

我国参考人主要放射性核素(元素)膳食摄入量 及其所致内照射剂量的现状

陆 梅

(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)

除氡的吸入外, 食入(包括食品和饮水)是环境放射性核素进入人体最主要的途径, 由于饮水贡献相对少, 食品就成为公众辐照所致内剂量的重要贡献者。随着原子能事业的发展, 人类所受辐照的组成也在发生变化。联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)每四年左右总结一次国际上各国参考人(成年男子, 从事极轻体力劳动)^[1]所受辐照的动态变化, 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及其对人类健康的可能影响。我国过去曾测定过膳食各主要放射性核素的含量和所致内剂量, 但随着人民生活水平提高和经济发展, 公众的膳食组成在发生改变, 食品中放射性核素的含量也发生着变化。本文综述了近年来研究资料, 并与国外报道值比较, 以阐明当前我国居民对这些放射性核素的摄入量及其所致内剂量。

1 我国近年来研究概况

1.1 历史回顾

50年代末以来, 我国早期食品放射性监测主要是针对美苏核武器试验全球性沉降对我国影响, 主要包括了粮食、蔬菜、牛奶和饮水等个别食品, 测定项目主要是裂变产物核素(如 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{131}I 等)和残留核燃料核素, 评价指标往往是这些核素在食品中的活性浓度, 监测目的通常是作为发现核试验污染到达的信号或对当地食品放射性污染程度的判断。1974年中国医学科学院放射医学研究所承担组织制定“食品放射性物质限制量标准”, 相继组织调查了我国海产品及某些主要食品放射性含量水平。其后, 30个研究单位又于1982~1986年对我国正常辐射本底地区食用的27种主要食品及在辐射可能升高地区(即广东阳江高本底地区、江西某铀矿水冶厂尾矿池附近)所生产的20多种食品进行了22种放射性核素含量测定, 估算了成年男子年摄入量及所致内剂量^[2]。几乎同期, 卫生部工业卫生实验所组织了27个省、市、自治区进行了我国食品和水天然放射性核素水平及对居民所致内剂量的调查^[3]。其后十余年来, 我国居民生活水平明显改善, 1990年中国预防医学科学院营养与食品卫生研究所组织了第一次全国总膳食研究, 放射医学研究所承担并完成了我国四大地区(包括12个省、自治区和直辖市, 人口覆盖率约占全国47.2%)组成膳食

的12类主要食品中6种主要放射性核素(^{226}Ra 、 ^{228}Ra 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs)的含量, 估算了我国参考人的年摄入量及其所致年有效剂量^[4,5]。最近于1992年进行了第二次全国总膳食调查, 更新补充了1990年数据, 从而为编制中国参考人的相应参数提供了依据^[6]。

1.2 估算方法

食入放射性核素所致内照射剂量的计算方法比较复杂, 但放射性核素摄入量是其基础。公众摄入量(AI)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, 内照射剂量(以待积有效剂量, CDE表示)通常用放射性核素摄入量与食入剂量系数(食入单位活度某种放射性核素所致待积有效剂量)乘积进行简便估算。由于近年来国际辐射防护委员会(ICRP)对剂量学和生物动力学模型的进展逐步阐明了食入所致待积有效剂量的年龄依赖性, 其60号出版物已取代26号出版物, 72号出版物也公布了最新的食入年龄依赖剂量系数, 而成为目前估算的依据^[7]。本文的年待积有效剂量均为采用最新食入剂量系数进行重估算的结果^[8]。

