

文章编号: 1001-098X(2003)0190-04

核素内照射剂量评价的有关方法

徐英杰

摘要: 内照射剂量的估算在剂量防护和评价中占有较大的比重。ICRP (国际辐射防护委员会) 的剂量系数估算方法确立以来, 内照射剂量估算的主要问题变成了如何估算摄入量的问题。主要介绍了一般情况下以及核事故情况下的摄入量估算方法, 对使用个人监测方法测得摄入量的一些进展也进行了介绍。

关键词: 内照射; 辐射剂量; 摄入量

中图分类号: R144.1 **文献标识码:** A

Some methods in assessment of internal radiation dose

XU Ying-jie

(The Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Science, Peking Union Medical College, Tianjin 300192, China)

Abstract: The calculation of internal radiation dose is very important in radiation protection and evaluation. According to the dose coefficient method of ICRP, the problem of internal radiation dosage estimation has turned into how to estimate the intake. In general situations or in nuclear accidents, some methods of calculating the intake were recommended in the review. Some progresses in individual monitoring programs have also been introduced.

Key words: internal irradiation; radiation dose; intake

内照射评价是在核污染发生时对工作人员或公众进行应急处理的重要环节, 也是剂量重建工作中的重要组成部分, 其目的是估算放射性核素的意外摄入量及其所致的内照射剂量。一直以来, 放射工作者对内照射剂量的估算做了相当多的工作, 在ICRP (国际辐射防护委员会) 的剂量系数估算方法确立之后, 内照射剂量估算的主要问题变成了如何估算摄入量的问题, 所以本文的重点是介绍摄入量的估算方法。

1 内照射剂量估算的通用公式

目前, 按ICRP的剂量系数方法, 一般采用如下的简单计算公式来对内照射剂量进行评价:

$$H_T(\tau) = A_0 h_T(\tau) \quad (1)$$

$$E(\tau) = A_0 e(\tau) \quad (2)$$

式中: $H_T(\tau)$ 是摄入的待积组织或器官当量剂量; $E(\tau)$ 是摄入的待积有效剂量; $h_T(\tau)$ 是每单位摄入的待积组织或器官当量剂量, 也可称为待积组织或器官当量剂量系数, 其单位为 Sv/Bq; $e(\tau)$ 是每单位摄入的待积有效剂量, 也可称为待积有效剂量系数, 其单位为 Sv/Bq; A_0 是放射性核素摄入量, 单位为 Bq。

一般情况下, $h_T(\tau)$ 和 $e(\tau)$ 可从相关的ICRP出版物中查到。因而, 要估算内照射的 $H_T(\tau)$ 和 $E(\tau)$, 关键在于估算出放射性核素的摄入量 A_0 。

2 摄入量的估算

2.1 估算摄入量的一般方法

核素一般通过吸入、食入或是从伤口进入人体, 这里主要从吸入和食入的情况讲述摄入量估算的一般方法。至于核素进入体内后的转移、吸收、源器官的沉积以及对靶器官的影响在估算剂量系数时已基本考虑。

2.1.1 吸入情况

收稿日期: 2003-04-09

作者简介: 徐英杰 (1979-), 女, 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) 硕士研究生, 主要从事辐射剂量学研究。

审校者: 中国医学科学院中国协和医科大学放射医学研究所 张良安

吸入量估算一般是通过计算人的呼吸率和测定空气中单位体积的核素含量来得到。考虑到性别、年龄和运动状态的差别都可能使人的呼吸率产生较大差异,ICRP对它们分别进行了讨论。对年龄,ICRP分了六个阶段:3个月、1岁、5岁、10岁、15岁和成人。同时,还区分了四种运动状态:睡眠、静坐、轻体力活动和重体力活动。在相关出版物中,还给出了不同年龄在不同运动状态下的各种

参考值,比如呼吸参数、活动时间等^[1]。表1给出了ICRP第71号出版物中确定的不同年龄成员在不同运动状态下的呼吸率。在呼吸率不确定的情况下,一般应采用ICRP的标准值。

