技术的研究提供了实验依据。

【关键词】 电磁辐射; 抑郁; 焦虑; 认知损伤; 行为学检测

【中图分类号】 R-33 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1671-7856(2018) 03-0015-06

doi: 10.3969/j.issn.1671-7856.2018.03.003

Behavioral tests of mood-cognitive impairment of mice exposed to high-frequency electromagnetic radiation

SUN Lijun¹, GAO Yan², GUO Ying³, ZHANG Chenggang², ZHANG Youzhi¹, LI Yunfeng^{1*}

(1. Beijing Key Laboratory of Neuropsychopharmacology, Beijing Institute of Pharmacology and Toxicology, Beijing 100850, China. 2. Beijing Institute of Radiation Medicine, Beijing 100850. 3. General Hospital of PLA, Beijing 100853)

【Abstract】 **Objective** To explore the effects of high-frequency electromagnetic radiation exposure on the mood-cognitive behaviors of mice, and to provide an experimental basis for the study on radiation damage mechanism and protection. **Methods** The electromagnetic reverberation chamber can produce continuous and uniform high-frequency electromagnetic waves. Different groups of ICR mice were exposed to high-frequency electromagnetic radiation in this chamber for 1 d, 3 d and 7 d, and then series of behavioral tests were conducted to observe the changes in locomotor activities, depressive-like and anxiety-like behaviors, and cognitive function of the mice. **Results** After exposed to the high-frequency electromagnetic radiation (3 GHz, SAR 4 W/kg) 4 h/d for 7 d, there was no obvious change in locomotor activity (times of grid crossing and standing up in the open field test) of the mice, while the times of entering the central

【基金项目】 国家自然科学基金项目(编号:81373035)。

【作者简介】 孙立君(1989—), 女, 博士研究生, 专业: 精神药理学。E-mail: sunlj9002@163.com

【通信作者】 李云峰(1972—), 男, 研究员, 研究方向: 神经精神药理学。E-mail: lyf619@aliyun.com

region ($P < 0.05$) and the time duration ($P < 0.05$) were significantly decreased. Compared with the unexposed group, the percentage of the times of entering the open arm in the elevated-plus maze ($P < 0.05$) and the time duration in the open arm ($P < 0.01$) of the mice in the radiation group were significantly decreased. Meanwhile, the immobility time in the forced-swimming test ($P < 0.01$) and the tail suspension test ($P < 0.05$) of the mice exposed to electromagnetic radiation was significantly increased, and the discrimination index of new objects in the new object recognition test was significantly reduced ($P < 0.001$). **Conclusions** Continual exposure to high-frequency electromagnetic radiation (3 GHz, SAR 4 W/kg) can lead to anxious-depression behaviors and cognitive impairment of mice in a time-dependent manner, which provides an experimental basis for the relevant study of prevention and therapy techniques.

【Key words】 electromagnetic radiation; depression; anxiety; cognitive impairment; behavioral tests

电磁辐射产生的污染已经成为世界性公害,世界卫生组织已将其列为第四大污染,联合国人类环境会议也已将其列为环境保护项目之一^[1]。辐射源一般产生的是环境电磁波,它的频率覆盖范围分为:长、中、短波(100 Hz ~ 30 MHz),超短波(30 MHz ~ 300 MHz)和微波(300 MHz ~ 300 GHz)^[2]。电磁辐射对身体的危害,源于人体本身存在微弱的电磁场和电生理平衡。流行病学调查显示,长期受高频辐射影响,可产生头昏、乏力、睡眠障碍、心悸、心前区疼痛等植物神经系统为主的症状^[3]。但是相关研究较为零散且报道的相关文献选用的辐射源种类(持续波或脉冲波)不同,电磁辐射参数标准(频率、场强、SAR 值)不同,使用的动物种属(Wistar 或 SD 大鼠, BALB/c 或 CD1 小鼠)或身体状态(孕鼠或成年普通鼠)不同,无法在同一辐射条件下获得情绪-认知功能损伤的稳定模型来继续深入研究^[4-7]。本实验选用了电磁波谱中一个重要的“中间”频率 3 GHz,比吸收率(SAR 值)根据国际非电离辐射协会的防护标准定为 4 W/kg,进行了电磁辐射频谱筛选,观察对小鼠的情绪-认知行为的损伤。此动物损伤模型将会为进一步研究辐射损伤机制以及如何做好辐射防护和辐射防护药物的研发提供实验依据。

