

核电厂环境风险评价框架及方法

陈妍,郑鹏,陈海英,张春明,李小龙

环境保护部核与辐射安全中心,北京 100082

摘要 目前核电厂风险评价技术分为核事故风险评价及非人类物种电离辐射防护评价。为发展一个包括非人类物种防护在内的核电厂辐射防护体系,本文借鉴环境风险评价的关键流程要素,提出包括公众健康和非人类物种的核电厂环境风险评价框架。在这一框架的危害排序环节,对所选择的各评价终点指标采用层次分析法,计算评价终点对核电厂环境风险的权重并进行排序,旨在发现对环境风险贡献较大的评价终点并在风险管理中对其优先管理控制。

关键词 环境风险评价;健康风险;生态风险

中图分类号 X820.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.04.006

Framework and approach for environmental risk assessment of nuclear power plants

CHEN Yan, ZHENG Peng, CHEN Haiying, ZHANG Chunming, LI Xiaolong

Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China

Abstract This paper studies the concepts and key elements of environmental risk assessment, focusing on development of accident risk assessment of nuclear power plants and radiation protection for non-human species, and proposing a framework for environmental risk assessment of nuclear power plants. In this framework, we try to adopt the analytic hierarchy process to calculate the endpoints' weights to the environmental risk of nuclear power plants and discuss its risk characterization with supposed source term, which would be a useful tool to support the environmental risk administration of nuclear power plant.

Keywords environmental risk assessment; health risk; ecological risk

环境风险评价是兴起于20世纪70年代的多学科交叉领域,包括人体健康风险和生态风险评价,即研究突发性事故和长期低浓度排放对人体健康的危害,也研究它们对生态系统的危害。环境风险评价可以积极防范项目的环境风险,为环境风险管理及决策提供重要依据。美国是发展环境风险评价研究最早且相对成熟的国家,英国、加拿大等国也在90年代中期开展了健康风险和生态风险评价的研究工作。

中国从20世纪80年代开始事故风险研究工作,国家环境保护局于1990年发布《关于对重大环境污染事故隐患进行风险评价的通知》,要求对重大环境污染事故进行环境风险评价,2004年颁布《HJ/T 169—2004 建设项目环境风险评价技术导则》^[1],2009年水利部发布《生态风险评价导则》^[2]。

环境保护部2012年发布《关于进一步加强环境影响评价管理防范环境风险的通知》和《关于切实加强风险防范严格环境影响评价管理的通知》,进一步明确要求“建设项目环境风险评价是相关项目环境影响的重要组成部分,科学预测突发性事件或事故可能引发的环境风险,提出防范和应急措施”。

然而,目前中国《建设项目环境风险评价技术导则》不适用于核建设项目,尽管其流程要素(如风险识别、源项分析、后果计算、风险评价及风险管理)与核电厂事故风险评价的要素相似。另一方面,2011年日本福岛核事故发生,尽管没有辐射造成的人员死亡,但核事故造成的长期环境影响受到关注。因此,本文通过研究健康风险和生态风险评价的关键要素及流程,结合现有的核电厂事故风险评价方法及非人类

收稿日期:2014-09-12;修回日期:2015-01-14

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX06004-008,2013ZX06002001-008)

作者简介:陈妍,高级工程师,研究方向为核电厂概率安全分析及环境风险评价技术,电子信箱:chenyan@chinansc.cn;郑鹏(通信作者),工程师,研究方向为核电厂概率安全分析及社会风险评价,电子信箱:zhengpeng@chinansc.cn

引用格式:陈妍,郑鹏,陈海英,等.核电厂环境风险评价框架及方法[J].科技导报,2015,33(4):37-43.

