

RESRAD-BIOTA 程序的改进及其应用研究

白晓平

中国核电工程有限公司, 北京 100840

摘要 目前, 电离辐射对生物产生的影响开始受到越来越多的关注, 对生物辐射效应进行评价首先要估算生物所受到的辐射剂量率。RESRAD-BIOTA 程序基于美国能源部 (USDOE) 技术标准 DOE-STD-1153-2002 中的分级 (graded) 方法, 可以计算环境中生物受到的辐射剂量率。针对该程序的不足之处对其进行了改进, 将改进后的程序用于中国某滨海核电厂厂址附近水生生物辐射剂量率的评估中, 并对程序的应用进行了初步研究, 最后讨论了程序应用中需要注意的问题。

关键词 RESRAD-BIOTA 程序; 生物; 辐射影响; 辐射剂量率

中图分类号 Q691.5

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)12-0061-04

Modification and Application of RESRAD-BIOTA Program

BAI Xiaoping

China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100840, China

Abstract At present, the effects of ionizing radiation on biota have not been well studied. The evaluation of radiological dose ratio is the basis in analyzing biological radiation effect. RESRAD-BIOTA program is based on a graded approach of Technical Standard DOE-STD-1153-2002 by U.S. Department of Energy (USDOE), and can be used to calculate radiological dose ratio of biota in nuclear environment. RESRAD-BIOTA program is modified to evaluate radiation dose rate of radioactive liquid for aquatic biota near a Chinese nuclear power plant in coastal area, and the results are analyzed. The future applications of the program are discussed.

Keywords RESRAD-BIOTA program; biota; radiological impact; radiation dose rate

0 引言

核设施正常运行时会向环境排放气态和液态放射性流出物, 这些放射性流出物会对周围环境产生一定的影响。以往评价核设施运行时对环境的影响主要关注对工作人员和

公众造成的辐射影响, 而对非人类物种的影响关注较少。近年来, 随着辐射防护概念的不断发展和对非人类物种保护要求的不断提高, 环境中生物受到的辐射影响已经逐渐引起人们的重视。

很多国际组织和政府部门都开展了非人类物种辐射防护的相关研究。国际放射防护委员会在 2000 年成立了一个任务组, 负责研究非人类物种放射防护问题, 并于 2002 年出版了第 91 号出版物《评价非人类物种电离辐射影响的框架》^[1]。国际原子能机构 (IAEA) 从 20 世纪 70 年代就开展了一系列放射性对水生生物和生态系统影响的研究^[2-4], 之后出版了“在现有辐射防护标准的水平上电离辐射对植物和动物的效应”等一系列报告^[5-7]。联合国原子辐射效应科学委员会 (UNSCEAR) 对环境中植物和动物可能受到的辐射效应进行了详细描述和系统评价^[8]。欧洲委员会在 2000-2004 年完成了电离辐射对欧洲生态系统环境影响进行评价的 FASSET 框架项目, 2004-2007 年完成了对电离辐射污染物的环境危险进行评价和管理的 ERICA 框架项目^[9-10]。USDOE 提出了评价水生和陆生生物辐射影响的 graded 方法^[11]。

从 20 世纪 80 年代开始, 中国的一些科研院所针对辐射生物效应和放射性核素通过环境介质转移到生物体中的行为、转移参数等开展了相关的理论和实验研究^[12-16]。但是, 到目前为止, 中国学者关于环境生物所受辐射剂量计算和评价的研究相对较少, 该研究仍处于起步阶段。

RESRAD-BIOTA 程序^[17]是一个基于 graded 方法的模型软件, 可以用来估算水生和陆生生物所受到的辐射剂量率。该程序实施简单, 通用性和适用性较强, 是现阶段在中国值

收稿日期: 2009-03-27

作者简介: 白晓平, 工程师, 研究方向为辐射防护与环境影响评价等设计和研究, 电子信箱: bxp03@126.com

得推荐的一个计算程序。但是,在使用过程中发现该程序存在着一些问题。程序要求输入的是核素的浓度数据,但是一般情况下首先已知的是核素的年排放量而不是浓度;程序计算后的结果以网页的形式显示,不便于使用者直接应用并对结果进行整理计算;另外,程序中某些参数的缺省值不能完全满足使用者的要求,需要进行修正。针对这些情况,本研究对程序进行了扩展和改进,并以中国某滨海核电厂为例,对程序的应用进行了研究。

