

核电厂生物辐射影响评价参数研究

杜红燕, 魏其铭, 白晓平, 王晓亮
(中国核电工程有限公司, 北京 100840)

摘要: 对 ERICA 程序及其计算参数进行了简要介绍, 推荐了水生生态系统和陆生生态系统的不同生态系统类型以及滨海厂址和内陆厂址的不同厂址类型中计算参数的选取方法, 研究成果对后续核电厂的生物辐射影响评价工作具有借鉴意义。

关键词: 核电厂; ERICA 程序; 生物; 辐射影响评价; 参数; 分配系数; 浓集因子; 剂量率转换因子
中图分类号: X802.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8676(2015)04-0151-04

Parameter Study on Radiological Impact Assessment of Biota for Nuclear Power Plant

DU Hongyan, WEI Qiming, BAI Xiaoping, WANG Xiaoliang
(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China)

Abstract: ERICA code was briefly introduced in this paper, and the different calculation parameter choose methods were recommended for aquatic ecosystem and terrestrial ecosystem, and for coastal NPPs and inland NPPs. The method can be a technique support in radiological impact assessment of biota for the following nuclear power plants.

Key words: nuclear power plant; ERICA code; biota; radiological impact assessment; parameter distribution coefficient; concentration ratio; dose conversion coefficient

目前, 社会对非人类物种的保护要求不断提高, 国际上对非人类物种电离辐射影响研究工作也不断深入, 环境中生物受到的辐射影响开始受到广泛关注。IAEA《基本安全原则》中第 7 原则明确指出必须保护人类和环境(包括现在和未来)免受电离辐射的危害^[1]。为与国际上环境保护的要求一致, 我国的审管部门已经在核电厂环境影响报告书审评中增加了对环境中生物进行辐射剂量学分析的要求, 并增补在新版的《核电厂环境影响报告书的格式和内容》(报批稿)^[2]中。核电厂生物辐射影响评价已是核电厂执照申请即选址、建造和运行各阶段的环境影响评价工作中必须开展的工作。目前在开展核电厂正常运行时气、液态流出物对厂址附近生物的辐射影响评价时^[3-7], ERICA 程序是应用最为

广泛的评价工具, 而正确、合理的选取合适的分配系数、浓集因子等计算参数是运用 ERICA 程序进行计算和评估的关键。

本文拟对 ERICA 程序进行简要介绍, 并分别对运用 ERICA 程序进行生物辐射影响评估时, 不同生态系统类型(水生生态系统和陆生生态系统)以及不同的厂址类型(滨海厂址和内陆厂址)中参数的选取方法进行研究和阐述, 对后续核电厂的生物辐射影响评价工作具有借鉴意义。

1 ERICA 程序简介

ERICA 程序是欧共同体推荐的可以估算生物辐射效应的程序, 该程序采用了三级筛选的方法, 一级筛选计算风险商, 从而是判断生物是否存在潜在危险。二级筛选计算各生物受到的辐射剂量率。三级筛选是在二级筛选的基础上通过统计学方法得到各生物具有统计意义的辐射剂量率。其中二级筛选是目前常用的筛选方法。

为与 ICRP108 号和 ICRP114 号报告保持一致,

ERICA 程序共选取了 39 种元素对应的 71 个默认的核素。此外,用户可以根据需要添加除惰性气体外的其它核素。

ERICA 程序中参考生物的选取采用了 ICRP 的建议,并对欧洲生态系统中的辐射敏感生物进行了考虑。陆生生态系统、淡水生态系统和海洋生态系统均选取了 13 种参考生物,表 1 中分别列出了 3 种生态系统对应的参考生物。

表 1 不同生态系统类型中 ERICA 程序选取参考生物

Table 1 Reference Organisms of Different Ecosystems in ERICA Model

海洋生态系统	淡水生态系统	陆生生态系统
鸟类	两栖动物	两栖动物
深水鱼	深水鱼	鸟类
双壳软体动物	鸟类	食腐类节肢动物
甲壳类动物	双壳软体动物	飞行类昆虫
大型藻类	甲壳类动物	腹足纲软体动物
哺乳动物	腹足纲软体动物	草本植物
浅水鱼	昆虫幼虫	苔藓类植物
浮游植物	哺乳动物	大型哺乳动物
多毛纲动物蠕虫	浅水鱼	小型掘穴类哺乳动物
爬行动物	浮游植物	爬行动物
珊瑚虫(或海葵)	维管束植物	灌木
导管植物	浮游动物	环节动物
浮游动物	爬行动物	乔木