物种电离辐射防护研究现状,探讨包括公众健康和非人类物种的核电厂环境风险评价框架,并在此框架的危害排序环节采用层次分析法,计算各评价终点指标对核电厂环境风险的权重及排序,计算假设源项下的核电厂环境风险表征值。

1 环境风险评价概念及流程方法

环境风险是由自发的自然原因和人类活动引起的、通过环境介质传播的、能对人类社会及自然环境产生破坏、损害及至毁灭性作用等不幸事件发生的概率及其后果^[3]。环境风险评价是环境影响评价中的重要组成部分。

健康风险评价的指导性文件是1983年美国国家科学院提出的4步法^[4]:危害识别、剂量效应评价、暴露评价和风险表征。危害识别是根据污染物的生物学和化学资料,判定某种特定污染物是否产生危害并确定其危害;剂量效应评价是对有害因子暴露水平与暴露人群或生物种群中不良健康反应发生率之间关系进行定量估算,通常以剂量反应关系描述;暴露评价是研究人体或生物暴露于某种化学物质或物理因子条件下,对暴露量的大小、暴露频度、暴露持续时间和暴露途径等进行测量、估算或预测的过程,评估主要包括源项评估、途径和结果分析、环境浓度估算、人群分析及综合暴露量分析;风险表征将综合信息进行风险的定量或定性表达,是风险评价和风险管理的接口,为风险管理提供科学依据。在此基础上,1986年美国国家环保局(US environmental protection agency, US EPA)采用了增加风险管理的健康风险评价框架。

生态风险评价在人体健康风险评价的基础上发展起来,1998年EPA颁布了《生态风险评价指南》^[5],提出生态风险评价三步法,即问题形成、分析和风险表征,同时要求在正式的科学评价之前制定一个总体规划,以明确评价目的。EPA生态风险评价框架如图1所示。生态环境风险评价的要素包括评价终点、概念模型、暴露分析、生态响应分析、风险表征等。其中选择生态评价终点是关键,选择依据包括:具有生态学意义、对重要压力响应敏感、能代表管理目标及社会价值、具有明确的专业化定义、可预测和可测量。通常推荐的评价终点有:个体及种群水平(濒危物种、候鸟、海洋哺乳动物、脊椎动物、无脊椎动物、植物—生境)和群落水平(水生群落、湿地、珊瑚礁、稀有、濒危群落)。暴露分析、生态响应分析、风险表征与健康风险分析方法类似,但由于生态风险评价中评价终点不止一个^[6],即在物种、群落、生态系统的不同层次都有可能选择评价终点,且相同层次也会选择多种评价终点,加之生态系统水平的实验和模型研究的局限性,生态风险评价远比人体健康风险评价困难和复杂。

