

军事医学科学院放射与辐射剂量学研究进展与展望

军事医学科学院

收稿日期: 2011-07-20; 接受日期: 2011-08-27
doi: 10.1360/052011-609

摘要 本文系统介绍了 60 年来军事医学科学院放射与辐射医学研究所从防原医学至放射与辐射医学研究各个阶段辐射剂量学研究的主要情况, 包括核试验剂量保证、生物效应照射实验条件及剂量学方法的建立、事故照射剂量重建技术、辐射防护学及其剂量评价、医疗和诊断剂量学、辐射加工剂量及辐照工艺、辐射剂量测量技术、核设施事故剂量学、辐射剂量标准、微波剂量学等所获得的成果和经验, 在此基础上, 对该所辐射剂量学发展方向和研究重点进行了分析和论述.

关键词
电离辐射
剂量
剂量学
辐射防护

电离辐射剂量学以物理学方法为主, 研究电离辐射能量在物质中的转移和沉积规律, 以及测量方法. 该学科是研究生物效应量效关系、作用机制和放射防护的基础, 因此也是军事医学科学院辐射防护和放射医学研究的重要组成部分. 建院 60 年来, 辐射防护和放射医学研究、电离辐射剂量学研究不断发展, 为军队核武器损伤医学防治, 尤其是在放射病诊治和辐射防护实践中的应用做出了贡献.

随着军事医学方向任务的拓展, 从“十五”开始, 放射与辐射医学研究所进行电磁辐射剂量学和卫生防护标准研究. 电磁辐射剂量学研究电磁波与生命物质相互作用的规律与机制以及测量方法, 是研究电磁生物效应量效关系的基础.

本文系统介绍军事医学科学院放射与辐射医学研究所 60 年来从防原医学至放射与辐射医学研究各个阶段辐射剂量学研究的主要情况, 包括核试验动物照射剂量保证、生物效应照射实验条件及剂量学方法的建立、事故照射剂量重建技术、辐射防护

剂量学及其评价、医疗和诊断剂量学、辐射加工剂量及辐照工艺、辐射剂量测量技术、核设施事故剂量学、辐射剂量标准、微波剂量学等所获得的成果和经验, 在此基础上, 对辐射剂量学发展方向和研究重点进行了分析和论述.

1 核试验动物照射剂量保证

自 1964 年中国第一次核试验起, 军事医学科学院放射与辐射医学研究所就进行了长期不懈的核试验现场中子、 γ 辐射剂量测量的研究, 研制了供剂量测量盒, 并不断改进; 采用 Au, Al, Cu, Mn, Ni, In, Co 和 S 等中子活化箔探测器测定了各种核爆炸条件下, 动物模体内的中子全能谱, 并确定以 S 和 Au 探测器的活化放射性活度给定核试验场动物的中子剂量; 选用胶片、银激活荧光玻璃和热释光剂量计测定 γ 剂量; 同时研制出小型热释光读出仪、定标器、自给能(充电)小型电离室等.

2 放射生物剂量学研究

放射生物剂量学是放射生物学和放射医学研究的先决条件和保证。

军事医学科学院放射与辐射医学研究所于 1959 年建立了适用于放射生物学研究用钴-60 源照射装置, 1963 年又建立了源活度为 PBq 水平的新装置。之后陆续用电离室和化学剂量计测定了辐射场剂量学参数, 建立了大、小动物与细胞照射方法, 确定了受照物的吸收剂量。

20 世纪 60 年代初, 在该所建立的高压倍加器和 中国原子能研究院回旋加速器上, 初步建立了中子剂量测量方法和生物照射条件。20 世纪 60 年代中期, 在清华大学实验用核反应堆上建立了国内唯一的具有 4 种不同中子- γ 比释动能比的裂变中子、 γ 混合辐射场的生物照射条件; 用活化法测定了空气中和狗模体内的中子能谱, 用非线性规划法解出了中子全谱; 用双电离室方法确定了空气中与大、小动物模体内的中子、 γ 吸收剂量率; 建立了质量保证体系。