1 RESRAD-BIOTA 程序简介

程序以 graded 方法的 3 个步骤作为技术基础,采用了 3 级筛选方法。具体来讲,graded 方法的第 1 步是数据采集,主要是收集评价区域内的源、受体、照射途径、环境介质等资料。第 2 步是一般筛选(一级筛选),将介质中的最大核素浓度值与由辐射剂量限值导出的参考浓度(称为一般 BCG)进行比较,判断生物在接受了预期最大剂量时是否能够保证其安全;如果不安全就需要继续进一步的筛选。第 3 步是分析,首先使用特定厂址的参数和条件,将核素浓度与一般 BCG 进行比较,并估算生物受到的辐射剂量率(二级筛选);在特定厂址分析中,应用生物体质量和内照射剂量相关的动力学模型,通过对与生物内照射剂量有关参数的修正来代表特定厂址和生物的特征,将核素浓度与特定厂址的 BCG 进行比较,并估算特定厂址的生物受到的辐射剂量率(三级筛选);最后是应用生态风险的概念对特定厂址的生物剂量进行评估。RESRAD-BIOTA 程序的 3 级筛选与 graded 方法 3 个步骤的对应关系见图 1。

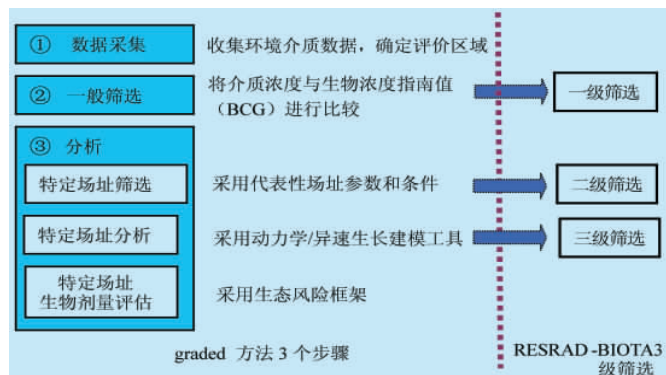


图 1 graded 方法 3 个步骤与 RESRAD-BIOTA 程序 3 级筛选的对应关系

Fig. 1 Three-level screening of RESRAD-BIOTA corresponding to the three-step process of graded approach

程序在进行筛选评估时,对于第 i 个核素 ($i=1, 2, \dots, N$) 在水中的浓度 Cw_i 和相应的 $BCGw_i$,以及在沉积物(或土壤)中的浓度 Cs_i 和相应的 $BCGs_i$,筛选的依据为

$$\sum_{i=1}^N \left(\frac{Cw_i}{BCGw_i} + \frac{Cs_i}{BCGs_i} \right) < 1.0 \quad (1)$$

其中,BCG 称为生物浓度指导限值,它是由生物的剂量率限值反推出各核素在不同介质中对不同生物的浓度限值,与核素、介质、生物种类等都有关系。目前,在程序最新的 1.2 版本中主要考虑了 46 个核素的计算。

程序在一、二级筛选中,根据生物栖息环境的不同,将生物分为水生生物和陆生生物,水生生物分为水生动物和滨岸动物,陆生生物分为陆生植物和陆生动物;在三级筛选中,根据生物的外形、习性、不同的生命阶段等特征将生物分为 8 个几何类别,在同一类别中的生物几何和新陈代谢的相关参数被认为都是相同的。

2 程序的扩展和改进

在程序使用过程中,核素的浓度作为一个已知数据输入程序以进行后续的筛选和计算。一般来讲,在实际工作中比较容易获得的是核素的年排放量数据。为了将核素的年排放量数据直接应用到程序中,本研究将核素的年排放量与核素浓度之间的计算加入到程序中,从而避免了在程序外进行额外的计算。

对于使用者而言,希望程序的计算结果便于使用并可以根据需要对计算结果进行数据处理或作图。基于此,本研究将程序的计算结果直接导入到 Excel 文档中,方便了用户的使用。

程序中默认的核素分配系数(K_d)是程序的开发单位根据当地的现场试验获得的数据,并不能完全代表各国的实际情况。为此,本研究对程序中 K_d 值进行了修正,采用了 IAEA19 号报告推荐的核素在海水(或淡水)中悬浮物的 K_d 值,并且一般认为核素在沉积物中的 K_d 值为悬浮物的 1/10。程序中默认的水生生物剂量率限值也根据需要修正为 USDOE 和 IAEA 推荐的 10 mGy/d。

