

非人类物种辐射剂量估算及评价方法

何映雪, 姜晓燕, 闫冬, 范莉, 丁库克*

(中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所放射生态研究室, 北京 100088)

【摘要】本文介绍了当前主流非人类物种辐射剂量评估的方法。详细介绍了欧盟推荐的ERICA方法和美国核能管理委员会的RESRAD-BIOTA方法的原理、参考生物、涉及核素、筛选流程和计算公式。比较两种评价方法在参考生物的选择和涉及核素的种类上的异同,同时列举国内外应用实例对两种方法进行了比较,探讨两种方法在剂量估算和评价中的异同性:多个应用实例表明两种方法均是有效的评价手段,评估结果的差异来自评估过程中参数的差异,RESRAD-BIOTA方法的评价结果偏保守,ERICA方法参数和参考生物的选择均可以进行自定义,可根据不同的需要选择不同的评估方法。

【关键词】非人类物种;辐射剂量估算;ERICA方法;RESRAD-BIOTA方法

中图分类号: R144.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-616X(2020)05-0405-04

doi: 10.3969/j.issn.1004-616x.2020.05.015

随着我国核事业的不断发展,进入环境中的放射性物质不断增多,放射性核素对环境的影响得到广泛关注。美国、加拿大等国家早在20世纪80年代就开始着手研究电离辐射非人类物种评价和防护问题,1991年美国国家辐射防护和测量委员会(National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP)发表了第109号报告《电离辐射对水生生物的影响》^[1]。报告较系统地总结了电离辐射对水生生物的效应。国际原子能机构从20世纪70年代起开展电离辐射对植物、动物及其生态系统的有关研究,1992年发表了第332号技术报告《在现代辐射防护标准水平电离辐射对植物和动物的影响》^[2],2003年开展了“辐射安全环境模型”(EMRAS)项目。欧洲从2000年年末陆续开展了FASSET(电离辐射对非人类物种影响的评价框架)、EPIC(北极电离污染的环境保护)、ERICA(电离污染的环境危险——评价和管理)等项目。2003年,国际放射防护委员会(International Commission on Radiological Protection, ICRP)出版了第91号出版物《评价非人类物种电离辐射影响的方法》^[3],建议发展评价和管理非人类物种辐射影响的方法。2005年,ICRP成立了第5委员会,专门研究环境电离辐射防护。ICRP 2007年意见书中提议采用参考动物和植物的概念,提供一个估算环境电离辐射的框架。我国在20世纪90年代发布了“中国自然保护纲要”和“中国21世纪议程”,2003年发布了“放射性污染防治法”,明确提出了防治放射性污染保护环境的要求。

针对电离辐射对非人类物种的影响评价,一些国际组织和政府部门提出了一系列辐射防护的评价方法,包括RESRADBIOTA、ERICA、R&D128、ECOMOD、LIETDOS-BIO、

SCK-CEN、EDEN和EPICDOSES3D等^[4]。其中国际上使用较为广泛的两种方法为美国能源部推荐的RESRAD-BIOTA程序^[5]和欧盟推荐的ERICA程序^[6]。

1 方法介绍

1.1 ERICA方法

ERICA方法是基于ERICA项目所建立的模型,用于估算非人类物种辐射剂量。2004—2007年,由欧洲7个国家的15个团体共计60多位科学家共同完成ERICA项目,评价电离辐射对环境中生物和生态系统的影响。该项目的基础是2000—2003年的“环境影响的评价框架”(Framework for Assessment of Environmental Impact, FASSET)项目^[7]和EPIC项目。ERICA项目的成果是ERICA总方法和ERICA工具^[8]。

1.1.1 ERICA方法的原理 ERICA模型建立的基本原理是,生物受到的辐射剂量包括生物在环境中受到的外照射剂量和生物通过食物受到的内照射剂量。该模型建立有以下基本假设:①在环境介质中核素浓度达到平衡,生物体中核素浓度与环境介质中核素浓度也达到平衡;②核素在生物体的所有组织中都是平均分布的,不考虑组织内差异;③吸收剂量是整个生物体体积的平均值;④外照射剂量计算式假定生物全部处于无穷大的介质中^[8]。

