

核和辐射卫生监测公众内照射剂量估算软件的编制

王进^{1,2}, 余宁乐², 杨小勇², 周献锋², 王福如², 朱宝立^{1,2}

摘要: [目的] 研制建立核和辐射卫生监测公众内照射剂量估算软件。[方法] 使用 POWERBUILDER 11.5, 运用 IAEA-TECDOC-1162 出版物中有关食入和吸入途径内照射剂量估算方法, 结合江苏省田湾核电站周围人群健康背景资料编制软件。[结果] 建成核和辐射卫生监测公众内照射剂量估算软件, 并运用软件计算 2010 年度田湾核电站 30 km 半径范围内食品中 ^{137}Cs 致公众内照射集体有效剂量为 5.05 人·mSv。2011 年应对日本核电站泄漏辐射监测期间, 南京地区蔬菜中 ^{131}I 致公众内照射有效剂量最大为 2.2×10^{-4} mSv。[结论] 该软件可满足核电站正常运行和事故状态下, 食入和吸入两种途径公众内照射待积有效剂量的快速计算评价。为保证评价准确性, 需要对核电站地区人口结构和饮食结构资料进行定期调查。

关键词: 核和辐射; 卫生监测; 内照射剂量; 估算软件

Establishment of a Public Internal Radiation Dose Estimation Software for Nuclear and Radiation Health Monitoring WANG Jin^{1,2}, YU Ning-le², YANG Xiao-yong², ZHOU Xian-feng², WANG Fu-ru², ZHU Bao-li^{1,2} (1.School of Public Health, Nanjing Medical University, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 2.Jiangsu Provincial Center for Disease Prevention and Control, Nanjing, Jiangsu 210009, China). Address correspondence to ZHU Bao-li, E-mail: zhuhl@jscdc.cn • The authors declare they have no actual or potential competing financial interests.

Abstract: [Objective] To establish an estimation software of internal radiation dose for nuclear and radiation health monitoring. [Methods] Based on the dose estimation methods for internal radiation including ingestion and inhalation in IAEA-TECDOC-1162, a rapid assessment software was developed using POWERBUILDER 11.5 combined with the health background of residents surrounding Jiangsu Tianwan Nuclear Power Plant. [Results] According to the software, the collective committed effective dose of ^{137}Cs in food within a radius of 30 km around Jiangsu Tianwan Nuclear Power Plant was 5.05 man·mSv in 2010; the maximum effective dose of ^{131}I in vegetables was 2.2×10^{-4} mSv in Nanjing during Japan's nuclear leakage accident in 2011. [Conclusion] The software could be applied to fast evaluation of public internal radiation effective dose combining both ingestion and inhalation pathways, whenever the nuclear power plant is under normal operation or emergency condition. In order to ensure the accuracy of evaluation, more regular updates of population structure and dietary information around the nuclear power plant are expected.

Key Words: nuclear and radiation; health monitoring; internal radiation dose; estimation software

公众内照射剂量评价是核事故医学应急处理过程中的重要一环。国际原子能机构 1162 号技术出版物 (IAEA-TECDOC-1162) 《Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency》^[1]中有针对性的给出了核和辐射应急状态下评估和响应通用程序, 对内照射剂量估算程序进行了简化, 采用剂量系数法对核和辐射突发事件中公众内照射剂量进行快速估算。其中吸入途径主要考虑公众吸入烟羽中的放射性核素, 以及沉积在地面的放射性核素通过再悬浮, 公众吸入后形成的内照