2 我国参考人主要放射性核素膳食摄入量及其所致内剂量的最新估算结果

2.1 天然放射性核素

主要来自岩石、土壤中放射系成员核素和钾的浸出, 以及核燃料开采和加工工业向环境的排放。主要是 ^{40}K 、 ^{87}Rb 、 ^{238}U 系、 ^{232}Th 系、 ^{227}Ac 等, 此外还有宇宙线作用生成的 ^3H 、 ^{14}C 。 ^{40}K 是对内剂量重要贡献者, 其摄入量较大, 但由于受代谢调节平衡而在体内能保持一定浓度, 因此 ^{40}K 有效剂量通过全身钾含量测量较为准确, 但摄入量仍提供了一个很好的第二指征。 ^{238}U 系核素(除了氡)包括 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po , 其中 ^{226}Ra 主要经由食入进入体内, 海产品是 ^{210}Po 的主要食品来源。 ^{232}Th 系核素摄入量相对较低, 只有 ^{228}Ra 被植物吸收较多。 ^3H 、 ^{14}C 既有天然又有人工来源, 但以天然来源为主。我国1982年调查结果认为^[3], 人工放射性核素对食品所致内照射剂量的贡献只约占3%。天然放射性核素贡献占97%, 而其中 ^{40}K 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 、 ^{228}Ra 、 ^{14}C 和 ^{226}Ra 总相对贡献占了96%, 提示在食品和放射性监测中对这些核素应予

足够重视。1990 年调查对 6 种主要放射性核素进行了重新调查和估算。由于 1992 年仅是对 1990 年数据的补充,且两年期间数据不会差别很大,因此本文资料仍以 1990 年所得结果为依据。将 1990 年和表 1 我国正常本底地区成年男子天然和人工放射性核素摄入量和待积有效剂量及其与世界平均值比较

1982 年调查所得我国正常本底地区 9 种天然放射性核素摄入量及所致年待积有效剂量重估算结果比较于表 1^[2,8]。

来 源	核 素	年摄入量(Bq)			待积有效剂量(μ Sv/a)		
		1982	1990	W. A. ^[9]	1982	1990	W. A.
天 然	天然铀	10. 04		10. 01	0. 471		0. 470
	²²⁶ Ra	22. 1	27. 1	19	6. 188	7. 588	5. 32
	²¹⁰ Rb	69. 1	109. 1	32	47. 679	75. 279	22. 08
	²¹⁰ Po	59. 8	125. 5	55	71. 760	150. 60	66. 00
	²²⁷ Ac	0. 2934			0. 323		
	合 计				126. 42	234. 26	93. 87
	天然钍	5. 32		1. 3	1. 227		
	²²⁸ Ra	30. 2	67. 7	13	20. 838	46. 71	8. 97
	合 计				22. 06	47. 94	9. 27
	⁴⁰ K	22780	8343		141. 24	51. 73	165
人 工	⁸⁷ Rb	1279	1118		1. 92	1. 68	6
	总 计 *				291. 64	335. 61	
	总估算值				315. 40	448. 88	274. 14
	⁹⁰ Sr	59. 7	92. 4		1. 67	2. 58	
	¹³⁷ Cs	34. 7	22. 4		0. 45	0. 29	

* 总计来自实际调查结果(包括天然铀、钍按 1982 年值), 总估算值对⁴⁰K 采用世界平均值

由表 1 可见, 1990 年²¹⁰Pb、²¹⁰Po、²²⁸Ra 年摄入量明显升高, 由其所致年待积有效剂量也明显增加,²²⁶Ra、⁸⁷Rb 变化不大,⁴⁰K 年摄入量明显下降, 但相对仍是最大。考虑到⁴⁰K 的体内代谢平衡, 估计我国居民所受内照射水平不会有很大差异, 采用世界正常辐射本底地区依据人体平均比活性所得估算值, 即 165 μ Sv^[9]。铀、钍两系成员核素的年待积有效剂量分别比 1982 年提高了 85. 3% 和 117. 3%。应该指出, 国内不同文献对²²⁶Ra、²¹⁰Pb、²¹⁰Po、²²⁸Ra 的调查数据还不甚相同^[9], 总膳食研究采用了烹调后食物样品进行分析, 是近年 WHO 推荐的方法, UNEP/FAO/WHO 的全球食物污染监测计划已把总膳食研究列为重要内容, 而且采用了集中分析, 应该说较其它方法为准确。