2 ERICA 程序中主要的计算参数

在平衡模式条件下,一级筛选要求输入核素、生态系统类型、剂量率筛选值、核素在介质中的活度浓度值参数;二级筛选除需输入一级筛选要求的参数外,还需输入生物种类、分配系数(K_d)、生物浓集因子(CR)等参数;三级筛选是在二级筛选输入参数的基础上,还要求进行概率模拟设置。

2.1 分配系数(K_d)

分配系数即吸附到固体颗粒物上的核素活度浓度与水中核素浓度之比,单位是 $L \cdot kg^{-1}$,是仅在水生生态系统计算中涉及的参数。对于淡水生态系统,ERICA 程序中缺省的分配系数主要来源于 IAEA SRS No. 19 号报告^[8]和 R&D128 号报告^[9];对于海洋生态系统,程序中缺省的分配系数主要来源于 IAEA TRS No. 422 号报告^[10]。

目前生物辐射影响评价中涉及水体中放射性活度浓度估算时,采用的是 IAEA SRS No. 19 号报告中淡水和海水水体悬浮物中各元素的分配系数。

2.2 浓集因子(CR)

浓集因子指生物体或组织内某种核素的活度浓度和环境介质(水体、土壤、大气)中该核素活度浓度的比值。不同生态系统中的浓集因子的计算方法分别如下公式所示,单位分别为: $Bq \cdot kg^{-1}/(Bq \cdot L^{-1})$ (水生生态系统); $Bq \cdot kg^{-1}/(Bq \cdot kg^{-1})$ (陆生生态系统); $Bq \cdot kg^{-1}/(Bq \cdot m^{-3})$ (3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P 和 ^{35}S)。

水生生态系统中:

$$CR = \frac{\text{生物体中核素的活度浓度}(Bq \cdot kg^{-1})}{\text{水体中核素的活度浓度}(Bq \cdot L^{-1})} \quad (1)$$

对于除核素 3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P 和 ^{35}S 以外的核素:
陆地生态系统中:

$$CR = \frac{\text{生物体中核素的活度浓度}(Bq \cdot kg^{-1})}{\text{土壤中核素的活度浓度}(Bq \cdot kg^{-1})} \quad (2)$$

对于核素 3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P 和 ^{35}S :
陆地生态系统中:

$$CR = \frac{\text{生物体中核素的活度浓度}(Bq \cdot kg^{-1})}{\text{空气中核素的活度浓度}(Bq \cdot m^{-3})} \quad (3)$$

ERICA 程序中推荐的 CR 值^[11],原始出版物中已有经验数值的先从中选择,没有相应的经验数值的情况下,需要通过计算获得。

目前 ERICA 程序中缺省的 CR 值有 11 种来源,主要为:

- 1) 采用实验数据。
- 2) 采用类似参考生物的数据。
- 3) 采用以往出版物的数据。
- 4) 采用模型方法。
- 5) 采用参考生物对应的具有类似生物化学特征的元素数据。
- 6) 采用类似参考生物对应的具有类似生物化学特征的元素数据。
- 7) 采用目前可获取的最大值。
- 8) 采用河口数据。
- 9) 采用最大的动物数据。
- 10) 采用最大的植物/藻类数据。
- 11) 联合方法,即采用一种或多种上述方法。

2.2.1 水生生态系统中浓集因子的取值研究

对于程序中提供了浓集因子值的部分元素,选

择程序中该元素对应的不同水生生物的浓集因子值。对于程序未提供浓集因子值的元素, 内陆厂址计算时可以采用 IAEA SRS No. 19 号报告或 IAEA TRS No. 472 报告^[12]中的数据。滨海厂址计算时采用 IAEA TRS No. 422 报告中的数据, IAEA TRS No. 422 号报告中生物种类有限, 因此, 对于 IAEA TRS No. 422 号报告没有列出的生物种类如涉禽、多毛纲动物蠕虫、珊瑚虫及珊瑚虫群落、爬行动物均保守的暂按软体动物考虑, 导管植物暂按浮游植物考虑。此外, 加拿大标准协会 1987 年发布的 CAN/CSA-N288.1-M87 报告中提供了淡水鱼以及海洋生态系统中鱼类、甲壳类、软体动物和海藻的浓集因子。

