

900 MHz 微波辐射不同时点暴露对雄性大鼠血浆激素水平昼夜节律的影响*

赵华, 宗春燕, 周振, 曹毅**

(贵州医科大学 公共卫生学院环境污染与疾病监控省部共建教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

[摘要] 目的: 观察不同时点 900 MHz 微波辐射暴露对雄性大鼠血浆褪黑素(Mel)和睾酮水平(T)昼夜节律的影响。方法: 健康雄性 SD 大鼠 110 只, 选取 Mel 水平昼夜节律差异无统计学意义的大鼠 60 只随机均分为对照组和照射组; 两组大鼠再分别分为 6 个时点组(2:00 AM、6:00 AM、10:00 AM、2:00 PM、6:00 PM、10:00 PM)暴露, 照射组大鼠给予 2 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 900 MHz 的微波辐射, 1 h/d、持续 30 d, 同时点对照组大鼠给与微波辐射假暴露; 暴露结束后, 各组大鼠每间隔 4 h 采血 1 次, 测定血浆中的 T 和 Mel 水平, 比较血浆 T 和 Mel 水平昼夜节律, 分析微波辐射对血浆 T 和 Mel 水平影响的敏感时点。结果: 照射组大鼠与对照组比较, 2:00 AM 辐射暴露后 Mel 水平昼夜节律的峰值时点延迟 9.37 h, 与其它 5 个时点比较, 其峰值时点变化最大; 2:00 PM 辐射暴露后 Mel 水平昼夜节律的峰值时点延迟 0.93 h, 与其它 5 个时点相比, 变化最小; 6:00 PM 辐射暴露后 T 昼夜节律的峰值时点延迟 11.98 h, 与其它 5 个时点比较, 变化最大; 10:00 AM 辐射暴露后 T 昼夜节律峰值时点延迟 3.01 h, 与其它 5 个暴露时点比较, 变化最小。结论: 不同时点 2 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 900 MHz 微波辐射暴露对大鼠血浆 T 和 Mel 水平的敏感时点不同, 以夜间影响较为明显。

[关键词] 辐射损伤; 微波; 昼夜节律; 时间因素; 褪黑素; 睾酮

[中图分类号] R339.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-2707(2020)02-0156-05

DOI: 10.19367/j.cnki.1000-2707.2020.02.006

Effects of 900 MHz Microwave Radiation at Different Time on Circadian Rhythm of Hormone Levels in Plasma of Male Rats

ZHAO Hua, ZONG Chunyan, ZHOU Zhen, CAO Yi

(Key Laboratory of Environment Pollution Monitoring and Disease Control, Ministry of Education, School of Public Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

[Abstract] **Objective:** To investigate the effects of 900 MHz microwave radiation at different time on circadian rhythm of melatonin, testosterone and estradiol levels in plasma of male rats. **Methods:** The circadian rhythm for locomotor activity and plasma melatonin levels of 110 SD adult male rats were measured, of which 60 rats were randomly divided into radiation group and control group with similar circadian rhythm of melatonin levels in plasma. Each large group was divided into 6 time points (2:00 AM, 6:00 AM, 10:00 AM, 2:00PM, 6:00P M and 10:00PM). Rats in each radiation group were exposed to 2 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 900 MHz microwave radiation at different time, 1 h/d, 30 days at zeitgeber time (ZT). At the same time, control group rats were given false exposure to microwave radiation. After the end of exposure, blood samples were collected once every 4 h for each group and the plasma T and Mel levels were measured, the circadian rhythm of plasma T and Mel levels were compared, the sensitive time points of the effect of microwave radiation on plasma T and Mel levels were analyzed. **Results:** Compared with the control group, the peak time point of the circadian rhythm of Mel level

*[基金项目] 国家自然科学基金(81373025)

