



## 一种可快速估算环境放射性污染所致公众外照射剂量的新软件

汪景航, 陈波, 卓维海

引用本文:

汪景航,陈波,卓维海. 一种可快速估算环境放射性污染所致公众外照射剂量的新软件[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2023, 43(10): 805–811.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112271-20230418-00125>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 三种含天然放射性布料使用所致成年男性参考人的辐射剂量评估

Radiation dose evaluation to male adult reference phantom from using three types of cloths with naturally occurring radioactive material

中华放射医学与防护杂志. 2020, 40(1): 47–50 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.01.008>

#### 接触<sup>131</sup>I放射性核素工作人员内照射剂量估算方法的初步研究

Preliminary study on assessment of internal dose to workers exposed to <sup>131</sup>I radionuclide

中华放射医学与防护杂志. 2021, 41(12): 898–905 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.12.004>

#### 特定照射条件下儿童心血管介入诊疗的受照剂量研究

Estimation of patient doses in paediatric cardiovascular interventional radiology under specific exposure conditions

中华放射医学与防护杂志. 2021, 41(3): 199–204 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.03.008>

#### 西北地区陆生典型昆虫剂量学模型的建立及应用

Establishment and application of typical insect dose model in northwestern China

中华放射医学与防护杂志. 2021, 41(11): 856–861 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.11.011>

#### 湖北省2009—2018年放射工作人员职业性外照射剂量监测结果分析

Levels of occupational external exposure of radiation workers in Hubei province from 2009 to 2018

中华放射医学与防护杂志. 2021, 41(2): 122–127 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.02.008>

# 一种可快速估算环境放射性污染所致公众外照射剂量的新软件

汪景航 陈波 卓维海

复旦大学放射医学研究所, 上海 200032

通信作者: 卓维海, Email: whzhuo@fudan.edu.cn

**【摘要】 目的** 开发便于快速估算环境放射性污染所致公众成员外照射剂量的应用软件。**方法** 基于国际放射防护委员会 (ICRP) 提供的数据库, 创建公众 (成人与不同年龄组儿童) 在不同环境暴露情形下的外照射剂量率转换系数数据库; 在 Windows 操作系统内利用 Python 语言编写数据调用与计算程序, 并借助 PyQt 工具包设计软件界面; 为测试该软件的计算结果, 试算了几种最可能出现放射性核素在 3 种环境暴露情景下所致公众成员的外照射剂量差异, 并开展了合理性分析。**结果** 本研究开发软件可在带 Windows 系统的个人电脑上快速完成放射性核素污染外照射所致公众的器官当量剂量与全身有效剂量的估算, 计算结果合理。结果表明, 公众成员的年龄越小, 器官当量剂量和有效剂量通常越大; 对于相同活度浓度且达到放射性平衡<sup>90</sup>Sr 的土壤表面污染和水体污染, 婴儿的有效剂量约为成人的 6.08 倍和 2.51 倍。**结论** 本研究开发的软件具有操作简单、计算速度快等优点, 适用于核事故应急等情形下快速估算公众成员外照射剂量。

**【关键词】** 放射性污染; 外照射; 当量剂量; 有效剂量; 软件工具

**基金项目:** 国家自然科学基金 (12175043)

## A new software for rapid estimation of external dose to the public due to environmental radioactive contamination

Wang Jinghang, Chen Bo, Zhuo Weihai

Institute of Radiation Medicine, Fudan University, Shanghai 200032, China

Corresponding author: Zhuo Weihai, Email: whzhuo@fudan.edu.cn

**【Abstract】 Objective** To develop a software for rapid estimation of external dose to the public due to environmental radioactive contamination. **Methods** Based on the data provided by the International Commission on Radiological Protection (ICRP), a database of the conversion coefficients of external dose rates for the public (adult and children of different age groups) under different environmental exposure scenarios was created. The programs of data search and calculation were written using Python language, and the software interface was designed using PyQt toolkit. To test the calculation results, the differences in external doses to different age groups of the public caused by most likely produced radionuclides under three environmental exposure scenarios were calculated, and their rationalities were analyzed. **Results** The software can immediately complete the estimation of the organ equivalent doses and the effective dose due to the external exposure from environmental contamination by using a personal computer with a Windows system, and its results are reasonable. The test results showed that the younger the public members, the larger the organ dose and effective dose. For soil surface and water contaminated with <sup>90</sup>Sr with the same activity concentration reaching radioactive equilibrium, the effective dose to infants was about 6.08 times and 2.51 times those to adults, respectively. **Conclusions** The software developed in this study has the advantages of simple operation and fast calculation, and is suitable for rapid estimation of external dose to the public members of different age groups in emergency situations such as nuclear accidents.

DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20230418-00125

收稿日期: 2023-04-18 本文编辑: 张庆

引用格式: 汪景航, 陈波, 卓维海. 一种可快速估算环境放射性污染所致公众外照射剂量的新软件[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2023, 43(10): 805-811. DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20230418-00125.

Wang JH, Chen B, Zhuo WH. A new software for rapid estimation of external dose to the public due to environmental radioactive contamination [J]. Chin J Radiol Med Prot, 2023, 43(10): 805-811. DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20230418-00125.