3 电离辐射防护剂量学研究

辐射防护剂量学是辐射防护的重要内容和先导, 它的作用是量度人类及生活环境所受到的电离辐射损害, 为评价防护措施效果提供依据。

军事医学科学院放射与辐射医学研究所在总结多年来进行电离辐射事故人体剂量估计经验的基础上, 在国内率先建立了一套完整的电离辐射事故外照射人体物理剂量早期快速估计和评价体系, 即: (1) 提出了造血干细胞活存计权等效剂量表达式、计算模式、通用计算机程序和简易实用估算方法; (2) 计算了不同能量的 γ 、X 射线点源在各种照射条件下的器官剂量、全身剂量与照射量、个人剂量计读数的关系, 给出了应用条件; (3) 研究出大视野大深度的组织-空气比(tissue-air ratio, TAR), 为计算事故剂量提供了重要参数; (4) 研制成功手表红宝石事故剂量测量方法, 研究出手表玻璃和人体骨骼测量事故剂量的顺磁共振技术; (5) 建立了放射事故外照射人体剂量估算的四项原则和三阶段程序的实用物理学体系。

上述研究成果已在国内 10 多起重大放射事故的近 50 余例受照病人的剂量测量和估算中得到应

用, 并在国内推广应用, 编入了《急性放射损伤诊治手册》、《核辐射事故的医学处理》等出版物。该所人员负责制订了国家职业卫生标准《用于光子外照射放射防护的剂量转换系数》、《用于中子外照射放射防护的剂量转换系数》、《X 射线诊断中受检者器官剂量的估算方法》。近几年来, 该所人员还负责制订了国家军用标准《军队放射防护与防原医学术语》、《核弹头装检人员个人监测规定》等。这些国(军)标在中国军内外辐射防护实践中发挥了重要作用。

4 辐射加工剂量学研究

辐射加工是近年来国内、外发展起来的高新核技术, 军事医学科学院放射与辐射医学研究所利用现有大型钴-60 源照射装置(PBq 级), 于 1984 年率先在国内开展了辐射化工、医药用品消毒灭菌、食品保藏等辐射加工研究。为此, 建立了大剂量(大于 kGy)测量技术, 利用硫酸亚铁、重铬酸银、重铬酸钾高剂量测量系统, 测定了 PBq 量级钴-60 源辐射场空气中和受照物内的剂量参数; 利用实验测量和计算相结合方法确定了介质-空气比; 建立了大剂量量值传递网络。

多年来, 该所在辐射加工剂量学研究和辐射加工实践中积累了较丰富的经验。1987 年, 该所人员负责制订了国家标准《辐射加工用钴-60 辐照装置的辐射防护规定》, 后来又修订为《钴-60 辐照装置的辐射防护与安全标准》; 1991 年, 该所人员又负责制订了国家标准《一次性医疗用品(射线辐射灭菌标准)》。这些国家标准有力地促进了辐射加工行业的科学化和规范化以及核技术的应用。

1986~1994 年, 该所承担了国家“七五”攻关项目《医疗用品 γ 辐射灭菌实验研究》和“八五”重点攻关项目《中药材、中成药辐射消毒灭菌实验研究》中的 γ 照射和剂量保证。

5 辐射剂量测量技术研究

辐射剂量测量技术是电离辐射剂量学的重要内容, 军事医学科学院放射与辐射医学研究所电离辐射剂量学研究工作不断发展和深化, 与辐射剂量测量技术不断创新和进步是密切相关的。

5.1 中子剂量测量

20世纪80年代初,该所在国内首先研制出组织等效导电塑料,其组成重量百分比对中子而言,与人体软组织等效,与国际上公认的A-150组织等效塑料相媲美,进而设计制作了各种类型和规格的流气式组织等效电离室与无氢电离室,配制了组织等效气体.建立了双电离室测量中子、 γ 混合辐射场吸收剂量的方法;实验测定了无氢电离室的中子相对灵敏度,为区分混合场中中子与 γ 剂量比例提供了可靠的参数.