1.1.2 ERICA方法涉及核素及参考生物 ERICA模型涉及了31种元素及其对应的63个核素,见表1,在ERICA方法中,用户可以根据需要添加除惰性气体外的其他核素^[8]。

ERICA模型共选择了38种参考生物,分别代表淡水生态系统、海洋生态系统和陆地生态系统,见表2^[8]。

收稿日期: 2020-03-23; 修订日期: 2020-09-14

基金项目: 北京自然科学基金项目(7172146)

作者信息: 何映雪, E-mail: yingxue@sina.com。*通信作者, 丁库克, E-mail: shouding@ccmu.edu.cn

表1 ERICA方法涉及的核素种类

元素	核素
Ag	¹¹⁰ Ag
P	³² P, ³³ P
Am	²⁴¹ Am
Pb	²¹⁰ Pb
C	¹⁴ C
Po	²¹⁰ Po
Cd	¹⁰⁹ Cd
Pu	²³⁸ Pu, ²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Pu
Ce	¹⁴¹ Ce, ¹⁴⁴ Ce
Ra	²²⁶ Ra, ²²⁸ Ra
Cl	³⁶ Cl
Ru	¹⁰³ Ru, ¹⁰⁶ Ru
Cm	²⁴² Cm, ²⁴³ Cm, ²⁴⁴ Cm
S	³⁵ S
Co	⁵⁷ Co, ⁵⁸ Co, ⁶⁰ Co
Sb	¹²⁴ Sb, ¹²⁵ Sb
Cs	¹³⁴ Cs, ¹³⁵ Cs, ¹³⁶ Cs, ¹³⁷ Cs
Se	⁷⁵ Se, ⁷⁹ Se
Eu	¹⁵² Eu, ¹⁵⁴ Eu
Sr	⁸⁹ Sr, ⁹⁰ Sr
H	³ H
Tc	⁹⁹ Tc
I	¹²⁵ I, ¹²⁹ I, ¹³¹ I, ¹³² I, ¹³³ I
Te	^{129m} Te, ¹³² Te
Mn	⁵⁴ Mn
Th	²²⁷ Th, ²²⁸ Th, ²³⁰ Th, ²³¹ Th, ²³² Th, ²³⁴ Th
Nb	⁹⁴ Nb, ⁹⁵ Nb
U	²³⁴ U, ²³⁵ U, ²³⁸ U
Ni	⁵⁹ Ni, ⁶³ Ni
Zr	⁹⁵ Zr
Np	²³⁷ Np

表2 ERICA总方法选取的参考生物

生态系统	生物种类数	参考生物
淡水生态系统	12	两栖动物、深水鱼、鸟类、双壳纲软体动物、甲壳纲动物、腹足纲动物、昆虫幼体、哺乳动物、浅水鱼、浮游植物、维管植物、浮游动物
海洋生态系统	13	(涉水)鸟、海底鱼、双壳纲软体动物、甲壳纲动物、大型藻类、哺乳动物、浅水鱼、浮游植物、多毛纲蠕虫、爬行动物、海藻/珊瑚、维管植物、浮游动物
陆地生态系统	13	两栖动物、鸟、鸟蛋、食腐无脊椎动物、飞行类昆虫、腹足纲动物、草和草本植物、地衣和苔藓植物、哺乳动物、爬行动物、灌木、土壤无脊椎动物、树

1.1.3 ERICA方法计算公式 ERICA方法采用了分级筛选评价的体系，分为三级筛选评价，其中，第三级的筛选评价最复杂，涉及的数据也最多。在评价过程中，如果满足第一级和第二级的筛选标准，确定辐射生物效应很低乃至可以忽略时，便可退出评价体系。否则，则进行下一级评价^[9]。

