

- 13 Natarajan AT et al. *Mutat Res*, 1991; 247: 103
- 14 Lucas JN et al. *Health Phys*, 1995; 68(6): 761
- 15 Tucker JD et al. *Int J Radiat Biol*, 1995; 67(1): 19
- 16 白玉书等. *中华放射医学与防护杂志*, 1993; 13(4): 243
- 17 冯嘉林等. *辐射研究与辐射工艺学报*, 1990; 8(2): 107
- 18 Lloyd DC et al. Treatment and biological dosimetry of exposed persons, Post-Chernobyl Action. Report EUR 12558 XI-XXV, 1991: 49
- 19 Hakoda M et al. *Mutat Res*, 1988; 201: 39
- 20 Kyoizumi S et al. *Cancer Res*, 1989; 49: 581
- 21 Akiyama M et al. *Health Phys*, 1995; 68(5): 643
- 22 Straume T et al. *Health Phys*, 1992; 62(2): 122
- 23 王惠琛等. 上海“6.25”钴源辐射事故病人后效应研究文集, 上海: 第二军医大学印刷厂, 1994: 42

(收稿日期: 1996-06-03)

回顾性剂量学方法

中国医学科学院、中国协和医科大学放射医学研究所(天津, 300192) 张良 安综述

摘要:在辐射流行病学调查研究中,为了对调查结果进行有效评价,并得出科学的结论,必须具有可靠及较完整的剂量学资料,为此产生了一种新的方法,即回顾性剂量学方法。本文重点介绍回顾性剂量学方法中的辐射剂量重建方法、辐射剂量重建中的几种直接测量方法、辐射剂量重建中的不确定度分析及与辐射流行病学相关的一些问题。

关键词:辐射流行病学 回顾性剂量学 辐射剂量重建

1 回顾性剂量学方法的提出及其内含

在辐射流行病学调查研究中,为了对调查结果进行有效评价,并得出科学的结论,必须具有可靠及较完整的剂量学资料。但面临这些情况确是大多数无完整的剂量学资料,因而要靠回顾的方法来重建辐射流行病学研究中的剂量学模式,用这样的模式来逼近真实情况,从而获得较为可靠和完整的剂量学资料。回顾性剂量学方法是 90年代初期开始受到人们重视的一种新的剂量学方法,它的关键是进行辐射剂量重建,因而也把这种方法称之为辐射剂量重建方法。

辐射剂量重建研究的主要目的是估算代表性的剂量和特定人员的剂量,或者二者兼有之。代表性的剂量是指在一个特定范围内的人员所接受到的平均剂量,而不是生活在这个范围的每个人员的真实剂量。一般这种剂量可以通过历史记录、文献资料来推导和

重建,文献资料是指通过饮食、生活习惯,在典型年龄范围内人员的生活环境、生活条件、工作条件、工作量及职业辐射史等研究得到的。代表性剂量表明了剂量的幅度和一般情况下,特定受辐照的方式及污染情况在其中的重要性。这种剂量可以用来确定计划中的辐射流行病学研究中的统计效能(statistical power)。特定人员的个人剂量估算的结果对辐射流行病学研究统计分析也有十分重要的意义,特别是个例(case control)调查的结果。

判断一个辐射剂量重建项目的设计是否合理,很难有一个统一的标准,它依赖于公众或研究者打算通过这样的研究项目回答辐射健康效应的问题。某些项目研究结果表明,从统计上讲,可探测到的效应虽然对公众的健康影响并不大,但它确具有较大的科学意义,它可通过对过去受照结果的监测和处理,来防止将来可能的受照。

2 辐射剂量重建方法

辐射剂量重建包括以下几个步骤:

(1)从流行病学研究的角度出发,明确辐射剂量重建需要回答的问题:例如一般辐射流行病学调查中需要估算危险度,这时必须回答调查人群中不同年龄组的代表性剂量。若需对某些病种开展个例调查,这时代表性剂量就无法使用,必须对个例的剂量进行重建。

