文章编号：1006-3617(2014)01-0065-04　　中图分类号：R114　　文献标志码：A

【综述】

射频辐射对中枢神经系统影响的研究进展

王创[1,2]，陈海燕[1]，雷美英[1]，李红政[1]

摘要： 随着现代科技的不断发展，人们接触射频辐射的机会大大增加。神经系统特别容易受到射频辐射的危害，许多研究者关注射频辐射对中枢神经系统的影响。为此，本文综述报道近年来关于射频辐射对人体认知功能、脑电生理、脑血流量的影响，以及对动物海马和认知功能损害的相关研究结果，旨为未来的研究提供参考。

关键词： 射频辐射；中枢神经系统；认知；脑电生理；脑血流量；综述

Research Progress on Effects of Radiofrequency Radiation on Central Nervous System　*WANG Chuang*[1,2], *CHEN Hai-yan*[1], *LEI Mei-ying*[1], *LI Hong-zheng*[1] (1.*303 Hospital Mental Health Center of Chinese People's Liberation Army*, *Guangxi* 530021, *China*; 2.*Guangxi Medical University*, *Guangxi* 530021, *China*). *Address correspondence to LI Hong-zheng*, *E-mail*: *psycho191@163.com*　*· The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.*

Abstract: With the continuous development of modern science and technology, the probability of people exposing to radiofrequency (RF) radiation has increased substantially. Nervous system is particularly vulnerable to RF radiation hazards, which concerns many researchers. To provide reference for further study, the current paper summarized recent reports about the effects of RF radiation on human cognitive function, brain electrophysiology, cerebral blood flow, as well as on animal hippocampus and cognitive function.

Key Words: radiofrequency radiation; central nervous system; cognition; brain electrophysiology; cerebral blood flow; review

射频辐射又称无线电波，是频率在100 kHz~300 GHz的电磁辐射，手机、移动基站、电视台天线等发出的无线电波是日常生活中常见的射频辐射。有研究认为，射频辐射可通过破坏一些维持蛋白活性结构的较弱化学键，增加活性氧族化合物（已知是热休克蛋白的诱导物）以及干扰热休克蛋白产生的细胞信号传导路径（通过热激因子激活作用）来诱导热休克蛋白的过量产生，从而引起一系列的生物反应而损伤机体组织[1]。神经系统细胞再生能力弱、抗氧化系统缺陷而新陈代谢旺盛，易遭受自由基的攻击，即使是低水平辐射也可通过诱导氧化应激而对神经系统产生不利影响[2]。目前，射频辐射已经成为新的环境污染，受到国内外学者的广泛关注，其对中枢神经系统尤其是大脑高级认知功能的影响已成为研究热点之一。

1　流行病学研究的局限

国内外一些横断面调查发现，日常生活中经常暴露于射频辐射环境者可增加头晕、头痛、乏力、记忆力减退等非特异性症状的发生率（如手机使用过多[3-4]或靠近移动基站[5-6]），然而，射频暴露与这些症状之间的因果关系并不明确。在各种流行病学研究中，对射频辐射水平的评估越精确，就会发现辐射与症状之间的关联性越不明显，如，最近FREI等[7]进行了一项前瞻性队列研究，旨在调查日常生活中的射频辐射对非特异性症状的影响，采用验证预测模型对远距离射频辐射水平进行评估，并通过调查手机使用情况和收集手机运营商数据来评估近距离射频辐射水平，随访1年，发现躯体症状或耳鸣的发生情况与辐射水平之间并没有相关关系；一项大型流行病学研究发现，虽然有10.3%的人把他们的症状归因于移动基站发出的电磁波，但通过辐射强度测量发现，这些主观症状与辐射强度之间并没有相关性[8]。

从近期较为严谨的流行病学研究来看，日常生活中的射频辐射水平与非特异性症状之间的因果关系并不显著，症状的产生与个体的主观认知密切相关，许多实验室研究证实了这一点，如RUBIN等[9]对60名自诉辐射敏感者进行了研究，发现无论在什么暴露类型下，敏感者在暴露或假暴露中各种症状的发生率远高于非敏感者，说明心理因素在此条件下起重要作用，相关研究也证实了这一点，那些自认为电磁敏感的人幸福感较低[10]并能体验更高水平的不适[11]。由于流行病学研究中混杂因素较多且难以控制，对主观症状的调查不能客观反映射频辐射的生物学效应，因此射频辐射的神经系统效应要通过深入细致的实验室研究来探讨。