1 材料和方法

1.1 实验动物

体重为 16 ~ 18 g 的 SPF 级成年雄性 ICR 小鼠 48 只,购于北京斯贝福实验动物技术有限公司[SCXK(京)2015-0004]。购入后 8 只一笼,于军事医学研究院毒物药物研究所 SPF 级实验动物中心[SYXK(军)2012-001]恒定条件的房间饲养:环境温度 22℃ ~ 23℃,湿度 40% ~ 60%,每天 12 h 白天(8:00 ~ 20:00)/12 h 黑夜(20:00 ~ 8:00)循环。实验过程中对动物的处置严格遵守我国科技

部 2006 年颁布的《关于善待实验动物的指导性意见》,并按实验动物使用的 3R 原则给予人道主义的关怀。

1.2 主要仪器设备:电磁混响室

使用的电磁混响室由北京辐射医学研究所提供。其配备 12 根天线,可实现 7 种频率的电磁场同时辐射,并可模拟 0.8 GHz ~ 4 GHz 电磁辐射信号,并放大。电磁混响室内产生的是一种均匀而稳定的辐射环境,并且动物在混响室内接受全身辐射的同时,还可自由活动,避免了动物束缚接受局部或全身辐射带来的影响。仪器选用 6 条线路辐射,频率为 3 GHz,场强为 120 V/m,电平参数为 -12.0 dBm,体重为 23 ~ 25 g 左右的小鼠在这种辐射环境下,SAR 值为 4 W/kg。

1.3 实验方法

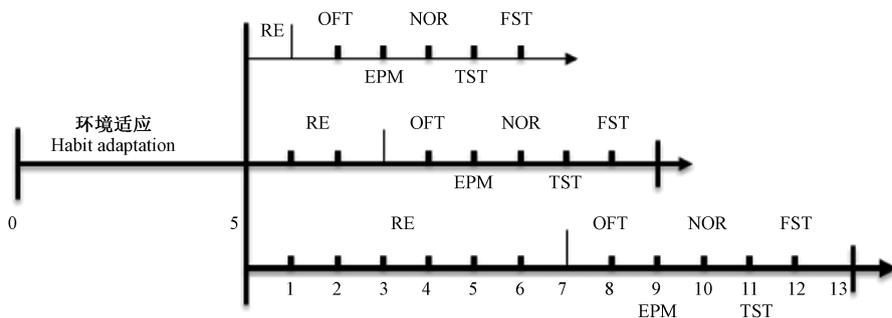
1.3.1 实验流程设计

按照图 1 所示,动物适应 5 d 后按照体重大小随机分为 3 组,每组 16 只,其中 8 只作为不暴露于辐射的正常组,其余 8 只暴露于电磁辐射中。3 组的辐射组小鼠分别暴露于电磁混响室中 1、3 和 7 d,每天暴露 4 h,随后进行系列行为学测试:自主活动(locomotor activity)检测,焦虑样行为检测-开场实验(open field test, OFT)和高架十字迷宫实验(elevated-plus maze test, EPM),抑郁样行为检测-小鼠悬尾实验(tail suspension test, TST)和强迫游泳实验(forced-swimming test, FST),以及新物体识别实验(novel objective recognition test, NOR)。

1.3.2 行为学测试

(1) 自主活动-开场实验(open field test, OFT)

开场实验的装置是一个透明聚丙烯酯开口箱(长 36.5 cm,宽 31 cm,高 30 cm),底部被均分成 16 格,中间 4 格作为中央区^[8]。将小鼠面对箱子一角放入使其自由活动,录像开始记录,统计 5 min 内小



注:RE:暴露于电磁辐射;OFT:开场实验;EPM:高架十字迷宫;NOR:新物体识别实验;TST:悬尾实验;FST:强迫游泳实验。数字表示天数。

图1 实验流程设计

Note. RE: radiation exposure; OFT: open field test; EPM: elevated-plus maze; NOR: novel objective recognition; TST: tail suspension test; FST: forced-swimming test. Numbers indicate days.