**【Key words】** Radioactive contamination; External exposure; Equivalent dose; Effective dose; Software tool

**Fund program:** National Nature Science Foundation of China (12175043)

切尔诺贝利和福岛核电站事故等重大核事故，对公众的健康与心理、以及社会、环境与经济的影响备受全球广泛关注<sup>[1-3]</sup>。严重核事故发生所释放的放射性核素将污染大气、土壤和水体环境，可能会给事故发生地周边的儿童和成人带来额外的辐射照射风险，因此快速估算不同年龄组儿童和成人所受的辐射剂量，对指导辐射应急工作的开展具有重要应用价值。

为指导核事故应急，通常需要利用剂量转换系数法来快速估算环境放射性污染所致公众的外照射剂量<sup>[4]</sup>。为此，我国还专门制定了《核事故应急情况下公众受照剂量估算的模式和参数（GB/T 17982-2018）》的国家标准<sup>[5]</sup>，并给出了相关剂量转换系数。但是，该标准给出的剂量转换系数源自于国际原子能机构（IAEA）1986 年发布的第 81 号出版物<sup>[6]</sup>和美国核管会 1983 年发布的 NUREG/CR-3160 号报告<sup>[7]</sup>，其中，器官剂量数值是基于早期的成年人程式化体模（stylized phantom）的计算结果，有效剂量转换系数更是基于国际放射防护委员会（ICRP）最早给出的组织权重因子计算得到的。另一方面，该标准仅提供了大气污染和地表污染所致成人外照射剂量的转换系数，所涉及的核素种类也非常有限，无法满足各年龄组、不同性别公众和不同器官当量剂量的快速估算需求。为此，ICRP 基于最新的数字化体模和最新的组织权重因子，重新计算了共 97 种元素

1 252 种放射性核素在 3 种放射性污染环境（大气、土壤和水体）下所致不同年龄组、不同性别公众成员的外照射剂量率转换系数，并于 2020 年在其第 144 号出版物<sup>[8]</sup>发布了环境源外照射的最新剂量转换系数共六百余个。但由于该出版物的数据量过于庞大，通过人工查表法来快速正确估算公众的外照射剂量耗时长且繁琐。为克服以上不足与困难，本研究拟通过编写应用软件来实现环境放射性污染所致公众外照射剂量的快速估算。

材料与方法

1. 剂量转换系数数据库构建：ICRP 提供了含有环境源外照射剂量转换系数的文本类型数据文件。本研究利用计算机编程语言 Python 3.8.10 结合数据库管理系统 SQLite3 创建剂量转换系数数据库，对 ICRP 文本数据利用 split 切片函数进行分隔，筛选出核素名称、不同年龄组、不同性别对应的剂量转换系数数据，并利用结构化查询语言 sql 语句将数据逐项插入数据库表中，得到器官当量剂量和有效剂量数据库的示例见图 1。
2. 软件设计：本研究选用 Python 3.8.10 作为编程语言编写功能代码，实现软件的主体计算功能。软件界面利用 PyQt 5 工具包进行设计，利用控件组框 Group Box 对不同控件进行归类及布局美化。设计完成后保存为用户界面 UI 文件，在集成开发环境 PyCharm 2022.2 中使用 PyUIC 工具转换

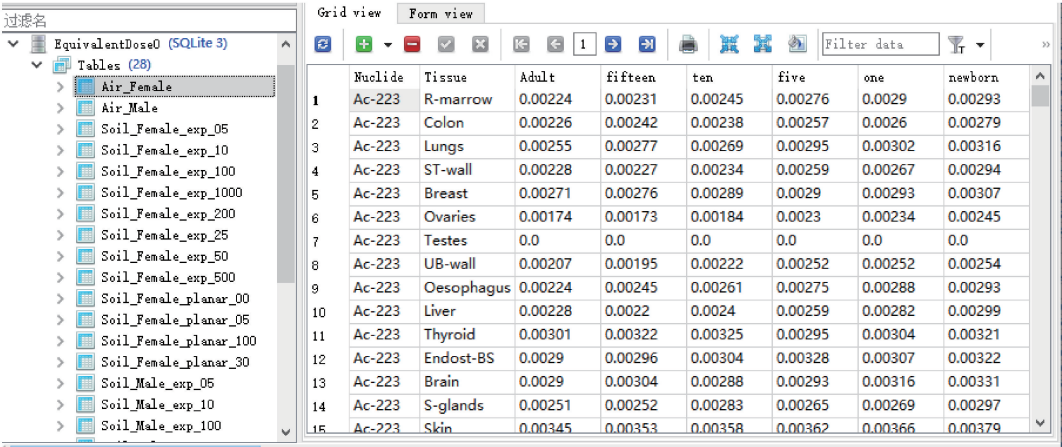


图 1 器官当量剂量转换系数数据库界面

Figure 1 Interface of database on organ equivalent dose conversion coefficients

为 Python 脚本文件 (.py)，并载入至功能代码中，编写函数完成界面的功能与逻辑互通。

本软件外照射器官当量剂量与有效剂量计算公式如下：

$$H_T = \dot{h} \cdot A \cdot t \tag{1}$$

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \dot{e} \cdot A \cdot t \tag{2}$$