5.2 防护剂量测量

20世纪90年代初,该所为建立防护水平低能X射线照射量标准装置,在国内首先设计研制出大体积薄壁碳纤维薄壁球形电离室,具有坚韧、不易破损、体积稳定、导电性能好,对低能X射线照射量测量灵敏度高等优点,既可作为防护水平低能X射线照射量标准,也适用于照射量的现场测量,填补了国内空白.中国辐射防护研究院用该电离室建立了防护水平标准装置,日本高能物理所要求购买该电离室作为标准.

为更好地满足军队核与辐射相关人员剂量监测和放射病早期快速分类诊断的需要,从20世纪90年代初开始进行了热释光探测器的深入研究,建立了BIRM系列热释光材料和探测器的制备工艺,研制出了近20种用于X、 γ 、 β 和中子等射线剂量测量的探测器,其剂量学性能优于国家标准《个人和环境剂量监测用热释光剂量测量系统》规定的指标要求.其中BIRM-100M, BIRM-1000和BIRM-10T型探测器通过了国家计量检定认证,获得了计量检定证书.首创了 $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$, $\text{LiF}(\text{Mg, Ti})$ —聚四氟乙烯探测器的冷压烧结切割工艺,研制出BIRM-10T, BIRM-100MF型探测器,提出了优化测量参数的技术,进而研制出BIRM系列热释光剂量计,现已批量生产,在军内外推广应用,部分产品已在海外一些实验室使用.基本研制成功以软件功能强为特色的多功能自动热释光剂量读出仪,温控精度高和热区均匀、稳定性好的热释光探测器退火炉和冷却炉.目前,该所的热释光剂量测量系统及其研究水平处于国内领先地位.

5.3 战时个人剂量测量

20世纪60年代初,该所开始对战时个人剂量测量技术进行研究,20世纪60年代末研制出氯仿化学剂量计,经实验室性能测量和核试验场检验,并在寒区和热带部队试用,似乎适合粗略判断人员受照剂量.

20世纪70年代初,该所参加了某单位负责的真空室个人剂量计的研制,该剂量计适合于核爆炸混合辐射场中测量强 γ 射线剂量(大于1 Gy),已推广使用.1974年,该所研制出天然 CaF_2 热释光个人剂量计(探测器有管状、片型和内热式3种),建立了热压切割、内热式喷涂和自加热工艺,并研制出小型现场用热释光读出仪.该剂量计(剂量测量范围为0.05 m~10 Gy;使用铅过滤后,在 γ 射线70~10 MeV能量范围内,能量响应在 $\pm 15\%$ 内一致;对快中子和热中子响应低;无剂量率响应;环境温度在 $-43\sim 50^\circ\text{C}$ 范围内,剂量计照后无衰退;可重复多次使用).

20世纪70年代末和80年代初,该所利用仿真人体模型和均匀组织等效人体模型,在核试验现场试用,为个人剂量计测得数据转换成人体剂量提供了参考资料.该研究结果已写入有关应用资料推广应用.

5.4 事故剂量测量

20世纪80年代初,该所对手表红宝石作为放射事故个人剂量计的热释光剂量特性进行了深入研究,研制了手表红宝石专用热释光测读装置,建立了测量方法和相应的资料档案.结果显示,在一定的控制条件下测量复现性好,退火条件要求不苛刻,剂量响应在0.1~10 Gy范围内呈良好线性关系,测量下限可达1 mGy;各手表红宝石之间灵敏度差别大、具有衰退特性,但这可通过控制测量条件、操作和采用相同条件下的“自身”定度等措施得到满意的解决.

20世纪80年代末至90年代中期,该所利用顺磁共振技术,成功地建立了手表玻璃、假牙和人体骨骼等事故剂量测量方法.建立了人体组织和随身携带物品中顺磁物质含量与受照剂量的量—效关系,采用固定内标等g值区间二重积分信号强度计算方法,利用较大体积片状样品等特殊形态样品的定量测量方法,选定适用于某些样品的自身本底信号恢复方法,得出人骨可测剂量下限 < 2 Gy;牙釉可测剂量下

限 <0.5 Gy; 表蒙玻璃可测剂量下限 <2 Gy; 蔗糖可测剂量下限 <1 Gy.