一级筛选评价需要输入环境介质(包括水、空气、土壤、沉积物等)的最大活度浓度，需要输入的数据少，简单保守，不考虑参考生物种类。环境介质中估算或者实测的核素活度浓度与环境介质浓度限值的比值为危害商RQ^[9]，所有核素的危害商相

加得到总的危害商RQ_{cons}。如果生物处于不同的介质中，则将生物在不同环境介质中的危害商相加，得到该生物的危害商RQ_{cons}。如果RQ<1，则认为生物剂量率小于剂量率限值，电离辐射对非人类物种的危害可忽略，终止评价；如果RQ≥1，则需要继续评价。其筛选公式为：

$$\sum_j \frac{C_{i,j}}{EMCL_{i,j}} < 1 \quad [10]$$

其中，C_{i,j}为第i种核素在介质j中的浓度；EMCL_{i,j}为相应的环境介质浓度限值，该值是由生物剂量率限值反推得到的，与核素、介质、参考生物等参数有关。

二级筛选同时使用危害商的计算值(RQ_{exp})和危害商的保守值(RQ_{cons}，等于RQ_{exp}乘不确定因子)来进行评价。二级筛选评价结果分三种情况。第一种情况：未超过剂量率限值，RQ_{cons}<1，电离辐射对环境的影响可忽略，终止评价；第二种情况，RQ_{cons}≥1，RQ_{exp}<1，可能超过剂量率限值，可能对环境有潜在影响，需要重新考虑二级筛选评价过程，使用更为准确的参数进行评价；第三种情况，RQ_{exp}≥1，电离辐射对环境有影响，需要进一步调查分析，进行三级评价。在该级筛选中，使用者可以添加默认核素以外的放射性核素和参考生物，可以修改核素在水和沉积物中的分配系数(Kd)和生物浓缩因子(CR)等参数。整个评估方法较为灵活，适用性广。对于水生生态系统，二级筛选的公式为：

$$D = D_{int}^b + D_{ext}^b = \sum_i C_i^b \times DDC_{int,i}^b + \sum_z V_z \sum_i C_{zi}^{ref} \times DDC_{ext,zi}^b \quad [10]$$

其中，D_{int}^b、D_{ext}^b分别为生物b的内照射吸收剂量率和外照射吸收剂量率；C_i^b为核素i在生物b内的平均活度浓度，单位Bq/kg(鲜重)，DDC_{int,i}^b、DDC_{ext,zi}^b分别为生物b的内、外照射剂量转换因子。V_z为占有系数，参考生物在某种介质z中的暴露时间占其生命周期的比例；C_{zi}^{ref}为核素i在介质z中的平均活度浓度。

三级筛选和二级筛选一样，参数选取有更大的灵活性，使用者不仅可以重新编辑输入不同的参数，而且参数还有不同的分布函数可以选择，且三级筛选可以使用不断更新的生物电离辐射效应文献。

1.2 RESRAD-BIOTA方法

RESRAD-BIOTA方法是由USDOE开发的一个基于GRADED方法的用于估算生物所受的辐射剂量率程序^[11]。该方法采用了三级筛选的方法进行生物辐射影响的评价。

1.2.1 RESRAD-BIOTA方法的基本原理 RESRAD-BIOTA方法有如下几点基本假设：①生物体处在源介质中，受到连续的照射，介质中放射性核素的浓度是均匀恒定的；②在预测陆生和两栖动物的放射性核素浓度因子时，程序采用了动态和异速生长技术；③计算内照射时，程序保守的假定所有衰变能均沉积在生物体中并包括其子体；④计算外照射时，程序假设生物体浸没在土壤、沉积物或水中，并且射线能量均沉积在生物体内，不考虑生物体自身的屏蔽。