基于上述内容,本研究在 RESRAD-BIOTA 程序的基础上重新编制了生物辐射影响计算程序,图 2 给出了生物辐射影响计算程序 3 级筛选中源项输入的程序界面。其中,生物剂量率计算中不同核素不同生物的剂量率转换因子采用原程序给出的缺省值。



图 2 生物辐射影响计算程序界面

Fig. 2 Program interface for biota radiological effects

3 程序的应用和分析

以中国某滨海核电厂的数据为例,采用改进后的程序计算液态放射性流出物对厂址附近水生生物的辐射影响。为了能够结合厂址的特征参数和条件,详细反映厂址附近海域水生生物所受辐射影响的有关情况,主要进行了3级筛选。根据对该厂址附近海域水生生物调查的结果以及程序对生物种类的划分情况,厂址附近主要有依据上文划分的第1类~第5类水生动物和第3类滨岸动物。计算时,以核电厂为中心,将厂址附近海域划分为近区(0~5 km)海域和远区(5~80 km)海域。由于远区海域海水的稀释因子小于近区海域海水的稀释因子,因此远区海域的剂量率计算结果应该小于近区海域的计算结果。如果近区海域的剂量率结果满足要求,那

么远区海域一定也满足要求,所以,这里只讨论近区海域的情况。

由于程序只考虑了46个核素,因此核电厂液态流出物排放源项中的核素不能全部被计算。首先讨论程序可计算的核素代表性和保守性问题。以M310机型为例,2台机组在运行状态下液态途径设计排放源项见表1。表1中左边一列13个核素是程序可计算的核素,其余27个核素相应的排放量占总排放量的0.033%,所占份额很小,可以忽略这27个核素对计算结果的影响。因此,程序基本可以满足核电厂周围水生生物辐射影响评价代表性和保守性的要求。

定义水生生物的危险商 D 为

$$D_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{BCG_{i,j}}$$

表 1 2 台 M310 机组在运行状态下液态流出物的年排放量

Table 1 Radioactive liquid effluent annual discharge of two M310 units under normal operation

核素	年排放量/(Bq·a ⁻¹)	核素	年排放量/(Bq·a ⁻¹)	核素	年排放量/(Bq·a ⁻¹)
Sr-90	1.24×10 ⁶	Ru-103	6.39×10 ⁶	I-135	1.22×10 ⁹
Zr-95	5.38×10 ⁶	Ru-106	8.59×10 ⁵	Y-90	8.79×10 ⁴
I-131	3.29×10 ¹⁰	Te-131m	7.20×10 ⁵	Cs-136	1.30×10 ⁹
Cs-134	8.16×10 ⁹	Te-131	5.77×10 ⁶	Sr-92	1.02×10 ⁷
Cs-137	9.95×10 ⁹	Te-132	1.38×10 ⁷	Sb-124	3.86×10 ⁹
Ba-140	1.30×10 ⁸	Te-134	1.19×10 ⁷	Sr-91	9.63×10 ⁶
Ce-141	6.77×10 ⁶	Nb-95	2.83×10 ⁶	La-140	5.10×10 ⁵
Ce-144	2.26×10 ⁶	I-132	8.94×10 ⁸	Tc-99m	5.12×10 ⁶
Cr-51	1.42×10 ⁹	I-133	3.91×10 ⁹	Ce-143	1.65×10 ⁶
Co-58	2.42×10 ¹⁰	I-134	1.13×10 ⁸	Pr-143	3.65×10 ⁶
Co-60	3.76×10 ⁹	Y-91	2.90×10 ⁶	Sr-89	8.49×10 ⁷
H-3	4.01×10 ¹³	Mo-99	1.20×10 ⁸	Mn-54	5.48×10 ⁸
C-14	5.50×10 ¹⁰	Pr-144	2.04×10 ⁶	Fe-59	1.82×10 ⁸
		Ag-110m	1.02×10 ⁹		

其中, $C_{i,j}$ 为核素 i 在介质 j 中的实际浓度, $BCG_{i,j}$ 为核素 i 在介质 j 中的参考浓度, $D_{i,j}$ 反映了介质 j 中核素 i 对该种水生生物的危险程度。图3为近区海域中各核素对各类水生生物造成的危险商的比较。图4为近区海域中各核素对各类水生生物造成的剂量率的比较。表2列出了近区海域放射性核素对不同水生生物造成的总危险商和总剂量率结果。