以滨海厂址鱼类部分核素的浓集因子取值为例, 对联合使用 ERICA 程序缺省值与 IAEA TRS No. 422 号报告中数据的保守性进行说明, 将滨海厂址计算采用的 ERICA 程序缺省值与 IAEA TRS No. 422 号报告的数据与加拿大 CAN/CSA-N288.1-M87 报告^[13]的数据进行对比, 部分核素的对比结果见表 2。

表 2 鱼类部分核素浓集因子取值对比

Table 2 The Comparison of CR Parameter of Fish for Part of Nuclides

元素	计算采用值	CAN/CSA-N288.1-M87 报告值	计算采用浓集因子相比 CAN/CSA-N288.1-M87 报告对比结果
Fe	3.00E+04	3.00E+03	10 : 1
Co	5.60E+03	1.00E+02	56 : 1
C	1.20E+04	2.00E+03	6 : 1
Ag	2.90E+03	1.00E+03	3 : 1
I	3.00E+00	5.00E+01	1 : 10
Mn	7.40E+02	5.00E+02	1.5 : 1

由表 2 可见, 大部分核素计算采用的各类生物的浓集因子值均大于加拿大 CAN/CSA-N288.1-M87 报告中的值, 因此, 采用 ERICA 程序缺省值与 IAEA TRS No. 422 号报告推荐值相比 CAN/CSA-N288.1-M87 报告更为保守。在 ERICA 程序只提供部分元素缺省值的情况下, 综合使用 ERICA 程序缺省值与 IAEA TRS No. 422 号报告推荐值是保守和可行的。

2.2.2 陆生生态系统中浓集因子取值研究

陆生生态系统的浓集因子是评价核素从环境介质(土壤、空气)向野生动植物迁移, 以及野生动

植物辐射剂量率和辐射效应的关键参数。ERICA 程序提供了部分元素对应的不同陆生生物的浓集因子值。对于程序未提供浓集因子值的元素, 计算时可以考虑采用 IAEA TRS No. 479 号报告中的浓集因子^[14]。

IAEA EMRAS 项目(2003—2007 年)比较和扩展了电离辐射对野生动植物影响评价的模型和途径。通过对多种情境的模型评价和比较, 发现模型中不同迁移参数的使用对生物体活度浓度和内照射剂量率的计算结果影响极大。IAEA EMRAS 生物工作组建议出版有关核素在野生动物体内迁移的评估手册, 在第二阶段的研究 EMRAS II (2009—2011 年)中出版了该浓集因子手册—IAEA TRS No. 479 号报告。IAEA TRS No. 479 号报告与 IAEA TRS No. 472 号报告的作用类似。该报告包含了平均的转移参数和相关的统计分配信息, 也包含了参数的来源和整理方法, 以及这些数据在模型中应用、空缺数据的处理等。报告给出了 ICRP38 号出版物中涉及的 52 种元素对应的参考生物的浓集因子。

2.2.3 各类生态系统中浓集因子的取值总结

海洋生态系统、淡水生态系统及陆生生态系统中浓集因子的取值来源见表 3。

表 3 不同生态系统中浓集因子的取值来源

Table 3 Parameter Sources of CR in Different Ecosystems

生态系统类型	CR 取值来源
海洋生态系统	1) 程序缺省值; 2) IAEA TRS No. 422 号报告
淡水生态系统	1) 程序缺省值; 2) IAEA SRS No. 19 号报告或 IAEA TRS No. 472 报告
陆生生态系统	1) 程序缺省值; 2) IAEA TRS No. 479 号报告