1.2.2 RESRAD-BIOTA方法的参考生物及涉及核素 RESRAD-BIOTA方法的参考生物选择较为笼统。在一、二级筛选中，该方法仅设定了4种参考生物，在三级筛选中，程序可设定8类不同大小等级的参考生物，这8类生物的体型尺寸数

据是限定不能更改的^[12]。

RESRAD-BIOTA 主要考虑了 29 种元素对应的 46 种放射性核素的计算,不能添加其他核素^[11]。

1.2.3 RESRAD-BIOTA 方法的步骤 RESRAD-BIOTA 程序以 GRADED 方法的三个步骤作为技术基础^[13],具体来说, GRADED 方法 3 个步骤为:①数据收集,包括获得各核素在不同介质中的最大浓度和平均浓度、生物在各介质中居留的时间份额、核素在不同介质间的转移参数以及核素在生物体内的代谢数据等;②初步分级(一般筛选),使用介质中的最大核素浓度值与由辐射剂量限值导出的生物浓度指南比较,判断生物在接受了预期最大剂量时,是否能够保证其安全;③考虑了场址具体数据包括生物体型大小、食物结构、呼吸量和饮水量后的辐射剂量率评估。程序将物种分为简单的几类—水生动物、滨岸动物、陆地动物和陆地植物;环境介质分为水、沉积物、土壤 3 种;在分级方法中包括内、外照射剂量的源项及照射途径。

1.2.4 RESRAD-BIOTA 方法的计算公式 RESRAD-BIOTA 模型采用了三级筛选的方法进行评估。一级筛选是将环境介质(水、沉积物或土壤)中的核素浓度与由生物剂量率限值反推出的参考浓度(Biota Concentration Guide, BCG)进行比较。如果比值 ≥ 1 ,则认为生物是不安全的,需要进一步的筛选。其筛选公式为:

$$\sum_{i,j} \frac{C_{i,j}}{BCG_{i,j}} < 1 \quad [10]$$

其中, $C_{i,j}$ 为第 i 种核素在介质 j 中的浓度; $BCG_{i,j}$ 为核素 i 在介质 j 中的生物浓度指导限值;该值与核素、介质、参考生物等参数有关,是由生物的辐射剂量率限值反推出的各核素在不同介质中对不同生物体的浓度限值。

二级筛选是使用代表特定厂址的参数和条件,将核素浓度与特定厂址的参考浓度(特定厂址 BCG)进行比较,并估算各核素在环境介质中对生物造成的辐射剂量率。在该级筛选中,同时估算了核素对生物的辐射剂量率。生物辐射剂量率包括外照射剂量率和内照射剂量率。对于核素 i ,其计算公式为:

$$D = (BIV_j^b \times DVF_m^b + EGF_j \times DCF_{in}^b) \times C_j \quad [10]$$

其中, BIV_j^b 表示介质 j 中核素在生物 b 内的浓集因子,无量纲; DVF_m^b 、 DCF_{in}^b 分别表示生物 b 的内、外照射剂量率转换因子; EGF_j 表示介质 j 的外照射几何因子,无量纲; C_j 表示介质 j 中核素的活度浓度。

三级筛选是一个独特而复杂的过程,使用了生物动力学模型,它的评价判断更为精确和详细,涉及的参数也更复杂,涉及的参考生物种类也更多。

2 ERICA 方法和 RESRAD-BIOTA 方法的比较

ERICA 方法和 RESRAD-BIOTA 方法虽然都是广泛用于非人类物种电离辐射评价的方法工具,两者有一定的区别,在实际应用中也有一些适用范围的差异。下面对这两种方法进行对比讨论。

2.1 参考生物

两种方法在参考生物上的选择有一定的差异,RESRAD-

BIOTA 程序参考生物的选择比较笼统,在一、二级筛选中,设定了 4 种参考生物,在三级筛选中,设定了 8 种参考生物,且体型尺寸数据不可更改^[12]。而 ERICA 程序比较灵活,可自己设定参考生物及相应的体形尺寸数据,且参考生物可分为鱼类、甲壳类、浮游植物等多种生物类群。