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental design

鼠的爬格数和直立次数,用以评价对动物的自主活动影响;以及进入中央区的次数和累积时间(s),其可作为动物焦虑样行为的指标^[9]。每一次测试结束,要清理干净排泄物,并喷洒10%酒精擦干以去除动物残留气味。

(2) 焦虑样行为-高架十字迷宫实验

高架十字迷宫实验是评价啮齿类动物焦虑样行为最简便、直观的方法^[10],并根据文献方法^[11]进行检测,小鼠面对开臂,被放置于开臂和闭臂的接合处,每条臂长30 cm,宽5.0 cm,闭臂高15.5 cm的围墙,整个迷宫置于距地面50 cm的支架上。录像记录5 min,统计小鼠进入开臂和闭臂的次数和时间,分别计算进入开臂次数百分比(进入开臂次数/(开臂+闭臂)总次数×100%)和在开臂滞留时间百分比(开臂滞留时间/(开臂+闭臂)累积滞留时间×100%)。每只测试结束后,将小鼠排泄物清理干净,并用10%酒精喷洒擦干,清除动物的残留气味。

(3) 抑郁样行为

① 小鼠悬尾实验(tail suspension test, TST):该实验方法参考本实验室发表的文献使用方法^[12]。用医用胶带粘住小鼠的尾巴(距离小鼠尾尖1 cm处),分别垂直倒挂于距离桌面30 cm的8个独立的黑色木质箱子(25 cm×25 cm)的顶部。实验录像记录6 min,统计后4 min内小鼠的累积不动时间(s)。② 强迫游泳实验(forced-swimming test, FST):该方法也称行为绝望实验,是目前应用最广泛的一种抑郁动物模型^[13]。小鼠将被放置于2000 mL的干净玻璃烧杯中,内盛有1500 mL(深度以小鼠尾巴和足尖碰不到杯底为宜)的(23±1)℃的水,将烧

杯放置于黑色的小隔间内,避免动物之间相互影响。小鼠不动行为,指动物除了为避免没入水中而向上的主动运动外,无其他行为^[14],统计最后4 min内小鼠的累积不动时间(s)。

(4) 认知样行为-新物体识别实验(novel object recognition, NOR)

实验方法参考^[15]并做细微调整,实验分为三部分:① 第一天适应期:将小鼠放入60 cm×60 cm×26 cm的黑色木质开口箱内,让其自由探索10 min;② 第二天,在装置内放两个相同的物体,将动物从同一位置放入,使其探索5 min;③ 第三天测试,将其中一个熟悉的物体换成另一个完全不同的新物体,再把动物按同一位置放入后探索5 min。所有过程均被录像,每次探索结束后清理动物的排泄物并用10%酒精喷洒擦干除味。统计小鼠对新、旧物体的累积探索时间,小鼠在距离物体2 cm以内对物体的嗅、探、触碰为探索,攀爬和玩耍不计入,最后计算小鼠对新物体的区分指数(discrimination index, DI)=新物体探索时间(s)/(新+旧)探索时间×100%。

1.4 统计学方法

数据统计软件采用GraphPad Prism 5.02,采用独立样本t检验进行组间比较,结果以平均数±标准差($\bar{x} \pm s$)表示, $P < 0.05$ 为差异有显著性。

2 结果

2.1 高频电磁辐射暴露不影响小鼠自主活动

在小鼠自发活动检测实验中,分别暴露于电磁混响室(SAR值为4 W/kg,4 h/d)中1 d、3 d和7 d的三组小鼠与未暴露的正常组小鼠相比,其爬格数

和直立次数均没有明显改变,提示频率为 3 GHz, SAR 值为 4 W/kg 的高频电磁辐射持续暴露不会影响小鼠的自主活动性,见表 1。

2.2 持续高频电磁辐射暴露导致小鼠焦虑样行为

2.2.1 开场实验

开场实验中,与未暴露组比较,暴露于电磁混响室中(SAR 值为 4 W/kg, 4 h/d, 连续辐射 7 d)的小鼠进入中央区的次数显著降低($P < 0.05$),在中央区停留时间也显著降低($P < 0.05$)。同时,暴露于电磁混响室中的小鼠进入中央区的次数[1 d: (9.13 ± 1.32), 3 d: (7.38 ± 1.89), 7 d: (5.38 ± 1.00)]和在中央区的停留时间[1 d: (10.88 ± 1.66), 3 d: (8.13 ± 2.18), 7 d: (5.25 ± 1.05)]呈现出与暴露时间对应的依赖性关系。提示频率为 3 GHz, SAR 值为 4 W/kg 的高频电磁辐射持续暴露导致小鼠焦虑样行为,结果如表 2 所示。

2.2.2 高架十字迷宫实验

表 1 高频电磁辐射暴露不同时间对小鼠自主活动的影响($\bar{x} \pm s, n=8$)

Tab. 1 Effects of electromagnetic radiation exposure for different days on locomotor activity of the mice

组别 Groups	爬格数 Times of grid crossing			直立次数 Times of standing up		
	1 d	3 d	7 d	1 d	3 d	7 d
	空白组 Control group	120.90 ± 7.57	108.00 ± 13.15	94.25 ± 9.20	38.63 ± 2.42	34.63 ± 4.88
辐射组 Radiation group	120.10 ± 8.23	112.60 ± 13.82	99.00 ± 7.55	41.13 ± 2.35	36.88 ± 5.44	39.13 ± 3.87

注:不同辐射天数内空白组与辐射组之间比较, $P > 0.05$ 。

Note. The radiation group compared with the control group exposed to electromagnetic radiation for the same time, $P > 0.05$.

