

水生生物辐射影响评价软件 ERICA 版本 变化分析及工程应用

魏其铭, 杜红燕, 白晓平

(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 介绍了水生生物辐射影响评价软件 ERICA 程序的计算原理及评价准则, 分析了程序新版本 ERICA1.2 与上一版本 ERICA1.0 相比的主要变化, 并以我国某压水堆核电厂厂址为例, 分别采用程序 ERICA 1.0 版和 1.2 版分析该电厂正常运行工况下液态流出物排放对厂址附近水生生物的辐射影响。结果表明, 使用程序的两个版本计算该电厂两台机组正常运行时的液态流出物对厂址附近水生生物的影响都是可接受的, 厂址附近水生生物是安全的。

关键词: ERICA 程序; 版本; 核电厂; 液态流出物; 水生生物; 辐射影响

中图分类号: R144.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)04-0147-04

Analysis and Engineering Application of Differences of Aquatic Organisms Radiological Impact Software ERICA Code Version

WEI Qiming, DU Hongyan, BAI Xiaoping

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

Abstract: The calculation principle and evaluation standard of the aquatic organisms' radiological impact software-ERICA code were introduced in this paper, and the differences of 1.0 version and 1.2 version were compared. The radiological impact of aquatic organisms when the nuclear power plant operates normally was calculated and evaluated through ERICA code 1.2 version and 1.0 version separately. The result shows that the radiation effects on aquatic organisms when the nuclear power plant operates normally calculated and evaluated through ERICA code 1.2 version and 1.0 version are all acceptable, the aquatic organisms nearby site are safety.

Key words: ERICA code; version; nuclear power plant; liquid effluent; aquatic organism; radiological impact

0 引言

“非人类物种”的辐射影响日益受到国际社会的关注, 目前国际上开展的环境辐射防护相关领域的工作主要有 FASSET 项目(环境影响评价大纲)^[1]、ERICA 项目(电离污染的环境危险—评价和管理)和 EPIC 项目(北极电离污染的环境保护)等^[2]。我国近年才开始开展了一些通过数学模型、实验室模拟估算放射性核素对非人类物种辐射剂量和生物效应方面的研究、放射生态学转移参数的编评工

作^[3-4], 以及一些非人类物种辐射影响评价模型方面的工作^[5-16]。

ERICA 程序由欧洲委员会开发, 该程序可以计算水生生物所受到的辐射剂量。程序较为常用的计算方法是结合特定场址中的具体生物的放射性生态学参数等, 计算各种生物受到的辐射剂量率。程序计算时采用的放射生态学等数据主要来源于生物辐射效应数据库(FREDERICA)。

1 水生生物剂量率计算原理及评价的筛选水平

1.1 计算原理

1.1.1 核素在悬浮沉积物中的浓度计算

核素在水体中的浓度可以根据液态途径放射性

核素浓度的计算得到,核素在悬浮沉积物中的浓度,可以根据核素的分配系数 K_d 利用如下公式从核素在水中的浓度推导出。

$$C_s = \frac{K_d \times C_w}{1000} \quad (1)$$

式中: C_s 为核素在悬浮沉积物中的浓度, Bq/kg; C_w 为核素在水中的浓度, Bq/m³; K_d 为分配系数, L/kg。

1.1.2 核素在生物体内的浓度计算

核素在生物体内浓度可以利用如下公式从核素在水中的浓度推导出:

$$C_o = \frac{C_w \times CR}{1000} \quad (2)$$

式中: C_o 为核素在生物体内的浓度, Bq/kg; C_w 为核素在水中的浓度, Bq/m³; CR 为浓集因子, (Bq/kg)/(Bq/L)。

1.1.3 水生生物辐射剂量率计算

1.1.3.1 内照射剂量率

$$D_{int}^j = \sum_i C_{o,i}^j \times (DCC_{int,i,low\beta}^j \times w_{low\beta} + DCC_{int,i,\beta/\gamma}^j \times w_{\beta/\gamma} + DCC_{int,i,\alpha}^j \times w_{\alpha}) \quad (3)$$