(2)受照人群(或个人)过去受照的基本特征分析是建立辐射剂量重建模式的基础。例如在我国医用 X线工作人员辐射流行病学研究中,1985年前尚未开展有效的个人剂量监测,甚至在 1975年以前,规范化的诊断 X线工作场所的监测数据也很难找到,因而很难用上述已有的监测结果来进行这类人员的辐射剂量重建。幸运的是,主要诊断类型的工作量资料(每天诊断人次数)大都可以查到,这些信息可用于辐射剂量重建^[1]。研究表明^[2]:1985年以前的主要诊断类型是胸、腹部透视,胸部拍片及胃肠道检查,这几项占诊断总人次数的 83%以上;即使同一诊断下工作量也相同时,职业人员受到的剂量还受工作场所防护条件、附加防护使用状况、患者病变程度及工作人员自身技术等影响。对患者病变程度,工作人员自身技术影响这两个因素,在估算这类人群的代表性剂量时,只要监测和调查的抽样方法合理,其结果已能较好地代表总体中这两个影响因素。因而在辐射剂量重建中应十分重视工作场所防护条件、附加防护使用状况这两个影响因素。在这两个影响因素中主要包括 X线机生产年代、容量、防护改进状况、焦皮距、球管的构成形式、诊断床及荧光屏的防护性能、射线准直和视野调节系统的性能、机器的输出特性(输出量及能谱)、铅椅性能及使用情况、铅围裙的性

能及使用情况等。对众多的影响因素要进行研究是一件十分困难的事。比较现实的办法是通过预调查,明确其中对辐射剂量重建影响较大的主要因素作为辐射剂量重建的基础,建立起辐射剂量重建的估算模式。

在核试验场、核工业工厂的情况下,必须进行源项分析和受照路径分析。这些分析主要包括核素的类型、名称、释放在环境中的幅度及其时期的估计,包括非日常事件中的插曲性(episodic)释放。路径分析主要分析释放到环境中的核素通过一些媒质传递到人体内的整个途径。此媒质包括空气、地表水和地下水、土壤、食品等。只有通过这些特征的分析,才可建立这种情况下的辐射剂量估算模式。

(3)有了上述的知识就可建立起辐射剂量重建的基本估算模式。例如在我国的医用诊断 X线工作人员辐射流行病学研究中,就可以用场所中自由空气中比释动能(K_a ,单位 mGy)求相应位置处人体皮肤剂量(D_s)的公式来推导出这种情况下的辐射剂量重建模式^[3],即:

$$D_s = P \sum \gamma_k W_k \quad (1)$$

式中 W_k 是某一个工作人员在 K类工作条件下的累积工作量, V_k 是这类工作条件下由于防护条件引入的修正系数,称 $\sum \gamma_k W_k$ 为累积规一化工作量,因而 P 为单位累积规一化工作量所引起的皮肤剂量,它可以通过实验方法来确定。

(4)要应用所建的估算模式,还需开展大量的研究工作并获取必要的信息。例如在核试验场及核燃料工厂的辐射剂量重建时,就需了解核素释放及向人体的转移,人们的生活方式和饮食习惯,农业及食品的实际分布,生物学参数等方面的信息。这种情况下的辐射剂量估算可用如下的流程图表示(图 1)