2.2 适用的放射性核素

RESRAD-BIOTA 程序主要考虑了 29 种元素对应的 46 种放射性核素的计算^[12],不能添加其他核素;ERICA 程序主要考虑了 31 种核素对应的 63 种放射性核素,且用户可以添加其他需要的元素。

2.3 其他参数

RESRAD-BIOTA 程序里生物评价标准采用的是美国能源部的标准,而 ERICA 程序里采用的评价标准的剂量限值是可以选择的,可以选择美国能源部的标准或其他标准。不同国家对不同生物体的剂量限值规定^[14]见表 3。

表 3 不同国家机构对不同生物类型的剂量限值规定

国家、机构	水生生物	陆生生物	陆生植物
美国	10 mGy/d (4 Gy/a)	1 mGy/d (0.4 Gy/a)	10 mGy/d (4 Gy/a)
加拿大	0.2 Gy/a (400 μGy/h)	0.4 Gy/a (40 μGy/h)	1 Gy/a (400 μGy/h)
英国	10 mGy/d (4 Gy/a)	1 mGy/d (0.4 Gy/a)	10 mGy/d (4 Gy/a)
IAEA	10 mGy/d (4 Gy/a)	1 mGy/d (0.4 Gy/a)	10 mGy/d (4 Gy/a)
联合国辐射效应科学委员会	10 mGy/d (4 Gy/a)	1 mGy/d (0.4 Gy/a)	10 mGy/d (4 Gy/a)

3 两种方法的应用实例

刘悦等^[15]以大亚湾核电站所在的自然生态系统为研究对象,以对虾、黑鲷、毛蚶和小球藻 4 种水生生物为代表,建立它们的剂量学模型,并使用 RESRAD-BIOTA 和 ERICA 程序对其剂量进行估算。他们得出的结果显示,在计算各生物体对其浓集因子数最大的单个核素的吸收剂量率的结果对比,由于 RESRAD-BIOTA 所用的是美国能源部保守模型,得到的是保守值,因此在计算结果中,RESRAD-BIOTA 的最大值是比较合理的,但该最大值是 ERICA 结果的 300 多倍,这主要是由于计算模型的不同造成的。这一结果与理论相符合。

白晓平等^[16]利用两个程序分别在我国某滨海核电厂液态放射性流出物对厂址附近一类浅水鱼所产生的辐射影响进行评估,采用 RESRAD-BIOTA 和 ERICA 程序得到该类浅水鱼的总剂量率分别为 $5.42 \times 10^{-3} \mu\text{Gy/h}$ 和 $4.82 \times 10^{-4} \mu\text{Gy/h}$,均远小于相应的剂量率限值,因此,该类浅水鱼是安全的。其中,RESRAD-BIOTA 程序得到的总剂量率比 ERICA 程序约大 1 个量级,该结果显示 RESRAD-BIOTA 程序的计算结果偏于保守。作者认为,在非人类物种辐射效应评价的研究中,ERICA 程序在适用性、灵活性、系统性、有效性等方面来看,更值得推荐。

Ćujić 等^[17]利用 ERICA 工具和 RESRAD-BIOTA 工具对塞尔维亚最大的一个煤炭发电厂周边陆生生物的辐射剂量进行了评



估,研究了9种核素的影响。在ERICA方法中选取了从苔藓到大型哺乳动物13种参考生物作为研究对象;在RESRAD-BIOTA方法中选取了8种参考生物作为研究对象。结果显示,利用ERICA方法计算得到的生物辐射剂量率为0.3~14.4 $\mu\text{Gy/h}$, RESRAD-BIOTA程序计算的动物和植物的辐射剂量率分别为7和3 $\mu\text{Gy/h}$ 。电离辐射对该地区生物的影响不显著,两种方法之间的结果差异是由于用于计算生物体内浓度活度的转移参数不同引起的。该研究结果显示了ERICA和RESRAD-BIOTA均是灵活有效的评估非人类物种辐射效应的方法。