2 核电厂环境风险评价的框架探讨

2.1 核电厂事故风险评价方法

核电厂事故风险评价目前主要关注公众健康风险,且国际上主要沿着3条技术路线发展^[7]:1) 概率安全评价(PSA)^[8],

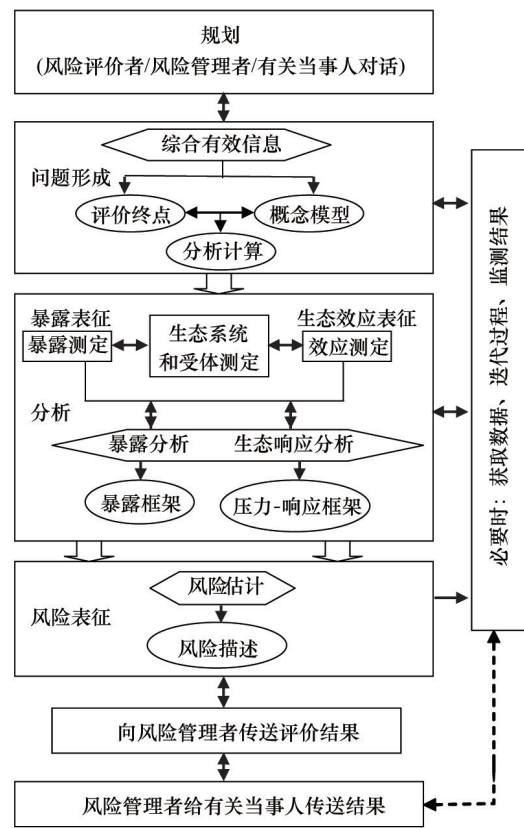


图1 美国EPA生态风险评价框架

Fig. 1 Framework for ecological risk assessment of US EPA

在事故发生前预测某设施可能发生什么事故及其可能造成的环境(或健康)风险;2) 实时(real-time)后果评价,主要研究事故发生期间实时的有毒物质的迁移轨迹及实时浓度分析,以做出正确的防护措施决策,如欧盟开发的RODOS系统等;3) 事故后果(past accident)评价,主要研究事故停止后对环境的影响,如国际原子能机构(international atomic energy agency, IAEA)发起主持的20多个国家参加的大型长期国际协调研究项目“核素在陆地、水体、城市诸环境中迁移模式有效性研究”,主要研究苏联切尔诺贝利核电站事故停止后对中欧、西欧的影响。

概率安全评价、实时后果评价及事故后果评价方法在很多情况下采用的基本方法大体相同,这些方法都包括对源项、大气扩散、剂量估算及健康风险评估等基本环节,但由于各自目的和要求不同,各方法的某些环节采用的模式方法和参数会有差别(表1)。

从表1可以看出,PSA分析范围更为广泛,且常用健康风险表征;实时后果评价要求很强的时效性,在有限的时间内计算出要求的数据,侧重剂量评估及估算剂量下的健康风险;事故后果评价侧重环境长期影响评价。因此,一定程度上PSA实现了事故下环境风险评价中的健康风险评估,而事故后果评价完成了环境风险评价中生态风险的部分内容。

表 1 核电厂事故风险评价方法比较

Table 1 Comparison of methods of accident risk assessment of nuclear power plants

项目	概率安全评价	实时后果评价	事故后果评价
目的	事故发生前,考虑事故谱的概率及其后果的风险评估	事故发生期间,开展剂量评价,为应急响应提供输入	事故停止以后,评估事故对环境的长期影响
分析对象	分析可能发生的事故谱	分析某基准事故源项	分析发生的事故源项
研究范围	一、二、三级 PSA,包括系统分析、事故进程分析、源项分析、后果分析	放射性烟羽的浸没外照射、吸入内照射和地面沉积外照射	食入途径是主要途径之一,长期环境影响
定量结果	健康风险(急性和晚期死亡风险)、经济代价	剂量估计、健康风险	污染水平,环境影响
扩散模式	通常高斯模式	拉格朗日类模式、高斯模式等	利用环境监测信息
气象数据	天气取样(循环取样、随机取样、重要度抽样/分层取样)	气象部门实时预报、准静力动力学预报模式和诊断模式	利用环境监测信息
应急措施	简化的应急措施	能够进行应急措施模拟	无

2.2 非人类物种电离辐射防护框架

20世纪80年代末,美国、加拿大等国开始研究电离辐射非人类物种评价和防护的管理问题,一些国际组织IAEA、联合国原子辐射影响科学委员会(UNSCEAR)、国际放射性辐射防护委员会(ICRP)和IUR等均先后讨论这一问题。IAEA指出“从可持续发展的角度看,仅仅从人类中心论观点看问题是不全面的,应该从人类、生物和生态等方面全面地考虑”。同时,保护了人就保护了环境这一观念是不全面的。这是因为:1) 存在没有人类的环境,例如深海有生物存在,但没有人类;2) 人类为了自身的利益可以从某一地区迁走,但生物则难于做到;3) 存在对人类不产生影响,但对环境产生影响的情况^[9,10]。