5.5 加工剂量测量

20世纪80年代初, 该所开展了丙氨酸电子自旋共振(ESR)高剂量测定方法的研究. 实验表明, 丙氨酸剂量计在 $5\sim 1.3\times 10^4$ Gy 剂量范围内信号响应呈良好的线性, 在室温条件下保存信号稳定, 可进行反复测量, 对 γ 射线剂量率高达 1×10^5 Gy/h, 未见剂量率响应, 能量响应在80 keV以上可不予考虑, 具有较好的生物材料等效性, 测量不确定度 $<4\%$ ($k=2$). 中国计量科学研究院已采用该剂量测量技术, 并加以改进后作为辐射加工级剂量量值传递标准.

20世纪80年代中期, 该所和中国计量科学研究院协作, 研制成功PC-85辐射显色染料薄膜剂量计. 采用付品红氧化物做辐射显色染料, 将其掺入聚乙烯醇缩丁醛塑料基质中, 制膜用柠檬酸作稳定剂, 用普通玻璃板经硅化处理作浇注平台, 局部小空间控制温湿条件, 真空加热固化工艺, 制备成干净透明、厚度均匀的薄膜. 该剂量计可用于 γ 和电子辐射加工现场中常规剂量测量, 测量范围为 $1\sim 100$ kGy, 呈良好线性, 测量值不确定度为 8% ($k=1$), 主要剂量学性能指标达到国际上同类剂量计的水平, 填补了国内空白. 该成果已在 ^{60}Co γ 辐射加工和电子高剂量测量中推广应用.

6 核设施事故剂量学研究

核设施和核装备事故所涉及到的剂量学是防原医学和军队辐射防护工作的重要内容. 20世纪90年代初, 军事医学科学院放射与辐射医学研究所与有关单位合作, 对辐射环境污染与人员受照剂量的快速估算进行了研究, 提出了在事故涉及方位的环境污染和人员受照剂量的快速估算方法, 建立了实用的计算机处理系统, 即: (1) 对于源项估计, 提出和分析了依据现场监测数据和实时气象条件导出源项的方法, 以及事故核素谱变化对源项与受照人员剂量估算的影响, 给出了从剂量学角度认为是合理的核潜艇事故源项数据; (2) 对于放射性流出物在大气中的输运模式, 提出了分段高斯烟羽输运模式, 应用短期扩散因子、干湿沉积损耗因子和衰变因子对高架点源、地面源释放和大气输运过程中的影响因素进行

校正; (3) 对于人体剂量估算, 建立了非均匀照射人体剂量模式, 计算了多种照射途径的人体内外剂量; (4) 对于计算机处理系统, 可提供核事故早期阶段实施应急计划和选择干预措施所需的剂量学资料. 该项成果也可用于民用核设施动力厂和实验核反应堆的核事故.

7 辐射剂量学标准研究

辐射剂量学标准是保证剂量学的量值准确、统一, 实施量值传递和溯源的计量器具或装置, 是剂量学的重要组成部分.

自20世纪90年代初开始, 军事医学科学院放射与辐射医学研究所先后研究并建立了如下剂量学标准: (1) 治疗级 γ 射线参考辐射及其照射量标准, 量限为 $(0\sim 2.58)\times 10^{-1}$ C/kg, 标准扩展不确定度 $<2\%$ ($k=2$, 治疗级水平), $<3\%$ ($k=2$, 防护级水平); (2) 过滤X射线参考辐射及其照射量标准, 量限为 $(0\sim 2.58)\times 10^{-1}$ C/kg, 标准扩展不确定度 $<3\%$ ($k=2$, 治疗级水平), $<5\%$ ($k=2$, 防护级水平); (3) 辐射加工级 γ 射线水吸收剂量标准, 量限为 $10\sim 10^4$ Gy, 标准扩展不确定度 $<3\%$ ($k=2$); (4) $4\pi\gamma$ 电离室活度标准, 量限为 $1\times 10^4\sim 1\times 10^{10}$ Bq, 标准不确定度 $<5\%$. 研究并建立了相应的校准(检定)方法和质量保证体系. 经国防科工委计量机构考核、认可和授权为中国人民解放军医用放射学计量测试研究总站、北京国防区域计量站1020校准实验室, 国家科委授权为国家生物医学分析中心—辐射和放射性计量实验室. 建立的这些计量标准已对工作剂量计、个人剂量计和X, γ 辐射场及液体放射性活度进行校准/检定, 为与电离辐射和放射性活度有关的研究和医疗、生产提供了计量方法、评价程序以及准确可靠的剂量学量值.