**通信作者 E-mail: yicao@suda.edu.cn

after radiation exposure at 2:00 AM was delayed 9.37 h, and compared with the other 5 time points, there was the greatest change at the peak time point. After radiation exposure at 2:00 PM, the peak time point of circadian rhythm at Mel level was delayed 0.93 h with the smallest change compared to the other 5 time points. After radiation exposure at 6:00 PM, the peak time point of T's circadian rhythm was delayed 11.98 h with the largest change compared to the other 5 time points. After radiation exposure at 10:00 AM, the peak time point of T circadian rhythm was delayed 3.01 h with the smallest change compared to the other 5 exposure time points. **Conclusion:** The effects of 2 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 900 MHz microwave radiation on plasma melatonin and testosterone levels are different when rats are exposed on different time points, and the effects are more obvious at night.

[**Key words**] radiation damage; microwave; circadian rhythm; time factor; melatonin; testosterone

睾丸是对微波辐射和电磁脉冲敏感的器官之一^[1]。移动电话作为当今社会主要的通信工具,其对生殖系统的影响是现今研究的热点之一,有学者研究了微波辐射对睾丸组织、精子形态及数量的影响^[2-5],本课题前期研究证实了雄性 SD 大鼠血浆睾酮(testosterone, T)、雌二醇(estradiol, E2)和褪黑素(melatonin, Mel)存在明显昼夜节律,在大鼠自发活动的峰值或谷值时点给予 900 MHz 2 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 微波辐射能够影响大鼠血浆激素水平的昼夜节律性^[6]。为维持机体正常功能,血浆激素水平稳定是非常重要的,本研究以血浆 Mel 具有明显昼夜节律性的大鼠为模型,探讨微波辐射影响昼夜节律的敏感时间,检测不同时点微波辐射对大鼠血浆 Mel 和 T 水平的影响程度,为研究微波辐射对生殖系统的影响和防护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

PMM8053A 场强仪(意大利 PMM 公司),自发活动视频分析系统(上海吉量软件科技有限公司)。电磁辐射系统:GTEM 室(长 5.67 m、宽 2.83 m、高 2.07 m,型号 DN6313A,苏州大学研制),功率放大器(型号 SN1012,HD Communications Corp)和信号发生器(型号 SN2130J6030,意大利 PMM 公司)。物节律单余弦模型分析软件(苏州大学),有机玻璃辐射盒,睾酮和 MelELISA 试剂盒(购于上海易利生物技术有限公司)。

1.2 方法

1.2.1 动物及分组 由苏州大学实验动物中心提供 SPF 级雄性 SD 大鼠 110 只,体质量(150 ± 10)g,根据大鼠 24 h 自发活动昼夜节律筛选出 87 只、根据大鼠血浆 Mel 水平 24 h 昼夜节律筛选出 60 只

昼夜节律无明显性差异的大鼠,随机分为照射组和对照组;照射组和对照组再各分为 6 个小组(2:00 PM、6:00 PM、10:00 PM、2:00 AM、6:00 AM 和 10:00 AM)、每组 5 只。大鼠在环境温度 20~26 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 40%~70% 下适应性喂养 30 d,自由饮水进食,光照/黑暗(12 h:12 h)。通过自发活动系统采集大鼠 24 h 自发活动数据,再运用生物节律单余弦分析软件选择 87 只具有明显昼夜节律的大鼠,24 h 尾静脉采血 6 次、每次间隔 4 h,测血浆 Mel 水平,分析 Mel 水平的 24 h 昼夜节律。

1.2.2 活动观察 观察室内放置 4 个大小为 50 cm \times 50 cm \times 70 cm 的隔光、隔声、独立的有机玻璃盒,盒内设饮水摄食装置;观察室内配有独立开关的红外线光源、人工白炽灯光源和摄像头,可拍摄大鼠的活动轨迹,视频信息输入电脑并通过软件分析得到大鼠自发活动平均速度。大鼠放入观察室内保持与外界隔光状态,适应 1 d,观察 24 h。每 4 h 摄像 1 次,每次观察 30 min,然后分析 24 h 内不同时间段大鼠自发活动的平均速度。

