

DOI:10.13491/j.issn.1004-714x.2018.03.003

· 辐射剂量与防护/论著 ·

四川涉核地区食品放射性核素含量及其所致居民剂量

段妮桢, 贺良国, 李林御, 何玲, 张洋

四川省疾病预防控制中心, 四川 成都 610041

摘要: **目的** 分析四川省核设施周边地区食品中天然和人工放射性核素含量, 了解其所致居民剂量。**方法** 分别采集四川省 A-E 市核设施周边和对照区粮食、蔬菜、奶粉、茶叶、肉类五类食品样品, 依据国家标准, 使用高纯锗 (HPGe) γ 能谱仪测量样品中 ^{238}U 、 ^{226}Ra 、 ^{131}I 、 ^{232}Th 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{58}Co 、 $^{100}\text{Ag}^m$ 、 ^{60}Co 、 ^{40}K 等放射性核素的比活度, 进行统计学分析, 并对其所致居民剂量进行估算。**结果** 197 个有效样品中, 放射性核素检出率 ^{40}K (100%) > ^{232}Th (50.8%) > ^{226}Ra (38.5%) > ^{238}U (15.2%) > ^{137}Cs (13.2%); 26 个样品检测出人工放射性核素 ^{137}Cs , ^{137}Cs 比活度均未超过国家浓度标准, 川内产奶粉比活度高于川外产奶粉; 样品放射性核素所致居民总年待积有效剂量平均为 0.22 mSv, 人工放射性核素 ^{137}Cs 所致年待积有效剂量平均值为 7.81×10^{-6} mSv。**结论** 四川省食品放射性核素水平及所致居民剂量与国内外相关研究一致。

关键词: 食品; 放射性核素; γ 能谱; ^{137}Cs ; 待积有效剂量

中图分类号: X591 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2018)03-0201-05

Radionuclide contents in foodstuff collected from the regions surrounding nuclear facilities in Sichuan Province and their committed dose to public

DUAN Weizhen, HE Liangguo, LI Linyu, HE Ling, ZHANG Yang

Sichuan CDC, Chengdu 610041 China

Abstract: **Objective** To analyze the artificial and natural radionuclide contents in foodstuff surrounding the nuclear facilities in Sichuan Province, and evaluate their committed dose to public. **Methods** Samples including grain, vegetables, meat, milk powder and tea in 5 regions surrounding the nuclear facilities were collected, and the specific activities of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{131}I , ^{232}Th , ^{137}Cs , ^{134}Cs , $^{100}\text{Ag}^m$, ^{58}Co , ^{60}Co , and ^{40}K were analyzed by using high purity germanium (HPGe) gamma-ray spectrometry. **Results** Among the 197 samples, the detectable rates of ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{238}U and ^{137}Cs were 100%, 50.8%, 38.5%, 15.2% and 13.2%, respectively. Even though ^{137}Cs was detected out in 26 samples, its activity did not exceed the national standard. The activity in milk powder produced in Sichuan was higher than those of other provinces. The total committed effective dose to adults caused by radionuclides in foodstuff was estimated to be 0.22 mSv, and the effective dose of ^{137}Cs was 7.81×10^{-6} mSv. **Conclusion** The radionuclide contents in foodstuff and their committed dose to public in Sichuan Province are close to other reported values at home or abroad.

Key words: Foodstuff; Radionuclide; Gamma-ray Spectrometry; ^{137}Cs ; Committed Effective Dose

核技术的广泛应用给人类社会带来巨大的利益, 但同时放射性核素也容易通过食物链转移到人体内, 对人体产生辐射照射, 对人类健康造成一定影响。目前我国已有部分对食品中的放射性核素含量的调查研究, 1996 年沙连茂等人在茶叶中检测出人工放射性核素 ^{137}Cs 和 ^{90}Sr ^[1], 2008 年张秀莲等人在乐山粮食和蔬菜中检测出天然放射性核素和人工放射性核素 ^{137}Cs ^[2], 日本福岛核事故发生后, 我国有 12 个省市的蔬

菜样品中检测出了人工放射性核素 ^{131}I ^[3-6]。四川是核技术应用大省, 分布了大量核设施, 涵盖从核燃料生产到核设施退役的每个环节, 全面了解四川食品中放射性核素水平及对居民所致剂量的影响, 建立食品放射性核素基线数据库非常有必要, 本单位于 2015 年和 2016 年开展了四川省涉核地区五类食品 10 种放射性核素监测, 并估算其对居民所致剂量。