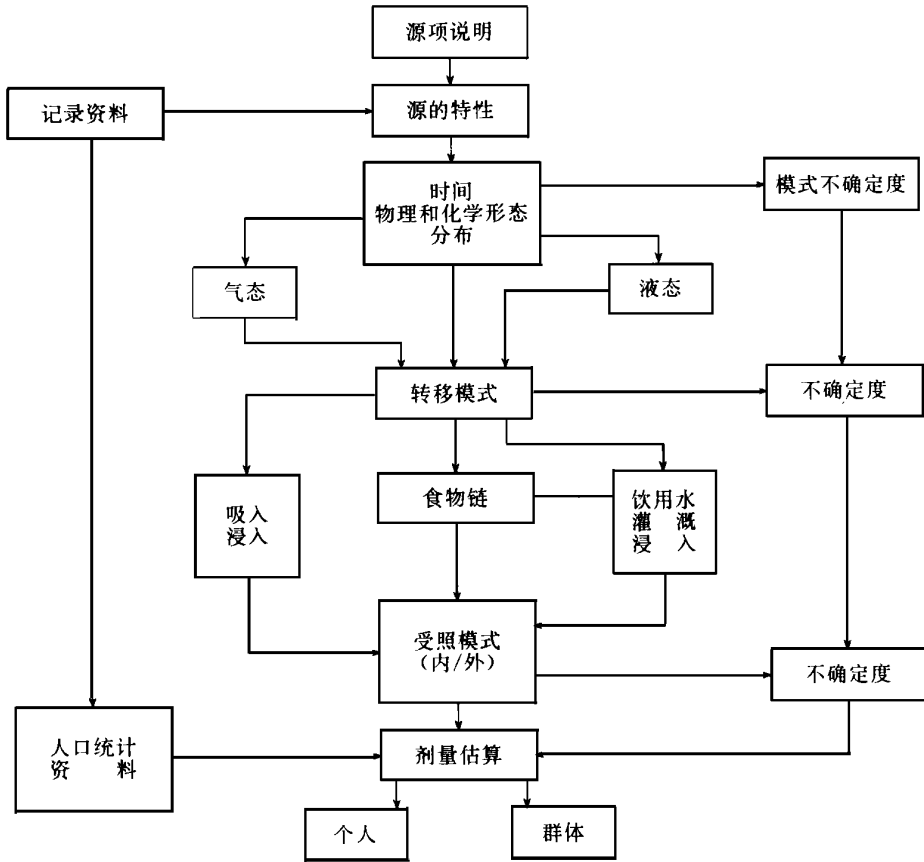


图 1 核试验场情况下的辐射剂量重建方法

对诊断 X 线职业人员的辐射流行病学研究人群而言,也可以设计出与之相应的辐射剂量重建的测量和调查工作流程图^[4]。

3 用于辐射剂量重建的直接测量方法

辐射剂量直接测量方法主要有两大类,即物理和生物学剂量测量方法。这些方法不但可以直接对考察的人群或个人进行粗略的剂量测量,而更重要的使命是对辐射剂量重建的结果进行实验验证。

3.1 生物学剂量方法

本期的另一篇文章中^[5]已详细报道了生物剂量计的有关情况,这里不再重述。

3.2 物理剂量方法

目前在辐射剂量重建中较为有应用价值的物理剂量方法分两大类,即电子自旋共振(ESR)和热释光(TLD)方法。

能用于 ESR 方法的材料比较多,但目前研究比较多的是骨和牙齿样品,特别是牙齿样品。在 ESR 测量中,测量了与顺磁样品基本特性相关的电子跃迁,通过跃迁电子强度的测定便可确定出包含在样品中的 CO_3^{3-} 的含量^[6]。因而,只要能确定出 CO_3^{3-} 含量与剂量的关系,便可用 ESR 方法来估计出剂量。到目前为止,这种方法的最低可测剂量下限为 0.5Gy。

能用于 TLD 方法的材料也比较多,但目前研究和应用比较多的是手表的红宝石和陶瓷及砖瓦样品。手表的红宝石是一种较理

想的“事故个人剂量计”。在测量红宝石的热释光信号时,应注意发光谱的范围和测量条件与普通 TLD方法的差异。利用陶瓷及砖瓦等环境样品,采用前剂量技术(Predose)进行剂量测量的方法也是一种较理想的直接测量方法。这种方法不同于一般的 TLD方法,它是利用已接受过辐射照射的陶瓷及砖瓦样品,通过适当温度(500°C左右)激活,再照射适当的刻度和试验剂量后,测其 110°C 峰的响应。通过这个响应的强度就可以确定出陶瓷及砖瓦等环境样品中原来受照的剂量大小。这种方法已在日本原爆的辐射剂量重建中成功地应用^[7]。

4 辐射剂量重建中的不确定度分析

在辐射剂量重建中,不但对测量和计算过程,而且对有效资料所作出的结论,都应给出不确定度的说明。一般而言,应说明使用方法的灵敏度,并用几率的方式把不确定度表示出来。在确定样本大小、统计效能和精度、测量次数等方面都要求对剂量的不确定度作出量化的估计,当然也应考虑到可行性和实用性。在进行不确定度计算时应该贯穿整个计算过程(如图 1)。由于生物测量有个体变异问题,一般物理测量比生物测量的误差要小得多。为了得到传递误差,应当估计由物理测量和生物测量引入的不确定度。

在任何一个研究工作以前,研究工作的计划制定者必须首先确定,什么样的不确定度对研究来说是可以接受的。

由于生物效应存在着剂量率依赖性和潜伏期问题,因而必须考虑剂量传递到全身和特定器官的时间依赖性问题。例如,往往用一个人群过去的年剂量来估计他们将来的危险度,但整个时期的累积剂量还与其余时期的年剂量和年剂量率有关。

不论何时都要用人体和环境样品中核素含量的直接测量和个人剂量测量来验证模型的预期值。一个人群内不同组的外照射剂量应可以通过开放地区、工作场所或放射污染的剂量率测量来估计。吸入或摄入的内照射剂量应可以通过水和食品中的放射性浓度来估计。如模型结果与直接测量结果差异较大,应优先选用测量结果。