式中， $H_T$  为器官当量剂量，nSv； $\dot{h}$  为器官当量剂量转换系数，nSv · h<sup>-1</sup> · Bq<sup>-1</sup> · m<sup>3</sup> 或 nSv · h<sup>-1</sup> · Bq<sup>-1</sup> · m<sup>2</sup>； $\dot{e}$  为有效剂量转换系数，nSv · h<sup>-1</sup> · Bq<sup>-1</sup> · m<sup>3</sup> 或 nSv · h<sup>-1</sup> · Bq<sup>-1</sup> · m<sup>2</sup>； $A$  为放射性核素活度浓度，Bq/m<sup>3</sup> 或 Bq/m<sup>2</sup>； $t$  为持续受照时间，h； $E$  为有效剂量，nSv； $w_T$  为组织权重因子。

软件计算流程如下：程序启动后，输入环境介质、受照者性别、年龄、放射性核素、受照时间后，软件可自动读取数据库中相应核素所对应的器官当量剂量转换系数，再输入相应放射性核素活度浓度便可计算得到器官当量剂量与有效剂量。计算结果可在软件界面中利用表格控件进行展示结果，并可保存输出为数据表格文件。

利用 PyQt 设计得到软件主体界面如图 2 所示。计算时先在左侧组件中选择受照者性别，输入年龄、照射时间和放射性核素名称；再选择环境介质（大气、土壤或水体），当选择土壤污染时，可根据实际情况选择平面源或体积源选项，并输入平面深度或松弛深度（g/cm<sup>2</sup>）；最后输入污染物放射性活度浓度并执行计算。计算结果在软件右侧展示，可给出 29 个器官/组织的器官当量剂量和外照射有效剂量<sup>[9]</sup>。其中，松弛深度是针对体积源而言，是指放射性活度浓度为地面活度浓度的

e<sup>-1</sup>时所在深度<sup>[10]</sup>。

3. 试算与结果分析：结合相关文献资料给出发生核事故可能释放的放射性核素种类<sup>[11-15]</sup>，选取最可能给大气、土壤和水体造成污染的放射性核素，试算在不同暴露情景下其外照射所致不同年龄组成员的器官当量剂量及有效剂量。针对有衰变链的放射性核素（如<sup>90</sup>Sr 和<sup>137</sup>Cs），试算其在放射性平衡前后的外照射剂量。为验证本研究开发软件的计算结果可靠性，引用国外其他学者的研究结果，对部分核素污染环境所致成人的外照射剂量进行比较。

结 果

- 1. 大气污染外照射所致公众的有效剂量：表 1 给出了大气受相应放射性核素污染带来外照射所致各年龄组公众有效剂量的计算结果。从表 1 可以看出，在污染物活度浓度均为 1×10<sup>6</sup> Bq/m<sup>3</sup> 时，不同核素所致各年龄组公众的有效剂量均有明显的差异，其中<sup>134</sup>Cs 污染所致同年龄组公众的外照射有效剂量是<sup>85</sup>Kr 的 300 倍以上。另一方面，<sup>137</sup>Cs 是否达到放射性平衡，其所致的外照射有效剂量的差异也可达 300 倍，主要是由于不考虑衰变子体<sup>137</sup>Ba<sup>m</sup> 时<sup>137</sup>Cs 以 β 衰变为主，而达到放射性平衡时子体<sup>137</sup>Ba<sup>m</sup> 主要释放能量为 661.66 keV 的光子，其所致剂量较高，一般默认<sup>137</sup>Cs 发射 661.66 keV 时处于放射性平衡态。
- 2. 土壤表面污染外照射所致公众的有效剂量：表 2 给出了土壤受相应放射性核素污染带来外照射所致各年龄组公众有效剂量的计算结果。从表 2 可

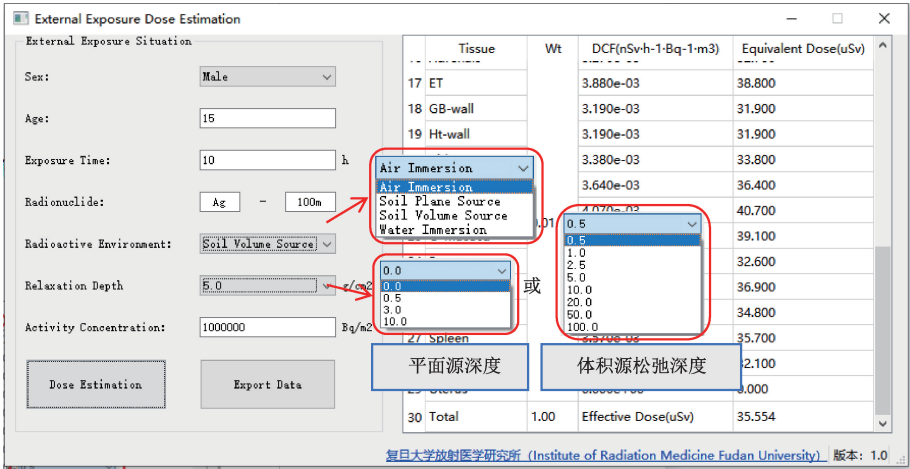


图 2 软件的用户界面图

Figure 2 The user interface of the software



表 1 大气污染中不同放射性核素所致不同年龄组公众的有效剂量 (μSv)