ICRP提出了评价非人类物种放射影响方法的基本框架,

指出环境放射防护的框架必须简单实用,参考动植物导出参考数据组的概念与人类辐射防护所用方法类似,因此可以采用共同的评价和防护方法:用防止发生确定性效应和限制个体的随机效应、并使其对群体的影响减到最小的方法保护人类健康;用防止或减小可能引起动物和植物早期死亡或繁殖率减小,使其对物种保护、生物多样性的保持或自然栖息地或群落状态的影响达到可忽略水平的方法保护环境。需要指出的是,ICRP提出加强放射环境保护的研究并不是由于已经发现核工业和技术应用已经对环境产生了明显的影响,而主要是从理论上有必要填补这一空白,同时也存在一些值得总结的经验教训和需要研究的实际问题。欧盟在2000年11月至2003年10月完成评价电离辐射对欧洲生态系统环境影响的框架(FASSET),如图2^[11]所示。

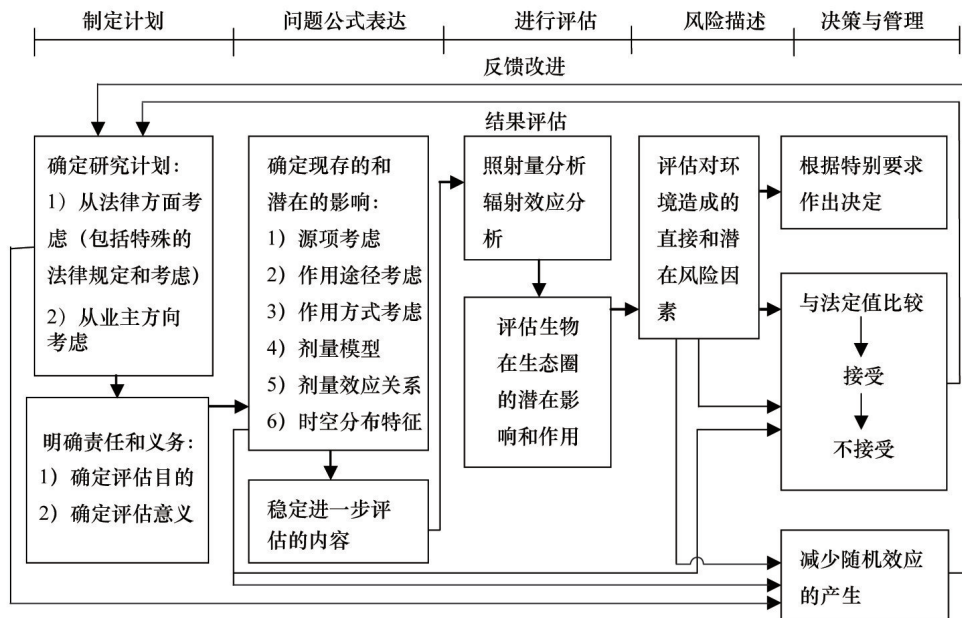


图2 FASSET电离辐射的环境影响评价框架

Fig. 2 FASSET framework for assessment of environmental impact of ionising radiation

目前核电厂正常运行工况下的公众健康风险研究较成熟,能够计算公众剂量并具备公众剂量约束值,生态风险方面能够计算水生生物的辐射剂量率,但尚未制定相关的评价标准,需要拓展参考生物(陆生植物/生物)研究及相关标准制定;在事故工况下,健康风险评价技术具备,但相关标准需要进一步确定;环境影响评价报告中能够计算各类设计基准事故造成的公众剂量并具备公众剂量约束,对超设计基准事故健康可接受水平尚未制定。生态风险方面国际上开展了一些参考生物、参考植物急性照射效应研究,但事故下剂量响应曲线研究尚少,并缺少评价标准。事故下生态风险定量描述困难,多采用半定量描述。

2.3 核电厂环境风险评价的框架探讨

随着社会的进步和发展,国际上已经达成共识:电离辐射的防护不仅要保护人而且还要保护非人类物种,保护生态环境。虽然中国已经颁布的《建设项目环境风险评价技术导则》和《生态风险评价导则》不适用于核电项目,但一方面对