一般情况下,空气中单位体积核素含量可以使用空气采样监测系统测得,但在核事故发生早期,因烟羽中的单位体积核素含量易受到地形、气候等各方面的影响,造成其测定的复杂化,目前,这方

表1 ICRP确定的不同年龄成员在不同运动状态下的呼吸率标准值

运动状态	3个月	1岁	5岁	10岁	15岁	成人
睡眠	0.09	0.15	0.24	0.31	0.42	0.45
静坐	-	0.22	0.32	0.38	0.48	0.54
轻体力活动	0.19	0.35	0.57	1.12	1.38	1.5
重体力活动	-	-	-	2.22	2.92	3.0

注:1)表中数据的单位为 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,即每小时的呼吸率。

2)3个月婴儿和1岁、5岁儿童的呼吸率男女一样;对于其他年龄,表中均为男性呼吸率值。

面的资料比较欠缺,仅有一些比较粗略的估算公式。有人利用三维拉格朗日粒子模型来计算烟羽的 γ 射线外照射^[2],也许可以借用它来分析单位体积核素含量变化,或者也可利用高斯分布模型结合大气的运动状况进行计算,这些有待于进一步的研究。

2.1.2 食入情况

食入的情况比吸入要复杂一些。人们食入的核素含量一般是基于膳食中各类食品的消费量及其烹调后食物中核素的含量。求人们的各类食品消费量时,需要调查待估算人群的膳食组成,了解他们的生活习惯;而估算食物中的核素含量时,需要建立起核素的食物链模型,了解核素在食物链的传递。

关于食物链模式不断有相关报道。他们建立了各种食入途径的模型,模型全面地包括了核素在食物链的传递过程,以及核素在食物链各个环节的转移参数。Shimada Y等^[3]在估算日本地区公众对落下灰中 ^{137}Cs 食入摄入量时,不但讨论了 ^{137}Cs 在土壤中的转移,还考虑了 ^{137}Cs 在农产品、动物和海产品中的聚集与转移。

各种食物链模型一般都是从植物性食品和动物性食品两方面来考虑的。对于植物性食品,核

素主要是通过植物根部吸收,以及空气中的粉尘落到其叶面后的吸收而进入其体内的。在根部吸收的情况下,土壤中核素含量的分层以及耕作都会对土壤表层和根系区核素含量有影响。对于叶面吸收,主要是空气湿度对吸收有影响。通过研究核素在植物中的易位,最终得到植物可食用部分中的核素含量。时间对植物中核素含量也会有影响。一般认为,核素仅在植物的成熟期才会聚集到可食用部分,当污染发生与植物成熟季节时间相近时,会导致植物的污染达到最大;另外,在蔬菜的存储过程中,核素自身的衰变又将减少一部分放射性核素。植物性食品的清洗、去皮等也会对核素含量造成影响。

对于动物性食品,如果是家畜,主要对其饲料中的核素含量进行测定;如果是放牧饲养的动物,应先测定牧草中的核素含量。核素在动物体内的转移份额标准值可以在IAEA(国际原子能机构)、SCEAR(联合国原子辐射效应科学委员会)和ICRP的相应出版物中找到。

在核恐怖事件或核事故发生的情况下,上述的一般方法实现起来比较困难,也不太现实。

2.2 个人监测方法

个人监测方法是内照射估算的一种简单方法,

通过它可以及时检测出人员是否受到内照射以及快速评价内照射剂量。它主要包括三个方面:体外直接测量、生物样品的检测和空气抽样检测。

2.2.1 体外直接测量

对人体或器官内容物的直接测量可快速方便地估算出人体的活度。但是,它仅适用于那些发射可以逃逸出人体的射线的核素,也就是说,它只能用于能发射X射线、 γ 射线、正电子(检测其湮灭后放出的射线)、高能 β 粒子(检测其发出的韧致辐射)、某些 α 发射体(检测其特征X射线)的核素^[9]。值得注意的是,测量前一定要清除身体表面污染的干扰。