1.2.3 微波辐射 大鼠在有机玻璃辐射盒中通过微波辐射系统进行全身照射^[6],各组分别于 2:00 PM、6:00 PM、10:00 PM、2:00 AM、6:00 AM 和 10:00 AM 时间点连续暴露 1 h 于 2 000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 900 MHz 微波辐射环境中,每组 1 h/d、共 30 d;同时点放置对照组于有机玻璃盒中进行微波辐射假暴露(假暴露即为除不给予微波辐射外,其余同照射组相同),1 h/d,其他饲养条件同照射组。

1.2.4 血浆激素水平测定 所有大鼠在暴露结束后第 0、4、8、12、16 和 20 h 时尾静脉采血,离心 15 min(1 500 r/min),4 $^{\circ}\text{C}$ 保存,用 ELISA 法测定血浆 T 和 Mel 水平。

1.3 数据处理

1.3.1 余弦分析 用生物节律单余弦模型分析软

件进行分析,根据方程式 $F(t) = M + A\cos(\omega t + \Phi)$ 拟合相位响应曲线(振幅 A 为上下波动的幅度、节律振荡的幅度, M 为涨落变化的中线、节律的调整中值, ω 为节律的角频率 $15^\circ/\text{h}$, Φ 为振荡到达顶峰的时刻、又称为峰值相位,是最稳定的节律特征参数),分析曲线时相变化确定是否存在昼夜节律,即对振幅 A 作 F 检验^[7]。将大鼠 6 个时点血浆中 Mel 和 T 的水平用上述分析软件拟合出相位响应曲线再进行分析,此分析方法可分为组平均余弦法和单一余弦法。用生物节律单余弦模型分析软件进行相位响应曲线拟合每组动物 6 个时点激素水平的均值,得到各组大鼠的相位响应曲线,以描述各组节律特征,即为组平均余弦法;单一余弦法则是每对大鼠 6 个时点的激素水平进行拟合分析,得到每只大鼠的 A 、 M 和 Φ 这 3 个参数,

然后对各个参数进行分析。

1.3.2 统计学处理 各参数运用 SPSS 17.0 统计软件进行完全随机设计样本均数的 t 检验,对振幅 A 作 F 检验,结果以均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义, $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 微波辐照前大鼠昼夜节律指标

对表 1 中血浆 Mel 水平昼夜节律相位响应曲线振幅 A 作 F 检验,照射组和对照组血浆 Mel 水平均具有明显昼夜节律,差异有统计学意义($P < 0.05$);照射组和对照组微波辐射前血浆 Mel 水平昼夜节律的 3 个指标比较,差异无统计学意义($P > 0.05$)。见表 1。

表 1 辐照前大鼠血浆 Mel 水平昼夜节律指标($n = 5$)

Tab. 1 Circadian rhythmic parameters of melatonin in plasma of rats before microwave radiation($n = 5$)

时点	$A/(\mu\text{g/L})^{(1)}$		$M/(\mu\text{g/L})$		Φ/ZT	
	对照组	照射组	对照组	照射组	对照组	照射组
2:00 PM	11.73 \pm 0.56	12.08 \pm 0.40	60.37 \pm 1.58	59.54 \pm 1.91	11.21 \pm 0.63	11.82 \pm 0.73
6:00 PM	15.77 \pm 0.82	16.12 \pm 0.91	64.87 \pm 1.32	65.62 \pm 1.80	12.70 \pm 0.77	12.19 \pm 0.51
10:00 PM	17.62 \pm 0.95	18.33 \pm 1.24	72.75 \pm 1.84	73.35 \pm 1.85	14.44 \pm 0.68	13.94 \pm 1.01
2:00 AM	15.22 \pm 0.69	16.03 \pm 0.57	52.19 \pm 0.79	50.33 \pm 1.20	13.12 \pm 0.76	14.02 \pm 0.53
6:00 AM	14.71 \pm 0.65	15.36 \pm 0.72	60.41 \pm 0.90	62.71 \pm 0.66	12.26 \pm 0.81	13.01 \pm 0.92
10:00 AM	13.11 \pm 0.74	12.99 \pm 0.38	63.86 \pm 1.31	62.03 \pm 1.28	13.11 \pm 0.67	13.21 \pm 0.88