射。食入途径主要考虑放射性核素沉积在食物表面或水中, 以及污染土壤或水中的放射性核素进入农作物被公众食入形成的内照射。江苏连云港田湾核电站是中俄两国合作建立的压水堆核电站。一期工程两台 106 万千瓦机组先后于 2006 年、2007 年建成投产, 目前取得了良好的经济与社会效益。3、4、5、6 号机组也已列入建设计划。田湾核电站 30 km 半径范围内人口总数为 108.3 万, 常住人口 99.5 万。虽然核电是清洁安全的能源, 但潜在的风险也不容忽视。1986 年前苏联切尔诺贝利核电站事故, 其周围居民受到的内照射最为重要的途径为食用受到 ^{131}I 和 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 污染的牛奶及其他食品。2011 年 3 月日本地震福岛第一核电站放射性物质外泄, 同样导致周围环境与各类食物受到放射性物质污染。在核电站突发事件情况下, 放射性核素可通过多种途径进入人体造成体内污染。2003 年 11 月至 2004 年 4 月, 本课题组对田湾核电站 30 km 半径范围内的居民健康状况进行调查, 建立核电站周围食品饮用水监测网络。通过积累核电站周围人群健康背景资料和公众膳食结构, 即可在

[基金项目] 江苏省科技支撑计划社会发展项目 (编号: BE2009684); “十二五” 科教兴卫工程“突发公共卫生事件应急处置创新平台” (编号: ZX21109)

[作者简介] 王进 (1970—), 男, 硕士生, 高级工程师; 研究方向: 辐射防护检测与评价; E-mail: jin.wang@163.com

[通信作者] 朱宝立主任医师, E-mail: zhuhl@jscdc.cn

[作者单位] 1. 南京医科大学公共卫生学院, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省疾病预防控制中心, 江苏 南京 210009

核电站正常运行期间及发生事故时,对公众内照射剂量的快速评价提供依据。本研究拟使用 POWERBUILDER 11.5,运用 IAEA-TECDOC-1162 出版物中有关食入和吸入途径内照射剂量估算方法,结合田湾核电站周围人群健康背景资料编制公众内照射剂量估算软件。

1 材料与方法

1.1 内照射剂量计算方法

食入和吸入途径公众待积有效剂量计算方法分别见公式(1)、公式(2)。根据应急工作的需要,把群体分成若干小的群体组,假设群体组的照射是均匀的、各群体组内各年龄段公众的生活与饮食习惯、食物摄入量和空气吸入量一致。集体有效剂量计算公式见公式(3)。由于核事故早期 ^{131}I 是主要被关注的核素,同时放射性碘吸入后主要蓄积在人体甲状腺部位,因此另外增加甲状腺待积当量剂量计算公式,见公式(4)。

$$E_{\text{ing}} = \sum_{i=1}^n C_{f,i} \cdot U_f \cdot DI_{f,i} \cdot CF_{5,i} \quad (1)$$

$$E_{\text{inh}} = \sum_{i=1}^n \bar{C}_{a,i} \cdot CF_{2,i} \cdot T_e \quad (2)$$

$$S_E = \sum_{j=1}^n (E_{\text{ing}} + E_{\text{inh}})_j \cdot N_j \quad (3)$$

$$H_{\text{inh}} = \sum_{i=1}^n C_{a,i} \cdot CF_{1,i} \cdot T_e \quad (4)$$

公式(1)中, E_{ing} 为食入途径待积有效剂量, mSv; $C_{f,i}$ 为经过处理的食物或土壤 f 中放射性核素 i 的活度浓度, kBq/kg; U_f 为所关注的居民食物 f 每天消费量, kg/d; $CF_{5,i}$ 为放射性核素的剂量转换系数(摄入单位活度放射性核素 i 产生的食入待积有效剂量), mSv/kBq; $DI_{f,i}$ 为食入的天数; n 为放射性核素数量。

公式(2)中, E_{inh} 为吸入途径待积有效剂量, mSv; $\bar{C}_{a,i}$ 为放射性核素 i 在空气中的平均活度浓度, kBq/m³; $CF_{2,i}$ 为放射性核素 i 的剂量转换系数, (mSv·h)·(kBq·m⁻³); T_e 为受烟羽的照射时间, h; n 为放射性核素数量。