1 材料与方法

1.1 样品的采集和制备 依据 GBT 16145-1995《生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法》, 结合四川

作者简介: 段妮桢 (1989-), 女, 满族, 辽宁开原人, 硕士, 助理工程师, 从事放射卫生与评价工作。E-mail: dwz1204@163.com

通讯作者: 贺良国 (1974-), 男, 四川三台人, 硕士, 副研究员, 从事放射卫生与防护工作。E-mail: 248878@qq.com

省食品生产种类和居民饮食习惯,分别采集涉核的五个市(州)(A ~ E)核设施周边(距核设施 10 km 内)和对照区(距核设施 30 km 以外)^[7]中粮食、蔬菜、茶叶、家畜家禽肉类和奶粉 5 类样品。样品中茶叶为干茶,蔬菜为茎叶等可食用部分,粮食中的玉米、小麦、大米均为脱壳干样,肉类为可食用肌肉和内脏,奶粉类 E 市为自产、其他市(州)为外地产市售奶粉。采用塑料袋

封装运输,新鲜样品进行洗净、晾晒、烘干处理,所有样品粉碎后装入 2 L 马林杯样品盒,称重,密封 20 d 后待测。

各市州食品样品种类及数量见表 1。两年共采集 197 个样品,其中茶叶 9.1% (18/197)、蔬菜 39.6% (78/197)、粮食 33.0% (65/197)、肉类 3.0% (6/197)、奶粉 15.2% (30/197)。

表 1 各地采样数据信息

种类	A 市 2015 年/2016 年	B 市 2015 年/2016 年	C 市 2015 年/2016 年	D 市 2015 年/2016 年	E 市 2015 年/2016 年	总计 2015/年 2016 年
茶叶	2/2	2/2	2/2	2/2	-/2	8/10
蔬菜	10/8	4/6	10/8	10/6	8/8	42/36
粮食	6/6	5/6	6/6	6/6	10/8	33/32
肉类	-/-	2/2	-/-	-/2	-/-	2/4
奶粉	2/4	4/4	2/4	2/4	2/2	12/18
总计	20/20	17/20	20/20	20/20	20/20	97/100

注:1. - 表示该类样品未采集。2. 肉类为各市州选作样品种类。3. E 市奶粉为自产,其他市奶粉为川外产。

1.2 测量方法 依据国家相关标准^[8],采用美国 ORTEC 公司 GEM40P4 低本底 HPGe γ 谱仪,测量样品中的²³⁸U、²²⁶Ra、¹³¹I、²³²Th、¹³⁷Cs、¹³⁴Cs、⁵⁸Co、¹⁰⁰Ag^m、⁶⁰Co、⁴⁰K 放射核素的比活度,其中粮食、奶粉、茶叶类为干样的比活度,蔬菜、肉类为鲜样的比活度,使用全能峰效率法对谱线进行解谱分析。

1.3 质量控制 所用 γ 谱仪相对探测效率为 40%,能量分辨率 1.7 keV,计量检定和国内实验室间比对均合格;测量前,使用 2 L 马林杯菠菜干粉生物样品标准物质(编号 15NHH-150301)对系统分别进行了能量和效率刻度,效率刻度核素主要有²⁴¹Am、¹⁰⁹Cd、⁵⁷Co、¹³⁹Ce、¹¹³Sn、¹³⁷Cs、¹³³Ba、⁶⁰Co 等,并每 3 个月进行峰位漂移观察;测量结果均扣除空盒本底,空盒本底测量时间为 86 400 s,每个样品测量 50 000 s,使用全能峰效率曲线法对样品分析测定,并对时间、密度等信息修正校准。

1.4 剂量估算方法 按照 GB 18871《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》^[9]中的剂量估算方法结合居民食物摄入量数据^[10]对食品所致居民剂量进行估算,见下式:

$$E_T = \sum_j e(g)_{j,ing} I_{j,ing}$$

$e(g)_{j,ing}$ 为同一期间内 g 年龄组食入和吸入单位摄入量放射性核素 j 后的待积有效剂量; $I_{j,ing}$ 为同一期间内食入放射性核素 j 的摄入量。