5 流行病学与辐射剂量重建

用于流行病学研究中的辐射剂量重建至少要计算年器官剂量,而且流行病学研究还需要协调辐照和其它信息估算中的精度和偏差之间的关系。

辐射剂量重建的设计与流行病学研究的设计有关,特别是回顾性的队列(cohort)研究和个例调查研究。在队列研究中要明确一个相同的受照人群,还必须确定研究什么样的特定健康效应。在上述研究中,往往在初始辐照后的一个时期内研究还未开始,但在感兴趣的时期进行随访调查时其健康效应并不改变,而且其数据处理的方法与前瞻性调查的方式相同。观察到的健康效应与基于适当对照组人群进行比较或研究剂量估算变异的关系。在个例调查研究中,是以病种为其考察目标,并且选择对照组,在对照组选择中要注意年龄、性别及其它因素的匹配。这时需要按例对其进行过去受照估算并与对照组比较。

在流行病学研究中统计效能的要求对辐射剂量重建的设计有重要关系,粗略的说,统计效能是某种健康效应发生的几率。为增加对辐射效应发生几率的知识,需要测定一个研究的统计效能,它的通常意义是用辐射危险度估计的一定倍数来表达可探测效应的希望值。

当某一效应未被监测时,在标准的危险

度估计中或用来确保公众的危险度较小时,可以通过一个研究的统计效能建立起危险度的上限。例如可用辐射防护基础的高剂量资料来外推低剂量的希望值。一般实际的值比上述的估算结果要小些。如果一个研究的结果要比高剂量资料外推结果大几倍,则该研究的结果就很值得怀疑。Greenland等人^[18]讨论了不同情况下统计效能的计算,也包括其置信限区间。

要计算一个研究的统计效能的大小,必须具备剂量和人群大小等信息,最后分类时还要求有年龄、性别、随访时间长短和其它因素。由于在统计效能估算中剂量和受照人群的特征及大小都具有不确定性,因而应在不同的假设下来计算统计效能。

一个研究的统计效能的估算在很大程度上取决于剂量估算中的量。例如,如果仅估算了人群的平均剂量,则该研究的统计效能就不可能高。由于在辐射剂量重建中的剂量估算结果的不确定度比较大,在统计效能计算时不但要考虑有效的剂量信息,还应考虑剂量估算中的误差。如剂量估算中未计算出误差,则可用剂量测量中的随机误差来推导出统计效能,此时可能会引起效应的低估,而且在剂量-效应关系中引起一个虚假曲线 (spurious curvilinearity)。1988年 Howe等人^[9]描述了在剂量分组资料不全的情况下,用剂量信息进行统计效能计算的近似方法。

在要求获得适当的统计效能的情况下,样本量将随剂量的减少而增大。为了说明剂量、样本大小及统计效能之间的关系, Schull等人^[10]计算了不同剂量下所需的样本大小和可能引起的总的癌症死亡率,其结果列在表 1中。从表中可以看出:当考察人群中每个人员的平均全身累积剂量低于 2.5mSv时要求的样本量高达 32×10^6 人,这在流行病学

研究中是无法实现的。当剂量大于 50mSv,其样本量的最低要求为 8万人,这样才可能使流行病学研究成为现实。

表 1 不同剂量下的样本大小和可能引起的

总癌症死亡		
平均全身累积剂量 (mSv)	每万人口中引起的癌症数目	流行病学研究中所需样本的大小
2.5	1.9	32 000 000
5.0	3.8	7 900 000
10.0	7.5	2 000 000
20.0	15.0	500 000
30.0	22.5	220 000
40.0	30.0	130 000
50.0	37.5	80 000
60.0	45.0	56 000
70.0	52.5	41 000
80.0	60.0	31 000
90.0	67.5	25 000
100.0	75.0	20 000
120.0	90.0	14 000
150.0	113.0	9 100
200.0	150.0	5 200

表 2 不同剂量下白血病、呼吸道癌调查所需的样本大小

平均器官剂量 (mSv)	研究中所需样本的大小	
	白血病	呼吸道癌
2.5	74 000 000	> 100 000 000
5.0	19 000 000	44 000 000
10.0	4 700 000	11 000 000
20.0	1 200 000	2 700 000
30.0	520 000	1 200 000
40.0	300 000	680 000
50.0	190 000	440 000
60.0	130 000	310 000
70.0	99 000	220 000
80.0	76 000	170 000
90.0	61 000	140 000
100.0	49 000	110 000
120.0	25 000	77 000
150.0	11 000	50 000
200.0	3 900	28 000