Table 1 Effective dose to the public from different radionuclides in airborne contaminatants (μSv)						
核素 <sup>a</sup>	成年	15 岁	10 岁	5 岁	1 岁	婴儿
<sup>85</sup> Kr	0. 778	0. 783	0. 794	0. 811	0. 824	0. 840
<sup>131</sup> I	56. 3	58. 8	60. 8	64. 7	66. 3	69. 1
<sup>133</sup> Xe	4. 03	4. 38	4. 60	5. 11	5. 53	5. 90
<sup>134</sup> Cs	242	250	256	270	279	293
<sup>135</sup> Xe	35. 7	37. 8	39. 0	41. 6	42. 4	44. 4
<sup>137</sup> Cs <sup>b</sup>	0. 291	0. 290	0. 290	0. 290	0. 296	0. 302
<sup>137</sup> Cs <sup>c</sup>	86. 5	89. 1	91. 6	96. 6	100	105

注:<sup>a</sup>模拟环境:人体位于均匀大气污染内,核素活度浓度为1×10<sup>6</sup> Bq/m<sup>3</sup>,受照时间1 h;<sup>b</sup>为便于比较,假设1 h内该核素子体不发生衰变;<sup>c</sup>考虑衰变达到平衡

以看出,在污染物活度浓度均为1×10<sup>6</sup> Bq/m<sup>2</sup>时,不同核素所致各年龄组公众的有效剂量差异更为明显,其中<sup>134</sup>Cs污染所致同年龄组公众的外照射有效剂量是刚释放出<sup>137</sup>Cs的30倍以上,主要是由于<sup>137</sup>Cs刚释放时不考虑<sup>137</sup>Ba<sup>m</sup>,若<sup>137</sup>Cs达到放射性平衡,<sup>134</sup>Cs污染所致有效剂量为<sup>137</sup>Cs的2倍以上。另一方面,<sup>90</sup>Sr或<sup>137</sup>Cs是否达到放射性平衡,其所致的外照射有效剂量的差异也可达6倍和12倍以上。

表 2 土壤表面污染中不同放射性核素所致不同年龄组公众的有效剂量 (nSv)

Table 2 Effective dose to the public from different radionuclides in soil surface contaminatants (nSv)						
核素 <sup>a</sup>	成年	15 岁	10 岁	5 岁	1 岁	婴儿
<sup>88</sup> Rb	4 330	4 200	6 410	7 470	11 500	18 900
<sup>90</sup> Sr <sup>b</sup>	120	108	110	132	178	289
<sup>90</sup> Sr <sup>c</sup>	783	677	930	1 132	2 218	4 759
<sup>131</sup> I	1 360	1 410	1 510	1 700	1 940	2 310
<sup>134</sup> Cs	5 220	5 380	5 790	6 400	7 190	8 330
<sup>137</sup> Cs <sup>b</sup>	112	102	103	123	167	279
<sup>137</sup> Cs <sup>c</sup>	2 019	2 065	2 227	2 473	2 810	3 356

注:<sup>a</sup>模拟环境:人体站立于土壤表面,核素活度浓度为1×10<sup>6</sup> Bq/m<sup>2</sup>,受照时间为1 h;<sup>b</sup>为便于比较,假设1 h内该核素子体不发生衰变;<sup>c</sup>考虑衰变达到平衡

3. 水体污染外照射所致公众的有效剂量:表3给出了水体受相应放射性核素污染带来外照射所致各年龄组公众有效剂量的计算结果。从表3可以看出,在污染物活度浓度均为1×10<sup>6</sup> Bq/m<sup>3</sup>时,不同核素所致各年龄组公众的有效剂量也都有明显的差异,其中<sup>134</sup>Cs污染所致同年龄组公众的外照射有效剂量是刚释放出<sup>90</sup>Sr或<sup>137</sup>Cs的1 300倍以上。同样,<sup>90</sup>Sr或<sup>137</sup>Cs是否达到放射性平衡,其所致的外照射有效剂量的差异也分布可达12倍和

表 3 水体污染中不同放射性核素所致不同年龄组公众的有效剂量 (nSv)

Table 3 Effective dose to the public from different radionuclides in water contaminants (nSv)						
核素 <sup>a</sup>	成年	15 岁	10 岁	5 岁	1 岁	婴儿
<sup>88</sup> Rb	273	282	308	329	357	395
<sup>90</sup> Sr <sup>b</sup>	0. 398	0. 388	0. 396	0. 398	0. 404	0. 418
<sup>90</sup> Sr <sup>c</sup>	5. 66	4. 92	6. 75	7. 33	10. 6	14. 2
<sup>131</sup> I	123	129	137	151	161	174
<sup>134</sup> Cs	529	550	578	628	665	714
<sup>137</sup> Cs <sup>b</sup>	0. 388	0. 375	0. 388	0. 389	0. 402	0. 427
<sup>137</sup> Cs <sup>c</sup>	189	198	208	226	240	258

