

环境辐射与居民健康的探讨

周 强, 徐翠华, 任天山, 苏 旭

中图分类号: R146 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2008)04-0500-02

正常情况下, 居民受到的电离辐射照射大部分来自环境。环境中的放射性分为天然放射性和人工放射性两类。天然放射性包括初级宇宙射线和次级宇宙射线, 以及宇生放射性核素(典型的有 ^3H 、 ^7Be 、 ^{14}C 和 ^{22}Na)和地壳中的放射性核素(主要来自铀系、钍系和锕系以及 ^{40}K 与 ^{87}Rb)。人工放射性来源于人工制造(反应堆、核爆炸)的放射性核素, 如 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{131}I 等^[1]。大气层核试验是环境中人工辐射源对全球公众产生照射的主要原因, 在试验后产生的放射性核素在陆地、水域、对流层和同温层中进行分配, 进入对流层的放射性气溶胶可在几十天内沉降下来, 大部分核爆产物分布在更高的同温层, 它们以落下灰的形式逐渐降落到地面, 是长寿命裂变产物污染的主要来源^[2]。自1945年7月16日至1980年10月16日在全球范围内共进行了520次大气层核爆炸, 其中2次为核袭击, 其余为核试验, 总威力为546Mt, 其中来自裂变的217Mt, 来自聚变的329Mt, 在裂变当量为217Mt的活性中, 分配在局部落下灰(沉降于试验场外100km范围内)和对流层落下灰(平均停留时间约1个月, 沉降到地面)中各占12%和10%^[3]。

1954年2月28日, 美国在太平洋比基尼环状珊瑚岛上进行的Bravo热核武器试验导致了很高的局部照射, 没有估计到的大量落下灰沉降在环礁西向的局部区域, 致使该区域内的人员受到早期落下灰外照射、皮肤照射和体内污染三种作用方式的照射, 在医学随访时观察到受照人员, 特别是未成年受照者的甲状腺肿瘤发病率增高与摄入混合放射性碘有关^[4]。从1951年到1958年, 美国在内华达州核试验场进行了一系列核试验。1978年Lyon等发表文章称犹他州南部“高落下灰”各县居民中与试验前对照人群相比, 试验后居民组中死于童年白血病的人数在统计上有显著增多, 而在该州北部的“低落下灰”各县居民中没有发现有统计学意义的增高^[5]。Lyon的报道在美国朝野引起很大震动, 随后各种调查工作不断展开, 其中, 搞清该地区的环境辐射水平是非常重要的前提条件, 于是美国政府提出要重新评价内华达核试验对犹他州居民的辐射剂量。我国从1964年10月到1980年10月, 在罗布泊核试验场进行了22次大气层核试验, 总当量为20.7Mt(裂变12.2Mt, 聚变8.5Mt), 其中有5次小的(0.02Mt/次)和1次较大(0.3Mt/次)的爆炸在地面进行^[6]。我国政府历来十分重视核试验的污染问题, 曾多次对核试验下风向地区居民进行环境辐射水平和居民健康调查。甘肃省酒泉地区位于我国核试验场的下风向地区, 在放射性烟云运行过程中, 受重力和降水的作用, 放射性微粒逐渐下沉, 有可能对地面环境造成不同程度污染, 从而对当地居民产生内外辐射照射。在已提交国际会议上交流的资料中提到, 截止到1987年底, 酒泉地区各地居民所受的全球性沉降和我国核试验沉降所致有效剂量的平均值分别为 0.72mSv 和 4.86mSv , 当地天然辐射外照射年平均有效剂量为 1.05mSv ^[7]。据甘肃省放射卫生防护监督监测所报道, 在我国停止大气层核试验约十年时, 酒泉地区水源中 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 的含量与全国其他地

区水源中 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 处于同一水平, 由饮水摄入 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 造成居民内照射年有效剂量当量为 $0.16\mu\text{Sv}$, 仅为当地天然辐射所致年有效剂量当量的 0.14% ^[8]。