在流行病学研究中,我们十分关心的往往不是总癌症死亡,而是白血病、呼吸道癌及皮肤癌等。表 2列出了辐射剂量重建中比较关心的两种癌症调查时不同剂量下所需样本的大小。从这个表中也可看出,即使剂量已到 50mSv,而要求的样本还太大。

应当说明的是在统计效能计算中,应使用一个人群的剂量范围而不是统一的剂量,当用总受照人群进行分析时,可能引起统计效能的增加^[11]。但一些个因素确有可能引起

统计效能的减少并要求加大样本,例如个人剂量估算中的不确定度^[12-14]、实际调查时期并非表 1和表 2那样,是基于对被调查人员全寿命期的随访(实际调查要短得多)及低剂量和低剂量率时的癌症发病率与高剂量时的差异。

最后要说明的是辐射剂量重建随辐射流行病学研究和事故剂量学的发展和需要而发展起来的,辐射剂量重建的剂量估算结果也仅用在这个范畴而不是其它,特别是不能用于日常的个人剂量监测。

参 考 文 献

- 1 张良安等. 中华放射医学与防护杂志, 1989; 9 (增刊): 10-16
- 2 张良安等. 中国辐射卫生, 1996; 5(1): 1-5
- 3 张良安等. 中国辐射卫生, 1996; 5(1): 6-9
- 4 张良安等. 中国辐射卫生, 1996; 5(1): 10-12
- 5 金瑾珍. 国外医学放射医学核医学分册, 1996; 20(4): 170

- 6 张文艺等. 中国辐射卫生, 1996; 5(2): 74-76
- 7 DS86 US-Japan joint reassessment of atomic bomb radiation dosimetry in Hiroshima and Nagasaki, Volume 1, Hiroshima, Japan, Radiatio Effects RERF, 1986 P 161-168
- 8 Greenland S. Am J Epidemiol 1988; 128 231-237
- 9 Howe GR, Chiarelli AM. Int J Epidemiol, 1988; 17 464-468
- 10 Schull WJ. Radiation dose reconstruction for epidemiologic uses, National Research Council, Washington, DC. National Academy Press, 1995 7
- 11 Shore RE et al. Regul Toxicol Pharmacol, 1992; 15 180-221
- 12 Walker A Blettner M. Am J Epidemiol, 1988; 128: 783-790
- 13 De Klerk NH et al. Int J Epidemiol, 1989; 18 705-712
- 14 Armstrong B. Recent Results Cancer Res, 1990; 120 50-60

(收稿日期: 1996-07-08)

电离辐射事故外照射个人剂量估计

北京放射医学研究所(北京, 100850) 郭 勇综述

摘 要: 电离辐射事故外照射个人剂量, 应视目的和受照水平高低选定范围和对象进行估计。本文从医疗、管理、大型核设施事故、局部照射和放射流行病学调查需要的角度, 简述对电离辐射事故个人剂量的要求、估计方法和主要影响因素。

关键词: 电离辐射事故 外照射 个人剂量

1 概况

电离辐射事故(以下简称事故)属于发生率很低的一类潜在危害, 特别是高剂量(使受照者发生急性放射病)事故就更为少见, 除日本原爆受难者、前苏联在核工业初期发生的核事故以及切尔诺贝利事故外, 40~90年代因事故死亡约 70余人, 全世界平均每年不过 1~2人, 对事故统计报道是很详尽的^[1-3]。尽管这类事故发生率很低或仅几个人受照, 但其社会和心理影响是很大的。这一方面是由于历史遗留的问题, 如日本原爆带来的“核恐怖”, 人们不甚了解辐射伤害的全貌, 对辐射

致癌或遗传效应望而生畏; 另一方面世界各国对辐射防护的重视, 给与较大的人力和财力的投入, 对人们产生了正面效应的缘故。总之, 防止核事故的研究在国际上是倍受重视的。

事故对人的照射情况多种多样, 个人受照剂量有大有小, 并不需要都进行剂量估计, 而应根据目的和剂量大小选定估计的范围和对象。ICRP在其第 28号出版物中有如下建议:^[4]

① 一旦可能估计出大概的剂量, 即可粗略地确定处理异常情况所需要的处置水平。