2.2 人工放射性核素

指来自核能研究和利用过程中人工制成的放射性核素, 包括超铀元素、裂变产物及中子活化产物等。计有²³⁷Np、^{239, 240}Pu、¹⁴⁷Pm、¹⁴⁴Ce、⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、¹⁰⁶Ru、⁹⁵Zr、⁶⁵Zn、⁶⁰Co、⁵⁵Fe、³H、¹⁴C 等。⁹⁰Sr、¹³⁷Cs 和¹⁴C 是对食品所致内剂量负担主要贡献的人工核素。⁹⁰Sr 和¹³⁷Cs 的剂量贡献到本世纪末将大部分给出, 长寿命的¹⁴C 将继续以非常低的剂量率在以后 10000 年给出剂量贡献^[9]。由表 1 可见, 人工放射性核素(⁹⁰Sr、¹³⁷Cs)对食品内剂量贡献很小, 由于核爆炸对

广大公众造成辐射最有意义的途径是食入, 据 1990 年和 1982 年两次调查所获⁹⁰Sr、¹³⁷Cs 年待积有效剂量未发生明显变化, 说明该期间发生的苏联切尔诺贝利核事故未对 1990 年采集的膳食样品造成显著污染^[3]。

自大气层核试验停止以来, 核爆炸裂变产物食入对公众辐照重要性下降, 而随着核电站的兴建及放射性核素在国民经济各部门的广泛应用, 对超铀元素和广为应用的其它长寿命放射性核素应给予更多重视。

2.3 不同食品对内剂量的贡献

现将 1990 年调查所获我国 12 类主要食品六种主要放射性核素年摄入量及所致待积有效剂量重估算值列于表 2^[3]。由表 2 可见, 由蔬菜所致年待积有效剂量约占 40%, 其次是水产品 (29. 6%)、谷类 (19. 4%)、肉类 (2. 9%)、薯类 (2. 7%)、豆类 (2. 2%)、蛋类 (1. 6%)。与 1982 年结果^[3]相比, 水产品贡献 (1982 年为 0. 9%) 大大上升, 薯类贡献 (1982 年为 18. 6%) 减小。原因除含量变化外, 膳食组成的变迁也是主要原因; 即关键途径 (食品种类) 和关键核素 (即食入剂量系数大的²¹⁰Po、²¹⁰Pb 等核素) 的重大影响。

2.4 我国公众食入放射性核素所致内剂量与世界公众平均水平的比较

表 2 我国成年男子由食入所致 AI 和 CDE

种类	AI(Bq)						CDE(μ Sv)
	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	
谷类	7.97	18.8	16.6	22.6	36.4	4.62	54.9
豆类	1.46	4.02	1.58	1.42	4.88	1.16	6.1
薯类	4.70	7.41	0.58	0.41	10.4	2.52	7.6
肉类	0.77	2.65	4.37	2.50	1.86	2.38	8.1
蛋类	1.21	1.34	2.64	2.09	0.81	0.36	5.6
水产类	0.54	3.66	38.9	44.8	3.64	1.02	83.4
乳类	0.05	0.09	0.06	0.05	0.09	0.02	0.18
蔬菜类	9.40	26.9	42.8	50.3	32.2	6.85	112.1
水果类	0.53	0.64	0.45	0.32	1.15	0.24	1.3
糖类	0.02	0.02	0.10	0.005	0.02	0.01	0.1
饮料及水	0.46	2.22	0.97	0.94	0.95	3.19	3.51
酒类	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.05	0.07
合计	27.2	67.8	109	125	92.4	22.4	282

由表 1 见,除天然铀外,我国参考人铀、钍系成年摄入量均高于世界平均值,总年待积有效剂量 282.2 μ Sv,比世界平均水平(101.14 μ Sv)高出一倍多。原因可能是:

