

《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》解读

刘庆芬 武权 樊体强 张良安

【摘要】 国家职业卫生标准——《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》已经卫生部批准并发布,此标准是在广泛调研国内外文献、阅读相关法律法规,并在明确了制定依据和原则的基础上制定的,此标准适用于职业内照射剂量估算。该文对此标准中的重要技术内容进行了解释说明,同时对该标准的宣传实施提出建议。

【关键词】 放射性同位素;规范;内照射剂量

Explanation of Specification for Assessments of Intakes and Internal Doses of Radionuclides LIU Qing-fen, WU Quan, FAN Ti-qiang, ZHANG Liang-an. Tianjin Key Laboratory of Molecular Nuclear Medicine, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Science, Tianjin 300192, China
Corresponding author: LIU Qing-fen, Email: qf6538@yeah. net

【Abstract】 National occupational health standard—*Specification for Assessments of Intakes and Internal Doses of Radionuclides* has been approved and issued by the Ministry of Health. Based on the extensive research of literature, systematic study of the relevant laws and regulations related to the specification, this specification was enacted according to the principles about it. It is mainly used for estimating the occupational radiation internal dose. This article explained the important technical content and proposed suggestions for the publicity and implementation of the standard.

【Key words】 Radioisotopes; Criteria; Internal doses

《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》(以下简称本标准)为卫生部2007年标准制修订计划项目,中国医学科学院放射医学研究所受卫生部放射性疾病诊断标准委员会委托,承担了修订该标准的任务。

1 目的和背景

随着核能技术和放射性核素在国民经济各部门的广泛应用,其在创造了巨大的社会和经济效益的同时也存在发生放射性辐射事故的潜在危险。除外照射可能引起辐射损伤外,放射性核素内污染也可能引起放射性损伤。为控制和缓解职业人员、公众和事故情况下人员损伤,规范放射性核素摄入量及内照射剂量的估算具有十分重要的意义。修订该标准不但可为放射性内污染疾病的诊断及救治提供剂量学依据,而且也将促进放射性核素和核能在国民

经济中的广泛应用,并能在辐射防护和控制核事故中起到关键作用。

原标准《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》^[1]起草时间较早,在此标准颁发后,国际辐射防护委员会又制定了新的内照射模型和剂量方法^[2-8],国际原子能机构也按新的内照射模型和剂量方法制定了相应的技术标准^[9-10],原标准所依据的一些概念、方法和数据现已发生了变化,无法再采用。因此,此次修订中,按照我国的辐射防护基本标准^[11],基于国际辐射防护委员会新的内照射模型和剂量方法^[2-8],主要参考了 *Safety Reports Series No. 37: Methods for assessing occupational radiation doses due to intakes of radionuclides*^[9]及 *Safety Standards Series No. RS-G-1.2: Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides*^[10]来编制本标准。

2 基础和依据

本次修订主要基于国际辐射防护委员会制定的最新的放射性核素摄入量估算方法^[7]和内剂量估算方法^[4-5,8]。依据国际原子能机构的相关标准(*Safety Reports Series No. 37: Methods for assessing occupa-*

DOI: 10. 3760 / cma. j. issn. 1673-4114. 2012. 04. 005

基金项目: 卫生部标准研究课题(2006-09-04)

作者单位: 300192 天津, 中国医学科学院放射医学研究所, 天津市分子核医学重点实验室

通信作者: 刘庆芬(Email: qf6538@yeah. net)

tional radiation doses due to intakes of radionuclides^[9], *Safety Standards Series No. RS-G-1.2: Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides*^[10], *Safety Series No.115: International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources*^[12], 并等效采用国际原子能机构的 *Safety Reports Series No. 37*^[9], 对原标准、方法进行了实质性的修改。新标准依据的资料代替了原标准的国际辐射防护委员会 30 号出版物^[13]和国际辐射防护委员会 56 号出版物^[14]; 主要剂量学和生物学模型采用了国际辐射防护委员会 30 号出版物^[13]中的消化道模型和国际辐射防护委员会 66 号出版物^[15]中的呼吸道模型; 采用的剂量学方法是剂量系数方法; 摄入量估算采用了国际辐射防护委员会 78 号出版物^[7]推荐的方法和参数。