2.3 生物居留因子

程序提供了各类生态系统中生物不同的栖息环境, 如图 1 所示。

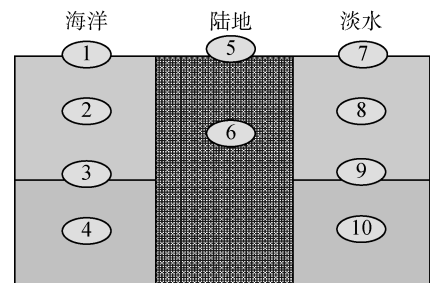


图 1 不同生态系统中生物的栖息环境

Fig. 1 The Inhabit Environment of Biota in Different Ecosystems

水生生态系统（包括海洋生态系统和淡水生态系统）及陆生生态系统不同栖息环境中的代表性生物如表4所示。

2.4 剂量率转换因子

ERICA 程序分别提供了淡水生态系统、海洋生态系统和陆生生态系统中不同核素不同水生生物在不同辐射类型下的内、外照射剂量率转换因子，包括低能 β 辐射、 β/γ 辐射、 α 辐射的内照射剂量率转换因子以及低能 β 辐射、 β/γ 辐射的外照射剂量率转换因子。

表4 各类生态系统不同的栖息环境的代表性生物

Table 4 The Typical Organisms in Different Inhabit Environment of Different Ecosystems

生态系统类型	栖息环境	代表性生物
海洋生态系统	水面 air-water	鸟类、哺乳动物、浅水鱼、浮游植物、爬行动物、浮游动物
	水中 water	深水鱼、双壳软体动物、大型藻类、珊瑚虫（或海葵）、导管植物、甲壳类动物
	水底 water-sediment	多毛纲动物蠕虫
水生生态系统	沉积物 sediment	两栖动物、哺乳动物、鸟类、浅水鱼、浮游植物、浮游动物、爬行动物（水中0.5）
	水面 air-water	深水鱼、双壳软体动物、甲壳类动物、腹足纲软体动物、维管束植物
	水中 water	昆虫幼虫、爬行动物（沉积物0.5）
	水底 water-sediment	乔木、鸟类、腹足纲软体动物、飞行类昆虫、草本植物、灌木、苔藓类植物、大型哺乳动物
陆生生态系统	土壤表面 air-soil	两栖动物、爬行动物、环节动物、食腐类节肢动物、小型掘穴类哺乳动物
	空气中 in-air	
	土壤中 soil	

注：代表性生物所在栖息环境的生物居留因子除标注外均为1。

ERICA 程序中的剂量率转换因子主要是根据环境条件、照射途径和参考生物的特征参数，通过蒙特卡罗的方法或经验公式进行计算。

2.5 辐射权重因子

ERICA 程序计算采用的辐射权重因子缺省值的取值见表5。

表5 ERICA 程序中辐射权重因子的取值

Table 5 The Radiation Weighting Factors in ERICA Model

程序	α	低能 β （平均能量 小于 10 keV）	非低能 β （平均能量 大于 10 keV）/ γ
ERICA	10	3	1

3 结论

1) 运用 ERICA 程序开展核电厂气液态流出物对厂址附近水生生物和陆生生物的辐射影响评价时，评价结果受到分配系数、浓集因子、剂量率转换因子、生物居留因子、辐射权重因子等参数取值的影响。因此，合理的参数取值是获得正确评价结果的重要前提。

2) 我国对生物辐射影响评价的基础研究工作较少，评价中的参数选取主要采用了程序的缺省值或国外技术报告中的参考值，在国内没有全面的评估参数的情况下，使用 IAEA 系列技术报告的相关参数进行筛选和评价是保守和可行的。

3) 由于我国生态系统和生物种类与国外存在差异，这些参数不一定完全适合我国的具体情况，今后除了应密切跟踪 IAEA 及 ICRP 等相关机构的最新研究成果外，还应结合我国核电厂和其它核设施厂址的具体情况，对程序中关键的计算参数开展基础实验和研究工作，推荐适合我国生态系统类型的特征计算参数。

参考文献：

- [1] IAEA. IAEA SSS SF-1: Fundamental Safety Principles [M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006.
- [2] NEPA-RGI, 核电厂环境影响报告书的格式和内容（报批稿）[S].
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] 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, 2011, 31 (2): 65-71.
- [8] IAEA. IAEA SRS 19: Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to The Environment [M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2001.
- [9] COPPLESTONE D, BIELBY S, JONES S R, et al. Impact Assessment of Ionizing Radiation on Wildlife [R]. Environment Agency R&D Publication 128, 2003.