2.4.1 与我国自然条件有关

据调查^[1],我国土壤中²³⁸U、²²⁶Ra 和⁴⁰K 比活度分别是世界均值的 1.5、2.3 和 1.6 倍,说明我国环境本底值是偏高的。在此环境中生长的植物可通过根部吸收部分⁴⁰K、²²⁶Ra 和²²⁸Ra,以及少量铀和极少量的钍。钍是镭的衰变产物,它不断从地壳表面、岩石裂缝、煤燃烧等逸出,其衰变产物²¹⁰Po、²¹⁰Pb 也通过

植物根部摄取或叶表面吸收以及动物的食入(和吸入)最终经食物链到达人体内。土壤中放射性水平较高可能是我国公众食入这些放射性核素高于世界平均值的原因之一。

2.4.2 与我国膳食习惯有关

由于膳食组成、烹调方法不同,人体对放射性核素的摄入量也有差异。目前我国膳食组成尽管日趋合理^[4,12],但仍以粮食、蔬菜等植物性为主,明显区别于以肉、奶为主要消费品的西方国家,导致从外界环境经食物进入人体的总转移系数比西方人高也是可能原因之一。

表 3 两个天然辐射高本底地区成年男子天然放射性核素摄入量及所致待积有效剂量

核素	阳江高本底地区			江西某铀矿附近		
	AI(Bq)	CDE(μ Sv)	CDE/CDE [*]	AI(Bq)	CDE(μ Sv)	CDE/CDE [*]
天然铀	10.66	0.50	1.06	288.15	13.54	28.75
²²⁶ Ra	146.84	41.12	6.64	518.48	145.17	23.46
²¹⁰ Pb	159.50	110.06	2.31	357.36	246.58	5.17
²¹⁰ Po	131.33	157.60	2.20	311.39	373.67	5.21
²²⁷ Ac	1.84	2.02	6.25	7.20	7.92	24.52
合计		311.30	2.46		786.88	6.22
天然钍	7.43	1.71	1.39	5.59	1.28	1.04
²²⁸ Ra	264.27	182.35	8.75	27.10	18.70	0.89
合计		184.06	8.34		19.98	0.90
总计		495.36	3.34		806.86	5.43

CDE^{}为正常地区的待积有效剂量

3 天然辐射可能升高地区参考人估算结果

1982 年我国对阳江高本底地区和江西铀矿山附近生产的主要食品中 7 种放射性核素或元素的摄入量和所致待积有效剂量调查结果表明(见表 3^[8],该次调查⁴⁰K、⁸⁷Rb 的摄入量几乎与正常地区相同,故表中未列出),阳江高本底地区铀系和钍系核素均高于正常地区年待积有效剂量,分别是其 2.5 和 8.3 倍,表明阳江高本底地区食入辐照来自铀系和钍系核素,Ra 和 Ac 同位素增量高于其母核铀和钍,可能

与其可溶性有关。而江西铀矿附近地区只有²³⁸U 系增高,是正常地区的 6.2 倍,比阳江高本底地区增加得多,其中天然铀、²²⁷Ac 和²²⁶Ra 升高最为显著,²³²Th 系未见增高,表明江西铀矿附近地区的辐照只源于铀系,是由于污染来自铀矿采冶的富铀废水,在此环境中铀呈溶解态。由表 4 可见,江西铀矿附近的居民天然铀的日摄入量比日本的两个铀矿区、美国的盐湖城铀矿区高得多,低于富含铀的印度 Gujrat 地区,是我国正常地区的数十倍。

表 4 世界铀矿或富含铀地区与对照地区居民天然铀日摄入量

日摄入量($\mu\text{g}/\text{人}$)	地 区	调查时间(年)	资料来源
30.9	江西铀矿, (中)	1982~1986	[2]
1.07	正常地区, (中)	1982~1986	[2]
4.55 2.86	Okayama 矿区, (日)	1969~1971	[13]
1.02 0.86	正常地区, (日)	1969~1971	[13]
4.4	盐湖城矿区(美)	1990	[13]
1.3	N. Y., (美)	1978	[13]
59.2 31.4	Gujrat, (印度富含铀地区)夏、冬	1980	[13]
0.55 2.2	Bomlay, (印)	1990	[13]