4 总结和展望

本文通过对两种方法的原理过程和应用实例的比较认为:ERICA方法和RESRAD-BIOTA方法都是有效的非人类物种辐射效应评估手段,两种方法评估结果的差异来自评估过程中参数的差异,RESRAD-BIOTA方法比较笼统,评价结果偏保守,而ERICA方法比较灵活,参数和参考生物的选择均可以进行自定义。在具体的应用中,可根据实际需要选择不同的评价方法,或者根据评价过程的不同阶段采用不同的评价方法进行评估。

参考文献

- [1] National Council on Radiation Protection and Measurements. Effects of ionizing radiation on aquatic organisms[R]. New York: Malcolm Pirnie, 1991: 1-15.
- [2] Internat. Atomic Energy Agency. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by current radiation protection standards [J]. Environ Int, 1993, 19(1): 103.
- [3] VALENTIN J. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species: ICRP Publication 91[J]. Ann ICRP, 2003, 33(3): 201-270.
- [4] VIVES I BATLLE J, BALONOV M, BEAUGELIN-SEILLER K, et al. Inter-comparison of absorbed dose rates for non-human biota[J]. Radiat Environ Biophys, 2007, 46(4): 349-373.
- [5] United States Department of Energy. DOE-STD-1153-2002 A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota [S]. Washington DC: US DOE, 2002: 1-8.
- [6] BERESFORD N, BROWN J, COPPLESTONE D, et al. An Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation: Description of purpose, methodology and application[R]. European Commission, Community Research, ERICA (Contract Number: FI6R-CT-2004-508847), 2007.
- [7] LARSSON C M. The FASSET framework for assessment of environmental impact of ionising radiation in European ecosystems: an overview[J]. J Radiol Prot, 2004, 24(4a): 1-12.
- [8] BROWN J E, ALFONSO B, AVILA R, et al. The ERICA tool[J]. J Environ Radioact, 2008, 99(9): 1371-1383.
- [9] LARSSON C M. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants[J]. J Environ Radioact, 2008, 99(9): 1364-1370.
- [10] 傅小城,王茹静,杜风雷.非人类物种辐射影响评价方法分析[J].核安全,2014,13(3): 84-89, 77.
- [11] United States Department of Energy. DOE-STD-1153-2002 A graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota [S]. Washington DC: US DOE, 2002: 1-8.
- [12] DOMOTORA S L, PETERSON JR H T, HIGLEYB K A. The US Department of Energy's graded approach for evaluating radiation doses to aquatic and terrestrial biota[J]. Protect Environ Iron Radiat, 2003: 171.
- [13] 白晓平. RESRAD-BIOTA程序的改进及其应用研究[J].科技导报, 2009, 27(12): 61-64.
- [14] 姚青山.非人类物种辐射剂量评估方法研究[D].北京:中国原子能科学研究院,2006.
- [15] 刘悦,曾志,赵颖,等.大亚湾周围海域几种水生生物的辐射剂量估算[J].辐射防护,2011,31(5): 300-305.
- [16] 白晓平,杜红燕,郑伟. RESRAD-BIOTA和ERICA程序对滨海核电厂浅水鱼的辐射剂量估算比较研究[J].辐射防护,2011,31(2): 65-71.
- [17] ČUJIĆ M, DRAGOVIĆ S. Assessment of dose rate to terrestrial biota in the area around coal fired power plant applying ERICA tool and RESRAD BIOTA code[J]. J Environ Radioact, 2018, 188: 108-114.

(上接第404页)

- 7402生长、迁移、侵袭和放射敏感性的影响[J].中华放射医学与防护杂志,2015,35(6): 413-418.
- [32] 陈浩,李七一,陆曙.中医药调控JAK/STAT信号通路的研究进展[J].

- 中西医结合心脑血管病杂志,2016,14(19): 2258-2262.
- [33] 高玉桥,苏丹,张汉辉.中药干预JAK/STAT信号通路的研究进展[J].时珍国医国药,2018,29(9): 2236-2240.