土壤是释放到大气层的放射性核素的最终归宿之一, 由于它的累积作用, 土壤是可利用的最灵敏的指示介质。由它可能得到核试验产生的放射性核素在不同地区的累积沉积情况, 从而获得所致外照射剂量的信息。核试验产生的所有裂变产物和活化产物中, 从所致剂量的角度看最重要的放射性核素为 ^{14}C 、 ^{137}Cs 、 ^{95}Zr 、 ^{90}Sr 、 ^{106}Ru 、 ^{144}Ce 和 ^3H 等。到1987年下风向调查时, 环境中仅存在有 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 、 ^{131}I 同位素, ^{14}C 和 ^3H 的半衰期很长(5730a), 虽对集体剂量负担有重要贡献, 但是在我们考虑的小时间区间内(1964年以来), 它的剂量贡献甚微, 因而外照射剂量回顾调查只能从 ^{137}Cs 入手。核爆炸产生的 ^{137}Cs 和其它核素进入同温层的比例取决于爆炸的当量和高度。同温层中 ^{137}Cs 滞留时间约1a, 由于它和 ^{90}Sr 有相似的半衰期, 地面上 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr 有相当稳定的活度比(1.5)^[9], ^{90}Sr 在同温层半滞留时间约为1a, ^{137}Cs 的最大归宿是海洋, 但从对人所致剂量的角度来考虑, ^{137}Cs 的陆地沉降是最重要的途径。 ^{137}Cs 向地面的沉降、衰变、转移和累积是一个动态过程。沉降在地面的 ^{137}Cs 可以有水平转移和垂直转移。由于 ^{137}Cs 易被土壤吸附, 它向下转移的速度很慢, 在土壤比活度的垂直剖面一般呈指数型分布, 顶部30cm的土壤几乎包含了全部的 ^{137}Cs 。所以, 从所致剂量的重要程度和测量方法上的可行性方面考虑, 在环境辐射水平调查中, 选定土壤中 ^{137}Cs 为主要研究核素, 将土壤中 ^{137}Cs 沉积密度的确定作为调查重点, 土壤中 ^{137}Cs 的沉积密度是核爆炸裂变产物和活化产物在地面累积沉积数量和状态的最主要表征, ^{137}Cs 的沉积密度和地区分布与其他核素的累积沉积数量和分布相关。其调查方法是现场采集土壤样品, 然后进行实验室 γ 能谱分析。各重要居民点和若干可能的重污染区域是调查的重点, 每个环境辐射水平调查点设2~3个土壤采样点, 采样点的选点原则是选择受人或动物干扰少、平坦开阔、地面覆盖草坪或低矮牧草, 以未耕地为主^[9]。在选定的采样点上画出 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的面积, 在四个角和中心分别采集土壤分层样品。土壤样品取样深度为30cm, 样品分层情况为: 0~5cm, 5~10cm, 10~20cm, 20~30cm^[7]。为保证所采土壤样品具有充足的代表性, 将同一采样点采集的相同深度的分层样品混合成一个组合样品, 装袋, 标识, 储运。样品采集并运输到实验室后, 将土壤样品在搪瓷盘中铺平, 拣出石子和杂草, 在 110°C 左右烘烤至恒重, 然后压碎、研磨, 用60目标准筛过筛, 装入样品盒, 称重, 密封, 放置一个月后测量^[10]。样品的测量和分析按国标GB-11743-89“土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法”推荐的方法进行^[11]。根据所求得的地面 ^{137}Cs 比活度, 利用公式(1)计算采样点的 ^{137}Cs 总沉积密度, 即截止到采样时刻为止土壤中来源于全球性沉降和局部沉降的单位面积上的 ^{137}Cs 累积沉降量:

$$I = C \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i / \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

式中: I 是单位面积地面沉积的 ^{137}Cs 总活度, 求和深度为30cm($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), 即沉积密度; C 是土壤中 ^{137}Cs 的活度浓度

