

## 综述与编译

# 食入放射性核素所致内照射剂量研究现状及展望

中国医学科学院 放射医学研究所(天津,300192) 诸洪达 陆梅综述 朱昌寿审校  
中国协和医科大学

**摘要:**介绍了公众食入放射性核素所致内照射剂量研究的放射卫生学意义,综述了当前世界人口由食入天然放射性核素(原生和宇生放射性核素)和人工放射性核素所致的内照射剂量及其估算方法,并对该领域研究发展趋势提出了看法。

**关键词:**放射性核素 食品 饮水 内照射剂量

联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)在1993年发表了第11次报告书,对电离辐射源及其效应又作出了最新国际评估<sup>[1]</sup>。其主要目的是评价各种天然和人工辐射源对世界人口的照射剂量和对人类健康的影响。就内照射而言,公众辐照途径包括吸入和食入(食品和饮水)。食品是环境物质(包括营养素、常量和微量元素、毒物)进入人体的重要环节之一。随着原子能应用的扩展(尤其是核武器试验)和切尔诺贝利核电站等重大核事故的发生,经食入的放射性核素的监测及相应卫生标准的制定受到各国重视。

本文综述了公众食入放射性核素所致内照射剂量研究的放射卫生学意义和当前研究现状,对近年研究趋势提出了看法。

## 1 公众食入放射性核素所致内照射剂量研究的放射卫生学意义

### 1.1 各国国民剂量的估算

各国公众都因其特定的地域、自然条件、经济开发、核能利用程度及居民基于种族和生活习惯等条件的不同而形成特定的解剖、生理、代谢参数。近年来,不少国家都在估算各自的国民剂量,它已成为放射环境监测和管理的重要基础国情资料。UNSCEAR报告书关于辐射源的剂量估计应该是各成员国国民剂量的人口加权平均值。

### 1.2 监测本底背景值

50年代末以来,为了监测核武器试验沉降物对公众健康的影响,大多数国家建立了放射性本底监测站(网),进行连续的沉降物和生物样品放射性监测。食品(如牛奶、蔬菜、谷物等)和饮水都是重要的监测对象。这些监测曾是及时发现核试验信号的有力根据和卫生学评价的主要依据。随着大气层核武器试验的停止,食入放射性监测频度大大减少,监测项目由核燃料元素和核裂变产物转向天然核素和国民经济中应用多的核素,主要目的也转向核动力生产及其它核和平利用方面的环境污染监测。核设施(如核电站等)正式运行前后均应开展环境(包括食品)的放射学调查,以获得放射性监测背景值和动态污染资料。在切尔诺贝利核电站事故引起的全球性污染监测中,各国大多采用各自原先膳食放射性调查资料作为本底背景值加以评价。各国的这些背景值资料对于各地的放射性环境监测以及在高天然辐射本底地区辐射研究中都是很有意义的。

### 1.3 食品中放射性核素卫生标准制定依据

按照ICRP第26号和第60号出版物建议的辐射防护剂量限制体系,食品(包括饮水)中放射性核素限制浓度系直接源自内照射剂量基本限值ALI。它是基于基本剂量限值通过相应代谢和剂量学模型及其参数而导出的推定限值。国际上这类标准的制定、修订中都需要有本国的下列资料作为依据:①食

品天然放射性核素含量本底值;②公众各年龄组膳食组成和各类食品的食用量资料<sup>[2]</sup>。

对于核事故应急而言,食品和饮水干预水平的制定具有重要的现实意义,尤其在中、晚期食入所致内照射剂量估算应成为卫生评价和决定应急措施的重要依据。1957年温茨凯尔事故和1986年切尔诺贝利事故使食品放射性污染都达到在一定地区内农、牧产品禁止食用的程度<sup>[1]</sup>。切尔诺贝利核事故引起国际组织和各国对食品放射污染的重视,客观上促进了相应卫生标准的制定和研究。