式中: D_{int}^j 为生物体 j 受到的内照射剂量率, $\mu\text{Gy}/\text{h}$; $C_{o,i}^j$ 为核素 i 在生物体 j 内的浓度, Bq/kg; $DCC_{int,i,low\beta}^j$ 、 $DCC_{int,i,\beta/\gamma}^j$ 、 $DCC_{int,i,\alpha}^j$ 分别为核素 i 在生物体 j 内的低能 β 、 β/γ 、 α 对应的内照射剂量转换因子, $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}/(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})$; $w_{low\beta}$ 、 $w_{\beta/\gamma}$ 、 w_{α} 分别表示低能 β 、 β/γ 、 α 的辐射权重因子。

1.1.3.2 外照射剂量率

$$D_{ext}^j = \sum_i DCC_{ext,i}^j \times [(v_w + 0.5v_{ws} + 0.5v_{ss}) \times C_{w,i} + (0.5v_{ss} + v_s) \times C_{s,i}] \quad (4)$$

式中: D_{ext}^j 为生物体 j 受到的外照射剂量率, $\mu\text{Gy}/\text{h}$; $C_{w,i}$ 为核素 i 在水中的浓度, Bq/L; $C_{s,i}$ 为核素 i 在悬浮沉积物中的浓度, Bq/kg; $DCC_{ext,i}^j$ 为核素 i 在生物体 j 内的外照射剂量转换因子, $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}/(\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1})$; v_w 、 v_{ws} 、 v_{ss} 、 v_s 分别为核素 i 在水中、水面、水底、底泥中的居留因子。

1.1.3.3 生物体 j 受到的总照射剂量率^[18]

$$D^j = D_{int}^j + D_{ext}^j \quad (5)$$

1.2 水生生物辐射影响评价的筛选水平

目前,水生生物剂量率评价的筛选水平国际上尚无统一的数值,我国还没有生物所受辐射影响评

价的相关标准。欧洲委员会(EC)推荐的对水生生物评价筛选值为 $10 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$, 与美国能源局(US-DOE)等的推荐值相比,EC推荐的水生生物评价筛选值较为严格,本次评价采用EC的评价筛选水平,即水生生物所受辐射影响评价筛选值为 $10 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2 ERICA 程序版本的主要变化

ERICA 程序于2014年进行了版本更新,更新后的版本为1.2版,较上一版本2012年的1.0版的主要变化如下:

2.1 核素

ERICA1.0版本中主要考虑了31种元素对应的63个核素,为了与ICRP108号和ICRP114号出版物保持一致,ERICA1.2版本中增加了Ba-140、Ca-45、Cr-51、Cf-252、Ir-192、La-140、Pa-231和Zn-65共8个核素,这8个核素的浓集因子(CR)、剂量率转换因子(DCC)也做了相应的补充和更新。

2.2 参考生物种类

ERICA1.0版本中淡水生态系统的参考生物有两栖动物、深水鱼、鸟类、双壳类软体动物、甲壳类动物、腹足类动物、昆虫幼体、哺乳动物、浅水鱼、浮游动物、浮游植物、导管植物共12种,包含了欧洲几乎所有受保护的淡水生物种类,但在程序使用过程中发现缺少了淡水爬行动物,因为淡水爬行动物在欧洲也是受保护的物种。所以,在ERICA1.2版本参考生物种类中增加了淡水爬行动物,该种类的代表性生物是成年雌性池塘龟,假定其生物体特征为:长18cm、宽12cm、高6cm、质量1kg,因其在河床上生活,所以居留因子为:水底1。此外,双壳类软体动物和腹足类动物名称分别修改为软体动物-双壳类和软体动物-腹足类。