注: ⁽¹⁾ 对 A 作 F 检验, $P < 0.05$ 。

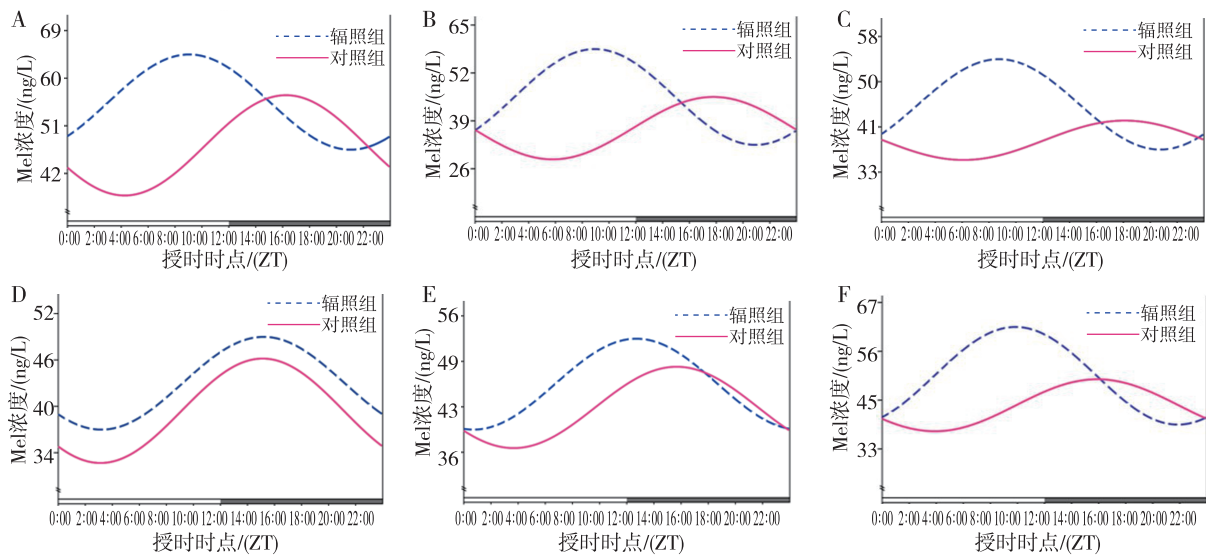
2.2 微波辐照对大鼠血浆 Mel 水平昼夜节律的影响

微波辐射后,对照组和照射组血浆 Mel 水平相位响应曲线如图 1 所示,6 个时间点组微波暴露后,雄性大鼠血浆 Mel 水平相位响应曲线均发生了变化。对照组和照射组大鼠血浆 Mel 水平相位响应曲线各个时点振幅 A 作 F 检验,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。将照射组和对照组相位响应曲线参数进行统计分析结果显示,2:00 AM 暴露于微波辐射的大鼠峰值时点对照组(18.10 ± 1.88)ZT、照射组(8.73 ± 1.01)ZT,与对照组比较,照射组峰值时点提前 9.37 h,在 6 个时点中变化最大;2:00 PM 微波辐射照射组大鼠 Mel 水平相位响应曲线峰值对照组为(15.12 ± 0.90)ZT、照射组为(14.19 ± 1.24)ZT,照射组与对照组相比,在 6 个暴露时点中变化最小,峰值时点延迟 0.93 h;白天辐射暴露(2:00 PM、6:00 PM 和 10:00 AM)峰值时点总差值为 13.62 h,黑夜(2:00 AM、6:00 AM