表 2 高频电磁辐射暴露不同时间对小鼠开场实验中焦虑样行为的影响($\bar{x} \pm s, n=8$)

Tab. 2 Effects of electromagnetic radiation exposure for different days on anxiety behavior of the mice in the open field test

组别 Groups	进入中央区次数 Times of entering the central region			中央区停留时间 Duration in the central region		
	1 d	3 d	7 d	1 d	3 d	7 d
	空白组 Control group	10.00 ± 1.85	9.25 ± 1.08	10.00 ± 1.91	12.25 ± 1.50	11.00 ± 1.68
辐射组 Radiation group	9.13 ± 1.32	7.38 ± 1.89	5.38 ± 1.00*	10.88 ± 1.66	8.13 ± 2.18	5.25 ± 1.05*

注:不同辐射天数内空白组与辐射组之间比较, * $P < 0.05$ 。

Note. The radiation group compared with the control group exposed to electromagnetic radiation for the same time, * $P < 0.05$.

表 3 高频电磁辐射暴露不同时间对高架十字迷宫实验中小鼠进入开臂次数的影响($\bar{x} \pm s, n=8$)

Tab. 3 Effects of electromagnetic radiation exposure for different days on times of entering the open arm of the mice in the elevated-plus maze test

组别 Groups	总次数 Total times			进入开臂次数百分比(%) Percentage of entering the open arm		
	1 d	3 d	7 d	1 d	3 d	7 d
	空白组 Control group	14.63 ± 1.54	15.38 ± 1.72	12.50 ± 1.24	12.40 ± 4.32	10.64 ± 2.97
辐射组 Radiation group	13.50 ± 1.40	13.25 ± 1.62	14.25 ± 1.28	12.10 ± 2.36	7.74 ± 2.51	5.58 ± 2.79*

注:不同辐射天数内空白组与辐射组之间比较, * $P < 0.05$ 。

Note. The radiation group compared with the control group exposed to electromagnetic radiation for the same time, * $P < 0.05$.

在高架十字迷宫实验中,暴露于电磁混响室中 1 d、3 d 和 7 d 的辐射组小鼠,进入开臂次数百分比 [(12.10 ± 2.36)%、(7.74 ± 2.51)%、(5.58 ± 2.79)%]和进入开臂的停留时间百分比 [(5.952 ± 1.33)%、(4.42 ± 1.65)%、(2.86 ± 1.70)%]均呈现递减现象;与未接受辐射的正常组相比,暴露 7 d 的辐射组小鼠进入开臂次数和在开臂的停留时间均显著下降($P < 0.05, P < 0.01$)。如表 3、表 4 所示。

2.3 持续高频电磁辐射暴露导致小鼠抑郁样行为

在小鼠急性抑郁模型 TST 和 FST 中,暴露于电磁混响室中(SAR 值为 4 W/kg, 4 h/d)的辐射组小鼠随着暴露时间的延长不动时间也逐渐增加。统计结果显示,持续辐射 7 d 的小鼠与正常组小鼠相比,在 TST 和 FST 中的不动时间均显著增加($P < 0.05, P < 0.05$),提示持续高频电磁辐射暴露导致小鼠抑郁样行为,见表 5。

2.4 持续电磁辐射暴露导致小鼠认知功能损伤

以新物体识别实验 (NOR) 来评价小鼠短期或长期的记忆能力, 结果发现, 暴露于电磁混响室中 (频率为 3 GHz, SAR 值为 4 W/kg, 4 h/d) 的辐射组小鼠对新物体的区分指数 (DI) 随暴露时间的延长而逐渐降低; 与未暴露正常组小鼠相比, 暴露于电磁辐射 3 d 和 7 d 组的辐射组小鼠对新物体的区分指数显著降低 ($P < 0.05, P < 0.001$), 提示持续高频电磁辐射暴露导致小鼠认知样行为损伤, 见表 6。