8 图像分析技术在辐射剂量学中的应用

图像分析技术是自动控制技术、模式识别技术和计算机技术的结合, 它已深入到各个领域, 在辐射剂量学中越来越发挥重要作用.

8.1 固体核径迹自动测量系统

1992~1994年, 军事医学科学院放射与辐射医学研究所利用图像分析技术, 实现了显微镜高精度的

自动聚焦与位移和核径迹的自动识别. 聚焦与位移精度分别达到 0.2 和 2 μm , 聚焦时间约 3 s, 能准确地从气泡或划痕中辨认不同形状和大小的径迹, 并区分重叠径迹, 自动计算出径迹密度; 与显微镜目测比较, 相对测量误差小于 10%, 速度提高 10 倍, 在标准氩室中比对的相对误差为 7.6%. 该技术已用于中子剂量测量和部队营房和地下设施氩浓度的监测和中子能谱的测量, 达到国外 20 世纪 90 年代的水平, 填补了中国核径迹全自动测量的空白.

8.2 染色体核型自动分析系统

1993~1996 年, 该所研制成功染色体核型自动分析系统. 该系统的特点是: (1) 具有自动分割粘连染色体的功能, 减少人工操作; (2) 具有分离重叠染色体功能, 可对重叠染色体进行分析; (3) 在染色体分类中没有使用双着丝粒位置参数, 加快了处理速度和提高了分析准确性; (4) 具有自动建库程序, 便于推广应用; (5) 在核型校正部分增加了分割编辑功能, 对在预处理过程中未分开的染色体进行分割、移动、旋转操作, 避免重新处理. 经 100 个细胞的 G 带染色体核型生物学验证, 准确率为 93%, 分析速度约 4 min. 其总体性能指标居目前国内领先水平, 已在放射事故受照人员随访观察中应用, 亦可用于遗传疾病的染色体分析.

8.3 染色体畸变自动计数系统

该系统包括在低倍物镜下中期分裂细胞的自动寻找、分级评类、定位, 在高倍物镜下对畸变染色体双着丝粒的识别计数. 为提高分析速度, 使用了两台计算机, 一台用于自动位移显微镜载物平台和自动聚焦, 另一台用于自动寻找中期分裂细胞和对畸变染色体识别计数. 该系统对双着丝粒染色体畸变判别的准确率高于 80%, 假阳性率和假阴性率低, 性能指标与国外同类产品相当, 为提高放射事故受照人员早期生物诊断的能力和水平创造了条件.

9 电磁辐射剂量学研究进展

9.1 S 波段微波生物照射实验室的建立

效应源微波频率为 S 波段, 脉冲宽度数十纳秒到两微秒连续可调, 可单(多)次发射, 或以一定的重复频率连续发射微波脉冲. 微波暗室由高碳钢六面

密封焊接外加吸波材料构成, 屏蔽性能达到 100 dB, 微波吸收性能达到 45 dB, 辐射场静区直径 1 m, 可以照射大型实验动物. 在满足远场照射的条件下, 照射点平均功率密度可高达 100 mW/cm^2 .

建立了微波输出系统实时峰值功率监测方法, 确定了微波照射室的远场范围、脉冲波形、脉间稳定性和辐射场均匀性等辐射场参数, 为剂量学研究提供了基础数据.

9.2 理论电磁剂量学研究

建立了大鼠、猴和人体的数值电磁模型, 采用时域有限差分法(finite difference time domain, FDTD)计算了远场条件下, 不同脉宽、不同重复频率脉冲电磁波在生物体内的电磁能量沉积及分布, 给出了重点靶器官的器官剂量, 为生物效应研究提供依据.