2 结果

2.1 各类食品中放射性核素含量 两年检测的 10

种放射性核素中,人工放射性核素只检测出了¹³⁷Cs、¹³¹I、¹³⁴Cs、⁵⁸Co、¹⁰⁰Ag^m、⁶⁰Co 均未检测出,检出核素含量见表 2。

以检出样本数除以总样本数得出的检出率来看,放射性核素的检出率⁴⁰K (100%) > ²³²Th (50.8%) > ²²⁶Ra (38.5%) > ²³⁸U (15.2%) > ¹³⁷Cs (13.2%)。从核素活度来看,茶叶、粮食、奶粉中⁴⁰K 的活度稍高于蔬菜和肉类,其他核素在各类样品中均保持较低的活度,小于 10 Bq/kg,大部分小于 1 Bq/kg。

2.2 各市州²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K 天然放射性核素检测结果 表 3 为各市州²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K 活度平均值。可以看出 2015 年和 2016 年各市州检测结果非常接近,只有 D 市的²³²Th 结果相差较大,对所有 D 市样品两年²³²Th 检测结果进行对比发现只有一个样品 2016 年比 2015 年高很多,拉高了 2016 年²³²Th 检测结果的平均值,其余两年结果整体一致,都处于较低的活度水平。

2.3 各市州¹³⁷Cs 人工放射性核素检测结果 从表 2 中可知,共有 26 个样品检测出¹³⁷Cs,检出率为 13.2% (26/197)。茶叶、奶粉、蔬菜、粮食、肉类检出率分别为 44.4% (8/18)、30.0% (9/30)、9.0% (7/78)、1.5% (1/65) 和 16.7% (1/6),其比活度均未超过 GB 14882-1994 食品中放射性物质限制浓度标准^[11]。茶叶和奶粉和蔬菜占全部检出¹³⁷Cs 样品的 92.3%。E 市自产奶粉¹³⁷Cs 含量明显高于川外产奶粉,比活度最大值为 2.77 Bq/kg;除一个茶叶样品为比活度 2.30 Bq/kg,其余均小于 1 Bq/kg。

除 5 个川外产奶粉,剩下 21 个川产样品中有 10 个来自核设施,11 个来自对照区。

2.4 食品中放射性核素所致居民年待积有效剂量见表 4。五类食物所致居民总年待积有效剂量平均值为 0.22 mSv,最大值为 0.72 mSv。其所致居民年待积有效剂量由大到小依次为粮食 > 蔬菜 > 奶粉 > 肉类

> 茶叶, 占总年待积有效剂量百分比依次为 52.3%、18.6%、17.7%、10.5%、0.7%; 人工放射性核素¹³⁷Cs 所致年待积有效剂量最大值为 5.17×10^{-5} mSv, 平均值为 7.81×10^{-6} mSv, 占有核素所致年待积有效剂量平均值的十万分之四。

表 2 检出放射性核素结果

样品种类	年份	样品来源	样品数量	放射性核素比活度平均值 Bq/kg(检出样本数)				
				²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K	¹³⁷ Cs
茶叶	2015	*	4	2.48(2)	0.79(3)	1.32(4)	668.04(4)	0.25(2)
		+	4	3.23(3)	1.32(3)	2.51(4)	753.33(4)	0.85(3)
	2016	*	5	5.29(2)	0.19(1)	2.28(4)	490.06(5)	0.01(1)
		+	5	4.54(1)	0.73(1)	5.44(4)	541.84(5)	0.002(2)
总平均值				4.00	0.72	3.00	602.50	0.20
粮食	2015	*	16	0.50(2)	0.18(8)	0.09(8)	173.08(16)	0.01(1)
		+	17	2.16(5)	0.21(10)	0.23(13)	155.69(17)	—
	2016	*	16	1.33(2)	—	—	154.95(16)	—
		+	16	1.79(2)	0.06(1)	0.03(2)	155.21(16)	—
总平均值				1.46	0.11	0.09	159.67	0.00
奶粉	2015	*	1	—	0.25(1)	—	298.49(1)	2.03(1)
		+	1	—	0.50(1)	0.27(1)	340.18(1)	2.55(1)
		川外产	10	0.84(2)	0.31(6)	0.21(4)	375.78(10)	0.09(10)
	2016	*	1	—	—	—	206.72(1)	0.45
		+	1	0.82(1)	—	—	361.88(1)	2.77
		川外产	16	0.57(1)	—	0.03(1)	287.47(16)	0.03(2)
总平均值				0.61	0.13	0.10	318.82	0.31
肉类	2015	*	1	—	1.04(1)	0.46(1)	73.37(1)	—
		+	1	—	0.51(1)	0.81(1)	72.40(1)	—
	2016	*	2	—	0.66(1)	0.08(1)	76.40(2)	—
		+	2	2.05(1)	0.51(1)	0.25(1)	83.75(2)	0.03(1)
总平均值				0.68	0.65	0.32	77.68	0.01
蔬菜	2015	*	21	0.04(1)	0.04(11)	0.08(12)	107.74(21)	0.00(1)
		+	21	0.07(2)	0.06(11)	0.07(12)	117.41(21)	0.00(1)
	2016	*	18	0.07(1)	0.03(4)	0.11(14)	75.42(18)	0.01(4)
		+	18	0.13(2)	0.02(4)	0.09(13)	81.20(18)	0.00(1)
总平均值				0.08	0.04	0.09	95.41	0.00