核电厂的健康风险和生态风险进行评价是适应现代环境保护要求的必然发展,另一方面《建设项目环境风险评价技术导则》和《生态风险评价导则》与核电厂风险评价方法的关键要素相同。目前国内关于核电厂的健康风险评价技术基本具备,关于评价过程中的一些基本数据以及健康风险可接受水平需要进一步研究确定。在生态风险研究方面,开展了一些参考生物选取、生物剂量的评价工作以及事故后环境影响研究,但是整体生态风险研究框架、核素转移系数、剂量效应研究、管理限值等方面都需要进一步深入研究。

为发展一个包括非人类物种防护在内的核电厂辐射防护体系,本文借鉴EPA提出的环境风险评价框图、生态风险评价框架,ICRP对人类和非人类生物体放射防护共同方法的发展框架,欧盟电离辐射对生态系统环境影响的框架,中国《建设项目环境风险评价技术导则》中环境风险评价流程图以及《生态风险评价导则》中的生态风险评价流程图,提出包括公众健康和人类物种的核电厂环境风险评价框架(图3)。

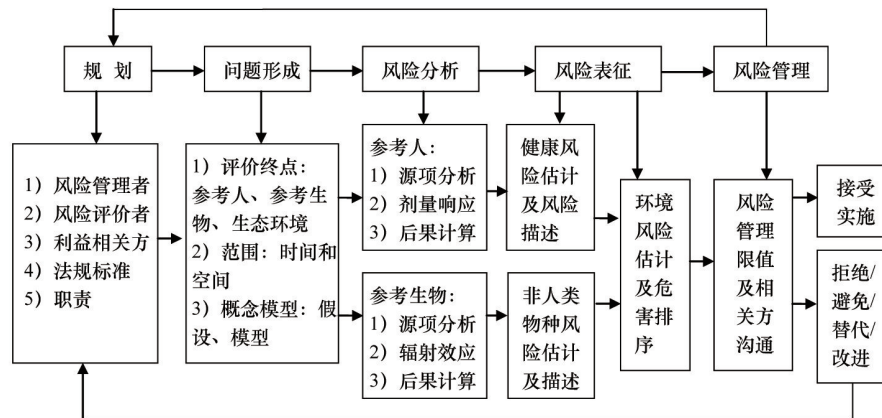


图3 核电厂环境风险评价框架

Fig. 3 Framework for environmental risk assessment of nuclear power plants

3 层次分析法下的核电厂环境风险评价研究

在核电厂环境风险评价框架下,参考人和参考生物的风险表征等环节技术已经具备。在危害排序环节,本文尝试采用层次分析法,计算权重排序以筛选对核电厂环境风险贡献较大的评价终点,为风险管理提供信息。

3.1 层次分析方法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)最早由美国运筹学家Saaty提出^[12],是一种定性和定量相结合、系统化、层次化的分析方法,它可以计算各层次因素对目标层的权重并进行排序,进而为复杂决策问题提供见解,AHP已逐步在计

划制定、资源分配、政策分析、决策预报等领域广泛应用^[13]。

AHP的步骤^[14]:1) 建立层次模型,将问题所包含的因素划分为目标层、准则层或指标层,用框图形式说明层次的递阶结构与因素的从属关系;2) 构造判断矩阵,一般采用1~9及其倒数标度值方法(表2),然后征询专家意见,对评价指标进行两两指标间相对重要性评分,构造评价指标判断矩阵;3) 层次排序及一致性检验,计算同一层次相应因素对于上一层因素的相对重要性排序数值及计算一致性指标CR(要求CR<0.1);4) 层次总排序,确定研究因素对于目标层的相对重要性^[15]。

表2 判断矩阵中标度值及含义

Table 2 Values and concepts of judgment matrix

标度值	含义	标度值	含义
1	两个要素比较,同等重要	9	两个要素比较,前者比后者极端重要
3	两个要素比较,前者比后者稍重要	2,4,6,8	相邻判断的中间值
5	两个要素比较,前者比后者明显重要	倒数	后者比前者的重要性标度
7	两个要素比较,前者比后者强烈重要		