注:<sup>a</sup>模拟环境:人体浸没于受污染水体中,核素活度浓度为1×10<sup>6</sup> Bq/m<sup>3</sup>,受照时间1 h;<sup>b</sup>为便于比较,假设1 h内该核素子体不发生衰变;<sup>c</sup>考虑衰变达到平衡

480倍以上。

4. 外照射所致婴儿和成人的有效剂量比较:表4给出了大气、土壤和水体受相应放射性核素污染带来外照射所致婴儿和成人有效剂量比值的计算结果。从表4可以看出,婴儿的有效剂量均大于成年的人有效剂量,且差异还与受污染的环境介质有关,土壤表面污染导致的婴儿与成人的有效剂量差异高于大气或水体受污染情景。

表 4 不同暴露环境下婴儿与成人外照射有效剂量的比值

Table 4 Ratios of infant to adult effective dose in different exposure environments						
暴露环境	<sup>90</sup> Sr <sup>a</sup>	<sup>90</sup> Sr <sup>b</sup>	<sup>131</sup> I	<sup>134</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs <sup>a</sup>	<sup>137</sup> Cs <sup>b</sup>
大气污染	—	—	1. 23	1. 21	1. 04	1. 21
土壤表面污染	2. 41	6. 08	1. 70	1. 59	2. 49	1. 66
水体污染	1. 05	2. 51	1. 41	1. 35	1. 10	1. 36

注:“—”为无数据。<sup>a</sup>不考虑其衰变子体;<sup>b</sup>考虑衰变达到平衡

5. 不同研究的计算结果比较:表5列出了在相同的污染情况下外照射所致成人有效剂量的计算结果比较。从表5可看出,相同活度浓度的放射性核素污染同类环境介质所致成人的外照射剂量均在同一量级。对于表5中所列的核素与环境,本研究的计算结果与美国环境保护署(EPA)FGR 12<sup>[16]</sup>、Veinot等<sup>[17]</sup>和Bellamy等<sup>[18]</sup>、Yoo等<sup>[19]</sup>的研究结果的相对偏差平均值分别为16.1%、5.5%和4.5%。

讨 论

为快速估算环境放射性污染所致公众成员的外照射剂量,本研究基于ICRP推荐的最新剂量转换系数,通过创建公众(成人与不同年龄组儿童)在3种暴露环境中因外照射所致公众器官当量剂量和有效剂量的转换系数数据库,并借助PyQt 5与

表 5 不同核素下各研究计算得到的成人外照射有效剂量 (nSv)

Table 5 Adult effective doses from external radiation exposure calculated from various studies for different radionuclides (nSv)

核素 <sup>a</sup>	本研究	EPA-FGR 12 <sup>[16]</sup>	Veinot 等 <sup>[17]</sup> 和 Bellamy 等 <sup>[18]</sup>	Yoo 等 <sup>[19]</sup>	污染环境
<sup>85</sup> Kr	7.78×10 <sup>2</sup>	4.28×10 <sup>2</sup>	8.64×10 <sup>2</sup>	8.10×10 <sup>2</sup>	大气
	5.63×10 <sup>4</sup>	6.55×10 <sup>4</sup>	6.01×10 <sup>4</sup>	5.83×10 <sup>4</sup>	大气
<sup>131</sup> I	1.36×10 <sup>3</sup>	1.35×10 <sup>3</sup>	1.27×10 <sup>3</sup>	1.27×10 <sup>3</sup>	土壤 <sup>b</sup>
	1.23×10 <sup>2</sup>	1.43×10 <sup>2</sup>	1.21×10 <sup>2</sup>	1.27×10 <sup>2</sup>	水体
<sup>133</sup> Xe	4.03×10 <sup>3</sup>	5.62×10 <sup>3</sup>	4.57×10 <sup>3</sup>	4.43×10 <sup>3</sup>	大气
	2.42×10 <sup>5</sup>	2.72×10 <sup>5</sup>	2.53×10 <sup>5</sup>	2.47×10 <sup>5</sup>	大气
<sup>134</sup> Cs	5.22×10 <sup>3</sup>	5.47×10 <sup>3</sup>	5.11×10 <sup>3</sup>	5.08×10 <sup>3</sup>	土壤 <sup>b</sup>
	5.29×10 <sup>2</sup>	5.90×10 <sup>2</sup>	5.26×10 <sup>2</sup>	5.44×10 <sup>2</sup>	水体
<sup>135</sup> Xe	3.57×10 <sup>4</sup>	4.28×10 <sup>4</sup>	3.89×10 <sup>4</sup>	3.74×10 <sup>4</sup>	大气
	8.65×10 <sup>4</sup>	9.79×10 <sup>4</sup>	9.07×10 <sup>4</sup>	8.87×10 <sup>4</sup>	大气
<sup>137</sup> Cs <sup>c</sup>	2.02×10 <sup>3</sup>	1.99×10 <sup>3</sup>	1.90×10 <sup>3</sup>	1.87×10 <sup>3</sup>	土壤 <sup>b</sup>
	1.89×10 <sup>2</sup>	2.13×10 <sup>2</sup>	1.88×10 <sup>2</sup>	1.96×10 <sup>2</sup>	水体