3 讨论

便携式设备在本地无线电频暴露的频率为 3 GHz ~ 10 GHz, 而 3 GHz 是电磁波谱中一个重要的“中间”谱段, 可以穿透表层皮肤组织, 在皮下和浅表的组织器官处产生较大的能量吸收和吸收梯度^[16]。目前微波生物效应研究中通常采用比吸收

率 (SAR) 作为剂量学量来表征量效关系, SAR 定义为每单位质量生物组织吸收的电磁能量^[17]。并且根据国际非电离辐射协会 (ICNIRP) 的电磁辐射防护标准, 认为当人体全身吸收平均 SAR 达到 4 W/kg 时, 可能会引起有害的损伤^[18]。本研究发现, ICR 小鼠在频率为 3 GHz, SAR 值为 4 W/kg 的电磁混响室中, 每天暴露辐射 4 h, 连续暴露辐射 7 d, 会导致小鼠焦虑样、抑郁样行为以及认知功能损伤。本研究为筛选抗抑郁、抗焦虑药物提供了一种简单的动物模型, 同时为研究电磁辐射造成情绪-认知损伤的机制和研发辐射防护药物提供了实验依据。

本实验采用的辐射源-电磁混响室, 辐射环境均匀、持续、稳定, 且不影响动物自由活动, 这比文献中所采用的动物束缚辐射更科学、可靠。其次, 采用 SAR 值来作为衡量电磁辐射强度的参数, 可以对电磁辐射的强度有直观的量化, 为以后本领域的研

表 4 高频电磁辐射暴露不同时间对高架十字迷宫实验中小鼠在开臂停留时间的影响 ($\bar{x} \pm s, n = 8$)

Tab. 4 Effects of electromagnetic radiation exposure for different days on time duration in the open arm of the mice in the elevated-plus maze test

组别 Groups	总时间 (s) Total time			开臂停留时间百分比 (%) Percentage of time duration in the open arm		
	1 d	3 d	7 d	1 d	3 d	7 d
	空白组 Control group	179.60 ± 13.25	219.30 ± 11.24	196.40 ± 21.65	11.95 ± 5.07	6.18 ± 2.40
辐射组 Radiation group	197.00 ± 12.53	192.40 ± 17.15	232.30 ± 9.98	5.95 ± 1.33	4.42 ± 1.65	2.86 ± 1.70**

注: 不同辐射天数内空白组与辐射组之间比较, ** $P < 0.01$ 。

Note. The radiation group compared with the control group exposed to electromagnetic radiation for the same time, ** $P < 0.01$.

表 5 持续高频电磁辐射暴露不同时间对小鼠抑郁样行为的影响 ($\bar{x} \pm s, n = 7 \sim 8$)

Tab. 5 Effects of electromagnetic radiation exposure for different days on depressive-like behaviors of the mice

组别 Groups	悬尾实验不动时间 (s) Immobility time in tail suspension test			强迫游泳实验不动时间 (s) Immobility time in forced-swimming test		
	1 d	3 d	7 d	1 d	3 d	7 d
	空白组 Control group	50.63 ± 9.59	61.57 ± 12.83	63.17 ± 4.72	78.00 ± 7.63	106.10 ± 11.34
辐射组 Radiation group	53.88 ± 12.45	70.25 ± 13.00	89.67 ± 9.99*	96.50 ± 18.93	117.50 ± 17.65	135.30 ± 11.35**

注: 不同辐射天数内空白组与辐射组之间比较, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。

Note. The radiation group compared with the control group exposed to electromagnetic radiation for the same time, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

表 6 持续高频电磁辐射不同天数暴露对小鼠认知行为的影响 ($\bar{x} \pm s, n = 8$)

Tab. 6 Effects of electromagnetic radiation exposure for different days on cognitive impairment of the mice

组别 Groups	新物体识别实验中对新物体的区分指数 (%) Discrimination index of new objects in the novel object recognition test		
	1 d	3 d	7 d
	空白组 Control group	63.57 ± 1.97	64.40 ± 10.39
辐射组 Radiation group	53.96 ± 6.35	49.81 ± 1.75*	46.69 ± 1.85***

注: 不同辐射天数内空白组与辐射组之间比较, * $P < 0.05$, *** $P < 0.001$ 。

Note. The radiation group compared with the control group exposed to electromagnetic radiation for the same time, * $P < 0.05$, *** $P < 0.001$.