3.2 实例计算

核电厂环境风险评价层次结构框如图4所示。目标层A为核电厂环境风险评价,准则层B₁~B₄根据辐射生物效应,考虑陆生动物、水生生物、陆生植物和人,子准则层C₁~C₁₂考虑各准则层的评价终点,最后指标层主要考虑各参考生物的急性死亡率、繁殖能力等有生物效应的指标。

在构造判断矩阵方面,主要依据人类及非人类物种对辐射敏感性^[10,16-19]。如对辐射最敏感的是哺乳动物,其次是鸟类、鱼类、爬虫类;高等植物比低等植物具有更高辐射敏感性。在一些事故中,如南乌拉尔和切尔诺贝利事故,植物受到剂量比人类受到剂量高1~2个数量级,同时考虑生态金字

塔结构及核电厂安全目标^[20]中多考虑人体健康影响等因素。

本文在准则层中,对作为生产者的植物采用稍重要的标度,对人采用明显重要的标度。在B₁子准则层,小型哺乳动物和鸟类赋予稍重要的标度;在B₂子准则层,对辐照较不敏感的无脊椎动物赋予稍不重要的标度;在B₃子准则层,对辐照相对敏感的高等植物赋予稍重要标度;在B₄子准则层,对辐照敏感的儿童采用明显重要的标度。在指标层,由于动植物的大量急性死亡将破坏生态系统,后果相对繁殖率低/产量低严重,因此对急性死亡采用了稍重要标度。此外,人的癌症死亡是核电安全目标中通常考虑的风险指标,其比生育能力低重要。