公式(3)中, N_j 为第 j 个群体组中的人数。 S_E 为集体有效剂量,表示为吸入和食入途径致公众内照射待积有效剂量与群体组中人数的乘积。

公式(4)与公式(2)类似,主要差别为此处为甲状腺当量剂量计算公式, $C_{a,i}$ 为放射性碘同位素 i 在空气中的平均活度浓度, kBq/m³; $CF_{1,i}$ 为放射性碘同位素 i 的剂量转换系数, (mSv·h)·(kBq·m⁻³)。

估算田湾核电站致公众内照射剂量时,采用2004年居民膳食结构和人口调查数据,假设群体组内公众人数在一定时间阶段内保持不变,也可以使用调查数据乘以居民自然增长率和各年龄段人数比例取得相关年份的各年龄段总人数。从保守估算公众内照射剂量的角度考虑,在核电站常年下风向选择主要的食品监测采样点,同时假设核电站周围公众使用本地的农作物为食品原料。

1.2 数据库

由于采用的内照射剂量计算涉及到食品、饮用水和空气中

各种放射性核素的监测结果,同时涉及公众的膳食消费量、人的呼吸率、人口分布等基础数据,因此建立相关数据库。

剂量转换系数数据库:包括“公众成员食入单位摄入量所致待积有效剂量系数表”、“公众成员吸入单位摄入量所致待积有效剂量系数表”和“吸入途径甲状腺当量剂量转换系数表”。

根据GB 18871—2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》附录B中表B6和表B7^[2]建立“公众成员食入单位摄入量所致待积有效剂量系数表”和“公众成员吸入单位摄入量所致待积有效剂量系数表”。2张数据表中放射性核素的选取参考联合国原子辐射效应科学委员会(United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, UNSCEAR)1982出版物有关大气层核试验关注的主要核素^[3]、UNSCEAR 1993出版物压水堆及沸水堆液态流出物和气态流出物中主要核素^[4]、UNSCEAR 2008出版物有关切尔诺贝利核电站事故堆芯释放的放射性核素^[5],最终确定76种放射性核素,按<1岁、1~2岁、2~7岁、7~12岁、12~17岁及17岁以上共计6个年龄段给出剂量转换系数。根据IAEA-TECDOC-1162出版物建立“吸入途径甲状腺当量剂量转换系数表”,确定9种放射性核素,按7~12岁儿童和17岁以上成人2个年龄段给出剂量转换系数。

公众调查数据库:包括地区人口构成表、公众食物摄入量表和公众空气呼吸率表。地区人口构成表给出距核电站或事故地点不同距离的人口数分布;公众食物摄入量表主要依据2003年11月至2004年4月的田湾核电站周围人群健康背景资料^[6-7],包括人口类别、地区范围、食物类别、不同年龄段(7~12岁、12~17岁、成人)的食物消费量等资料;公众呼吸率表参考ICRP71号出版物中不同年龄段不同运动状态下呼吸率标准值,确定轻体力活动状态下6个年龄段公众的呼吸率^[8]。

1.3 软件设计

软件采用POWERBUILDER 11.5开发,设计流程图(图1)。设计原则尽可能减少用户数据输入工作量。使用时只需输入核电站有关地理位置、采样地点信息和样品(食品、空气、水)放射性核素比活度监测结果,系统按输入的数据自动调用剂量转换系数数据库和公众调查数据库,计算出不同样品中不同放射性核素致公众内照射待积有效剂量或甲状腺待积当量剂量。