作者单位: 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所, 北京100088

作者简介: 周强(1974~), 男, 北京人, 主管技师, 主要从事辐射检测与评价工作。

通讯作者: 苏旭, 研究员, 博士生导师。

($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$); ρ 是土壤密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); n 是该调查点的采样点数; $\sum V_i$ 是 n 个采样点采集的土壤总体积 (m^3); $\sum S_i$ 是 n 个采样点的总采样面积 (m^2)。

在核爆炸裂变产物的分凝因子为 50% 的假定条件下, 参数 $\alpha/\rho = 0.16 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (其中, α 是土壤中 ^{137}Cs 深度分布张弛长度的倒数, ρ 是土壤的密度)。计算核试验的裂变产物和活化产物所致吸收剂量为:

$$D = \text{DCF}_1 \times k \cdot I \quad (2)$$

式中: D 是距地面 1m 处无限长时间内的空气累积吸收剂量, Gy ; I 是落下灰到达调查点时间有关的剂量校正因子; k 是归因于核试验的 ^{137}Cs 沉积密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$; DCF_1 是文献中给出的局地落下灰剂量转换系数, $\text{Gy} \cdot (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ 。

公式 (3) 是根据空气吸收剂量计算的居民个体经外照射途径所受的平均有效剂量当量负担:

$$E = D \times \text{DCF}_d \times (0.8 \text{ SF} + 0.2) \quad (3)$$

式中: E 是居民个体经外照射途径所受的平均有效剂量负担, Sv ; D 是用公式 (2) 求出室外累积空气吸收剂量负担; DCF_d 是由空气吸收剂量计算有效剂量的剂量转换因子, 对于沉降到地面的 γ 放射性核素其值为 $0.7 \text{ Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$; SF 是建筑物等对 γ 放射性沉降物的辐射屏蔽因子, 其值为 0.2 即建筑物的屏蔽作用使建筑物内的空气吸收剂量率平均减少到室外的 20%, 括号内的 0.8 和第二项的 0.2 分别是当地居民在室内外的平均居留因子^[7]。

天然辐射也是环境辐射的一个重要组成部分, 1982 年 ~ 1987 年, 由卫生系统组织进行的我国土壤中放射性核素水平调查, 给出了甘肃省土壤中放射性核素含量, 以未开垦的土壤为例, 其 ^{238}U ^{232}Th ^{226}Ra 和 ^{40}K 的活度浓度分别为: (29.8 ± 9.3) $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, (45.2 ± 8.7) $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, (34.2 ± 7.7) $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, (570 ± 93) $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[12]。由于甘肃省酒泉地区的平均海拔大都在 1 000m 以上, 致使该地区宇宙辐射水平较高, 因此, 由宇宙辐射导致酒泉地区居民所受的有效剂量也必须要加以考虑。

环境中的辐射水平属小剂量、低剂量率照射。UNSCEAR 2000 年报告专门论述了小剂量和低剂量率的定义: 根据细胞培养的辐射生物效应实验结果, 低于 20 mGy 的急性剂量为小剂量; 根据人类流行病学研究结果, 小剂量应在 0.2 Gy 以下 (不管剂量率), 小于 0.1 mGy/m^2 剂量率为低剂量率。美国电离辐射生物效应委员会 BEIR VII 报告 (低水平电离辐射的健康效应危险) 将小于 100 mSv 低 LET (传能线密度) 的辐射剂量定义为小剂量^[13]。小剂量、低剂量率照射对人体的危害作用潜伏期长、发生率低, 特别是辐射致癌和遗传危害是人们关注的重点。在辐射致癌方面, 目前的科学数据表明, 在小剂量 (小于 100 mSv) 情况下电离辐射照射和辐射诱发人类实体瘤之间存在着线性剂量响应关系。在遗传危害方面, 尽管在受照双亲子女身上未发现有害效应 (归因于辐射诱发的突变), 但却有许多资料表明, 在小鼠和其他动物体内辐射可诱发遗传突变, 因而没有理由相信, 人类能够免受这种类型的损害^[14]。因此, 在开展与环境辐射水平相关的居民健康调查时, 要重点进行恶性肿瘤死亡率、儿童先天畸形和遗传性疾病的人群调查。