和 10:00 PM)峰值时点总差值为 22.67 h,峰值时点是反映昼夜节律变化的敏感标志。实验结果显示,2:00 AM 是大鼠血浆 Mel 对微波辐射最为敏感的时间点,对其影响最大;而 2:00 PM 是大鼠血浆 Mel 对微波辐射最不敏感的时间点,对其影响最小;提示黑夜辐射暴露对大鼠血浆 Mel 水平较白天明显。

2.3 微波辐照对大鼠血浆 T 水平昼夜节律的影响

照射组与对照组在微波辐射暴露后血浆 T 水平相位响应曲线如图 2 所示。由图可知,6 个时点微波辐射后各组大鼠血浆 T 水平相位响应曲线均发生了变化。对照组血浆 T 水平相位响应曲线各个时点振幅 A 和照射组比较,如图 2 所示,对各组振幅 A 作 F 检验,差异均有统计学意义($P < 0.05$)。将照射组和对照组相位响应曲线参数进行统计分析,结果显示,6:00 PM 暴露于微波辐射的大鼠峰值时点为(0.61 ± 0.76)ZT,对照组为(12.72 ± 0.83)ZT,照射组与对照组比较,峰值时点

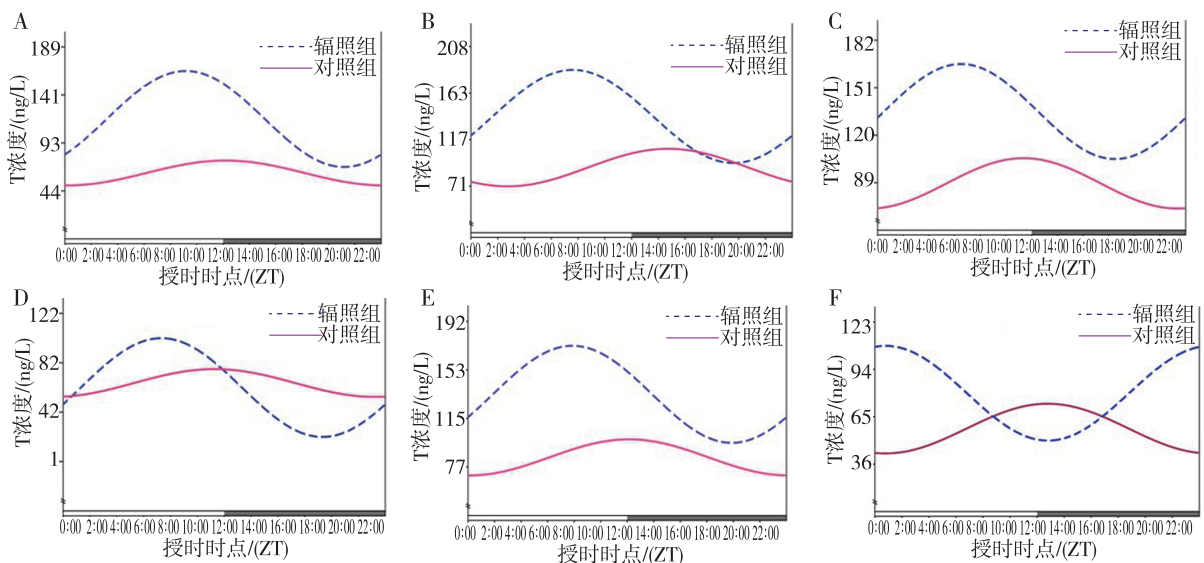


注:A 为 10:00 AM、B 为 10:00 PM、C 为 2:00 AM、D 为 2:00 PM、E 为 6:00 AM、F 为 6:00 PM,

图中 ZT0 点为自然时间 9:00 AM,横轴灰色部分代表黑夜,白色部分代表白天。

图 1 大鼠血浆 Mel 水平相位响应曲线结果

Fig. 1 PRCs for plasma of rats melatonin concentrations



注:A 为 10:00 AM、B 为 10:00 PM、C 为 2:00 AM、D 为 2:00 PM、E 为 6:00 AM、F 为 6:00 PM,

图中 ZT0 点为自然时间 9:00 AM,横轴灰色部分代表黑夜,白色部分代表白天。

图 2 大鼠血浆 T 水平相位响应曲线结果

Fig. 2 PRCs for plasma of rats testosterone concentrations

提前 12.11 h,在 6 个时点中变化最大;10:00 AM 暴露于微波辐射的大鼠血浆 T 水平相位响应曲线峰值时点为 (9.17 ± 0.69) ZT、对照组为 (12.18 ± 0.68) ZT,与对照组比较,照射组峰值时点提前 3.01 h,在 6 个暴露时点中变化最小;白天辐射暴露(2:00 PM、6:00 PM 和 10:00 AM)峰值时点总