注:<sup>a</sup> 大气和水体污染核素活度浓度为 1×10<sup>6</sup> Bq/m<sup>3</sup>, 土壤污染为 1×10<sup>6</sup> Bq/m<sup>2</sup>, 受照时间 1 h; <sup>b</sup> 选取平面源典型深度为 0.5 g/cm<sup>2</sup>; <sup>c</sup> 放射性衰变达到平衡

Python 3.8.10 设计编写了一款可以估算环境放射性污染所致公众成员外照射剂量的应用软件工具。在带 Windows 系统的普通家用电脑或个人手机上均可在数秒 (包括输入核素及其活度浓度以及选择暴露环境等参数) 内给出任一放射性核素污染所致各年龄组公众的 29 个器官的当量剂量与有效剂量。

试算结果表明,即便是相同的环境和污染物浓度,不同核素所致相同年龄组公众成员的有效剂量差异最大可达 3 个数量级。这主要是因为不同放射性核素衰变所发射的光子 (包括 γ 射线和 X 射线) 和电子 (包括 β 粒子、内转换电子和俄歇电子) 的比例和能量有很大的差异<sup>[20]</sup>。另外,对于某些放射性核素,它们是否达到放射性平衡,其外照射所致公众的有效剂量也有很大的差异。如对于<sup>137</sup>Cs,达到平衡后外照射所致公众的有效剂量在大气或水体受污染情况下是其刚释放出来时的 300 倍以上,这主要是因为<sup>137</sup>Cs 的子体<sup>137</sup>Ba<sup>m</sup> 发射的光子和电子的份额与能量均远高于<sup>137</sup>Cs 本身<sup>[20-21]</sup>。这也提示了快速开展放射性去污的重要性。

试算结果表明,相同活度浓度的同种放射性核素污染大气、土壤和水体所致相同年龄组公众成员的有效剂量也存在较大差异,通常污染大气所致有效剂量更高,这与 Bilgiç 和 Gündüz<sup>[22]</sup> 的

模拟结果一致,这主要是因为大气对光子的衰减很小,而土壤和水体本身就有射线的屏蔽作用;如若考虑到大气流动性与土壤固定性的差异,在长期照射时土壤污染所致剂量反而占据更高比例<sup>[23]</sup>。试算结果还表明,同种放射性核素污染相同环境所致公众的外照射有效剂量的年龄差异也较为明显,以<sup>90</sup>Sr 为例,对于相同活度浓度且达到放射性平衡<sup>90</sup>Sr 的土壤表面污染和水体污染,婴儿的有效剂量约为成人的 6.08 倍和 2.51 倍,主要原因是婴幼儿体型小、皮肤薄、肌肉与脂肪含量少、自身屏蔽作用也弱<sup>[24]</sup>,尤其是在土壤被污染的情况下,由于儿童身高矮,整个身体距土壤表面更近,因此受照剂量的年龄差异更为明显<sup>[25]</sup>。

不同研究得到不同放射性核素污染环境所致成人外照射剂量的定量比较结果表明,本研究计算得到的外照射剂量与 Veinot 等<sup>[17]</sup>、Bellamy 等<sup>[18]</sup>和 Yoo 等<sup>[19]</sup>的计算结果非常接近;在本研究所考虑的核素和环境中,外照射剂量的最大相对偏差仅分别为 13.4%和 9.9%。但对主要发射 β 粒子的放射性核素,本研究计算得到的外照射剂量与 EPA FGR 12 的计算结果仍有较大差异,如对<sup>85</sup>Kr 和<sup>133</sup>Xe,相对偏差仍可达 40%左右。这很可能是因为发布于 1993 年的 EPA FGR 12 所采用的体模欠精细,且其所采用的组织权重因子是来自于 ICRP 的第 60 号出版物<sup>[26]</sup>。

需要提及的是,本研究所采用的剂量转换系数和计算模型较为理想,所采用体模多为基于高加索人建立的 ICRP 参考人<sup>[27]</sup>,与中国种存在一定差异;另外,考虑到严重事故情境下受照者所处环境的差异性及剂量估算的急迫性,本文以受照剂量最大化估算,未曾考虑环境内居留因子与房间屏蔽效应等,在实际应用中还需考虑建筑物和衣物的屏蔽<sup>[28]</sup>、人员的姿态<sup>[29]</sup>、环境放射性污染的均匀性<sup>[30]</sup>等因素的影响。另一方面,对于大气污染情景,吸入放射性核素所致的内照射剂量也备受广泛关注,本研究也将充分结合现有的研究结果,在尽快开发出 APP 软件的同时,并继续开发可快速估算内照射剂量的应用软件。