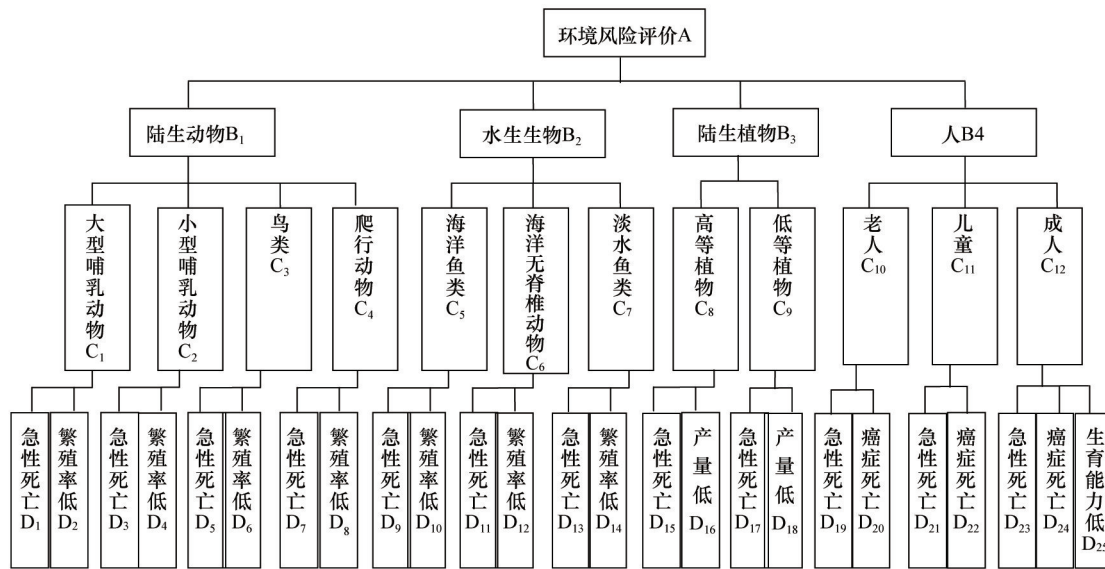


图4 核电厂环境风险评价层次结构模型

Fig. 4 Hierarchy model of environmental risk assessment of nuclear power plant

文中计算采用的判断矩阵如表3和表4所示。然后采用算术平均法求得各层次间的权重,各层及总体一致性检验CR均小于0.1,权重计算结果见表3和表4中W列。

根据各层次要素的权重,计算得到25个指标对目标层的权重排序(表5)。在本文的判断矩阵下,权重前四位的指标

分别是儿童急性死亡、高等植物急性死亡、儿童癌症死亡和低等植物急性死亡。急性死亡的权重比繁殖率降低的权重大。需要指出,文中的构造的判断矩阵是基于当前的知识判断,判断矩阵的不确定性在实际应用中需要进一步综合大量各方面专家给出的判断矩阵加权计算后得到。

表3 A层与B层、B层与C层的判断矩阵及各层次间的权重结果

Table 3 Judgment matrices and weights between level A and level B, level B and level C

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W	B ₁	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	W		
B ₁	1	1	1/2	1/5	0.11	C ₁	1	1/4	1/3	2	0.12		
B ₂	1	1	1/2	1/5	0.11	C ₂	4	1	2	8	0.51		
B ₃	2	3	1	1/2	0.24	C ₃	3	1/2	1	6	0.31		
B ₄	5	5	2	1	0.54	C ₄	1/2	1/8	1/6	1	0.06		
B ₂	C ₅	C ₆	C ₇	W	B ₄	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	W	B ₃	C ₈	C ₉	W
C ₅	1	3	1	0.43	C ₁₀	1	1/5	1	0.14	C ₈	1	2	0.67
C ₆	1/3	1	1/3	0.14	C ₁₁	5	1	5	0.71	C ₉	1/2	1	0.33
C ₇	1	3	1	0.43	C ₁₂	1	1/5	1	0.14				

表4 C层与D层的判断矩阵及权重结果

Table 4 Judgment matrices and weights between level C and level D

C ₁	D ₁	D ₂	W	C ₂	D ₃	D ₄	W	C ₃	D ₅	D ₆	W	
D ₁	1	3	0.75	D ₃	1	3	0.75	D ₅	1	3	0.75	
D ₂	1/3	1	0.25	D ₄	1/3	1	0.25	D ₆	1/3	1	0.25	
C ₄	D ₇	D ₈	W	C ₅	D ₉	D ₁₀	W	C ₆	D ₁₁	D ₁₂	W	
D ₇	1	5	0.83	D ₉	1	3	0.75	D ₁₁	1	3	0.75	
D ₈	1/5	1	0.17	D ₁₀	1/3	1	0.25	D ₁₂	1/3	1	0.25	
C ₇	D ₁₃	D ₁₄	W	C ₈	D ₁₅	D ₁₆	W	C ₉	D ₁₇	D ₁₈	W	
D ₁₃	1	3	0.75	D ₁₅	1	3	0.75	D ₁₇	1	3	0.75	
D ₁₄	1/3	1	0.25	D ₁₆	1/3	1	0.25	D ₁₈	1/3	1	0.25	
C ₁₀	D ₁₉	D ₂₀	W	C ₁₁	D ₂₁	D ₂₂	W	C ₁₂	D ₂₃	D ₂₄	D ₂₅	W
D ₁₉	1	3	0.75	D ₂₁	1	3	0.75	D ₂₃	1	4	2	0.57
D ₂₀	1/3	1	0.25	D ₂₂	1/3	1	0.25	D ₂₄	1/4	1	2	0.14
								D ₂₅	1/2	1/2	1	0.29