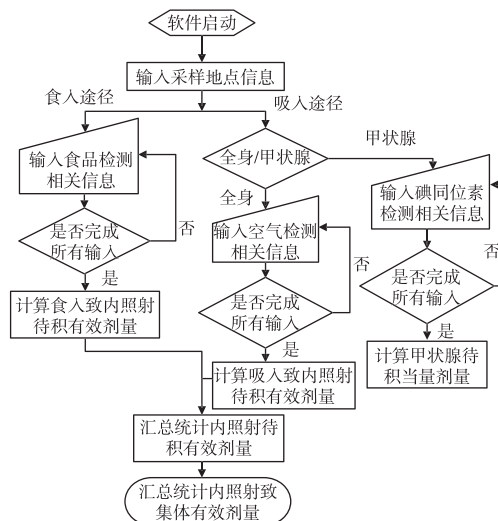


图1 核电站周围公众内照射剂量估算软件设计流程图

2 结果

2.1 根据设计流程完成本软件开发

软件附带安装说明文件,可在 Windows 7 或 Windows XP 系统中使用。按照安装说明文件步骤完成安装工作后,在系统开始菜单的程序组菜单中启动软件或在桌面运行软件快捷方式,即可打开软件界面进行计算工作。

采样数据录入演示,见图 2。针对一个采样点可能存在的多种样品采集以及多种放射性核素监测结果录入,软件可做到完成第一组数据输入保存后,用户直接修改其中变化部分并另外保存即可完成其余数据的录入,提高数据输入效率。同时,为完成内照射待积有效剂量及当量剂量的计算,软件设计有检验功能,当缺少相关参数输入时,系统会提示输入该参数,直至所有参数完成验证,方可进行计算。

查询和统计功能演示,见图 3。统计功能包括样品比活度分析、公众内照射有效剂量分析、甲状腺当量剂量分析、公众集体剂量汇总分析。查询功能可实现按采样信息、核素、食物、年龄段等相关需要,开展输入信息查询。同时用户可以自由组合各种查询条件,以获得需要的查询信息。

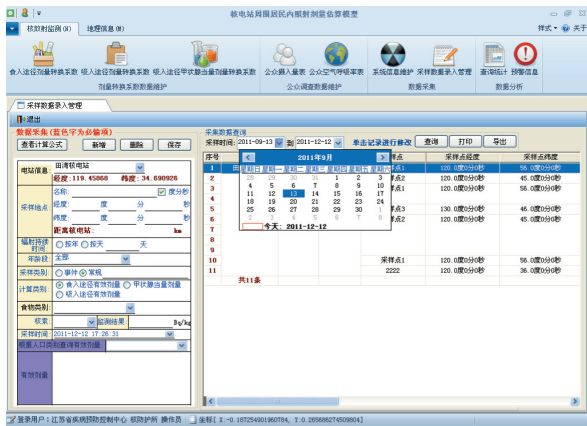


图 2 采样数据录入管理演示



图 3 查询和统计功能演示

2.2 软件功能的扩展

软件可实现核电站与采样点之间距离的自动计算,只需输入采样点全球定位系统(GPS)坐标,软件将结合核电站核岛机组坐标计算出直线距离,调用相关距离位置人口资料进行内

照射待积有效剂量和集体有效剂量的计算分析。同时通过网络地理信息系统展示采样点和核电站的相关地理信息。

软件研制过程中设置了公众内照射待积有效剂量黄色和红色预警。以公众年有效剂量限值 1 mSv 的 1/10 设置指导水平 0.1 mSv 作为黄色预警阈值,同时参考《核与放射突发事件医学救援小分队行动导则》^[9]设置干预水平 5 mSv 作为红色预警阈值。软件运行时,可自动汇总不同样品各种核素的监测结果,给出不同年龄段公众的内照射待积有效剂量黄色和红色预警。

此外,软件还扩展了数据导入和导出功能。用户可将单机版资料导出或导入,供其他电脑使用,避免了重复输入。

2.3 应用

2.3.1 田湾核电站周围食品放射性水平监测 根据 2010 年田湾核电站食品饮用水放射性水平监测方案,开展核电站裂变产物 γ 放射性核素监测。其中宿城乡和云山乡作为 0~10 km 烟羽应急计划区采样点,中云乡、朝阳镇、宋庄镇和东辛农场作为食入应急计划区采样点。经检测,核电站 30 km 半径范围内食品样品中测出微量的人工放射性核素 ^{137}Cs ,使用本软件进行数据汇总分析。各采样点监测结果见表 1,各年龄段人群食物摄入量见表 2,核电站周围人口分布见表 3。