ERICA1.0版本中海洋生态系统的参考生物种类有涉禽、浅水鱼、深海鱼、底栖软体动物、甲壳类动物、大型藻类、哺乳动物、浮游植物、浮游动物、多毛纲动物蠕虫、爬行动物、珊瑚虫(或海葵)、珊瑚虫的群落(或海葵的群落)、导管植物共14类。在ERICA1.2版本参考生物种类中删除了“珊瑚虫的群落(或海葵的群落)”、“涉禽”、“珊瑚虫(或海葵)”、“底栖软体动物”名称,修改为“鸟类”、“珊瑚虫和海葵”和“双壳类软体动物”,这样就与IAEA野生动物转移参数手册(IAEA TRS

479 号报告, 2014 年)保持了一致。此外, “大型藻类”在 1.0 版本中的生物体特征质量为 0.006 5 kg, 该数据来源于早期的 ICRP 参考动植物方法, 但在 ICRP108 号出版物中褐藻的质量为 0.652 kg, 为与 ICRP108 号出版物一致, ERICA1.2 版本中对“大型藻类”的生物体特征质量进行了修改。

另外, ERICA1.2 版本对海洋和淡水水生生态系统中的浮游植物的质量也分别进行了修改, 由 $6.54 \times 10^{-11} \text{kg}$ 和 $2.05 \times 10^{-12} \text{kg}$ 分别修改为 $1.0 \times 10^{-6} \text{kg}$ 。

ERICA1.2 版本中的剂量率转换因子也根据参考生物的生物体特征进行了更新。

2.3 浓集因子(CR)取值

ERICA1.2 版本根据 IAEA 野生动物转移数据库 (IAEA TRS 479 号报告) 中参考生物-放射性核素组的经验值对数据库进行了补充。

ERICA1.0 版数据库中 CR 值有经验数据的仅占 40%, 没有经验数据的 CR 值是通过一系列外推法得到的。ERICA1.2 版中仍需要用外推法来得到缺省的 CR 值, 但是这些外推法根据程序 1.0 版本中外推法的使用评价进行了精简和提炼, 1.0 版与 1.2 版 CR 值外推法对比见表 1。

表 1 1.0 版与 1.2 版 CR 值外推法对比表

Table 1 Comparison of CR Extrapolation Approaches of 1.0 Version and 1.2 Version

序号	1.0 版本	1.2 版本
1	同类分类法	同类参考生物
2	同类参考生物	取自公开刊物
3	取自公开刊物	模型方法
4	特殊活动模型	参考生物同类生物地球化学元素
5	同类生物地球化学法	同类参考生物同类生物地球化学元素
6	同类生物地球化学法和分类法	最大有效值法
7	同类生物地球化学法和参考生物	河口数据
8	异速生长或其他模型法	最大动物值
9	最大有效值法	最大植物值
10	不同生态系统中的参考生物	以上各种方法的组合
11	以上各种方法的组合	—

3 使用 ERICA 程序 1.0 版和 1.2 版对我国某压水堆核电厂厂址附近水生生物的辐射影响估算对比

本节使用 ERICA 程序 1.0 版和 1.2 版分别估算

我国某核电厂在正常运行工况下, 其液态流出物排放对厂址附近水生生物造成的辐射剂量率水平。

由于该厂址为沿海厂址, 所以选用 ERICA 程序中的海洋生态系统, 因程序 1.2 版对部分参考生物种类名称做了修改并且删除了“珊瑚虫的群落(或海葵的群落)”, 为方便对比, 程序 1.0 版计算的结果也采用程序 1.2 版的参考生物种类, 即鸟类、浅水鱼、深海鱼、双壳类软体动物、甲壳类动物、大型藻类、哺乳动物、浮游植物、浮游动物、多毛纲动物蠕虫、爬行动物、珊瑚虫和海葵、导管植物 13 类参考生物。

电厂正常运行时, 使用 ERICA 程序 1.0 版和 1.2 版分别计算厂址半径 80 km 范围内液态流出物对水生生物的影响率对比见图 1, 水生生物所受的总剂量率对比见图 2。