#### 1.4 参考人参数编制的依据

公众食入放射性核素摄入量调查是各国辐射防护领域参考人参数编制的重要依据。现行ICRP参考人参数还是1975年主要基于当时有限的北美、欧洲白人资料制定的,ICRP正在考虑其第23号出版物的修订,而各国参考人参数正是国际参考人相应参数修订的重要基础。

### 2 世界平均食入放射性核素所致内照射剂量的最新估算值

#### 2.1 食入放射性核素所致内照射剂量估算方法

放射性核素摄入量是内照射剂量估算的基础,公众摄入量是按人群膳食组成(即各类食品年食用量)和该类食品中放射性核素浓度来计算的。摄入量调查可用总膳食研究或双份饭法来进行。人体摄入放射性核素后所受辐射剂量计算基本上沿用ICRP第30号出版物推荐的方法<sup>[3]</sup>,只是由于估算对象是包括不同年龄组的公众和ICRP第26号出版物已被第60号出版物所取代,以及其后第68和第72号出版物公布,计算方法有所修订<sup>[4,5]</sup>。

摄入放射性核素后所致照射剂量现采用已有明确权重因子的12个器官和组织以及“其余组织”所总共接受的待积有效剂量来表示,即按组织权重因子与这些靶器官的待积

当量剂量相乘后求和而得,而器官和组织的待积当量剂量则是当量剂量率对特定时间的积分。由于公众包括了各个年龄组的广大人群,积分时间对成人为50年,对未成年人计算到70岁<sup>[5]</sup>,靶器官中的待积当量剂量取决于放射性核素摄入后在积分时间内源器官中辐射的核转变数和来自源器官中的辐射在靶器官中所致的比有效能量。可见摄入后内照射剂量不但与放射性核素本身特性有关,还受人体代谢的生物动力学和剂量学模型所支配。为方便起见,ICRP对食入放射性核素人体代谢生物动力学用消化道模型来描述。该模型把胃肠道视为由胃、小肠、上段大肠和下段大肠四部分组成,小肠是胃肠道到体液的唯一吸收途径,并对各部分壁和内容物质量、平均停留时间等采用了ICRP参考人的相应参数。ICRP第68号出版物对第30号出版物中的胃肠道模型作了以下修改:结肠只有一个组织权重因子,其剂量是两部分的质量加权平均值;食道有专门的组织权重因子,应包括在胃肠道模型之内,假设将胸腺比吸收分数作为食道相应值的近似值;考虑到公众对象修正了一些消化道的 $f_1$ 值。生物动力学模型也基于新资料作出某些修正<sup>[4]</sup>。

内照射剂量的计算尽管很复杂,但在通常估算中可采用某些简便方法。放射性核素摄入量乘以剂量系数(食入单位活度所致待积有效剂量, Sv/Bq)便可估算出所致待积有效剂量。UNSCEAR在近年报告书中,对天然放射性核素用平均的待积有效剂量来表示,而人工核素由于其很大的时空差异,自其1977年报告书以来按其来源估算出集体剂量负担。对核试验释出核素所致剂量采用了隔室模型和转移系数,将膳食到剂量分成包括其间的组织共三个隔室用两个转移系数加以联系,总转移系数为两个转移系数之积。<sup>3</sup>H和<sup>14</sup>C剂量负担(人工部分)是通过与宇宙射线作用下的产率与剂量比较估算的。自50年代起核电生产持续增长,UNSCEAR

报告书自1972年开始,除估算实际集体剂量负担外,还估计了每生产单位电能的集体剂量负担。

表1 天然放射性核素世界平均食入年摄入量及有效剂量

种类	核素	摄入量 (Bq)	剂量* ( $\mu$ Sv)
原生放射性核素:	$^{40}\text{K}$	-	165
	$^{87}\text{Rb}$	-	6.0
	$^{238}\text{U}$	4.9	0.25
	$^{234}\text{U}$	4.9	0.28
	$^{230}\text{Th}$	2.5	0.59
	$^{226}\text{Ra}$	19	8.0
	$^{210}\text{Pb}$	32	34
	$^{210}\text{Po}$	55	95
	$^{232}\text{Th}$	1.3	0.36
	$^{228}\text{Ra}$	13	21
	$^{228}\text{Th}$	1.3	0.24
	$^{235}\text{U}$	0.21	0.011
	宇生放射性核素:	$^3\text{H}$	500
$^7\text{Be}$		1 000	0.03
$^{14}\text{C}$		20 000	12
$^{22}\text{Na}$		50	0.15

