DOI:10.19789/j.1004-9398.2025.01.007
文献引用:卢秀芳,谢萍,吴应宇,等.2012—2022年广西食品中^{90}Sr放射性水平分析[J].首都师范大学学报(自然科学版),2025,46(1):55-60.
LU X F,XIE P,WU Y Y,et al. ^{90}Sr radioactivity in food in Guangxi from 2012 to 2022[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2025,46(1):55-60.

2012—2022年广西食品中^{90}Sr放射性水平分析*

卢秀芳,谢 萍,吴应宇,雷家杰,马一龙,冯兰英,赵新春**
(广西壮族自治区疾病预防控制中心,广西 南宁 530028)

摘要:为了掌握广西壮族自治区食品中放射性核素^{90}Sr放射性水平,估算其成人摄入^{90}Sr的含量及所致年内照射剂量,本文依据二-(2-乙基己基)磷酸萃取色层法对7类共161份食品样品中的^{90}Sr放射性水平进行监测,并汇总分析监测结果。共检161份食品样品,其中136份检出,检出率为84.5%,样品的比活度为0.006~8.801 Bq/kg,其中茶叶的^{90}Sr比活度最高,平均值为2.880 Bq/kg,检出范围为0.177~8.801 Bq/kg。2012—2022年所检的7类广西食品样品中^{90}Sr放射性水平均低于国家标准限值,成人食用这些食品的^{90}Sr年摄入量为45.7 Bq,远低于国家卫生标准限值3.5×10^4 Bq,所致成人年内照射剂量为1.270 μSv,人群剂量负担轻微。

关键词:^{90}Sr;放射性水平;摄入量;年内照射剂量
中图分类号:R146;O6 **文献标志码**:A

^{90}Sr radioactivity in food in Guangxi from 2012 to 2022*

LU Xiufang, XIE Ping, WU Yingyu, Lei Jiajie, Ma Yilong, Feng Lanying, ZHAO Xinchun**
(Guangxi Zhuang Autonomous Region Center for Disease Control and Prevention, Nanning Guangxi 530028)

Abstract: In order to know well the level of ^{90}Sr in food in Guangxi Zhuang Autonomous Region, the content of ^{90}Sr ingested by adults in Guangxi and the resulting annual exposure dose were estimated. The ^{90}Sr level in 161 food samples from 7 categories was monitored using the method of dichroic-(2-ethylhexyl) phosphate extraction chromatography, and the monitoring results were summarized and analyzed in this paper. A total of 161 food samples were detected, 136 of which were higher than the minimum detection limit with a rate of 84.5%. The specific activity of samples ranged from 0.006 to 8.801 Bq/kg. The ^{90}Sr specific activity of tea was the highest, with an average value of 2.880 Bq/kg and a detection range from 0.177 to 8.801 Bq/kg. The results of 161 food samples tested from 2012 to 2022 were all lower than the national standard limit. The ^{90}Sr ingestion of adults from these foods was 45.7 Bq, far lower than the national health standard limit (3.5×10^4 Bq). The annual exposure dose of adult was 1.270 μSv, and the dose burden of population was slight.

Keywords: ^{90}Sr; radioactivity level; intake; annual internal exposure dose
CLC: R146; O6 **DC**: A

收稿日期:2023-04-07
*广西医药卫生科研课题项目(Z20190178);广西卫生健康委员会科研课题项目(Z-A20240394)
**通信作者:85776129@qq.com

0 引 言

^{90}Sr是^{235}U裂变时产生的^{90}Kr经β衰变而成,是最重要的长寿命核素之一,在核裂变反应中产额较高,物理半衰期为28.1 a。^{90}Sr经β衰变生成高能β射线的子体^{90}Y,是纯β放射性核素。自然界中的^{90}Sr主要有核爆炸落下灰、核事故释放和核燃料循环后段设施运行排放3种来源[1]。环境中植物的根对^{90}Sr的吸收很少,而叶片上的沉降灰中^{90}Sr较多,未清洗干净的叶片若被动物或人食用而使^{90}Sr进入生物链。Sr和Ca的生物和化学性质类似,^{90}Sr进入机体后,超过99.0%的^{90}Sr滞留于骨骼和牙齿中,且半衰期长,其衰变产生的高能β射线对骨髓造血组织和骨骼组织造成较大辐射损伤[2]。