差值为 18.94 h,黑夜(2:00 AM、6:00 AM 和 10:00 PM)峰值时点总差值为 20.02 h。结果提示,6:00 PM 左右是大鼠血浆 T 对微波辐射最为敏感的时间点,对其影响最大;10:00 AM 左右是大鼠血浆 T 对微波辐射最不敏感的时间点,对其影响最小;提示黑夜辐射暴露对大鼠血浆 T 水平影响较

白天明显。

3 讨论

WHO 不育症防治专题组的研究表明生殖功能紊乱是男性不育最重要的病因之一。全世界具有不同程度生育障碍的育龄夫妇中约 50% 是男方因素。由于短时间内遗传变异造成的影响是有限的,过去 50 年中男性生殖功能有所下降,有可能是受到了某些环境有害因素的影响^[8-9]。伴随科技的发展,各种电磁辐射暴露也越来越多,生殖器官作为电磁辐射的敏感器官,使得人们越来越重视其带来的影响。

本实验选择 Mel 水平作为筛选条件是由于松果体产生的 Mel 受光周期制约,体内 Mel 的含量呈昼夜性节律改变,从而使生物体的功能活动与外界的环境变化相适应,且 Mel 可通过下丘脑-垂体-性腺轴对生殖系统进行调节,下丘脑是 Mel 调节生殖系统的主要部位及靶器官^[2,10-11]。本实验中照射组在辐射后 Mel 和 T 水平各个时点组均升高,提示 Mel 的变化可能对血浆 T 水平有影响,这与 Shou 等^[12]的研究结果类似,其研究显示 Mel 可通过 Leydig 细胞的 Mel 受体影响睾丸的内分泌活动,影响血浆性激素水平。性激素对生殖系统功能起着关键作用,同时对环境适应、维持机体平衡和神经系统等也起着重要作用。雄性动物体内中 T 是最重要的性激素,T 水平异常可干扰生殖内分泌系统,影响雄激素生物学作用,导致生殖功能紊乱,其激素改变可能是微波辐射影响雄性生殖功能的基础^[13]。Myung 等^[14-15]的研究也认为电磁辐射能影响机体生殖内分泌功能。本实验显示不同时点微波暴露对血浆激素水平的影响不同,证实了电磁辐射对 Mel 和 T 的影响。2:00 AM 微波辐射对血浆 Mel 影响最大,说明其对微波辐射敏感时间为 2:00 AM 左右;而微波辐射对血浆 T 影响最大的敏感时间段为 6:00 PM 左右。由于机体对外界环境刺激的敏感度在一天中并不稳定,这也就解释了不同时点微波辐射对激素影响不同。本实验结果显示微波辐射在黑夜对大鼠血浆激素水平的影响较白天更为明显。然而,细胞感受电磁辐射物理信号、电磁辐射能量在生物组织转化及传递和引起敏感组织与细胞的损伤机理仍不清楚,电磁辐射影响的机制还需要进一步的研究。