此外,巴西的米纳斯吉拉斯火山区、伊朗北部也有报道发现其食品中放射性增加。而环境放射性核素在食品中富集而致异常高食入内剂量的典型例子发生在北极地区^[9]。由于高本底地区有利于研究低剂量长期受照的生物效应,而成为受重视的放射环境调查和辐射研究的现场。

4 总结和讨论

4.1 我国参考人目前食入主要放射性核素(²²⁶Ra、²¹⁰Pb、²¹⁰Po、²²⁸Ra、⁴⁰K、⁸⁷Rb 和天然钍、天然铀和²²⁷Ac)所致内剂量约为 0.449mSv,比 1982 年明显升高,原因与膳食组成的变迁及食品中核素含量变化有关,比世界相应核素平均水平(0.274mSv)高出 63.5%,我国土壤中铀系、钍系的放射性核素含量高以及粮谷、蔬菜为主的膳食结构是其可能原因。

4.2 目前,对食品所致内剂量贡献大小的核素依次为²¹⁰Po、²¹⁰Pb、⁴⁰K、²²⁸Ra、²²⁶Ra、⁸⁷Rb、天然钍、天然铀和²²⁷Ac。对内剂量贡献大小的食品种类依次为蔬菜、水产、谷类、肉类、薯类、豆类、蛋类等。与 1982 年相比水产类贡献上升,薯类贡献下降。

4.3 我国参考人所致内照射剂量仍然主要来自天然放射性核素,人工污染贡献很小。

4.4 自 1982 年以来,我国(包括高本底地区)的膳食结构发生了显著变化,年摄入量、年有效剂量及各种食品贡献大小也显著改变,因此,有必要做定期调查研究。

4.5 低钾摄入是中国膳食的一个传统缺陷,中国参考人的体重比 ICRP 的参考人轻,而⁴⁰K 又是国民内剂量的一个主要贡献者,中国参考人⁴⁰K 所致内剂量应通过全身测量或组织含量测定来估算,其大小值得进一步研究和确认。

4.6 随着对剂量年龄依赖关系的确认,对辐射防护重要年龄组的差异值得今后进一步研究。

(本文在写作过程中,多次得到诸洪达教授的指导和帮助,在此表示深深的感谢)

参考文献

1 ICRP. Report of the task Group on Reference Man. I-CRP Pub. 23 Oxford; Pergamon Press, 1975; 4.

2 张景源, 诸洪达主编, 中国食品中放射性及所致内剂量. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.

3 刘玉兰, 等. 我国食品和水天然放射性核素的摄入量及所致内剂量. 中华放射医学与防护杂志, 1988 8(增刊): 1.

4 陈君石, 高俊全. 1990 年中国总膳食研究. 卫生研究, 1993 (增刊): 1.

5 诸洪达, 等. 国膳食中⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、²²⁶Ra、²²⁸Ra、²¹⁰Pb 和²¹⁰Po 含量及其所致内照射剂量. 辐射防护, 1993 13(2): 85.

6 诸洪达, 等. 中国人膳食组成及食入元素和放射性核素摄入量研究(一). 辐射防护通讯, 1996, 16(2): 1~24.

7 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.

8 诸洪达. 中国两个天然辐射高本底地区膳食所致摄入量和内剂量重新估算. 辐射防护通讯, 1997, 17(1): 6.

9 UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Annexes. United Nations New York. 1993.

10 潘自强, 等. 中国国民剂量初步评价. 辐射防护, 1997, 17(2), 6~11.

11 张淑蓉, 等. 我国土壤中放射性核素水平及分布. 中华放射医学与防护杂志, 1988 8(增刊): 1.

12 葛可佑, 等. 九十年代中国人群的膳食和营养情况. 营养学报, 1995(2): 123.

13 Kinno Shiraishi et al. Daily intakes of ²³²Th and ²³⁸U in Japanese males. Health Phys. 1992. 63(2).

(1998 年 12 月 21 日收稿)