自20世纪50年代以来,由于一些国家核试验爆炸产生物质的全球性沉降,致使^{90}Sr对环境的污染不断增加,因此,对放射性^{90}Sr可能引起的危害研究更为重视。国内已有关于食品中^{90}Sr的研究报道:诸洪达等[3]在1990年调查了全国总膳食的放射性物质情况,于1993年报道了组成我国膳食的各类食品中多项核素的测定结果,包含食品中^{90}Sr的含量调查,估算了我国居民经食入这些核素所致年摄入量和待积有效剂量当量;刘翠红等[4]在2009年结合秦山核电基地外围环境放射性水平监测数据,计算了秦山核电基地外围^{90}Sr和^{137}Cs的公众食入摄入量及内照射剂量;Chen等[5]研究了^{90}Sr分析不确定度的算法,并调查了我国茶叶中^{90}Sr水平[6]。近几年关于食品中^{90}Sr监测的文献主要见于对核电站周围食品的监测[7-10],但由于^{90}Sr的检验复杂,从前处理到检测时间很长,一个样品的前处理时间大约是3 d,故大范围多种类食品中的^{90}Sr放射性水平分析的文献较少。本研究采用二-(2-乙基已基)磷酸(di(2-ethylhexyl)phosphoric acid,HDEHP)萃取色层法对2012—2022年广西壮族自治区(广西)内7类13种共161份食品样品进行^{90}Sr的放射性比活度进行了调查与分析,拟评估广西成人摄入^{90}Sr的含量及其所致的年内照射剂量,积累广西环境放射性基线数据,为广西食品安全工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 仪器设备

使用美国ORTEC公司生产的MPC 9604型四路低本底α/β计数器进行测量,效率为^{241}Am≥42.0%、^{210}Po≥42.0%、$^{90}Sr/^{90}Y$≥55.0%;使用德国纳博热公司生产的LT40/12/P330型马弗炉灰化样品;使用上海坤科仪器设备有限公司生产的Binder FD240型强制对流烘箱烘干样品;使用北京赛多利斯天平有限公司生产的BS210S型分析天平称量样品质量;使用上海安亭科学仪器厂生产的TDL-5-A型低速台式大容量离心机离心样品溶液;使用北京化工冶金研究院生产的P204-HDEHP-kel-F色层柱对待测样品溶液进行过柱分离;使用成都艾科生产的Exceed-Cb-10型超纯水机制备超纯水;使用上海伊萨科学仪器有限公司生产的PHS-3C型pH计测定溶液pH。

1.2 试剂与耗材

$SrCl_2\cdot 6H_2O$购自光复精细化工研究所;$Y(NO_3)_3\cdot 6H_2O$购自上海迈瑞尔生化科技有限公司;$Bi(NO_3)_3\cdot 5H_2O$、无水乙醇均购自西陇科学股份有限公司;Na_2S购自天津福晨化学试剂厂;$H_2C_2O_4$购自天津登峰化学试剂厂;浓HCl、浓HNO_3均购自国药集团化学试剂有限公司;浓$NH_3\cdot H_2O$购自爱廉化试剂有限公司;30.0% H_2O_2购自成都科隆化学品有限公司;Sr^{90}-Y^{90}标准溶液(证书编号为F130320,比活度为28.7 Bq/g)购于中国计量科学研究院;P204-HDEHP-kel-F色层粉(HDEHP>50.0%,80目)购于北京化工冶金研究院。实验用水均为超纯水。

1.3 实际样品

在2012—2022年共采集广西本土7类食品样品,详细信息列于表1。共计采样161份,包括蔬菜类、粮食类、家畜家禽肉类、海产品类、淡水产品类、茶叶和奶粉。蔬菜类样品一般于每年的春夏季节采集;粮食类一般采集于收获季节,分别为每年的7和11月;家畜家禽肉类样品一般于每年的上半年采集,海产品样品在每年开海前后2个月(3—5和8—10月)采集;淡水产品采集于每年7月;茶叶和奶粉每年采集2次,上半年和下半年各1次。