2　人体试验研究的不一致性

使用人类志愿者作为试验对象的优势是其结果可能反映类似辐射暴露人群的健康情况，但其缺点也很明显，包括辐射

DOI：10.13213/j.cnki.jeom.2014.0022

[基金项目]全军医学科学技术“十二五”计划课题（编号：CWS11J278）；军队心理卫生应用性科研课题（编号：12XLZ204）；国防部专项科研项目（编号：GFB2012001-1）

[作者简介]王创（1988—），男，硕士生；研究方向：微波职业暴露的脑功能成像研究；E-mail：w545676253@163.com

[通信作者]李红政，E-mail：psycho191@163.com

[作者单位]1.解放军第303医院全军心理卫生指导中心，广西 530021；2.广西医科大学，广西 530021

暴露的持续时间短、志愿者的数量少且异质性大，其后果是经常检测不到显著的辐射效应，或者有阳性发现却无法复制，因此，尽管有许多研究直接检测了射频暴露对人脑生理和行为功能的影响，但目前还没有一致的定论。

2.1 认知行为功能

国外关于射频辐射对人体认知功能的影响已做了大量试验研究，但由于缺乏统一的认知评估工具，以及试验设计、辐射暴露装置、辐射强度的不同，使得各项研究结果差异很大，这极大地阻碍了对试验结果的解释和各研究之间的比较。大部分研究采用载波频率约 900 MHz 的全球移动通信系统信号作为辐射源，而认知任务复杂多样，目前还没有一个特定的任务可以很敏感地评估射频暴露的行为效应。在 2000 年以来的文献报道中，较早期的研究主要发现射频暴露可改善认知，如反应时间缩短[12]、准确性升高[13]、言语记忆和视空间工作记忆增强[14]等，而较近期的研究却发现射频暴露可导致认知功能减弱，如执行速度降低[15]、心智能力减弱[16]、迷宫行驶距离缩短[17]等，然而也有许多研究并没有阳性发现[18-20]。未来的研究目的应该集中于对实验任务敏感性或任务类型的探讨，从而认定一个可以更加细微地洞察射频暴露行为学效应的实验任务；在严格控制的条件下进行认知任务的随访，对于鉴定辐射行为效应的可靠性具有重要意义；另外，应避免实验任务太单一，因为任务太简单或太难都可能掩盖射频辐射潜在的行为学效应。值得注意的是，迄今几乎所有的研究都只评估了短期射频暴露后的认知功能改变，暴露时间通常在 10~150 min 不等，许多实验室研究之所以检测不到射频暴露前后的人体行为变化，可能是由于暴露时间太短，还不足以引起可察觉的认知行为改变，因此射频辐射的长期低水平暴露是未来研究的需要。

2.2 脑电生理

已有许多研究利用脑电图和事件相关电位检测急性射频暴露对脑电生理的影响。KRAUSE 等[21]运用假暴露、双盲、交叉设计等进行研究，采用 902 Hz 手机信号作为辐射源，大脑左右两侧同时暴露 6 周，包括假暴露、连续波电磁场和脉冲调制电磁场 3 种类型的暴露，发现虽然存在脑电生理效应（α 波频段改变，约 8~12 Hz），但这些效应是相当温和、不固定和无规律的，且难以复制。CROFT 等[22]的大型研究（120 人）证实了以前较小规模的研究，采用双盲交叉平衡设计（暴露或假暴露 30 min，间隔 1 周），辐射源为手机发出的低水平辐射，结果表明辐射暴露后可引起脑电图 α 波功率增加，但对大脑自然活动的其他频段的影响并没有一致的发现。FERRERI 等[23]利用事件相关电位调查手机射频对皮质兴奋性的影响，发现暴露侧的半球皮层抑制效应短暂下降，而皮层内易化效应一过性升高，然而，其他一些事件相关电位研究并没有阳性发现[24-25]。有研究者认为[26]，之所以许多研究没有观察到脑电效应或即使有效应也很微弱、无规律，最大的原因是大多数研究采用线性分析方法，由于大脑与它所处环境是不平衡的，脑电波不是固定的，因此电磁场对脑电活动的影响也是非线性相关的，采用线性分析方法很可能平均掉真正的电磁场效应。到目前为止，最一致的发现是关于脑电活动的变化，最常见的影响是在觉醒时的射频暴露（多为全球移动通信信号）可导致 α 波（8~12 Hz 频段）功率增强，而睡眠时的暴露可导致非快速眼动睡眠期的睡眠主轴频率改变，此外，脉冲调制的射频电磁场对诱导电生理效应至关重要，支持非致热效应的理念。