3 内容解读

3.1 总体结构

标准正文第 4~7 章和附录 A、B、C、D 为标准的主要内容。第 4 章为“摄入途径和模式”, 第 5 章为“摄入量的测量和估算”, 第 6 章为“内照射剂量估算及方法”, 第 7 章为“不确定度估算中应考虑的因素”; 附录 A 为“生物动力学和剂量学模型”, 附录 B 为“用直接和间接测量数据估算摄入量的方法”, 附录 C 为“主要核素的剂量系数”, 附录 D 为“摄入量和内照射剂量估算举例”。

3.2 采用方法的说明

3.2.1 生物动力学和剂量学模型

在放射性核素摄入量及内照射剂量估算时采用国际原子能机构的 *Safety Reports Series No. 37*^[9]中使用的生物动力学和剂量学模型。这些模型的主要内容已在标准附录 A 中作为资料性附录进行了介绍, 这里不再重复。

3.2.2 剂量系数方法

在放射性核素摄入量及内照射剂量估算时, 采用了国际辐射防护委员会新的内照射剂量估算方法, 即剂量系数方法^[7,9-10,12], 并采用了国际辐射防护委员会和国际原子能机构的相关文献中给出的参数^[2-5,7]。

在内照射剂量估算中, 最常用的是待积器官当量剂量 $H_T(\tau)$ 和待积有效剂量 $E(\tau)$, 可分别用以下公式计算:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t+t_0} q_S(t, t_0) SEE(T \leftarrow S; t) dt \quad (1)$$

$$E(\tau) = \sum_{T=1}^{12} W_T H_T(\tau) + W_{\text{其余}} H_{\text{其余}}(\tau) \quad (2)$$

式中, $q_S(t, t_0)$ 为 t_0 时刻摄入, t 时刻源器官内核素的放射性活度, 单位为 Bq; $SEE(T \leftarrow S; t)$ 为比有效能量, 它是 t 时刻源器官(S)内每次核蜕变引起靶器官(T)内的当量剂量, 单位为 $Sv \cdot (Bq \cdot s)^{-1}$; W_T 为组织权重因子; $H_{\text{其余}}(\tau)$ 为其余器官的待积当量剂量。

$H_T(\tau)$ 和 $E(\tau)$ 是摄入放射性物质后, 随时间积分的一个剂量学量。如果没有特殊说明, 对成年人, t 的值为 50 年, 对于婴幼儿为 70 年; 在职业照射的情况下, 积分时间 $t_0=20$ 年, $t+t_0=70$ 年。

用上述公式直接计算 $H_T(\tau)$ 和 $E(\tau)$ 比较困难。在辐射防护中我们并不需要这样复杂的计算, 而是将采用简单的隔室模型代表器官中的放射性核素的转移、沉积和排除进行简化, 此时, 复杂的内照射估算可以简化。

采用国际原子能机构的 *Safety Reports Series No.37*^[9]中使用的生物动力学和剂量学模型时, 放射性核素的代谢可用指数模式描述, 从而有:

$$q(t, t_0) = \sum_m A_0 f_i f_s T_m a_m (1 - e^{-0.693t/T}) \quad (3)$$

式中, A_0 为 t_0 时刻摄入的总活度, f_i 为放射性物质转移到体液的份数, f_s 为从体液转移到源器官(s)的份数, T_m 为该放射性物质相应于 m 指数项(隔室)的有效半排出期, a_m 为 m 指数项占的份数。将公式(3)代入公式(1), 并定义 $h_T(\tau)$ 为:

$$h_T(\tau) = \int_{t_0}^{t+t_0} \sum_s \sum_m A_0 f_i f_s T_m a_m (1 - e^{-0.693t/T}) SEE(T \leftarrow S; t) dt \quad (4)$$

则公式(1)可改写为:

$$H_T(\tau) = A_0 h_T(\tau) \quad (5)$$

式中, $h_T(\tau)$ 为待积器官当量剂量的剂量系数, 即每单位摄入量的待积器官当量剂量的预定值, 单位为 Sv/Bq。

用同样的方法可以得出:

$$E(\tau) = A_0 e(\tau) \quad (6)$$

在公式(5)和公式(6)中, A_0 为放射性核素的摄入量, 单位为 Bq; $e(\tau)$ 为待积有效剂量的剂量系数, 即每单位摄入量引起的待积有效剂量预定值, 单位为 Sv/Bq。

国际辐射防护委员会基于生物动力学和剂量学模型,对 $h_T(\tau)$ 和 $e(\tau)$ 值进行了计算,并分别在国际辐射防护委员会的67号出版物^[2]、71号出版物^[4]、72号出版物^[5]、69号出版物^[6]中给出了计算的结果,国际原子能机构标准中也采用了相关的参数^[9],在本标准的附录C中列出了主要核素的剂量系数值。