表 2 近区海域放射性核素对不同水生生物造成的总危险商和总剂量率

Table 2 List of total danger ratio and dose ratio of each kind of aquatic biota induced by each radionuclide in the sea area 0 to 5 km from the plant

生物种类	总危险商	总剂量率/(Gy·d ⁻¹)
第1类水生动物	1.25×10 ⁻⁵	1.25×10 ⁻⁷
第2类水生动物	1.30×10 ⁻⁵	1.30×10 ⁻⁷
第3类水生动物	1.32×10 ⁻⁵	1.32×10 ⁻⁷
第4类水生动物	1.35×10 ⁻⁵	1.35×10 ⁻⁷
第5类水生动物	1.40×10 ⁻⁵	1.40×10 ⁻⁷
第3类滨岸动物	1.73×10 ⁻⁵	1.73×10 ⁻⁷

由图3和图4可知,在近区海域中,⁵⁸Co对6类水生生物造成的危险商(<1×10⁻⁵)和剂量率(<1×10⁻⁷ Gy/d)最大,其次是¹⁴C。由表2可知,放射性核素对第3类滨岸动物造成的总危

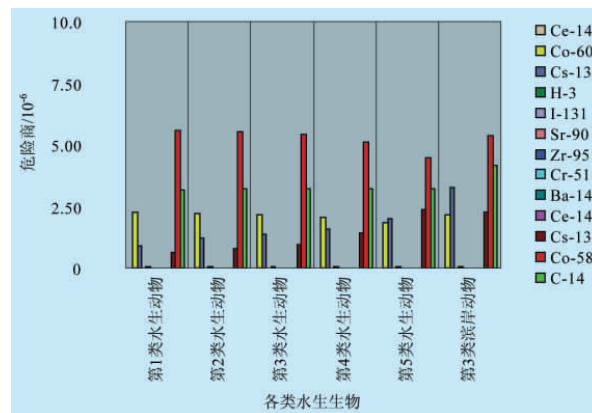


图 3 近区海域各核素对各类水生生物造成的危险商

Fig. 3 Danger ratio of each kind of aquatic biota induced by each radionuclide in the sea area 0 to 5 km from the plant

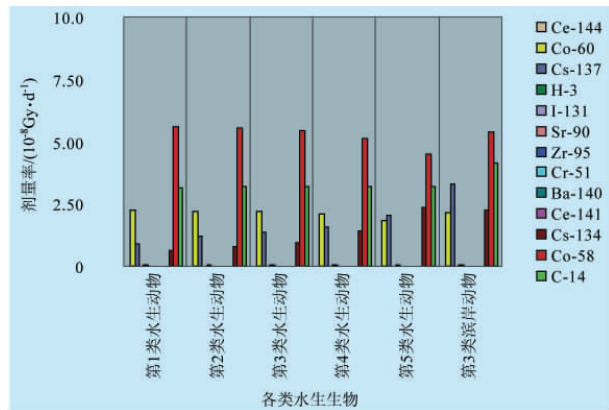


图4 近区海域各核素对各类水生生物造成的剂量率

Fig. 4 Dose ratio of each kind of aquatic biota induced by each radionuclide in the sea area 0 to 5 km from the plant

险商(<1)最大,并且对第3类滨岸动物造成的总剂量率也最大,为 1.73×10^{-7} Gy/d,该值小于IAEA及USDOE推荐的对水生生物的剂量率限值(10^{-2} Gy/d)。因此,可以推断该滨海核电厂正常运行时,厂址附近水生生物不会受到威胁,是安全的。

4 结论

1) 本研究主要针对RESRAD-BIOTA程序的不足对其进行了改进,将改进后的程序应用于中国某滨海核电厂厂址附近水生生物的辐射影响评价中,结果表明改进后的程序可以大大提高程序使用者的工作效率。

2) 程序目前可以进行46个核素的计算,不能根据实际需要增加相应的核素,使程序的应用受到了一定的局限性。

3) 对于像秦山核电基地的多堆厂址而言,如何使程序的计算结果更真实地反映多堆厂址周围生物所受辐射影响,是下一步应关注的问题。

4) 目前我们进行生物剂量评价时,所采用的评价准则是IAEA以及USDOE推荐的保护标准,这些标准不一定完全适合中国。因此,中国需要尽快研究并制定相关标准,以满足环境影响评价的要求。