现较常用的体外探测装置有碘化钠探测器和锗探测器。碘化钠晶体可制成较大体积,对 γ 射线有高的探测效率,但对多种核素混合物发出的 γ 能谱分析起来比较困难;锗探测器则可以简化复杂 γ 能谱的解谱工作,所以多用于体内受到混合 γ 辐射核素污染的人员。

目前,体外探测装置一般做成阴影屏蔽床和屏蔽椅样的监测系统。阴影屏蔽床全身监测器从头到脚进行扫描,可以获得全身扫描图,从而可以对体内核素活度进行定位,监测时间为15~20min。屏蔽椅监测器的工作区较前者小,不能提供人体内放射性的定位信息,但是它比较小巧,而且它还能根据被测者体内放射性水平来调节监测的时间,一般情况下只需要2~3min就可以提供有效信息,这在核事故应急情况下尤其有用^[9]。

印度的Bhsbha原子能研究中心^[10]将标准屏蔽椅监测器建成了一套无需人看管、由计算机控制的、针对内照射剂量全身监测的自动化系统,有望在发生紧急事故时快速监测剂量。

各种探测装置均存在有探测限值的问题,不过在监测时通常遇到很多核素的探测限仅相当于工作人员年摄入量限值的1/1000~1/10000,所以影响不大。

在ICRP的第54和第78号出版物中可查出用测量值 M 推算 A_0 的基本公式:

$$A_0 = M/m(t) \quad (3)$$

其中 $m(t)$ 是摄入1Bq某核素 t 天后应测得的结果(在上述出版物的附录中可查得)。应当说明的是,公式(3)不适用于连续摄入的情况,此时可用 $m(t/2)$ 代替 $m(t)$ 进行计算^[9]。

2.2.2 生物样品的检测

生物样品包括尿、粪、血液、呼出气、唾液和汗液等,但常用的是尿和粪样,所以习惯上又称排泄物分析。通过生物样品检测也可推算出 A_0 ,推算的 A_0 不但与生物样品检测的结果有关,也与内照射的模式有关。

某些情况下,排泄物分析法是测量无 γ 射线发射或仅发射低能光子的核素的惟一方法。粪样分析法常用于估计意外摄入而实施的特殊监测中,它比较适合于探测不可转移性物质的摄入,比如,核素直接通过胃肠道经由粪便排出,或者难溶性的物质从呼吸系统清除的情况^[9]。尿样分析法是排泄物分析中最常用的方法,收集尿样时应避免样品受到外来污染。为估计每日尿排出总活性,多数情况下宜收集24h全尿,因为样品量小代表性就差些,但无除外;当收集24h全尿有困难时,可用尿中肌酐含量由部分尿样中放射性核素活度间接地折算成全日尿的活度。具体采集的尿样数量应根据分析方法的灵敏度而定,对某些核素,如果要达到足够的灵敏度,需要对数天的排泄物进行分析^[9]。

为了从排泄物中分离得到有效信息,人们建立了一种更简单、更快速、更低价又更安全的固相层析方法^[9]。此法使得核素从复杂基质中的分离得到简化,而固相提取剂的优良选择性又减少了洗涤提取溶剂的用量。因此,这种方法不但可以改进样品的处理量和数据质量,而且可以减少实验室排放的有害废料,降低费用。不过,在分析锕系元素时,还不能做到将同一柱子中的锕系元素依次分离,因此,必须结合离子交换柱使用。

同样,我们可以使用公式(3)来估算摄入量,只是其中的 M 应为尿样测量值, $m(t)$ 为摄入1Bq某核素后 t 天应测得的尿样结果(其值可查)。连续摄入的情况也需用 $m(t/2)$ 代替 $m(t)$ 进行计算。

2.2.3 空气抽样检测

大多数的体内污染是通过吸入污染空气造成的,空气污染活度的监测也成为个人体内污染监测的一种手段,它可以直接用于估计吸入的污染量。空气污染的监测内容包括监测空气中放射性核素的比活度和气溶胶粒子的粒度分布。