2.3 局部脑血流

局部脑血流变化反映了神经活动局部变化。HUBER 等[27-28]利用正电子发射断层显像技术进行了两次类似的研究，均发现在辐射吸收率为 1 W/kg 类手机射频暴露（脉冲调制 900 MHz 电磁场）30 min 后，暴露侧大脑半球的背外侧前额叶脑血流量增加，而第二次实验中[28]类基站射频（连续波）暴露没有这种改变，因此作者认为唯有脉冲调制的射频可诱导大脑生理变化。与此不同的是，HAARALA 等[29]检测 902 MHz 手机射频的暴露过程中（而不是暴露之后）的局部脑血流量变化，结果显示，最大暴露部位的血流量无显著改变，而双侧听觉皮层的局部脑血流量下降，然而，这被归因于手机通话状态下电池发生的高频听觉信号，因为使用非通话状态、外部电源的手机没有这种显著效应；AALTO 等[30]改进了 HAARALA 等[29]的设计（去除听觉干扰），发现靠近天线的颞下回脑血流降低，而较远的前额叶皮层血流量上升，但并未提供脑血流量测试与辐射暴露之间的时间关系，而阻碍了与上述研究的比较，需要更为严谨的实验求证。从目前少数的几个研究来看，似乎手机射频暴露可增加前额叶的局部脑血流量，这也与射频辐射可诱发神经活动变化的假设一致，但这一结论需进一步研究验证，并探讨不同位置的暴露对各个脑区的影响以及可能的产生机制。

考虑到各类人体试验的不一致性，在今后的研究中，辐射暴露装置、暴露条件、操作顺序、技术规格（如信号强度、频率成分）等都应详细记录备案，各个脑部位的剂量学数据也应该提供，以利于研究的复制或随访，这对于研究结果的解释以及各研究之间的比较有重大意义。另外，在试验设计时，应充分考虑对组内及组间差异影响较大的一些因素，包括样本量及样本特征（如年龄、性别、文化程度）、辐射暴露特征（如强度、载波频率、波形、暴露时间、暴露部位、距离）等，测试的时间（暴露前、中、后）以及行为任务的数量和类型都应在试验开始前充分考虑，以利于对各种观察结果做出合理的解释，探讨出射频辐射的真实效应。

3 动物实验研究的一致发现

动物实验可解决人体试验中暴露时间短、数量少、异质性大等问题，但它不能直接反映射频辐射对人体的影响。尽管如此，动物实验中较为一致的发现可为射频辐射的人体生物学效应提供科学依据。关于射频辐射对中枢神经系统影响的相关动物研究结果已有学者作了详细阐述[31-32]，以下仅对近年来关于射频辐射导致认知功能损害的相关发现做一简要归纳。

3.1 海马损伤与认知损害

关于海马特别容易受到射频辐射的损害已在许多动物研究中得到证实。海马作为大脑中最重要的结构之一，它控制行为和认知功能，许多动物实验研究显示，低水平辐射可导致海马结构和功能的损害以及认知功能的受损。如 SALFORD 等[33]发现，暴露于低于 100 mW/kg 的电磁场中可诱导老鼠显著的海马神经元损伤以及皮质和基底神经节损害；NING 等[34]的动物研