本实验中,微波辐射在各个时点暴露对血浆 Mel 和 T 水平均有影响,表现为振幅和峰值时点改

变、中值增高,但机体对不同时点微波辐射的敏感度不同,这也提示,可通过避免暴露于机体对微波辐射敏感的时间段来降低电磁辐射影响,为电磁辐射防护提供新思路 and 理论依据。

4 参考文献

- [1] JENS P B. Male reproductive organs are at risk from environmental hazards [J]. Asian Journal of Andrology, 2010,12:152-156.
- [2] BIN S, FENGJUAN W. Effect of Aqueous extract from morinda officinalis f. c. how on microwave-induced hypothalamic-pituitary-testis axis impairment in male sprague-dawley rats[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2015(8):110-115.
- [3] HAE J L, JEONG K P, TAE H K, et al. The lack of histological changes of cdma cellular phone-based radio frequency on rat testis [J]. Bioelectromagnetics, 2010(31):528-534.
- [4] YAN-Y L, TAO W, JUN Y L, et al. 1950MHz radio frequency electromagnetic radiation inhibits testosterone secretion of mouse leydig cells[J]. Environmental Research and Public Health, 2018,15(1):1703-1710.
- [5] FAEZEH A, BEHZAD S, MOHSEN A, et al. An experimental study of the effects of combined exposure to microwave and heat on gene expression and sperm parameters in mice [J]. Journal of Human Reproductive Sciences, 2017,10(2):128-134.
- [6] 赵华,宗春燕,曹毅,等. 900 MHz 微波辐射对雄性大鼠血浆激素水平昼夜节律的影响[J]. 环境与职业医学, 2012,12(29):735-738.
- [7] 童建. 余弦分析法在生物节律研究中的应用[J]. 中国卫生统计, 1991,8(1):23-25.
- [8] 郭凯琳,刘玉龙. 电离辐射对男性生殖及内分泌功能的影响[J]. 辐射防护通讯, 2016(5):6-9.
- [9] NIELS E. SKAKKEBAEK, EWA R M, et al. Male reproductive disorders and fertility trends: influences of environment and genetic susceptibility[J]. Physiological Reviews, 2016,96(1):55-97.
- [10] RUSSEL J R, SERGIO A. ROSALES C, et al. Peripheral reproductive organ health and melatonin: ready for prime time [J]. Molecular Sciences, 2013, 14(4):7231-7272.
- [11] STEPHAN G J, DAVID J P, NED J P, et al. Dorsomedial hypothalamic lesions block syrian hamster testicular regression in short day lengths without diminishing increased testosterone negative-feedback sensitivity[J]. Biology of Reproduction, 2013,89(2):23.

(下转第 168 页)