\* 除 $^{87}\text{Rb}$ 数据来自文献[6]外,其余均来自文献[1]及其后的修正值;剂量除 $^{40}\text{K}$ 、 $^{87}\text{Rb}$ 和宇生放射性指成人外,其余均为人口加权平均值。

## 2.2 食入天然放射性核素所致内照射剂量

### 2.2.1 原生放射性核素

主要有 $^{40}\text{K}$ 铀和钍系放射性核素。由于在自然界中溶解、产生射气及生物吸收和代谢,食物中天然放射性核素并不平衡。体内 $^{40}\text{K}$ 主要来自食入,由于在体内可自动调节平衡,其所致内照射剂量估算来自人体含量直接测量,对成年人有效剂量为 $165\mu\text{Sv}$ ,儿童为 $183\mu\text{Sv}$  [1]。 $^{87}\text{Rb}$ 所致年有效剂量为 $6\mu\text{Sv}$  [6]。

原生放射性核素食入所致内照射剂量反映膳食和饮水摄入,UNSCEAR 1993年报告书在估算时采用WHO世界标准化平均食品食用率和主要北温带食品参考活性浓度,假设了食入剂量系数不依赖年龄,而仅设定了成人、儿童和婴儿的分布份额为0.65、0.30

和0.05,用年龄加权平均剂量来表示。最近由于剂量系数的修正,原生铀系和钍系放射性核素的内照射剂量估算值已由1993年报告书的 $52\mu\text{Sv}$ 更新为约 $160\mu\text{Sv}$ 。

### 2.2.2 宇生放射性核素

人类受宇生放射性核素辐照途径是食入,最重要的是 $^{14}\text{C}$ 、 $^{22}\text{Na}$ 、 $^7\text{Be}$ 和 $^3\text{H}$ 、 $^{14}\text{C}$ 和 $^3\text{H}$ 都还有人工放射性来源。

现将天然放射性核素所致年摄入量及有效剂量列于表1。

### 2.3 人工放射性核素食入所致内照射剂量

天然放射性辐照可看作是恒定水平的连续照射,而人工放射性则是不恒定的,因此年剂量并不是满意的度量,UNSCEAR报告书采用了集体剂量和剂量负担的概念,并与天然辐照相比较。

大气层核爆炸试验大多是1945年~1980年间在北半球进行的,1952年~1958年和1961年~1962年是试验最多的时期,到1981年为止共进行541次试验,总裂变和聚变产额为 $440\text{Mt}$ 。迄今核武器试验所致总集体有效剂量大约为 $3 \times 10^7$ 人 $\cdot\text{Sv}$ 。到2200年将实际接受 $7 \times 10^6$ 人 $\cdot\text{Sv}$ 。大气层核试验对全球人口有效剂量负担的重要核素除 $^{14}\text{C}$ 外还有 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{95}\text{Zr}$ 、 $^{95}\text{Nb}$ 、 $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{54}\text{Mn}$ 、 $^{144}\text{Ce}$ 、 $^{131}\text{I}$ 和 $^3\text{H}$ ,食入贡献为80%。超铀元素所致剂量可忽略不计。由食入途径所致剂量峰值在1964年。当前,由 $^{14}\text{C}$ 所致食入剂量超过所有其它放射性核素。在1993年UNSCEAR报告书中给出了20多种放射性核素经由食入途径的单位释出或单位沉降密度相应剂量的转移系数。集体剂量是依据 $^{90}\text{Sr}$ 和 $^{95}\text{Zr}$ 的沉降密度和其它放射性核素与这两核素的比值来计算的。UNSCEAR从集体有效剂量来比较,认为大气层核试验造成的照射相当于世界人口3年所受的天然照射,而其余人工来源只相当于数小时或数天天然本底照射 [1]。