究表明，在早期发育阶段慢性暴露于2.4 W/kg的1 800 MHz微波可能影响海马神经元的树突发展和兴奋性突触的形成。海马病变可损害老鼠的空间和非空间记忆，长期微波暴露后，使大鼠对目标以及呈现顺序的记忆受损[35]，空间记忆能力下降[36]，因此，许多研究者认为即使在低水平的辐射下，微波也可能对神经系统产生不利的生物效应，尤其是海马，特别容易受到微波辐射的损害，可能导致记忆和学习障碍。最近，ZHAO等[37]的研究显示，与对照组相比，长期微波暴露小鼠出现巩固和（或）回忆障碍，另外还发现了一个剂量依赖性的改变，即随着微波辐射的增加平均逃跑潜伏期延长，而病理检测发现，大脑抑制性和兴奋性神经递质失衡以及海马结构出现病理改变，表明认知缺陷可能或至少部分是由于暴露后海马功能损伤和结构改变所导致，温度检测还表明这种影响为非热能效应。

3.2　认知损害的分子生物学机制

关于射频辐射的大脑损伤机制也有较一致的发现，这种损害可能是通过大脑氧化应激形成而介导。CAMPISI等[38]发现，即使是低强度的电磁场急性暴露，也可诱导原始培养中星形胶质细胞的活性氧产生增加和DNA碎片的增多。而分子生物学研究[39]发现，在40 d和60 d的手机900 MHz微波暴露后费舍尔鼠大脑内的过氧化氢酶活性降低，黄嘌呤氧化酶活性增加，而且脑组织中丙二醛和羰基浓度显著增加，表明在微波暴露后费舍尔鼠的大脑氧化受损。最近，MEGHA等[2]发现，在辐射吸收率远低于辐射指南临界值（欧洲标准为2 W/kg）的情况下，仍导致了老鼠神经认知功能的损害，其空间学习和记忆功能明显受损。作者从细胞、分子水平进行了分析，发现大脑中氧化产物丙二醛以及可诱导氧化应激的蛋白氧化修饰指标蛋白羰基含量显著增高，而抗氧化剂还原型谷胱甘肽水平显著降低，因此，微波辐射暴露可能是通过诱导自由基产生，引起大脑炎症反应失衡和氧化损伤，从而影响空间学习和记忆。GARAJ-VRHOVAC等[40]对雷达作业人员的检测也发现了丙二醛浓度的增高和谷胱甘肽浓度的下降，说明脉冲微波的工作环境可能通过氧化应激导致人体基因和细胞的损害。

4　结语

综述了射频暴露影响中枢神经系统生理和行为功能的相关证据，发现了目前关于这方面研究的一些局限。流行病学研究多止于对辐射暴露人群的主观症状的调查，据此来推测射频暴露对神经系统的影响，然而心理认知因素、其他不良环境因素等都会影响暴露人群的健康状况，导致使得人们无法从现有的流行病学报道中获得较为一致和肯定的结论。关于人体试验研究，由于低水平辐射的人体短期效应较微弱，差异性大且不稳定，使得目前的研究手段难以对这种效应精确界定和统一。动物实验研究有较为一致的发现，如海马的易损性以及大脑的氧化损伤机制，但也有许多其他发现得不到合理的解释，有必要对其进行反复验证；对认知功能障碍也难以准确判断，而分子领域的研究多需离体测试分析，干扰因素较多。从目前的实验结果来看，脉冲调制的射频电磁场（而不是类基站的连续波）似乎更容易引起大脑的生理变化，然而，总的来说，短期的射频暴露对人脑生理和行为功能影响均不显著，使得实验结果缺乏一致性及重复性，因此在选择辐射强度时，应尽量采用最大的辐射吸收值，并延长暴露时间，以便最大可能的观察到行为学效应，但应严格按照世界卫生组织关于电磁－生物效应研究的研究标准和指南进行。人体实验应采用双盲设计，可能的混杂因素（如咖啡因和酒精摄入、实验前的睡眠情况）必须控制。在今后的研究中，可结合脑功能影像、脑电生理等技术对辐射职业暴露人群进行研究，这样可以直接检测长期辐射暴露下人脑结构和功能的变化，这对于探索射频辐射的中枢神经系统效应以及提出针对性的防护策略意义重大；另外，儿童因大脑没有完全成熟而对辐射损害特别敏感，今后的研究应特别关注射频辐射对发育期大脑的影响。

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献：

[1]de POMERAI D，DANIELLS C，DAVID H，et al. Non-thermal heat-shock response to microwaves[J]. Nature，2000，405(6785)：417-418.