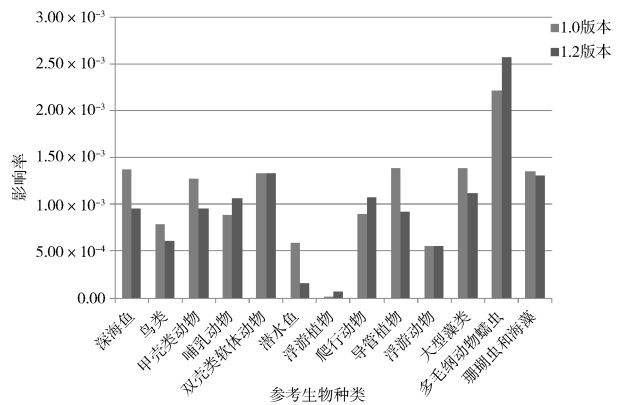


图 1 厂址半径 80 km 范围内液态流出物对各种水生生物产生的影响率对比图

Fig. 1 Comparison of the Risk Quotient of Aquatic Organism by Liquid Effluent within the Radius of 80 km of the Site

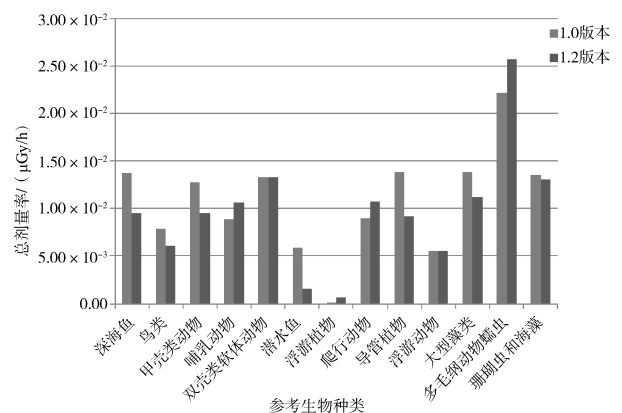


图 2 厂址半径 80 km 范围内液态流出物对各种水生生物产生的总剂量率对比图

Fig. 2 Comparison of Total Dose Rate of Aquatic Organism by Liquid Effluent within the Radius of 80 km of the Site

由图1和图2可以看出,使用ERICA程序1.0版和1.2版计算该电厂两台机组液态流出物对不同水生生物的影响率均在 10^{-2} 数量级以下,其中对多毛纲动物蠕虫的影响率最大,厂址附近海域13类生物受到的总剂量率均小于 $1 \times 10^{-1} \mu\text{Gy/h}$,其中受到总剂量率最大的水生生物为多毛纲动物蠕虫。上述各类水生生物所受的总剂量率均小于ERICA推荐的筛选值($10 \mu\text{Gy/h}$)。

总体而言,除浮游植物外,使用ERICA程序两个版本计算得到的各类水生生物受到的总剂量率相差不大,造成计算结果不同的主要原因为程序1.2版本对部分CR值和剂量率转换因子进行了调整。而程序两个版本计算得到的浮游植物受到的总剂量率相差较大的主要原因是程序1.2版本中浮游植物的生物体质量有了较大的增加,相应的剂量率转换因子也有较大的增加,因此计算得到的总剂量率也增加较大。虽然使用程序1.2版本计算的浮游植物受到的总剂量率增加较大,但其受到的总剂量率与其他参考生物种类相比仍然处于最低水平。

4 结论

1)水生生物辐射影响评价软件ERICA1.2版本主要在核素种类、参考生物及浓集因子的选取方法等方面进行了更新和提升,进一步完善了计算核素、参考生物生物学参数和浓集因子数据库,更好的适用于厂址生物辐射影响的评估。