注:“—”表示结果低于探测下限,“*”表示核设施周边,“+”表示对照组。

表 3 各市州²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K 检测结果

市州	²³⁸ U 比活度平均值 ± 标准差 (Bq/kg)2015/2016	²³² Th 比活度平均值 ± 标准差 (Bq/kg)2015/2016	²²⁶ Ra 比活度平均值 ± 标准差 (Bq/kg) 2015/2016	⁴⁰ K 比活度平均值 ± 标准差 (Bq/kg)2015/2016
A 市	0.98 ± 2.34/0.96 ± 3.65	0.21 ± 0.3/0.16 ± 0.33	0.11 ± 0.22/0.02 ± 0.06	166.39 ± 181.83/171.75 ± 153.04
B 市	1.57 ± 3.48/1.81 ± 3.96	0.73 ± 1.79/0.39 ± 1.02	0.52 ± 0.97/0.16 ± 0.40	229.18 ± 204.22/162.68 ± 143.96
C 市	0.34 ± 1.54/0.00 ± 0.00	0.31 ± 0.33/0.26 ± 0.60	0.25 ± 0.28/0.01 ± 0.03	282.21 ± 248.73/187.81 ± 173.94
D 市	1.10 ± 3.21/1.42 ± 5.13	0.14 ± 0.21/1.33 ± 4.72	0.14 ± 0.27/0.23 ± 0.83	212.21 ± 228.55/205.01 ± 170.83
E 市	0.22 ± 0.53/1.60 ± 4.95	0.10 ± 0.11/0.04 ± 0.06	0.18 ± 0.20/0.01 ± 0.03	162.64 ± 114.06/194.23 ± 188.78

注:—表示该样品结果低于探测下限。

3 讨论

表 2 所示,粮食中天然放射性核素²³⁸U、²³²Th、

²²⁶Ra、⁴⁰K 的比活度平均值分别为 1.46、0.09、0.11、159.67 Bq/kg,与张秀莲等人对乐山粮食作物的研究结果 1.03、0.79、0.26、47.26 Bq/kg 比较,除了⁴⁰K 结

果差异较大外其余较为相近,且与资料报道的正常地区稻谷类作物天然放射性核素比活度范围 0.08 ~ 6.9、0.01 ~ 0.2、0.01 ~ 2.0、28.8 ~ 3900 Bq/kg 一致^[12]。蔬菜中的天然放射性核素²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、⁴⁰K 的比活度平均值分别为 0.08、0.09、0.04、95.41 Bq/kg,远低于张秀莲^[2]对莲花白的研究结果,原因可能在于样品种类、样品处理方法不同。

表 4 放射性核素所致居民年待积有效剂量

种类	所致剂量最大值	所致剂量平均值
	所有核素/ ¹³⁷ Cs(mSv)	所有核素/ ¹³⁷ Cs(mSv)
茶叶	$3.86 \times 10^{-3}/1.10 \times 10^{-5}$	$1.64 \times 10^{-3}/2.24 \times 10^{-6}$
粮食	$4.68 \times 10^{-1}/2.64 \times 10^{-6}$	$1.15 \times 10^{-1}/4.00 \times 10^{-8}$
奶粉	$6.32 \times 10^{-2}/3.60 \times 10^{-5}$	$3.89 \times 10^{-2}/5.34 \times 10^{-6}$
肉类	$3.90 \times 10^{-2}/7.80 \times 10^{-7}$	$2.34 \times 10^{-2}/1.30 \times 10^{-7}$
蔬菜	$1.50 \times 10^{-1}/1.30 \times 10^{-6}$	$4.14 \times 10^{-2}/6.90 \times 10^{-6}$
总计	$7.24 \times 10^{-1}/5.17 \times 10^{-5}$	$2.21 \times 10^{-1}/7.81 \times 10^{-6}$