表 1 各采样点食品中 ^{137}Cs 活度浓度监测结果

采样点名称	距田湾核电站距离(km)	样品类别	监测结果(Bq/kg)
宿城乡	4.8	谷物	3.3×10^{-4}
云山乡	7.2	叶类蔬菜	4.3×10^{-4}
中云乡	12.4	谷物	4.2×10^{-4}
中云乡	12.4	叶类蔬菜	3.2×10^{-3}
朝阳镇	14.2	肉制品	1.3×10^{-3}
宋庄镇	23.5	鱼类	1.7×10^{-3}
东辛农场	23.9	奶制品	3.1×10^{-4}

表 2 田湾核电站周围不同年龄段公众食物摄入量调查结果(kg/年)

食物类别	食物摄入量		
	7~12岁	13~17岁	>17岁(成人)
奶制品	14.0	13.4	12.6
谷物	177.2	215.4	274.7
肉制品	42.3	66.0	69.3
叶类蔬菜	88.2	100.3	120.5
鱼类	19.9	33.2	35.1

表 3 田湾核电站周围人口分布

距离(km)	人口数		
	7~12岁	13~17岁	>17岁(成人)
0~10	6901	6806	72409
11~30	48067	47409	504377

使用本软件进行公众内照射待积有效剂量和各地区公众集体剂量分析,结果见表 4。由表 4 可见,公众待积年有效剂量最高为 8.5×10^{-6} mSv,远低于剂量限值 1 mSv 的 1/10。2010 年度田湾核电站厂外不同食品中 ^{137}Cs 活度浓度致 0~10 km 和 11~30 km 范围内公众内照射集体有效剂量分别为 0.15 人·mSv 和 4.9 人·mSv,合计 5.05 人·mSv。

表 4 公众待积有效剂量及集体有效剂量汇总分析

距田湾 核电站距离	待积有效剂量 (mSv)			集体有效剂量 (人·mSv)			
	7~12 岁	13~17 岁	>17 岁	7~12 岁	13~17 岁	>17 岁	合计
0~10km	9.6×10^{-7}	1.5×10^{-6}	1.9×10^{-6}	6.7×10^{-3}	1.0×10^{-2}	0.13	0.15
11~30km	4.5×10^{-6}	7.3×10^{-6}	8.5×10^{-6}	0.22	0.34	4.30	4.90

2.3.2 应对日本核应急 2011 年 3 月 12 日日本地震福岛第一核电站放射性物质外泄, 3 月 16 日起江苏省疾控系统开展应对核泄漏食品和饮用水放射性监测。4 月 7 日至 4 月 18 日监测到南京等地莴苣叶及菠菜叶含 ^{131}I , 活度浓度 1 Bq/kg。使用本软件进行公众内照射待积有效剂量估算。以持续时间 12d, 使用 GBZ/T 200.4—2009^[10] 中中国人学龄前、儿童期、少年期和成人期的蔬菜摄入量, 计算内照射待积有效剂量, 分别为 2.2×10^{-4} 、 1.6×10^{-4} 、 1.5×10^{-4} 、 9.5×10^{-5} mSv, 学龄前儿童内照射待积有效剂量高于成人结果。