辐射对人体的影响多年来一直沿用的是“线性无阈” (linear no threshold LNT) 理论, 但近年来该理论受到越来越多的挑战。LNT 理论认为, 任何剂量甚至很小都是有害的, 并随着剂量的增加而线性增加。ICRP 在其建议书草案 (征求意见稿 2006) 中指出, 委员会推荐的辐射防护的实际体系将继续建立在“线性无阈”的假设上, 即在剂量低于约 100 mSv 的情况下, 给定的剂量增量将与归因于辐射的癌症和遗传效应发生概率的增量成正比^[15]。辐射照射与白血病的大多数类型和许多器官的癌症有关, 如肺癌、乳腺癌和甲状腺癌等, 然而微量的附加辐射照射 (如数量级为天然辐射照射的全球平均水平) 引起的可归因性癌症机率的增加是极微小的。此外, 辐射诱发的癌症可

能在发生照射后几十年才显现出来, 也难与自生的癌或归因于其它因素的癌相区分。UNSCEAR 2000 年报告中指出: 辐射即便在小剂量, 也会作为肿瘤发生的一种突变性始动因子在起作用。而且, 抗肿瘤发生的防御作用不可能呈现小剂量依赖性。来自日本原子弹爆炸 (原爆) 幸存者的数据在广泛的剂量范围内, 都与线性或者线性平方剂量响应关系是一致的。但是, 对小剂量危险的定量, 因为存在有统计精度的局限性, 可能剩余偏差或者其他的方法学问题以及多元统计检验所致偶然结果的可能性, 所以不是很肯定, 因此流行病学单独是不能解决是否存在小剂量阈这一问题的。然而, 应该指出的是, 未能测定出剂量甚小时的危险增加, 并不意味着危险中的这种增加就不存在^[16]。由于各种对健康有害的危险因素 (“突变相关因素^[16]”) 相互竞争的原因, 有可能由其它有害的环境因素和自身不良的生活习惯所造成的健康效应, 掩盖了辐射损伤所致的健康效应。只有当辐射剂量达到一定程度后, 由辐射所产生的随机效应应攒到一定程度, 足以能够超过其它有害因素所致的健康效应时, 才有可能被流行病学调查所揭示。虽然辐射对人体产生的损害没有阈值, 但由其损害所产生的、能够被人们所捕捉和认识到的健康效应, 可能存在某个辐射损害效应显现的剂量阈值。甘肃省酒泉地区地处我国核试验场的下风向地区, 从该省疾控中心对酒泉地区 1987 年 ~ 2000 年农村居民恶性肿瘤死亡抽样调查的结果看出, 在该地区的癌症死亡中, 消化系统的恶性肿瘤所占比例偏高, 特别是胃癌和食管癌占全部恶性肿瘤死亡的 62.26%^[17]。而甘肃全省消化系统肿瘤的发病率就较高, 根据该省疾病监测系统报告, 2003 年甘肃省肿瘤死亡率第一位的就是胃癌 ($29.56/10 \text{ 万}$)^[18], 这主要与当地居民的生活和饮食习惯有关, 存在一些诱发消化系统癌症增加的因素, 例如大量饮酒和高吸烟率等不良习惯, 特别是当地居民喜食腌菜, 日常生活中少食新鲜蔬菜, 每年有长达几个月的时间食入腌渍菜等。腌渍菜内含有亚硝酸盐, 而亚硝酸盐是世界卫生组织公认的强致癌物。这一结果表明, 该地区的环境辐射水平, 在辐射致癌方面, 对人体产生的损害弱于当地居民喜食腌菜、大量饮酒和高吸烟率对人体产生的损害。说明当地居民所受的辐射剂量水平, 没有达到辐射损害效应显现的剂量阈值。在受到较高剂量照射的马绍尔群岛居民中, 已经证明落下灰导致超额的甲状腺疾病^[19]。由于该地区居民所受的剂量较高, 在诱发甲状腺疾病方面, 其危害足以超过其他对健康有害的危险因素, 所以人们可以观察并认识到这一剂量的辐射损害。