利益冲突 无

作者贡献声明 汪景航负责软件设计、数据分析和论文撰写;陈波负责软件设计指导;卓维海负责研究和论文写作指导

## 参 考 文 献

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. UNSCEAR 2020/2021 Report. Sources, effects and risks of ionizing radiation [R]. New York: UNSCEAR, 2022.
- [2] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 146. Radiological protection of people and the environment in the event of a large nuclear accident [R]. Oxford: Pergamon Press, 2020.
- [3] López-Pérez M, Ramos-López R, Perestelo NR, et al. Arrival of radionuclides released by the Fukushima accident to Tenerife (Canary Islands) [J]. J Environ Radioact, 2013, 116: 180-186. DOI: 10.1016/j.jenvrad. 2012.09.011.
- [4] 高佚名. 核事故外照射剂量快速估算方法的研究与软件编制 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.  
Gao YM. Research and software development of fast estimation method of external radiation dose in nuclear accident [D]. Shanghai: Fudan University, 2011.
- [5] 中华人民共和国卫生部. GB/T 17982-2018 核事故应急情况下公众受照剂量估算的模式和参数 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
Ministry of Health of the People's Republic of China. GB/T 17982-2018 Models and parameters of public exposure dose estimation in case of nuclear accident emergency [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [6] International Atomic Energy Agency. IAEA Safety Series No. 81. Derived intervention levels for application in controlling radiation doses to the public in the event of a nuclear accident or radiological emergency [R]. Vienna: IAEA, 1986.
- [7] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. NUREG/CR-3160. Parameters and variables appearing in radiological assessment code [R]. New York: UNSCEAR, 1983.
- [8] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 144. Dose coefficients for external exposures to environmental sources [R]. Oxford: Pergamon Press, 2020.
- [9] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection [R]. Oxford: Pergamon Press, 2007.
- [10] Kofler C, Domal S, Satoh D, et al. Organ and detriment-weighted dose rate coefficients for exposure to radionuclide-contaminated soil considering body morphometries that differ from reference conditions: adults and children [J]. Radiat Environ Biophys, 2019, 58 (4): 477-492. DOI: 10.1007/s00411-019-00812-2.
- [11] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations. UNSCEAR Report 2000. Sources and effects of ionizing radiation [R]. New York: UNSCEAR, 2001.
- [12] Kovalenko IO, Panasiuk MI, Skorbin AD, et al. Correlation between chemical composition and  $^{90}\text{Sr}$  concentrations in groundwater of the Chernobyl NPP industrial site [J]. J Environ Radioact, 2021, 240: 106756. DOI: 10.1016/j.jenvrad. 2021.106756.
- [13] 陈灿, 李俊峰, 王建龙. 福岛核事故后的海洋放射性排放和监测研究进展 [J]. 科技导报, 2022, 40 (17): 105-112. DOI: 10.3981/j. issn. 1000-7857. 2022. 17. 009.
- [14] 郭瑞萍, 杨春林, 陈海英. 基于 RASCAL 软件的核电厂事故后放射性核素不同释放途径对公众剂量的影响 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36 (10): 765-769. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098. 2016. 10. 010.
- [15] 郭瑞萍, 杨春林, 陈海英. 基于 RASCAL 软件的核电厂事故后放射性核素不同释放途径对公众剂量的影响 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36 (10): 765-769. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098. 2016. 10. 010.
- [16] 黄彦君, 黄东辉, 上官志洪, 等. 我国核电厂辐射本底调查的标准要求分析 [J]. 核安全, 2021, 20 (4): 12-20. DOI: 10.16432/j. cnki. 1672-5360. 2021. 04. 003.
- [17] 黄彦君, 黄东辉, 上官志洪, 等. 我国核电厂辐射本底调查的标准要求分析 [J]. 核安全, 2021, 20 (4): 12-20. DOI: 10.16432/j. cnki. 1672-5360. 2021. 04. 003.
- [18] Environment Protection Agency. Federal Guidance Report No. 12. External exposure to radionuclides in air, water, and soil [R]. Washington: EPA, 1993.
- [19] Veinot KG, Eckerman KF, Bellamy MB, et al. Effective dose rate coefficients for exposure to contaminated soil [J]. Radiat Environ Biophys, 2017, 56 (3): 255-267. DOI: 10.1007/s00411-017-0692-7.
- [20] Bellamy MB, Veinot KG, Hiller MM, et al. Effective dose rate coefficients for immersions in radioactive air and water [J]. Radiat Prot Dosim, 2017, 174 (2): 275-286. DOI: 10.1093/rpd/new103.
- [21] Yoo SJ, Jang HK, Lee JK, et al. External dose-rate conversion factors of radionuclides for air submersion, ground surface contamination and water immersion based on the new ICRP dosimetric setting [J]. Radiat Prot Dosim, 2013, 156 (1): 7-24. DOI: 10.1093/rpd/nct045.
- [22] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 107. Nuclear decay data for dosimetric calculations [R]. Oxford: Pergamon Press, 2008.
- [23] 杨福家. 原子核物理 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993.
- [24] Yang FJ. Nuclear physics [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1993.
- [25] Bilgiç E, Gündüz O. Dose and risk estimation of Cs-137 and I-131 released from a hypothetical accident in Akkuyu Nuclear Power Plant [J]. J Environ Radioact, 2020, 211: 106082. DOI: 10.1016/j.jenvrad. 2019.106082.
- [26] 胡啸峰, 陈鹏, 曾昭龙. 基于 WRF 的放射性物质大气扩散模拟的环境辐射剂量估算方法 [J]. 安全与环境工程, 2016, 23 (2): 135-142. DOI: 10.13578/j. cnki. issn. 1671-1556. 2016. 02. 025.
- [27] Hu XF, Chen P, Zeng ZL. Method of assessment of environmental radiation dose based on simulation of atmospheric dispersion of radionuclides by using WRF [J]. Saf Environ Eng, 2016, 23 (2): 135-142. DOI: 10.13578/j. cnki. issn.