3 讨论

核和辐射突发事件内照射剂量评价, 涉及到评价程序、监测方法和剂量评价等多方面内容, 国内外进行了广泛的研究。刘长安^[11]和 YOUNGMAN^[12]开发编制了基于个体的体外直接测量估算伤员内照射剂量的软件。本软件主要侧重于群体的内照射剂量评价分析。根据《卫生部核事故和辐射事故卫生应急预案》^[13], 地方卫生应急响应工作包括了饮用水和食品的放射性水平监测, 并需要提出饮用水和食品能否饮用和食用的建议。通过调查田湾核电站周围饮用水和食品放射性水平, 结合公众调查数据库中饮食结构、人口结构等相关信息, 本软件能快速估算田湾核电站周围食品放射性水平致公众内照射待积有效剂量。运用人工计算进行结果验证, 结果显示符合较好, 相对偏差小于 1%。本软件可快速估算公众内照射待积有效剂量和集体剂量, 简化计算, 提高了计算速度和准确性, 便于行政部门进行决策, 同时可以对核电站后果影响评价提供依据。

使用食品和饮用水放射性水平监测数据进行公众内照射剂量评价, 需要开展样品快速监测方法的研究, 以提高监测的可靠性和准确性。同时需要对核电站地区人口结构和饮食结构资料进行定期复查, 确保公众内照射剂量评价资料的完整性和准确性。

本软件可在国内具有或正在建设核电站的省份推广使用, 运用于核电站周围公众内照射剂量评价。在核电站可研阶段, 卫生部门可通过核电站周围放射性水平本底调查、公众食物摄入量和人口构成调查, 取得核电站周围公众内照射剂量估算的基础数据。同时, 也可以通过查阅核电站可研阶段环境影响报告书取得人口构成和公众食物摄入量的调查数据。

下一步工作应结合个体体外直接测量或生物样品监测的

内照射剂量评价, 通过地理分析系统开展空间数据分析和展示, 组成完整的核和辐射卫生应急公众内照射剂量评价体系。

(志谢: 在本软件开发和论文撰写过程中, 对苏州大学李士骏教授给予的支持和帮助, 深表感谢!)

·作者声明本文无实际或潜在的利益冲突。

参考文献:

- [1] IAEA. IAEA-TECDOC-1162, Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency [R]. Vienna: IAEA, 2000.
- [2] 中华人民共和国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基本标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [3] UNSCEAR. Ionizing radiation sources and biological effects (UNSCEAR 1982 report) [R]. New York: UNSCEAR, 1982.
- [4] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation (UNSCEAR 1993 report) [R]. New York: UNSCEAR, 1993.
- [5] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation (UNSCEAR 2008 report to the General Assembly with Scientific Annexes) [R]. New York: UNSCEAR, 2011.
- [6] 周献锋, 余宁乐. 田湾核电站运行前周围居民健康调查表的设计 [J]. 中国辐射卫生, 2010, 19(3): 309-310.
- [7] 杨广泽, 朱磷扬, 余宁乐. 田湾核电站周围居民健康状况调查与评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [8] ICRP. Age-dependent Doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4, Inhalation dose Coefficients. ICRP Publication 71 [R]. Oxford: Pergamon Press, 1996.
- [9] 刘长安, 刘英, 苏旭. 核与放射突发事件医学救援小分队行动导则 [M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2005.
- [10] 中华人民共和国卫生部. GBZ/T 200.4—2009 辐射防护参考人第四部分: 膳食组成和元素摄入量 [S]. 北京: 人民卫生出版社, 2009.
- [11] 刘长安, 张庆, 徐翠华. 用于核或放射应急的甲状腺剂量估算软件的研制 [J]. 中国辐射卫生, 2006, 15(4): 399-401.
- [12] YOUNGMAN MJ, DAVIS KE, ETHERINGTON G, et al. ERIDAS, a computer program for rapid calculation of internal doses from measurements of people in an emergency [J]. Radiat Prot Dosimetry, 2007, 127 (1/2/3/4): 374-377.
- [13] 中华人民共和国卫生部. 卫生部关于印发《卫生部核事故和辐射事故卫生应急预案》的通知 [EB/OL]. (2009-10-27). <http://www.moh.gov.cn/publicfiles/business/htmlfiles/mohbgt/s9514/200910/43212.htm>.

(收稿日期: 2012-02-08)

(英文编审: 金克峙; 编辑: 王晓宇; 校对: 徐新春)