人类所受辐射照射中既包括天然本底的照射,如宇宙射线、食品中天然放射性核素所致内照射、以及来自自然环境外照射,也包括人类活动对辐射利用产生人工照射,人工放射性核素可作为判定食品是否受到放射性污染的定性或定量指标。人工放射性核素¹³⁷Cs 只来自于核反应堆裂变,核燃料生产过程和铀矿设施并不产生¹³⁷Cs。食物样品中的¹³⁷Cs 有两个来源,本地核反应堆裂变过程中向环境排放的废水、废气,以及既往核事件释放的¹³⁷Cs 伴随大气的沉降。20 世纪全球大气层核试验、切尔诺贝利核反应堆事故、福岛核反应堆事故^[13-15]等均不同程度地向全球范围释放¹³⁷Cs,并且该核素半衰期较长(30.17 a),在产生、释放后可通过大气环流作长距离扩散,并以沉降方式降落至地面,被地表土壤颗粒吸附^[16-17]。植物在生长过程中经过吸收、富集、转移等过程将沉积在土壤浅表层的放射性核素¹³⁷Cs 转移到了各类食品中。本研究的 197 个有效样品中,检测出¹³⁷Cs 的样品 10 个来自核设施周边,11 个来自对照区。四川省具有核设施的五个市中只有 B、D 两个市具有反应堆及退役设施,B、D 两市检测出¹³⁷Cs 的样品中只有一个来自于核设施所在地,其他样品均来自于对照区。另外 3 个不具有反应堆和退役设施的市中也均有¹³⁷Cs 检出。因此,本省食品中的¹³⁷Cs 与当地核设施无直接的相关性,可能由于既往核事件的大气沉降所致。

茶叶(干茶)比活度大概为 0.11 ~ 2.30 Bq/kg,同 1996 年沙连茂等人对其他省份茶叶的研究结果(2.2 ± 0.9) Bq/kg 相接近^[1]。根据文献报道茶叶、白菜、

小麦、草、大米这 5 种植物中,茶叶中¹³⁷Cs 的浓度是最高的,且其转移系数也最高,茶叶对¹³⁷Cs 具有强烈的富集作用,高于稻谷类植物^[18]。这种富集作用很可能是本省茶叶¹³⁷Cs 检出率(44.4%)高的原因。

E 市奶粉中¹³⁷Cs 比活度高于川外产奶粉,作者认为这与我国 E 市的奶牛为在山坡上散养的牦牛,常年以山坡上生长的草为食,由于土壤多年未翻耕,浅表层沉积大量的¹³⁷Cs,该地区草中¹³⁷Cs 含量高于外地奶厂人工饲料有关,与周强等人^[19]对福岛核事故后我国牛奶样品中人工放射性核素¹³⁷Cs 的检测结果一致。

本研究得出的食物所致居民年待积有效剂量平均值 0.22 mSv,这与联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)2000 年报告中报道,全球天然辐射源所致个人平均年有效剂量为 2.4 mSv^[20-21],其中大约 0.29 mSv 是来源于食物,典型范围为 0.2 ~ 0.8 mSv 一致^[22]。各类食物样品中¹³⁷Cs 产生的总年待积有效剂量平均值为 7.81×10^{-6} mSv 不到剂量限值 1 mSv 的十万分之一,因此食物中的人工放射性核素¹³⁷Cs 不会对人体健康造成危害。