因此,只要我们能估算出摄入量(A_0),再结合国际辐射防护委员会给出的 $h_T(\tau)$ 或 $e(\tau)$ 值,就可以方便地计算出待积器官当量剂量 $H_T(\tau)$ 或待积有效剂量 $E(\tau)$ 。

3.3 估算 A_0 的常用方法

3.3.1 消耗量剂量模式下 A_0 的估算

在消耗量剂量模式中主要分为吸入和食入两大类。在进行吸入 A_0 估算时除了要考虑空气污染监测结果外,还应考虑呼吸率和居留因子等因素对结果的影响。食入又分为饮水和食用两大类。

通过以上的分析,这时的摄入量(A_0)可以用下式计算:

$$A_0 = A_{\text{吸}} + A_{\text{饮水}} + A_{\text{食用}} \quad (7)$$

式中, $A_{\text{吸}}$ 为吸入空气造成的放射性核素摄入量,单位为Bq; $A_{\text{饮水}}$ 为饮水造成的放射性核素摄入量,单位为Bq; $A_{\text{食用}}$ 为食用各类食物造成的放射性核素摄入量,单位为Bq。

一般来说,只要测得空气放射性含量(Bq/m³)、呼吸率、居留系数就可方便的计算出 $A_{\text{吸}}$ 。空气监测结果通常以时间积分浓度(Bq·s/m³)表示。居留系数是指在污染地区停留的时间份额,除突发事件的情况外,可以不考虑。对于某一种核素 j 累计时间内的摄入量 $A_{j\text{吸}}$ 可以用下式计算:

$$A_{j\text{吸}} = C_{j\text{空}} B_{\text{空}} \quad (8)$$

式中, $C_{j\text{空}}$ 为核素 j 在空气中的时间积分浓度(Bq·s/m³); $B_{\text{空}}$ 为人员呼吸率(m³/s)。

一般来说,只要测得水的放射性含量(Bq/kg)、水系损失、饮用量就可方便的计算出 $A_{\text{饮水}}$ 。水系损失是指取监测样品的水中与饮用水中的放射性核素,由于各种原因的差异,只要我们尽可能适时地在实际的饮用水中取样监测,此时也可不考虑这种修正。对于某一种放射性核素 j 的摄入量 $A_{j\text{饮水}}$ 可以用下式计算:

$$A_{j\text{饮水}} = C_{j\text{水}} Q_{\text{水}} \quad (9)$$

式中, $C_{j\text{水}}$ 为放射性核素 j 在水中的含量

(Bq/kg); $Q_{\text{水}}$ 为饮水量(kg)。饮水量随地区、年龄、习惯等因素而异,一般在计算机系统中使用联合国原子辐射效应科学委员会的成人数据(500 kg/a)作为其系统的默认值。

对于某一种放射性核素 j 的摄入量 $A_{j\text{食用}}$ 可以用下式计算:

$$A_{j\text{食用}} = \sum_m C_{ji\text{食}} Q_{i\text{食}} \quad (10)$$

式中, $C_{ji\text{食}}$ 为放射性核素 j 在 i 类食品中的含量(Bq/kg); $Q_{i\text{食}}$ 为 i 类食品的食用量(kg)。

3.3.2 个人监测下 A_0 的估算

内照射个人监测方法^[7]是在核与辐射事故情况下评价个人内照射剂量的一种十分重要的方法,它能够快速地给出比较直观、有效的结果。人们常常通过个人监测来检查核与辐射事故中受到内污染的人员,以及职业人员受到内照射的程度,它是评价个人体内放射性污染的主要根据。在核与辐射事故发生的情况下,常常需要个人监测方法来检测职业人员和公众是否受到了内照射。个人监测方法主要有空气个人监测方法、生物样品个人监测方法和体外个人监测方法。