1.4 溶液配制

称取153.0 g $SrCl_2\cdot 6H_2O$溶解于0.1 mol/L HNO_3溶液中并稀释至1 L,得到50 mg/mL锶载体溶液;称取86.2 g $Y(NO_3)_3\cdot 6H_2O$,加热溶解于100 mL 6.0 mol/L HNO_3中,转入1 L容量瓶内,加H_2O定容,得到20 mg/mL钇载体溶液;称4 461.8 mg $Bi(NO_3)_3\cdot 5H_2O$,用100 mL 1.5 mol/L HNO_3溶解,得到20 mg/mL铋载体溶液;称1 170.6 mg Na_2S固体,用50 mL H_2O溶解,得到0.3 moL/L Na_2S溶液,现用现配;取10.0 g $H_2C_2O_4$固体,溶于100 mL水中,充分

表1　实际样品的相关信息

类别	品种	采样数/份	样品预处理方法
蔬菜类	蔬菜	18	取可食部分清洗后晾干,依次烘干、炭化、灰化
	瓜果	5	清洗后去皮去籽,依次烘干、炭化、灰化
粮食类	大米	14	直接烘干、炭化、灰化
	玉米	17	直接烘干、炭化、灰化
	红薯	9	清洗后去皮,然后依次烘干、炭化、灰化
家畜家禽肉类	鸡、鸭、鹅	13	去内脏、去皮、去油质、去骨头,取瘦肉部分依次烘干、炭化、灰化
海产品类	海虾	9	带壳烘干、炭化、灰化
	海蟹	15	带壳烘干、炭化、灰化
	海鱼	18	带鱼刺烘干、炭化、灰化
	海贝	19	取可食部分烘干、炭化、灰化
淡水产品类	草鱼	5	带鱼刺烘干、炭化、灰化
茶叶	茶叶	15	直接烘干、炭化、灰化
奶类	牛奶	4	直接炭化、灰化

搅拌,滤去沉淀即可得到饱和$H_2C_2O_4$溶液;P204-HDEHP-kel-F色层粉使用之前用H_2O浸泡24 h。

1.5　样品前处理

参照《食品安全国家标准食品中放射性物质检验锶-89和锶-90的测定:GB14883.3—2016》[11]和《水和生物样品灰中锶-90的放射化学分析方法:HJ 815—2016》[12],采用HDEHP萃取色层法分析生物样品灰中的^{90}Sr。

将采集后的样品取可食部分,洗净后用干净纱布擦去表面水分,称质量后将样品放入烘箱中,在105~120 ℃下烘干,然后将干样品装入陶瓷坩埚中,放入电炉上炭化,待完全炭化无烟后转移到马弗炉中,360~400 ℃灰化,直到生成灰白色的细软灰[13],称质量,计算灰鲜比,留灰备用。

称取5.0~10.0 g样品灰(准确到10 mg),加入定量50 mg/mL锶载体溶液和20 mg/mL钇载体溶液,用浓HNO_3和30.0% H_2O_2消解样品灰,蒸干样品,再移入马弗炉600 ℃灼烧2 h;取出坩埚,冷却至室温;用80 mL 2.0 mol/L HCl分2次加热浸取,离心取上清液,浸取液收集于烧杯中,加入10.0 g $H_2C_2O_4$,用浓$NH_3\cdot H_2O$调至溶液pH 2.5,生成白色沉淀并过滤,将沉淀加热炭化至无烟后转移入马弗炉,800 ℃灼烧1 h,取出坩埚待冷却至室温;用5 mL 6.0 mol/L HNO_3溶解沉淀,直至不再产生气泡为止;加入35 mL 1.0 mol/L HNO_3使沉淀完全溶解,若沉淀无法完全溶解,则继续根据实际情况加入6.0 mol/L HNO_3直到沉淀完全溶解;加入500 μL 20 mg/mL铋载体,滴加400 μL 0.3 mol/L Na_2S溶液,生成黑色沉淀,过滤并收集滤液,调滤液pH 1.0。