（上转第 101 页 Continued on Page 101）

到国家和地方一级排放标准。两台机组处理设备联合布置在汽机房外,减少汽机房跨度约12 m,避免汽轮机基座土建和地下设施交叉施工,缩短负挖回填工期。设备地上式布置,解决了进口波纹斜板设备长期浸泡问题,提高了耐久性,达到先进核电厂60年寿期的要求,设备国产化率提高到80%,工程节省投资约240万元。本系统已推广应用于山东海阳、广东阳江、广西防城港、福建宁德在建核电机组,经济与社会效益显著。

4 结论

本文分析了核电厂常规岛潜在放射性含油废水产生的原因和特点,并结合1 000 MWe级核电厂工程应用实例,探讨了适用于常规岛含油废水处理系统优化。研究认为:

- 1) 常规岛含油废水处理系统工艺流程选择应根据纵深防御原则降低潜在放射性污染的风险。
- 2) 含油废水处理系统容量应根据收集常规岛工艺系统疏放水和冲洗水量、消防灭火系统排水量确定。处理系统应设置地下废水调节池,其有效容积应根据常规岛汽机运转层下自动喷水和室内消火栓

消防排水量、集水面积经计算确定,并留有一定裕量。系统处理规模宜按 $4 \times 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3) 两台机组处理系统宜布置在独立厂房内,设备地上式安装,调节池和管道系统应设置实体分隔,并联运行,互为备用,设计使用寿命为60年。

4) 处理系统宜采用非能动部件的重力式油水分离器,和能动部件少的气动隔膜式提升泵设备,无污泥副产物,运行安全可靠,出水水质达到国家和地方一级排放标准。

参考文献:

- [1] GB 14587—2011, 核电厂放射性液态流出物排放技术要求[S].
- [2] 张强, 任世军, 胡昌贤, 等. 岭澳核电站非放射性油水分离系统改造[J]. 中国给水排水, 2006, (12): 30-33. ZHANG Qiang, REN Shijun, HU Changxian, et al. Modification of the Separation System for Wasted Nonradioactive Oil and Water of Ling'ao Nuclear Power Plant [J]. China Water & Wastewater, 2006, (12): 30-33.
- [3] 阎维平, 周月桂, 刘洪宪, 等. 洁净煤发电技术[M]. 第2版, 北京: 中国电力出版社, 2008: 24-25.
- [4] HAF 102—2004, 核动力厂设计安全规定[S]. 2004.

(责任编辑 黄肇和)

(下接第154页 Continued from Page 154)

- [10] IAEA. IAEA TRS 422: Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in The Marine Environment [M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
- [11] ERICA. Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and Management (EC 6th Frame-work Programme) [EB/OL]. <http://www.facilia.se/projects/erica.asp>.
- [12] IAEA. IAEA TRS 472: Handbook of Parameter Values for The Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments [M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2010.

- [13] Canadian Standard Association. Guidelines for Calculating Derived Release Limits for Radioactive Material in Airborne and Liquid Effluents for Normal Operation of Nuclear Facilities [R]. CAN/CSA-N288. 1-M87. 1987.
- [14] IAEA. IAEA TRS 479: Handbook of Parameter Values for The Prediction of Radionuclide Transfer to Wildlife [M]. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2014.

(责任编辑 高春萌)

(下接第169页 Continued from Page 169)

- [13] DIKMEN I, BIRGONUL M T, TAH J H M, et al. Web-based Risk Assessment Tool Using Integrated Duration-cost Influence Network Model [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2012, 138(9): 1023-1034.
- [14] 全吉, 黄剑眉, 张水波, 等. 基于风险链和风险地图的风险识别和分析方法[J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 92-96. QUAN Ji, HUANG Jianmei, ZHANG Shuibao, et al. Method of Risk Identification and Analysis Based on Risk Chain and Maps [J]. Energy Construction, 2014, 1(1): 92-96.

- [15] 朱明, 全吉, 黄剑眉, 等. 国际工程项目费用风险量化评估与动态管控[J]. 国际经济合作, 2014, 29(5): 81-86. ZHU Ming, QUAN Ji, HUANG Jianmei, et al. Quantitative Risk Assessment and Dynamic Control of International Engineering Project Cost [J]. Journal of International Economic Cooperation, 2014, 29(5): 81-86.

(责任编辑 郑文棠)