参考文献

- [1] 沙连茂,邱云殿,王治慧,等. 我国市售茶叶中⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs 和¹⁴⁴Ce 的含量[J]. 辐射防护, 1996, (1): 70-80.
- [2] 张秀莲,贺良国,董强,等. 乐山市食品中放射性核素含量及其所致居民有效待积剂量当量[J]. 职业卫生与病伤, 2008, 23 (6): 335-338.
- [3] 张伟,秦斌,侯长松,等. 我国对日本福岛核电站事故的卫生应对[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32(2): 115-117.
- [4] 石二为,崔勇,张谦,等. 日本福岛核事故对辽宁省局部地区环境放射性水平的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32 (2): 137-140.
- [5] 邹家龙,孙卫,王赞,等. 兰州地区大气气溶胶中日本核电站泄漏核素监测结果分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32 (2): 141-142.
- [6] 娄云,万玲,马永忠,等. 日本福岛核事故所致北京地区放射性污染的监测与分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32 (2): 129-132.
- [7] 中华人民共和国卫生部. 核电站周围居民健康与卫生监测工作指南[S]. 2010-08-16
- [8] 中华人民共和国卫生部. GBT 16145-1995 生物样品中放射性核素的 γ 能谱分析方法[S]. 北京:中国标准出版社,1995.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. GB 18871-2002 电离辐射防护与辐射源安全标准[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [10] 国家统计局. 中国统计年鉴 2013[M]. 北京:中国统计出版社, 2013.
- [11] 中华人民共和国卫生部. GB 14882-1994 食品中放射性物质限

- 制浓度标准[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [12] 张景源,诸洪达,韩佩珍,等. 我国食品放射性含量及其所致居民内照射剂量估算[J]. 中华放射医学与防护杂志,1988,8(1): 33-36
- [13] 拓飞,徐翠华,张京,等. 云南芒市地区野生食用蘑菇中 ^{137}Cs 、 ^{40}K 含量及所致居民剂量估算[J]. 中华放射医学与防护杂志,2014, 34(8): 621-624.
- [14] 吉艳琴,尹亮亮,田青,等. 应对福岛核事故我国食品和饮用水的放射性监测[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32(2): 125-128
- [15] 拓飞,徐翠华,张京,等. 日本福岛核事故期间环境放射性水平的监测[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32(02): 120-124.
- [16] 贺良国,张一云,李家柱,等. 紫色土草地表层土壤 ^{137}Cs 含量与粒度和有机质的相关性研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 43-45.
- [17] 刘志强,杨明义,刘普灵,等. ^{137}Cs 示踪技术背景值研究进展与建议[J]. 核农学报,2008,22(6):913-917
- [18] 陆继根. 田湾核电站周边 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr 在陆地介质中分布和转移研究[D]. 南京:南京大学, 2007.
- [19] 周强,徐翠华,李文红,张京,等. 福岛核事故期间北京某菜园露天菠菜和土壤的放射性核素[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32(6): 635-637
- [20] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiations; UNSCEAR 2000 report to general assembly, Volume 1 sources [R]. United nations, Vienna;United Nations,2000.
- [21] 夏益华. 高等电离辐射防护教程[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.
- [22] 潘自强. 辐射安全手册[M]. 北京:科学出版社,2011.

收稿日期:2018-01-04

(上接第 200 页)

3 讨论

本文针对高浓缩铀材料辐射场计算的实际情况,提出了基于宽束理论的 γ 辐射场计算模型和基于分出截面法的中子辐射场计算模型,通过原理分析和实试验证,证明本文提出的计算方法是合理可行的,能够满足科学性和准确性要求。通过进一步分析,高浓缩铀材料外辐射场计算本质上是 γ 和中子在屏蔽体中的减弱计算。本文研究提出的 γ 、中子辐射场计算方法有充足的理论依据,且计算过程相对比较简单,并有一定的精确度保证。但任何一种计算方法都有一定的局限性,例如,在利用本文提出的方法进行多层屏蔽 γ 辐射场计算时,因衰减系数难以确定,因此适用性较差。同样,对于利用本文提出的基于分层截面法进行中子辐射场计算时,屏蔽层中要含有足够的氢和

重核材料,应用本方法时需要作一定的假设和近似,会造成误差变大。因此,在计算方法选择时,应对计算对象、条件和边界等进行全面深入的分析,避免模型和方法选择的问题而导致误差不可接受。

参考文献

- [1] 春雷. 核武器概论[M]. 北京:原子能出版社,2005:15.
- [2] K. 吉尔伯特. 核武器事故响应程序手册;第4版[M]. 李喆译. 北京:原子能出版社,2010:141-142.
- [3] 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京:原子能出版社,1982:118-177.
- [4] T. B. 格拉希维里. 核素数据手册;第3版[M]. 赵志祥译. 北京:原子能出版社,2004:286-301.
- [5] 夏益华. 电离辐射防护基础与实践[M]. 北京:原子能出版社,2011:117.
- [6] 潘自强. 辐射安全手册[M]. 北京:科学出版社,2011:135.

收稿日期:2017-12-19