参考文献 (References)

- [1] Valentin J. A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species, ICRP Publication 91 [J]. *Annals of the ICRP*, 2003, 33(3): 201-270.
- [2] IAEA. Effects of ionizing radiation on aquatic organisms and ecosystems, IAEA Technical reports series No.172[R]. Vienna: IAEA, 1976.
- [3] Woodhead D S. Methods of dosimetry for aquatic organisms. In: Methodology for assessing impacts of radioactivity in aquatic ecosystems, IAEA Technical report No 190 [R]. Vienna: IAEA, 1979.
- [4] IAEA. Assessing the impact of deep sea disposal of low level radioactive waste on living marine resources, IAEA Technical reports series No.288 [R]. Vienna: IAEA, 1988.
- [5] IAEA. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards, IAEA Technical

reports series No 332[R]. Vienna: IAEA, 1992.

- [6] IAEA. Protection of the environment from the effects of ionizing radiation, IAEA TECDOC-1091[R]. Vienna: IAEA, 1999.
- [7] IAEA. Ethical considerations in protection of the environment from the effects of ionizing radiation, IAEA TECDOC-1270 [R]. Vienna: IAEA, 2002.
- [8] UNSCEAR. Sources and effects of ionising radiation: Report to the general assembly with scientific annex [R]. New York: United Nations, 1996.
- [9] Larsson C M. The FASSET framework for assessment of environmental impact of ionising radiation in European ecosystems: an overview [J]. *Journal of Radiological Protection*, 2004, 24(4A): A1-A12.
- [10] Projects: Simulation modelling: ERICA [EB/OL]. [2009-02-25]. <http://www.facilia.se/projects/erica.asp>.
- [11] US Department of Energy. A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota, DOE-STD-1153-2002 [R]. Washington D C: US Department of Energy, 2002.
- [12] 蔡福龙, 吴晋平, 陈其焕, 等. ^{60}Co 、 ^{137}Cs 在几种海洋生物的浓集问题的初步研究[J]. *海洋学报: 中文版*, 1980(2): 81-93.
Cai Fulong, Wu Jinping, Chen Qihuan, et al. *Acta Oceanologica Sinica: Chinese*, 1980(2): 81-93.
- [13] 蔡福龙, 吴晋平, 林义祥, 等. 几种海洋浮游生物对 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 的浓集[J]. *海洋环境科学*, 1983(1): 28-31.
Cai Fulong, Wu Jinping, Lin Yixiang, et al. *Marine Environmental Science*, 1983(1): 28-31.
- [14] 李淑琴, 戚勇. 水生生物对天然放射性核素浓集作用的调查研究[J]. *能源与环境*, 1991, 7(3): 18-27.
Li Shuqin, Qi yong. *Energy and Environment*, 1991, 7(3): 18-27.
- [15] 商照荣, 赵文虎. ^{147}Pm 在鲤鱼体内的分布动力学 [J]. *核农学通报*, 1995(3): 34-37.
Shang Zhaorong, Zhao Wenhui. *Journal of Nuclear-Agricultural Sciences*, 1995(3): 34-37.
- [16] 秦苏云, 李淑琴, 周彩云, 等. ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Po 、天然铀和 ^{226}Ra 在淡水生物中的浓集因子[J]. *辐射防护*, 1995, 15(5): 330-337.
Qin Suyun, Li Shuqin, Zhou Caiyun, et al. *Radiation Protection*, 1995, 15(5): 330-337.
- [17] US Department of Energy. User's guide, RESRAD-BIOTA: A tool for implementing a grade approach to biota dose evaluation, ISCORS TECHNICAL REPORT 2004-02 [R]. Washington D C: US Department of Energy, 2004.

(责任编辑 赵佳)

《科技导报》“研究论文”栏目征稿

《科技导报》以发表国内外科学技术各学科专业原创性学术论文为主,同时刊登阶段性最新科研成果报告,以及国内外重大科技新闻,快速、全方位、高密度、大容量提供科技信息。“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。本栏目欢迎广大一线科技工作者投稿。投稿网址: www.kjdb.org; 投稿邮箱: kjdbbjb@cast.org.cn。