将滤液通过装有P204-HDEHP-kel-F色层粉的色层柱分离,分离后得到的解析液为纯$Y(NO_3)_3$溶液,向解析液加5 mL饱和$H_2C_2O_4$溶液,用浓$NH_3\cdot H_2O$调至溶液pH 2.0,生成$Y_2(C_2O_4)_3\cdot 9H_2O$沉淀,水浴加热20 min冷却至室温。在铺有已恒质量的慢速定性滤纸的可拆卸式漏斗上抽吸过滤,用7~8 mL无水乙醇洗涤沉淀;45~50 ℃烘干至恒质量,待测。

1.6　比活度

将沉淀固定在测量盘上,在低本底α/β测量仪上计数[14-15],比活度计算公式为:

$$E=\frac{N_s-N_0}{m_s A_s R_Y e^{-\lambda t}},$$

$$A=\frac{N_x-N_0}{mER_Y e^{-\lambda t}},$$

式中:E为仪器探测效率;N_s为标准源计数率,单位为s^{-1};N_0为本底计数率,单位为s^{-1};m_s为标准源样品残渣质量,单位为g;A_s为标准源质量活度,单位为Bq/g;A为样品中^{90}Sr的比活度,单位为Bq/kg;N_x为样品源^{90}Y计数率,单位为s^{-1};m为样品质量,单位为kg;R_Y为Y的回收率;λ为^{90}Y的衰变常数;t为从^{90}Sr、^{90}Y分离到测量中间时刻的间隔时间,单位为h。

1.7　年内照射剂量估算

按照文献[13],年内照射剂量估算公式为

$$E(\tau)=e(g)\times\sum(C_i\times I_{Ri}),$$

式中:$E(\tau)$为年内照射剂量,单位为Sv/a;C_i为食品中^{90}Sr活度浓度,单位为Bq/kg;I_{Ri}为居民i类食品每年的摄入量,单位为kg/a;$e(g)$为^{90}Sr剂量转换系数,单位为Sv/Bq(成人$e(g)=2.8\times10^{-8}$[13]);广西成人日均消费量参考文献[16]计算。

1.8　文献对比

本研究估算了广西成人年^{90}Sr年摄入量及其所致的年内照射剂量,并将之与1990年全国总膳食的放射性物质比活度、年摄入量和年内照射剂量[3]以及中国参考人的^{90}Sr年摄入量和年内照射剂量[17-18]等进行对比。

2　结　果

2.1　各类食品中^{90}Sr的检出情况及放射性水平

161份食品中有136份检出^{90}Sr,检出率为

84.5%;蔬菜、瓜果、红薯、淡水鱼、茶叶和牛奶的检出率均为100%,其余食品的检出率为55.6%~85.7%,海虾的检出率最低为55.6%。样品中^{90}Sr比活度为0.006~8.801 Bq/kg,平均值为0.426 Bq/kg;若剔除^{90}Sr比活度最高的茶叶后,其他食品的^{90}Sr比活度平均值为0.122 Bq/kg。

不同食品中^{90}Sr的检出率及放射性水平列于表2。蔬菜类包括蔬菜和瓜果2种,共23份样品,其^{90}Sr比活度为0.011~0.221 Bq/kg,蔬菜和瓜果对应^{90}Sr比活度平均值分别为0.081和0.032 Bq/kg;粮食类样品包括大米、玉米和红薯3种,共有40份,其^{90}Sr比活度为0.006~0.373 Bq/kg,对应^{90}Sr比活度平均值分别为0.031、0.030和0.155 Bq/kg;海产品类样品包括海虾、海蟹、海鱼和海贝4种,共有61份,对应^{90}Sr比活度平均值分别为0.175、0.259、0.238和0.121 Bq/kg,海蟹^{90}Sr含量最高;淡水产品为草鱼,共有5份,其^{90}Sr比活度平均值为0.356 Bq/kg;奶类产品共检测4份,其^{90}Sr比活度平均值为0.075 Bq/kg。