9.3 实验剂量学研究

研制了小鼠照射体模和基于热量测量的微波实验剂量学方法, 对微波照射小鼠体模平均 SAR 进行精确测量. 对实验过程中可能产生的误差进行了分析, 并给出了修正方法. 实验剂量学方法是对理论剂量学的有力补充, 同时也验证了理论剂量学的计算结果.

10 展望

放射与辐射剂量学是一门新兴的学科. 随着科学技术的进步及社会、经济的推动, 剂量学已拓展到许多领域, 如电离辐射剂量学、放疗剂量学、辐射防护剂量学、环境剂量学、核武器爆炸测量学、辐射加工剂量学、放射生物剂量学等; 按电离辐射的类别划分, 则有 X、 γ 射线剂量学、电子及 β 射线剂量学、中子剂量学、重粒子剂量学、宇宙射线剂量学、微波剂量学等. 近十几年来, 辐射剂量学研究逐渐成熟, 但由于在理论和方法上没有重大突破, 辐射剂量学在其经典方法上没有重大进展.

军事医学科学院放射与辐射医学研究所是国内开展辐射剂量学研究起步最早的单位之一, 具有一支雄厚的科研队伍和扎实的工作基础. 21 世纪, 从国防建设和国民经济建设的实际需要出发, 对剂量学工作者提出了更高的要求, 应该重点做好以下几方面的工作.

10.1 提高剂量测量技术的水平

剂量测量技术和方法的创新和提高是剂量学发展的突破口和前提. 应分别建立和完善供常规监测和事故(包括战时)监测用的剂量表达方法和实测技术, 如进一步研究各种类型和规格的热释光探测器及其自动读出器系统, 研制小型化的顺磁波谱仪, 寻找新的“事故剂量计”, 研制供不同用途的剂量学模型、剂量探测器及测量系统. 更新必要的仪器设备, 引进国外先进技术, 使剂量测量技术达到国际先进水平.

10.2 建立和完善辐射计量标准

现已建立的 X, γ 照射量和水吸收剂量标准应进一步完善, 应建立 β 和中子吸收剂量标准、CT 和核磁共振剂量标准. 关键问题是提高计量标准的准确度, 为放射生物学和放射医学研究和辐射防护研究提供标准辐射场和准确的剂量学量值. 为此, 应从国外权威计量机构引进标准计量仪器, 并建立相应计量方法, 使剂量学量值能溯源到国家基准或与国际量值比对, 以便对下进行量值传递.

10.3 开展微剂量学研究

开展微剂量学研究, 对深入进行放射生物学和放射医学研究具有极其重要的意义. 利用该所研制和从国外引进的正比计数器(管), 建立相应辐射粒子

的微剂量学方法. 从理论和实验上研究探索微电子学和微型探测器技术用于固体微剂量学的测量方法. 开展微剂量学计算方法的研究. 从细胞和分子水平上定量描述电离辐射能的沉积规律, 阐明电离辐射损伤的作用机制.

10.4 深入进行计算剂量学研究

计算剂量学研究近 10 年来相当活跃, 从广义上讲, 它包括计算机图像、图形分析技术, 剂量数学模型、剂量参数选取和计算程序等. 应进一步研究染色体畸变自动计数系统, 提高识别准确率, 降低假阳性率和假阴性率; 深入研究核事故人体剂量计算的三维动态模拟分析系统, 重构核事故场景和源项所致人体剂量的表达及计算方法; 开展放射成像中的剂量计算研究, 如 CT、核磁共振、X 和 γ 刀等的剂量计算, 完成在线实时剂量监测.

10.5 加强微波剂量的研究

随着该所军事医学方向任务的拓展, 满足平战时放射与辐射剂量监测, 开展电磁辐射剂量学和卫生防护标准研究具有重要意义. 全面开展电磁辐射计算剂量学的研究, 建立各种实验动物模型和中国人人人体模型及其电磁剂量学计算方法, 建立微波剂量的各种实验测量方法, 为电磁生物效应量效关系研究打好坚实的基础.

撰稿人: 杨国山, 谢向东, 郭勇