对个人体内污染估计时,采样点的代表性很重要,采样点应放置在个人呼吸带位置和经常活动区

域,最好是使用个人空气采样器。理想情况下,采样速率应该代表个人的典型呼吸率,但目前的装置还只能达到该值的1/10,而且,个人空气采样器无法提供有关颗粒大小的信息^[4]。

固定空气采样器通常用来监测环境条件,测得的单位体积核素含量一般低于工人呼吸带附近的单位体积核素含量,最明显时能相差10倍。不过,当固定空气采样器置于合适的位置,可通过比较个人空气采样器和固定空气采样器的测量值来间接评价剂量,而且可以提供核素构成和颗粒大小方面的有用信息^[4]。

有人将使用固定空气采样器测量单位体积核素含量带来的不确定度和因个人差异引起的模型参数的变化分开讨论,对受职业照射的核电站工人的吸入剂量进行估算后发现,由单位体积核素含量带来的不确定度在剂量估算的整体不确定度中起决定性作用。所以,使用靠近呼吸带的个人空气采样器结合一定的生物鉴定的方法能降低整体的不确定度,可更有效地进行个人剂量估算^[7]。

上述方法可根据需要进行选择,在一些特殊条件下也可将上述方法结合使用^[4]。Thind KS^[8]在对核电站的裂变和活化产物造成的内照射进行估算时,考虑到混合物中存在的锕系元素对剂量也有显著贡献,于是建立了一套综合考虑源、地点、活化或是从反应堆排放的方法先进行体外直接测量,并对第一份粪样用 γ 谱仪进行定量分析,如果发现锕系元素的存在,进一步对粪样和尿样进行检测,从而得到较准确的剂量估算值。不过,对某些核素,只能使用其中的一种方法,比如在测量氡的摄入时,只能用尿样检测。

3 小结

总的说来,目前核素内照射的剂量评价主要

是依据ICRP的剂量系数方法。在对其中的摄入量进行估算时,用上述的一般方法计算的结果较精确,但是它实现起来比较困难,一般多用于实验室的模拟研究。核事故情况下,采用摄入量经验公式以及常规的个人监测方法,不但估算的结果比较直观和可靠,结果的不确定度基本能满足事故剂量重建的要求,而且实现起来也较容易,所以在核事故和辐射事故医学应急的实际中运用较多。

参考文献:

- [1] ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4 inhalation dose coefficients [J]. ICRP Publication 71, 1995, 25(3-4): 9-23.
- [2] Raza S, Avila R. A 3D lagrangian partical model for direct plume gamma dose rate calculations[J]. J Radiol Prot, 2001, 21(2): 145-154.
- [3] Shimada Y, Morisawa S, Yoneda M, et al. A dosimetric determination of ¹³⁷Cs ingestion from global fallout and the related risks to Japanese[J]. Health Phys, 1998, 74(3): 316-329.
- [4] ICRP. Individual monitoring for internal exposure of workers replacement of ICRP publication 54[J]. ICRP Publication 78, 1997, 27(3-4): 19-23.
- [5] Singh IS, Suri MMK, Vidhani JM, et al. Development of an automated shielded chair whole-body monitor [J]. Radiat Prot Dosimetry, 2002, 102(2): 145-151.
- [6] Robredo LM, Navarro T, Sierra I. Indirect monitoring of internal exposure in the decommissioning of a nuclear power plant in Spain[J]. Appl Radiat Isot, 2000, 53(1-2): 345-350.
- [7] Linkov I and Burmistrov D. Reconstruction of doses from radionuclide inhalation for nuclear power plant workers using air concentration measurements and associated uncertainties[J]. Health Phys, 2001, 81(1): 70-75.
- [8] Thind KS. Monitoring methods and dose assessment for internal exposures involving mixed fission and activation products containing actinides[J]. Health Phys, 2001, 80(1): 47-53.