### 3 食入放射性核素所致内照射剂量研究发展趋势

#### 3.1 低剂量受照研究渐受重视

天然辐射是人类受照的主要来源,剂量相对低而稳定,涉及人群大。在这样较低剂量范围内进行剂量效应关系的研究比起大剂量效应外推来说更有意义。近年来,天然高本底辐射和技术发展所致辐照以及特殊生态链所致辐照研究较为活跃,对 $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{210}\text{Po}$ 尤为重视。自大气层核试验停止以来,人工放射性(如 $^{90}\text{Sr}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ )食入的公众危害的重要性下降,现仍被用作特定核设施或事故监测的手段, $\text{Am}$ 、 $\text{Pu}$ 等超铀元素的内照射剂量研究逐渐受到重视。

#### 3.2 剂量年龄依赖关系研究取得进展

ICRP第二委员会新近发布一系列相应出版物,其第72号出版物已对这些出版物上91种放射性核素推荐了通过食入所致待积有效剂量的年龄依赖剂量系数。给定的年龄(可用范围)为:3月(0~1岁)、1岁(1~2岁)、5岁(2~7岁)、10岁(7~12岁)、15岁(12~17岁)以及成人(大于17岁)<sup>[5]</sup>。看来,对辐射防护重要的年龄组推荐相应参考人参数并分别进行剂量评价已成为必要和可能,在UNSCEAR 1993年报告书所作出的剂量系数不依赖年龄的假设应该修订。

#### 3.3 研究方法不断发展和标准化

早自核试验监测起,各国积累了大量食物放射性监测及剂量评估资料。但限于调查测量技术受当时条件的限制,尤其是缺乏必要的质量保证措施,各地资料常难总结和比较。总膳食研究由于既直接测定人群已烹调的全部膳食,又可获得食物相对贡献信息,已被联合国有关机构(WHO、FAO和UNEP)定为全球食物污染监测计划重要内容<sup>[7]</sup>。由于食物基质复杂而放射性含量低,近年来核

探测技术的进步大大提高了测定灵敏度,从而提高了结果的可靠性。中子活化分析、 $\alpha$ 谱仪和低本底 $\gamma$ 谱仪、电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)等新技术已越来越多地应用于食品放射性监测。以食物作基质的各级标准参考物质的研制和应用,并强调对国际权威标准物质可溯源性,从而保证了各实验室结果的可比性。

#### 3.4 放射性核素与微量元素研究的结合

原子能和核技术发展促进了环境核监测技术的提高和完善,形成了放射化学和核探测等新学科。但本质上,放射性核素本身就是元素的组成成分,在环境和人体内仍按所属元素的特性转移。美国和日本等都已将有害的放射性核素作为膳食污染物调查项目的一部分。

#### 参考文献

- 1 UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, United Nations, New York, 1993
- 2 ICRP. 1990 Recommendations of the ICRP. ICRP Pub. 60, Annals of the ICRP 21(1~3), Pergamon Press, Oxford, 1991
- 3 ICRP. Limits for intakes of radionuclides by workers. Part 1, ICRP Pub. 30, Annals of the ICRP 2(3/4), 1979
- 4 ICRP. Dose coefficients for intakes of radionuclides by workers. ICRP Pub. 68, Annals of the ICRP 24(2), Elsevier Science Ltd. Oxford, 1995
- 5 ICRP. Age-dependent doses to the members of the public from intake of radionuclides Part 5, Compilation of ingestion and inhalation coefficients. ICRP Pub. 72, Pergamon Press, Oxford, 1996
- 6 UNSCEAR. Sources, effects and risks of ionizing radiation, United Nations, New York, 1988 58
- 7 WHO. Newsletter on Environmental Health. 1992; 13 17

(收稿日期:1998-02-15)