究提供了参考。

筛选电磁辐射波段任务艰巨。前期筛选结果中,我们发现频率为 3 GHz, SAR 值为 3 W/kg, 暴露辐射 1 d, 系列行为学检测并无变化;而 SAR 值为 8 W/kg 时,分别暴露辐射 1 d, 3 d 和 7 d 的动物,各项行为学指标出现了非规律性、不可解释性的变化;只有 SAR 值为 4 W/kg 时,连续暴露辐射 7 d 才产生了稳定的行为学损伤。对于其他两个频率和时间依赖关系的筛选,我们还需要进行大量的研究。此外,本实验中电磁辐射所造成的抑郁-焦虑样行为与经典的抑郁-焦虑样动物模型,除了在行为学上有相似的表现之外,在抑郁症经典的病因机制假说上是否会有不同?这需要我们进一步的研究和探索。

参考文献:

[1] 王生浩, 文峰, 郝万军, 等. 电磁污染及电磁辐射防护材料 [J]. 环境科学与技术, 2006, 29(12): 96-98.

[2] 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.

[3] 殷秀珍, 黄永禧, 张玉芳, 等. 射频热疗机的电磁波辐射防护——简易屏蔽室 [J]. 北京医学院学报, 1981, 13(2): 130.

[4] 方传勤, 高长越, 王景周, 等. 电磁辐射孕鼠对仔鼠神经发生和学习记忆影响研究 [J]. 中国职业医学, 2011, 38(5): 381-383.

[5] Júnior LC, Guimarães Eda S, Musso CM, et al. Behavior and memory evaluation of Wistar rats exposed to 1.8 GHz radiofrequency electromagnetic radiation [J]. Neurol Res, 2014, 36(9): 800-803.

[6] Salunke BP, Umathe SN, Chavan JG. Behavioral in-effectiveness of high frequency electromagnetic field in mice [J]. Physiol Behav, 2015, 140: 32-37.

[7] Zhang Y, Li Z, Gao Y, et al. Effects of fetal microwave radiation exposure on offspring behavior in mice [J]. J Radiat Res, 2015, 56(2): 261-268.

[8] Pınar N, Akillioglu K, Sefil F, et al. Effect of clozapine on locomotor activity and anxiety-related behavior in the neonatal

mice administered MK-801 [J]. Bosn J Basic Med Sci, 2015, 15(3): 74-79.

[9] Kumar M, Haridas S, Trivedi R, et al. Early cognitive changes due to whole body γ -irradiation; a behavioral and diffusion tensor imaging study in mice [J]. Exp Neurol, 2013, 248: 360-368.

[10] Walf AA, Frye CA. The use of the elevated plus maze as an assay of anxiety-related behavior in rodents [J]. Nat Protoc, 2007, 2(2): 322-328.

[11] 孙秀萍, 张楠, 高杰, 等. 慢性束缚应激模型致焦虑和抑郁共病的行为学研究 [J]. 中国比较医学杂志, 2015, 25(6): 18-22.

[12] Qin JJ, Chen HX, Zhao N, et al. The role of activation of the 5-HT1A receptor and adenylate cyclase in the antidepressant-like effect of YL-0919, a dual 5-HT1A agonist and selective serotonin reuptake inhibitor [J]. Neurosci Lett, 2014, 582: 104-108.

[13] Takatsu-Coleman AL, Patti CL, Zanin KA, et al. Short-term social isolation induces depressive-like behavior and reinstates the retrieval of an aversive task; mood-congruent memory in male mice? [J]. J Psychiatry Neurosci, 2013, 38(4): 259-268.

[14] Cryan JF, Markou A, Lucki I. Assessing antidepressant activity in rodents: recent developments and future needs [J]. Trends Pharmacol Sci, 2002, 23(5): 238-245.

[15] de Lima MN, Laranja DC, Bromberg E, et al. Pre- or post-training administration of the NMDA receptor blocker MK-801 impairs object recognition memory in rats [J]. Behav Brain Res, 2005, 156(1): 139-143.

[16] 周红梅, 苏镇涛, 胡向军, 等. 微波暴露人体比吸收率 (SAR) 的分布研究 [J]. 辐射防护, 2009, 29(3): 154-159.

[17] 周红梅, 苏镇涛, 杨国山. 量度微波生物效应的实验剂量学研究进展 [J]. 军事医学科学院院刊, 2005, 29(5): 484-488.

[18] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz) [J]. Health Phys, 1998, 74(4): 494-522.

[收稿日期]2018-01-23