[2]MEGHA K，DESHMUKH P S，BANERJEE B D，et al. Microwave radiation induced oxidative stress，cognitive impairment and inflammation in brain of Fischer rats[J]. Indian J Exp Biol，2012，50(12)：889-896.

[3]SANDSTRÖM M，WILEN J，OFTEDAL G，et al. Mobile phone use and subjective symptoms.Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones[J]. Occup Med(Lond)，2001，51(1)：25-35.

[4]戴伏英，邢玉梅，吉秀亮.手机对神经衰弱症状影响的研究[J].现代预防医学，2007，34(21)：4021-4022，4028.

[5]ABDEL-RASSOUL G，EL-FATEH O A，SALEM M A，et al. Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations[J]. Neurotoxicology，2007，28(2)：434-440.

[6]HUTTER H P，MOSHAMMER H，WALLNER P，et al. Subjective symptoms，sleeping problems，and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations[J]. Occup Environ Med，2006，63(5)：307-313.

[7]FREI P，MOHLER E，BRAUN-FAHRLÄNDER C，et al. Cohort study on the effects of everyday life radio frequency electromagnetic field exposure on non-specific symptoms and tinnitus[J]. Environ Int，2012，38(1)：29-36.

[8]BERG-BECKHOFF G，BLETTNER M，KOWALL B，et al. Mobile phone base stationsand adverse health effects：phase 2 of a cross-sectional study with measured radio frequency electromagnetic fields[J]. Occup Environ Med，2009，66(2)：124-130.

[9]RUBIN G J，HAHN G，EVERITT B S，et al. Are some people sensitive to mobile phone signals? Within participants double blind randomised provocation study[J]. BMJ，2006，332(7546)：886-891.

[10]RUBIN G J，CLEARE A J，WESSELY S. Psychological factors associated with self-reported sensitivity to mobile phones[J]. J Psychosom Res，2008，64(1)：1-9.

[11]FURUBAYASHI T，USHIYAMA A，TERAO Y，et al. Effects of short-term W-CDMA mobile phone base station exposure on women with or

without mobile phone related symptoms[J]. Bioelectromagnetics, 2009, 30(2): 100-113.

[12]KOIVISTO M, REVONSUO A, KRAUSE C, et al. Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans[J]. Neuroreport, 2000, 11(2): 413-415.

[13]SMYTHE J W, COSTALL B. Mobile phone use facilitates memory in male, but not female, subjects[J]. Neuroreport, 2003, 14(2): 243-246.

[14]EDELSTYN N, OLDERSHAW A. The acute effects of exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on human attention[J]. Neuroreport, 2002, 13(1): 119-121.

[15]LURIA R, ELIYAHU I, HAREUVENY R, et al. Cognitive effects of radiation emittedby cellular phones: the influence of exposure side and time[J]. Bioelectromagnetics, 2009, 30(3): 198-204.

[16]RODINA A, LASS J, RIIPULK J, et al. Study of effects of low level microwave field by method of face masking[J]. Bioelectromagnetics, 2005, 26(7): 571-577.

[17]WIHOLM C, LOWDEN A, KUSTER N, et al. Mobile phone exposure and spatial memory[J]. Bioelectromagnetics, 2009, 30(1): 59-65.

[18]HAMBLIN D L, CROFT R J, WOOD A W, et al. The sensitivity of human event-related potentials and reaction time to mobile phone emitted electromagnetic fields[J]. Bioelectromagnetics, 2006, 27(4): 265-273.

[19]KLEINLOGEL H, DIERKS T, KOENIG T, et al. Effects of weak mobile phone-electromagnetic fields(GSM, UMTS)on event related potentials and cognitive functions[J]. Bioelectromagnetics, 2008, 29(6): 488-497.

[20]SAUTER C, DORN H, BAHR A, et al. Effects of exposure to electromagnetic fields emitted by GSM 900 and WCDMA mobile phones on cognitive function in young male subjects[J]. Bioelectromagnetics, 2011, 32(3): 179-190.

[21]KRAUSE C M, PESONEN M, HAARALA BJÖRNBERG C, et al. Effects of pulsed and continuous wave 902 MHz mobile phone exposure on brain oscillatory activity during cognitive processing[J]. Bioelectromagnetics, 2007, 28(4): 296-308.