2)采用ERICA 1.0版本和1.2版本分别开展该电厂两台机组正常运行时液态流出物对厂址附近水生生物所致辐射剂量率评价,两个版本的结果均表明,该电厂两台机组液态流出物对附近水域水生生物所致的总剂量率均在ERICA推荐的筛选值 $10 \mu\text{Gy/h}$ 以下,总体而言,厂址附近水生生物是安全的。程序两个版本计算的结果不同主要是因为程序1.2版本对部分CR值和剂量率转换因子进行了调整。其中程序1.2版本对浮游植物的生物体质量修改较大,相应剂量率转换因子也有较大变化,从而导致计算得到的总剂量率变化较大。

3)目前我国对核电厂液态流出物对水生生物的辐射影响评价开展的基础研究工作相对较少,通过对ERICA软件及其版本变化的分析可以发现剂量率转换因子等参数对计算结果影响较大,因此,今后我国的核电厂液态流出物对水生生物的辐射影响

评价研究工作应根据国内的水生生态环境对水生生物的分类、不同核素的分配系数、浓集因子及剂量率转换因子等进行适应性研究。

参考文献:

- [1] 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(4): 1-12.
- [2] LARSSON C M. 环境辐射防护—关于科学和决策的未来挑战 [J]. 辐射防护通讯, 2005(25): 72-78.
- [3] 唐文乔, 潘自强, 夏益华. 核电站放射性液态流出物对大亚湾海洋生物所致的辐射剂量率 [J]. 科学通报, 1999(44): 1846-1850.
- [4] 商照荣. ^{90}Sr 对家禽的放射毒理学研究 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 1995, 15(6): 406-409.
- [5] 李静晶, 刘森林, 陈超峰, 等. 使用RESRAD-BIOTA程序和ERICA程序计算某核电厂址附近水域中华鲟剂量的对比 [J]. 辐射防护通讯, 2009, 29(6): 6-13.
- [6] 姚青山, 潘自强, 刘森林, 等. 国际主要非人类物种辐射剂量评估方法比较 [J]. 辐射防护通讯, 2006, 26(5): 1-7.
- [7] 杜红燕, 白晓平. SRS-19模型和R&D128模型在ERICA程序陆生生物辐射影响评价中的应用研究 [J]. 辐射防护, 2015, 35(1): 20-25.
- [8] 周永增. 非人类物种的辐射生物效应及其评价 [J]. 辐射防护通讯, 2004, 24(4): 1-9.
- [9] 韩宝华, 李建国, 马炳辉, 等. 我国某核场址非人类物种辐射影响评价中陆生参考生物的选择 [J]. 辐射防护通讯, 2009, 29(2): 20-24.
- [10] 李建国, 商照荣, 杨俊成, 等. 放射生态学转移参数手册 [M]. 原子能出版社, 2006.
- [11] 白晓平, 杜红燕, 郑伟. RESRAD-BIOTA和ERICA程序在非人类物种辐射效应评估中的比较研究 [J]. 辐射防护 [J]. 2011, 31(2): 65-71.
- [12] 郑伟, 白晓平. 液态放射性流出物对水生生物辐射影响评价初探 [J]. 铀矿冶, 2008, 27(3): 134-137.
- [13] 李静晶. 非人类生物辐射剂量评估中参考生物选择 [J]. 辐射防护通讯, 2010, 30(6): 7-12.
- [14] 韩学全, 李建国. 非人类物种辐射剂量估算转换因子分析 [J]. 辐射防护通讯, 2009, 29(2): 17-21.
- [15] 白晓平, 杜红燕. ERICA程序在核电厂厂址陆生生物辐射影响评价中的应用 [J]. 辐射防护通讯, 2012, 32(3): 4-9.
- [16] 杜红燕, 白晓平, 郑伟. ERICA程序在滨海和内陆核电厂生物辐射影响评价中的应用比较 [C]. 中国核电工程有限公司青年优秀论文集, 2011(2): 145-150.
- [17] FASSET. Handbook for Assessment of the Exposure of Biota to Ionising Radiation From Radionuclides in the Environment [M]. NRP, 2003.