- rantly activated HOTAIR/EZH2/miR-193a feedback loop in progression of prostate cancer[J]. *J Exp Clin Cancer Res*, 2017, 36(1): 159–173.
- [20] MENG F, SAXENA S, LIU Y, et al. The phospho-caveolin-1 scaffolding domain dampens force fluctuations in focal adhesions and promotes cancer cell migration[J]. *Mol Biol Cell*, 2017, 28(16): 2190–2201.
- [21] PACE G, MASSIMO C D, AMICIS D D, et al. Inflammation and endothelial activation in benign prostatic hyperplasia and prostate cancer[J]. *Int Braz J Urol*, 2011, 37(5): 617–622.
- [22] THORSEN K, SORENSEN K D, BREMS-ESKILSEN A S, et al. Alternative splicing in colon, bladder, and prostate cancer identified by exon array analysis[J]. *Mol Cell Proteomics*, 2008, 7(7): 1214–1224.
- [23] KOWALSKI M P, KRUEDE T. Functional roles of non-coding Y RNAs[J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2015, 66: 20–29.
- [24] ZEYBEK A, OZ N, KALEMCI S, et al. Diagnostic value of mir-125b as a potential biomarker for stage I lung adenocarcinoma lung Adenocarcinoma [J]. *Curr Mol Med*, 2019, 19(3): 216–227.
- [25] WU F, MO Q, WAN X, et al. NEAT1/has-mir-98-5p/ MAPK6 axis is involved in non-small-cell lung cancer (NSCLC) development[J]. *J Cell Biochem*, 2019, 120(3): 2836–2846.
- [26] CHEN X, XIONG D, YE L, et al. Atractylenolide II reverses the influence of lncRNA XIST/miRNA-30a-5p/ ROR1 axis on chemo-resistance of colorectal cancer cells [J]. *J Cell Mol Med*, 2019, 23(5): 3151–3165.
- [27] RUIJUAN Z, ZHIJUN W, QIANYUN Y, et al. KCNQ1OT1/miR-217/ZEB1 feedback loop facilitates cell migration and epithelial-mesenchymal transition in colorectal cancer[J]. *Cancer Biol Ther*, 2019, 20(6): 886–896.
- [28] 罗振国, 李淑奎, 陶然, 等. 检测尿液中的 USP9Y-TTTY15RNA 对前列腺癌的早期诊断 [J]. *黑龙江医药科学*, 2017, 40(3): 30–31, 34.
(2019-11-15 收稿, 2020-01-09 修回)
中文编辑: 刘平; 英文编辑: 丁廷森

(上接第 155 页)

- [14] MARTINON F. Targeting endoplasmic reticulum signaling pathways in cancer[J]. *Acta Oncologica*, 2012, 51(7): 822–830.
- [15] BHAT T A, CHAUDHARY A K, KUMAR S, et al. Endoplasmic reticulum-mediated unfolded protein response and mitochondrial apoptosis in cancer[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Cancer*, 2017, 1867(1): 58–66.
- [16] MOHAMED E, CAO Y, RODRIGUEZ P C. Endoplasmic reticulum stress regulates tumor growth and anti-tumor immunity: a promising opportunity for cancer immunotherapy[J]. *Cancer Immunology, Immunotherapy*, 2017, 66(8): 1069–1078.
- [17] BETTIGOLE S E, GLIMCHER L H. Endoplasmic Reticulum Stress in Immunity[J]. *Annual Review of Immunology*, 2015, 33(1): 107–138.
- [18] MEI Y, THOMPSON M D, COHEN R A, et al. Endoplasmic reticulum stress and related pathological processes[J]. *Journal of Pharmacological & Biomedical Analysis*, 2013, 1(2): 1000107.
(2019-11-15 收稿, 2020-01-06 修回)
中文编辑: 刘平; 英文编辑: 乐萍

(上接第 160 页)

- [12] SHOU L D, YAN Z, KUN Y, et al. Melatonin up-regulates the expression of the GATA-4 transcription factor and increases testosterone secretion from leydig cells through ROR α signaling in an in vitro goat spermatogonial stem cell differentiation culture system[J]. *Molecular Sciences*, 2017, 8(66): 592–605.
- [13] 袁梦, 林艳云, 高鹏等. 1840 MHz 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 [J]. *现代医学研究进展*, 2017(28): 5406–5411.
- [14] MYUNG G, CHAN J P. Effect of electromagnetic field exposure on the reproductive system[J]. *Clinical and Experimental Reproductive Medicine*, 2012, 39(1): 1–9.
- [15] ALI A, AMIR A K, ASGHAR R, et al. A review on Electromagnetic fields (EMFs) and the reproductive system [J]. *Electron Physician*, 2016, 8(7): 2655–2662.
(2019-12-18 收稿, 2020-01-03 修回)
中文编辑: 刘平; 英文编辑: 冉海勇