[22]CROFT R J, HAMBLIN D L, SPONG J, et al. The effect of mobile phone electromagnetic fields on the alpha rhythm of human electroencephalogram[J]. Bioelectromagnetics, 2008, 29(1): 1-10.

[23]FERRERI F, CURCIO G, PASQUALETTI P, et al. Mobile phone emissions and human brain excitability[J]. Ann Neurol, 2006, 60(2): 188-196.

[24]INOMATA-TERADA S, OKABE S, ARAI N, et al. Effects of high frequency electromagnetic field(EMF)emitted by mobile phones on the human motor cortex[J]. Bioelectromagnetics, 2007, 28(7): 553-561.

[25]KLEINLOGEL H, DIERKS T, KOENIG T, et al. Effects of weak mobile phone-electromagnetic fields(GSM, UMTS)on event related potentials and cognitive functions[J]. Bioelectromagnetics, 2008, 29(6): 488-497.

[26]MARINO A A, CARRUBBA S. The effects of mobile-phone electromagnetic fields on brain electrical activity: a critical analysis of the literature[J]. Electromagn Biol Med, 2009, 28(3): 250-274.

[27]HUBER R, TREYER V, BORBÉLY A A, et al. Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG[J]. J Sleep Res, 2002, 11(4): 289-295.

[28]HUBER R, TREYER V, SCHUDERER J, et al. Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow[J]. Eur J Neurosci, 2005, 21(4): 1000-1006.

[29]HAARALA C, AALTO S, HAUTZEL H, et al. Effects of a 902 MHz mobile phone on cerebral blood flow in humans: a PET study[J]. Neuroreport, 2003, 14(16): 2019-2023.

[30]AALTO S, HAARALA C, BRÜCK A, et al. Mobile phone affects cerebral blood flow in humans[J]. J Cereb Blood Flow Metab, 2006, 26(7): 885-890.

[31]干雅平, 申秀英, 许晓路, 等.微波辐射对中枢神经系统影响的研究进展[J].中华劳动卫生职业病杂志, 2006, 24(10): 628-630.

[32]隋建峰, 范郑丽.电磁场的神经生物学效应及机制研究进展[J].环境与职业医学, 2009, 26(4): 409-411, 416.

[33]SALFORD L G, BRUN A E, EBERHARDT J L, et al. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones[J]. Environ Health Perspect, 2003, 111(7): 881-883.

[34]NING W, XU S J, CHIANG H, et al. Effects of GSM 1 800 MHz on dendritic development of cultured hippocampal neurons[J]. Acta Pharmacol Sin, 2007, 28(12): 1873-1880.

[35]NITTBY H, GRAFSTRÖM G, TIAN D P, et al. Cognitive impairment in rats after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation[J]. Bioelectromagnetics, 2008, 29(3): 219-232.

[36]NARAYANAN S N, KUMAR R S, POTU B K, et al. Spatial memory performance of Wistar rats exposed to mobile phone[J]. Clinics(Sao Paulo), 2009, 64(3): 231-234.

[37]ZHAO L, PENG R Y, WANG S M, et al. Relationship between cognition function and hippocampus structure after long-term microwave exposure[J]. Biomed Environ Sci, 2012, 25(2): 182-188.

[38]CAMPISI A, GULINO M, ACQUAVIVA R, et al. Reactive oxygen species levels and DNA fragmentation on astrocytes in primary culture after acute exposure to low intensity microwave electromagnetic field[J]. Neurosci Lett, 2010, 473(1): 52-55.

[39]SOKOLOVIC D, DJINDJIC B, NIKOLIC J, et al. Melatonin reduces oxidative stress induced by chronic exposure of microwave radiation from mobile phones in rat brain[J]. J Radiat Res, 2008, 49(6): 579-586.

[40]GARAJ-VRHOVAC V, GAJSKI G, PAŽANIN S, et al. Assessment of cytogenetic damage and oxidative stress in personnel occupationally exposed to the pulsed microwave radiation of marine radar equipment[J]. Int J Hyg Environ Health, 2011, 214(1): 59-65.

(**收稿日期**: 2013-07-26)

(英文编辑: 汪源; 编辑: 洪琪; 校对: 徐新春)