7类食品按照^{90}Sr比活度平均值由高到低排顺序为茶叶类、淡水产品类、海产品类、粮食类、蔬菜类、奶类和家畜家禽肉类。其中茶叶类中^{90}Sr含量最高,其均值为2.880 Bq/kg,淡水鱼次之,其均值为0.356 Bq/kg,最小为家畜家禽类0.032 Bq/kg,粮食类、蔬菜类、奶类以及家畜家禽类^{90}Sr比活度平均值比较低且差别不大。

2.2 年内照射剂量估算

食品中^{90}Sr年人均摄入量和所致的年内照射剂量结果列于表3。2012—2022年通过食用蔬菜^{90}Sr年摄入量最大为14.80 Bq,年内照射剂量为0.410 μSv;其次为食用牛奶,年摄入量为8.21 Bq,年内照射剂量为0.230 μSv;食用玉米^{90}Sr年摄入量最小为0.22 Bq,年内照射剂量为0.006 μSv;7类食品按照^{90}Sr年摄入量由高到低排序为蔬菜类、牛奶、鱼虾蟹类、大米、瓜果、茶叶、薯类、畜禽肉类、海贝类和玉米。所致年内照射剂量大小顺序亦同。广西成人食用7类食品摄入^{90}Sr为45.67 Bq,所致成人年内照射剂量为1.270 μSv。

2.3 文献比对

本研究估算了2012—2022年广西成人年摄入^{90}Sr含量及其所致的年内照射剂量,并将之与1990年全国总膳食的放射性物质情况[3]以及中国参考人的^{90}Sr年摄入量及年内照射剂量[17-18]进行对比,结果见表4。除奶类外,本研究调查的食品中放射性核素^{90}Sr的含量均值均落在1990年全国调查的范围内;且各类食品^{90}Sr比活度均值也低于1990年调查的均值。广西成人从水产类、茶叶、瓜果及牛奶中^{90}Sr年摄入量要高于1990年的调查以及中国参考人的数据结果,其他对应结果则低于1990年的调查以及中国参考人的数据结果。

3 讨 论

将本研究的结果与1990年调查的均值相比较,除奶类外,本研究调查的均值均落在1990年全国调查的范围内。自1990年的调查至今已过32年,理

表2 各类食品中^{90}Sr检出情况及放射性水平

类别	食品名称	样品数/份	检出数/份	检出率/%	比活度/(Bq·kg^{-1})	平均比活度/(Bq·kg^{-1})
蔬菜类	蔬菜	18	18	100	0.011~0.221	0.081
	瓜果	5	5	100	0.013~0.093	0.032
粮食类	大米	14	12	85.7	MDL~0.152	0.031
	玉米	17	13	76.5	MDL~0.068	0.030
	红薯	9	9	100	0.006~0.373	0.155
家畜家禽肉类	鸡鸭鹅肉	13	11	84.6	MDL~0.079	0.032
海产品类	海虾	9	5	55.6	MDL~0.490	0.175
	海蟹	15	11	73.3	MDL~0.847	0.259
	海鱼	18	12	66.7	MDL~1.680	0.238
	海贝	19	16	84.2	MDL~0.721	0.121
淡水产品类	草鱼	5	5	100	0.115~0.696	0.356
茶叶类	茶叶	15	15	100	0.177~8.801	2.880
奶类	牛奶	4	4	100	0.015~0.105	0.075
合计		161	136	84.5	0.006~8.801	0.122

注:MDL为探测下限。

表3　食品中^{90}Sr年人均摄入量及所致年内照射剂量

主要食品	日均消费量/(g·d^{-1})	放射性水平/(Bq·kg^{-1})	年摄入量/Bq	年内照射剂量/μSv
蔬菜类	500	0.081	14.80	0.410
瓜果类	350	0.032	4.09	0.110
大米	400	0.031	4.53	0.130
玉米	20	0.030	0.22	0.006
薯类	40	0.155	2.26	0.063
畜禽肉类	75	0.032	0.88	0.025
鱼虾蟹类	75	0.251	6.87	0.190
海贝类	15	0.121	0.66	0.018
茶叶	3	2.880	3.15	0.088
牛奶	300	0.075	8.21	0.230