参考文献:

- [1] UNSCEAR Report 1993 电离辐射源与效应 [R]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [2] 任天山, 程建平主编. 环境与辐射 [M]. 北京: 原子能出版社, 2007.
- [3] 叶常青. 大气层核试验对人类健康的影响 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 1995, 15: 204—207.
- [4] 叶常青主编. 放射性肿瘤的判断——科学基础和损害赔偿 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [5] 任天山. 美国内华达州核试验对犹他州居民辐射剂量贡献再评价中的回顾技术 [A]. 任天山, 著. 环境辐射测量与评价 [M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 374—384.
- [6] UNSCEAR Sources and Effects of Ionizing Radiation [R]. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to General Assembly. Volume 1 Sources. United Nations, 2000.
- [7] Ren T, Zhang S, Li Y, et al. Methodology of retrospective investigation on external dose of the downwind area in JIUQUAN region, China [J]. Radiation Protection Dosimetry, 1998, 77: 25—28.

半影区剂量测量方法及在调强放疗中的临床意义

梁志文, 李 勤, 韩 军

中图分类号: R815 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2008)04-0502-03

调强放疗技术的精确性体现在靶区内剂量的准确性和剂量分布的适形性。在调强治疗技术所需要建立的质量保证方法中, 射野半影宽度的确定是一个不可忽视的重要因素。由于半影宽度纳入了调强剂量计算模型的考虑, 其准确性直接影响剂量计算结果的客观性, 从而影响对邻近危及器官的临床评估和对验证结果的分析判断, 因此半影区的剂量测量及半影宽度的准确性在调强放疗中具有重要的临床意义。半影区的剂量主要是由 X射线的边缘散射所造成的, 半影宽度通常用 80% 和 20% 等剂量线间的测向距离表示, 半影宽度除了受射线能量、源皮距、射野大小、测量深度影响外, 还与测量方法有关。笔者主要介绍了近些年来半影区剂量测量的相关研究, 分析了指型电离室和胶片剂量仪对半影区测量的特点, 并提出了处理方法。

1 半影区的常用测量方法及特点

剂量测量常用的工具有指型电离室和胶片剂量仪。指型电离室在测量点吸收剂量前, 需要对它做出一定修正。指型电离室具有一定的外形尺寸, 在平方反比定律和射线随深度衰减的影响下, 在探头内会形成剂量梯度。消除影响的方法有两种: 一种是乘以一个梯度校正因子 P_g , 使探头所处的位置为测量点的位置, 另一种方法是确定一个有效测量点, 探头测的就是有效测量点处的吸收剂量。另外, 把指型电离室放入均匀的水模体中测量时, 由于两者的材料不同, 会对电子注量产生扰动影响, 在瞬时电子平衡 (transient charged particle equilibrium) 存在的区域, 电子注量与物体的密度无关, 电离室不影响电子注量, 但在建成区和半影区里这些瞬时电子平衡不满足的区域就要引入注量校正因子 P_d 以抵消电离室产生的扰动影响。

在临床应用中, 半影区内是缺乏侧向电子平衡的。但在测量射野离轴剂量分布时, 为方便起见, 测射野外区域剂量时电离室所做的修正与测量射野内时所做的修正一样, 这就导致了测量误差的产生。并由于电离室具有一定的体积, 空间分辨率

不高, 通过移动电离室所测出的半影宽度通常比真实的半影宽度要宽, 用不同尺寸的电离室测出的半影宽度也不同, 有学者把这种由电离室自身体积引起的半影宽度测不准的现象被称为电离室的空间效应 (spatial effect)^[1]。