1671-1556. 2016. 02. 025.

[ 24 ] 庞春兰, 关邵翔, 杨小春, 等. 儿童全身<sup>18</sup>F-FDG PET/CT 有效剂量的临床研究 [J]. 中山大学学报 (医学科学版), 2021, 42 (2): 271-278. DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci). 2021.0035.

Pang CL, Guang SX, Yang XC, et al. Clinical study of effective dose for pediatric whole-body <sup>18</sup>F-FDG PET/CT examination [J]. J Sun Yat-sen Univ (Med Sci), 2021, 42 (2): 271-278. DOI: 10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci). 2021.0035.

[ 25 ] Saito K, Ishigure N, Petoussi-Henss N, et al. Effective dose conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground [J]. Radiat Environ Biophys, 2012, 51 (4): 411-423. DOI: 10.1007/s00411-012-0432-y.

[ 26 ] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection [R]. Oxford: Pergamon Press, 1991.

[ 27 ] 刘欢, 邱睿, 潘羽晞, 等. 中国成年男性参考人体素模型

CRAM 淋巴结的建立及其在放射性核素治疗中的应用 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2016, 56 (12): 1290-1296. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb. 2016. 25. 039.

Liu H, Qiu R, Pan YX, et al. Development of lymphatic nodes in the Chinese reference adult male voxel model (CRAM) with applications to radionuclide therapy [J]. J Tsinghua Univ (Sci Technol), 2016, 56 (12): 1290-1296. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb. 2016. 25. 039.

[ 28 ] Horst F, Boscolo D, Durante M, et al. Thick shielding against galactic cosmic radiation: A Monte Carlo study with focus on the role of secondary neutrons [J]. Life Sci Space Res (Amst), 2022, 33: 58-68. DOI: 10.1016/j.lssr. 2022. 03. 003.

[ 29 ] Chen Y, Qiu R, Li C, et al. Construction of Chinese adult male phantom library and its application in the virtual calibration of in vivo measurement [J]. Phys Med Biol, 2016, 61 (5): 2124-2144. DOI: 10.1088/0031-9155/61/5/2124.

[ 30 ] Overcamp TJ. An exact solution for the ground-level gamma dose rate from a spherical gaussian puff [J]. Health Phys, 2016, 111 (5): 403-409. DOI: 10.1097/HP. 0000000000000567.

· 读者 · 作者 · 编者 ·

## 本刊可直接使用缩写形式的常用词汇

本刊对于以下放射医学工作者比较熟悉的一些常用词汇, 将允许在论文撰写和发表文章中直接使用其缩写, 可以不标注中文。按汉语拼音排序如下:

白介素 (IL)	聚合酶链反应 (PCR)
白细胞 (WBC)	聚偏氟乙烯 (PVDF)
苯甲基磺酰氟 (PMSF)	链霉亲和素-生物素复合物 (SABC)
丙氨酸氨基转移酶 (ALT)	临床靶区体积 (CTV)
传能线密度 (LET)	磷酸盐缓冲液 (PBS)
磁共振成像 (MRI)	三维适形放疗 (3D-CRT)
碘化丙啶 (PI)	十二烷基硫酸钠 (SDS)
二氨基联苯胺 (DAB)	四甲基偶氮唑盐 (MTT)
二甲基亚砜 (DMSO)	苏木精-伊红染色 (HE)
二喹啉甲酸 (BCA)	胎牛血清 (FBS)
4', 6-二脒基-2-苯基吲哚 (DAPI)	体质量指数 (BMI)
反转录-聚合酶链反应 (RT-PCR)	天冬氨酸氨基转移酶 (AST)
干扰素 (IFN)	调强适形放疗 (IMRT)
红细胞 (RBC)	危及器官 (OAR)
放射增敏比 (SER)	血红蛋白 (Hb)
计划靶区体积 (PTV)	血小板 (PLT)
计算机断层扫描 (CT)	一氧化氮 (NO)
剂量长度乘积 (DLP)	异硫氰酸荧光素 (FITC)
剂量体积直方图 (DVH)	转化生长因子 (TGF)
焦碳酸二乙酯 (DEPC)	肿瘤坏死因子 (TNF)
聚丙烯酰胺凝胶电泳 (PAGE)	大体肿瘤体积 (GTV)

(本刊编辑部)