论上放射性核素^{90}Sr衰变了1个多半衰期(^{90}Sr的半衰期为28.1年),^{90}Sr的放射性水平会有所降低,这是符合预期的。

本研究对广西7类13种共161份食品样品中^{90}Sr的放射性水平进行了调查,估算了成人食入这些食品摄入^{90}Sr的年摄入量及所致的年内照射剂量。7类食品样品中茶叶中^{90}Sr比活度均值最高,为2.880 Bq/kg,但是由于其日均消费量很低,故其所导致的年摄入量以及年内照射剂量并不高,而蔬菜的^{90}Sr比活度均值为0.081 Bq/kg,由于其日均消费量较大,反而导致^{90}Sr年摄入量最大为14.80 Bq,年内照射剂量为0.410 μSv;无论是茶叶,或其他类食品,本研究监测的食品中的^{90}Sr比活度均远低于国家食品中^{90}Sr限制活度浓度(33~290 Bq/kg)[19],广西成人^{90}Sr年摄入量估算结果也远低于《公众成员的放射性核素年摄入量限值:WS/T 613—2018》[20]中规定的限值3.5×10^4 Bq/a,食入所致的内照射剂量1.270 μSv对公众受照剂量的贡献极低(我国相关标准中规定公众年受照剂量为1 mSv[21]),因此广西食品中^{90}Sr的放射性水平不会对公众健康造成危害,人群剂量负担轻微。

纵观近几年国内其他区域关于^{90}Sr监测情况,红沿河核电站周围的粮食和海产品中的^{90}Sr放射性水平分别为0.104和0.359 Bq/kg[7],略高于广西粮食和海产品中的^{90}Sr水平(分别为0.031和0.251 Bq/kg);三门核电站周围海鱼的^{90}Sr放射性水平范围为0.18~0.65 Bq/kg[9],这与广西海鱼^{90}Sr放射性水平(0.238 Bq/kg)持平;宁德核电站周围食品中^{90}Sr的放射性水平显示[8],蔬菜的结果稍高于广西的调查水平,大米、薯类和畜禽肉类的调查结果与广西的结果接近,而海产品类的调查结果要稍低于广西的调查结果。总体而言,各地方食品中^{90}Sr含量都相对较低,都在国家标准范围内,且数值范围相差不大,可见目前我国环境中^{90}Sr的含量很低,对人体健康的影响微乎其微。

食品中^{90}Sr的放射性水平在各类食品中均不同,即使在同一物种中也会因为采样地点不同有波动,且同一地点不同年份的同一种食品^{90}Sr结果也会有波动,主要是由于放射性核素^{90}Sr进入食物受多方面因素的影响,其中包括放射性核素的物理化学形式,地质水文与气象条件,生物体内的代谢情况等,当然,海鱼、海虾、海蟹和海贝中^{90}Sr放射性水平还会随海水的^{90}Sr活度浓度变化,且与不同海产品对^{90}Sr的迁移与富集规律有关。

4　结束语

从本文的检测结果而言,广西食品中^{90}Sr并未对环境或者人体健康造成不良影响,但是由于采样的局限性,并不能完全代表食品安全,随着广西防城港核电站的运行,以及日本核污染水的排放,食

表4　全国调查、中国参考人从各类食品摄入^{90}Sr含量及所致年内照射剂量

食品类别	1990年全国调查[7]				本文结果		中国参考人[17]	
	含量/(10^{-2} Bq·kg^{-1})	平均值/(10^{-2} Bq·kg^{-1})	年摄入量/Bq	年内照射剂量/μSv	年摄入量/Bq	年内照射剂量/μSv	年摄入量/Bq	年内照射剂量/μSv
薯类	4.96~62.0	23.1	10.4	0.237	2.26	0.063	—	—
蔬菜	7.6~55.4	26.8	32.2	0.902	14.80	0.410	31.7	0.9
谷物	2.73~21.6	8.26	—	—	4.53	0.130	5.8	0.16
肉类	MDL~15.2	8.46	1.86	0.052	0.88	0.025	0.8	0.02
水产类	MDL~59.8	33.8	3.64	0.102	7.53	0.208	1.3	0.04
奶类	MDL~3.40	1.52	0.09	0.003	8.21	0.230	0.16	0.005
茶叶	—	—	—	—	3.15	0.088	1.4	0.04
瓜果	0.9~8.61	4.7	1.15	0.032	—	—	—	—