对于传统的三维适形计划, 电离室的空间效应影响不大, 因为 PTV 一般都被 95% 的等剂量线包绕着, 适形时射野的边缘是在 PTV 的基础上外放一定的 margin, margin 的宽度至少与野的半影宽度相等。这时半影区在 PTV 的外面, 受到电离室空间效应的影响只是使计划系统高估了 PTV 外正常组织的剂量。对调强计划则不一样, 调强可以做出与靶区高度适形的剂量曲线, 在提高肿瘤靶区受量的同时降低周围正常组织的损伤, 这使靶区的边缘剂量梯度加大。而且在静态调强中, 一个大野里面常常包含许多小子野, 这些小子野的边缘常在 PTV 内, 不准确的半影宽度将会影响 PTV 内的实际剂量, 因而得不到靶区内真实的剂量分布。

另一种测量方法是采用胶片剂量仪, 它可以避免电离室空间效应的影响, 具有很高的空间分辨率, 能比较准确的测量半影区的宽度, 但它也有两个需要注意的地方, 一是胶片的线性响应范围, 二是胶片对射线能量的依耐性。射线的能谱是随离中心轴的距离变化的, 在半影区及半影区以外的区域能谱变化较大, 胶片可能会发生“超敏反应”, 使测量结果不准。用胶片做调强剂量验证时, 受到胶片超敏反应的影响, 会影响胶片分析的结果。

2 电离室准确测量半影宽度

为了消除电离室体积的影响得到真实的半影宽度, 一般有两种方法来进行处理: 一种是由测得的电离室的半影外推出电离室体积大小为零时的半影宽度, 从而消除空间效应的影响, 第二种是通过对测量响应方程去卷积, 来得到真实的半影宽度。

2.1 外推法 最初 C. H. Sbarda^[2] 用不同尺寸的电离室采用二次多项式模型外推出零体积电离室测得的半影宽度。W. U. Laub^[2] 用钻石半导体探头和不同体积的指型电离室测量了射野半影区的剂量分布, 分析了测量小野时电离室的空间效应对剂量测量的影响。如图 1 所示。

作者单位: 武汉协和医院肿瘤诊疗与研究中心 湖北 武汉 430023
作者简介: 梁志文 (1981-), 男, 技师, 从事肿瘤放疗工作。

- [8] 雷尊成, 高子和, 王岩. 酒泉地区水源中镭-90 钍-137 含量调查及所致居民内照射剂量估算 [J]. 中国辐射卫生, 1994 3 (1): 36-38
- [9] 张淑蓉, 潘京全, 徐翠华, 等. 土壤放射性核素水平及分布调查中的质量保证工作 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 1988 8 (增刊 2): 122-124
- [10] 张淑蓉, 潘京全, 李允兴, 等. 我国土壤中放射性核素水平及分布 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 1988 8 (增刊 2): 1-15
- [11] GB-11743-89 土壤中放射性核素的 γ 能谱分析方法 [S].
- [12] 王尹, 刘星, 郭从彭, 等. 甘肃省土壤中放射性核素含量 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 1988 8 (增刊 2): 113-114
- [13] BEIR Health Risk from Exposure to Low Level of Ionizing

Radiation [J]. BEIR VII-Phase 2 2005

- [14] 周永增. 辐射防护的生物学基础 [J]. 辐射防护通讯, 2006 26 (4): 1-7
- [15] ICRP Draft Recommendation of the International Commission on Radiological Protection For Consultations 2006
- [16] 魏履新主编. 中国阳江高本底辐射研究 [M]. 北京: 原子能出版社, 1996
- [17] 雷红玉, 郭桂枝, 张荣, 等. 酒泉市 1987~2000 年农村恶性肿瘤死亡调查 [J]. 癌情监测, 2004 13 (11): 704-706
- [18] 任晓岚, 格鹏飞, 魏志真, 等. 甘肃省疾病监测系统肿瘤死亡情况分析 [J]. 疾病监测, 2005 20 (9): 492-494
- [19] 雷红玉, 张守志. 核试验落下灰照射的致癌效应 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2004 25 (2): 173-175

(收稿日期: 2008-07-28)