空气个人监测方法通常是采用个人空气采样器直接对内污染进行监测,并用监测结果估计放射性核素摄入量。

若监测结果是监测周期内的累积放射性活度,则可直接视为此时的摄入量 A_0 。若监测结果是核素空气浓度 $C_{j\text{空}}$ (kBq/m³),还需要有呼吸率($B_{\text{空}}$)和监测周期(T)的值,这时核素 j 的摄入量 A_{j0} 可用下式计算:

$$A_{j0} = C_{j\text{空}} B_{\text{空}} T \quad (11)$$

体外直接测量法是使用探测器直接从体外测量全身或器官内放射性核素的活度来估算摄入量的一种方法,其结果较生物样品测量法的结果更加可靠。这一方法在核与辐射事故应急测量中经常使用。但是,它仅适用于那些能发射可以逃逸出人体的射线的核素,即能发射X射线、 γ 射线、正电子(检测其湮灭后放出的 γ 射线)、高能 β 粒子(检测其发出的韧致辐射)以及某些 α 发射体(检测其特征X射线)的核素。直接从体外测量全身或器官内放射性核素的含量可以快速而简便地估算体内相应器官或组织的放射性活度,从而可首先估算出 A_0 再估算内剂量。

用测量值 M (Bq)推算 A_0 的基本公式如下:

$$A_0 = M/m(t) \quad (12)$$

式中, $m(t)$ 为摄入 1 Bq 某核素 t d 时体内或器官内核素的含量(Bq), $m(t)$ 在《职业性内照射个人监测规范》^[17]中可查得。应当说明的是,公式(12)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, T 为监测周期(d)。

对不释出 γ 射线或仅释出低能光子辐射的放射性核素,个人体内污染量的监测主要借助于排泄物的分析。用测量值 M (Bq/d)推算 A_0 的方法如下:

$$A_0 = M/m(t) \quad (13)$$

其中 $m(t)$ 为摄入 1 Bq 某核素 t d 时日排泄量(Bq/d)的预期值。 $m(t)$ 在《职业性内照射个人监测规范》^[17]中可查得。应当说明的是,公式(13)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, T 为监测周期(d)。

4 小结

本标准已实施 3 年,得到 2 个单位的应用反馈,分别是辽宁省职业病防治院和山东省医学科学院放射医学研究所,除了肯定本标准对实际工作的指导意义外,同时要求对标准进行宣贯。本文通过对《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》研制的目的和背景、基础和依据、标准的内容(包括总体结构、采用方法的说明、估算 A_0 的常用方法)等方面进行解读,对应用单位进一步认识和理解这一标准,并在实践中正确运用将会有一定帮助。

参 考 文 献

- [1] 国家技术监督局,中华人民共和国卫生部. GB/T16148-1995 放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [2] International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides—part 2 ingestion dose coefficients. ICRP Publication 67. Ann ICRP, 1992, 22(3-4).
- [3] International Commission on Radiological Protection. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 68. Ann ICRP, 1994, 24(4).
- [4] International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides—part 4 inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. Ann ICRP, 1995, 25 (3-4).
- [5] International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to the members of the public from intake of radionuclides—part 5 compilation of ingestion and inhalation coefficients. ICRP Publication 72. Ann ICRP, 1995, 26 (1).
- [6] International Commission on Radiological Protection. General principles for the radiation protection of workers. ICRP Publication 75. Ann ICRP, 1997, 27 (1).
- [7] International Commission on Radiological Protection. Individual monitoring for internal exposure of workers. ICRP Publication 78. Ann ICRP, 1997, 27(3-4).
- [8] International Commission on Radiological Protection. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals (addendum 2 to ICRP publication 53, also includes addendum 1 to ICRP publication 72). ICRP Publication 80. Ann ICRP, 1998, 28 (3).
- [9] International Atomic Energy Agency. Methods for assessing occupational radiation doses due to intakes of radionuclides. Safety Reports Series No. 37. Vienna: IAEA, 2004.
- [10] International Atomic Energy Agency. Assessment of occupational exposure due to intakes of radionuclides. Safety Standards Series No. RS-G-1.2. Vienna: IAEA, 1999.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [12] Food and Agriculture Organization, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, et al. International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources. Safety Series No.115. Vienna: IAEA, 1996.
- [13] International Commission Radiological Protection. Limits for intakes of radionuclides by workers. ICRP Publication 30 (Part 1). Ann ICRP, 1979, 2 (3-4).
- [14] International Commission Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides—part 1. ICRP Publication 56. Ann ICRP, 1990, 20 (2).
- [15] International Commission Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP Publication 66. Ann ICRP, 1994, 24 (1-3).
- [16] International Commission Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides—part 3 ingestion dose coefficients. ICRP Publication 69. Ann ICRP, 1995, 25 (1).
- [17] 中华人民共和国卫生部. GBZ129-2002 职业性内照射个人监测规范. 北京: 法律出版社, 2002.

(收稿日期: 2012-05-12)