注:—指无数据。

品安全风险监测尤其是食品中放射性核素监测工作将任重道远,本研究将持续监测食品中的放射性核素,同时扩大样品的数量,增加更多核素的监测,研究探索更为快捷的检测前处理以及监测方法,为广西的食品健康风险监测工作提供有力的数据,对核事故后的卫生学评价和公众健康效应评估及社会稳定具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 党磊,吉艳琴.低水平^{90}Sr的分析方法研究进展[J].核化学与分析化学,2010,32(3):129-144.

[2] 朱寿彭,李章.放射毒理学[M].苏州:苏州大学出版社,2004:268-269.

[3] 诸洪达,王守亮,孟玮,等.我国膳食中^{90}Sr、^{117}Cs、^{226}Ra、^{228}Ra、^{210}Pb和^{210}Po含量及其所致内照射剂量[J].辐射防护,1993,2(13):85-91.

[4] 刘翠红,张磊,郭秋菊.秦山核电基地外围^{90}Sr、^{117}Cs公众摄入量估算及内照射剂量评价[J].辐射防护,2009,4(29):243-249.

[5] CHEN F,YIN L L,KONG X Y,et al. ^{90}Sr in Chinese tea of typical regions: activity concentration and hygienic evaluation[J].中华放射医学与防护杂志,2017,37(5):367-371.

[6] 陈飞,尹亮亮,孔祥银,等.生物样品中锶-90分析的不确定度评定[J].辐射研究与辐射工艺学报,2016,34(1):61-66.

[7] 石二为,崔勇,要爽,等.2013—2020年辽宁红沿河核电站周围地区的食品放射性水平及公众内照射剂量研究[J].中华放射医学与防护杂志,2021,41(10):741-745.

[8] 郑琪珊,张燕,黄丽华,等.2013—2017年宁德核电站周围食品中^{90}Sr放射性水平调查[J].中华放射医学与防护杂志,2019,39(12):931-935.

[9] 曹艺耀,赵栋,俞顺飞,等.2015—2019年三门核电站周围近海海水与三类海产品中^{90}Sr放射性水平调查及人群剂量评估[J].中华放射医学与防护杂志,2021,41(4):288-292.

[10] 曹艺耀,任鸿,王鹏,等.全国首台AP1000核电机组安装后周围生活饮用水及食品中^{90}Sr和^{137}Cs放射性水平调查[J].中华放射医学与防护杂志,2021,41(6):456-460.

[11] 卫生健康委员会.食品安全国家标准食品中放射性物质检验锶-89和锶-90的测定:GB14883.3—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

[12] 生态环境部.水和生物样品灰中锶-90的放射化学分析方法:HJ 815—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

[13] 卫生健康委员会.2016年食品安全国家标准食品中放射性物质检验总则:GB14883.1—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

[14] 申宝鸣,邵宪章,尹亮亮,等.萃取色层法快速分析^{90}Sr方法的探讨[J].中华放射医学与防护杂志,2015,35(5):382-383.

[15] 生态环境部.水中锶-90的放射化学分析方法二-(2-乙基己基)磷酸酯萃取色层法:GB 6766—86[S].北京:中国标准出版社,1986.

[16] 中国营养学会.中国居民膳食指南科学研究报告[R].北京:中国营养学会,2021.

[17] 陆梅.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[J].中国辐射卫生,1999,8(2):120-123.

[18] 王继先,陈如松,诸洪达.中国参考人解剖生理和代谢数据[M].北京:原子能出版社,1998.

[19] 卫生健康委员会.食品中放射性物质限制浓度标准:GB 14882—1994[S].北京:中国标准出版社,1994.

[20] 卫生健康委员会.公众成员的放射性核素年摄入量限值:WS/T 613—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[21] 国家市场监督管理总局.电离辐射防护与辐射源安全基本标准:GB 18871—2002[S].北京:中国标准出版社,2003.

(责任编辑:王　媛)