表5 各指标对目标层的权重排序

Table 5 Weight and rank of indexes to the target level

排序	指标	指标含义	权重	排序	指标	指标含义	权重
1	D ₂₁	儿童急性死亡	0.286	14	D ₂₀	老人癌症死亡	0.020
2	D ₁₅	高等植物急性死亡	0.133	15	D ₄	小型哺乳动物繁殖率低	0.014
3	D ₂₂	儿童癌症死亡	0.095	16	D ₁₁	海洋无脊椎急性死亡	0.012
4	D ₁₇	低等植物急性死亡	0.060	17	D ₁₀	海燕鱼类繁殖率低	0.012
5	D ₁₉	老人急性死亡	0.057	18	D ₁₄	淡水鱼繁殖率低	0.012
6	D ₂₃	成人急性死亡	0.043	19	D ₂₄	成人癌症死亡	0.011
7	D ₃	小型哺乳动物急性死亡	0.043	20	D ₁	大型哺乳急性死亡	0.010
8	D ₉	海洋鱼类急性死亡	0.039	21	D ₆	鸟类繁殖率低	0.008
9	D ₁₃	淡水鱼类急性死亡	0.036	22	D ₇	爬行急性	0.005
10	D ₅	鸟类急性死亡	0.036	23	D ₁₂	海洋无脊椎繁殖率低	0.004
11	D ₁₆	高等植物产量低	0.027	24	D ₂	大型哺乳动物繁殖率低	0.003
12	D ₂₅	成人生育能力下降	0.027	25	D ₈	爬行动物繁殖率低	0.002
13	D ₁₈	低等植物产量低	0.020				

假设核电厂环境风险评价框架中的源项、剂量响应、后果及健康评价已经分析,采用半致死剂量LD₅₀商值法或连续法得到各生物指标(D₁~D₂₅)的风险表征值(范围0~100)R_i为{20, 40, 13, 35, 13, 20, 6, 8, 15, 25, 10, 15, 15, 25, 45, 70, 5, 8, 15, 18, 15, 18, 8, 10, 19},则在假设风险表征值下的核电厂的环境风险为: $R = \sum_{i=1}^{20} R_i \times W_i = 20.2$ 。若环境风险管理限值定为环境风险表征值低于20,环境风险属于低风险;20~80属于中等风险,需要采取代价利益分析进行改进;大于80属于高

风险,必须立即采取行动降低风险。可以看到,尽管人都在低风险区,但由于植物不可移动其受到的辐射影响比较大,也可能使这一地区的环境风险成为中等风险,需要关注。此外更为重要的是,通过加权后风险表征值R×W_i排序,可以看到哪些评价终点的风险需要优先管理控制,如本例中按加权风险值排序在前四位的分别是高等植物急性死亡、儿童急性死亡、高等植物产量低、儿童癌症死亡,表明高等植物和儿童急性死亡的风险需要格外关注。

4 结论

随着核电厂风险评价技术的发展以及现代环境保护的要求,对核电厂进行环境风险评价势在必行。本文力求发展一个包括非人类物种防护在内的核电厂辐射放射防护体系,借鉴目前国内外的健康风险和生态风险评价框架流程及要素,对中国核电厂环境风险评价框架进行了探讨。在此框架的危害排序环节采用层次分析法,选择评价终点及指标,计算了各指标对核电厂环境风险的权重及排序,其中儿童急性死亡、高等植物急性死亡、儿童癌症死亡和低等植物急性死亡权重较高,最后探讨了假设源项的核电厂环境风险表征及排序。

需指出的是,本文提出的核电厂环境风险评价框架值得进一步探讨;评价终点和源项需要根据厂址特征和具体源项分析得到;所选择指标的生态学意义、可测量性及社会价值、判断矩阵以及风险表征的不确定性等需要各方面专业人员沟通共同获得;最后,环境风险评价是多学科交叉领域,核电厂的环境风险评价研究需要加强与其他各个专业的合作,以制定适合核电厂环境风险评价的技术文件,为核电厂环境风险管理提供支持和依据。

致谢:感谢程理、姚仁太、童节娟、全占军、王先良、刘新建、王亮、余少青对相关问题的讨论和帮助。

参考文献 (References)

- [1] 国家环境保护总局. HJ/T 169—2004 建设项目环境风险评价技术导则[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
State Environmental Protection Administration. HJ/T 169—2004 Technical guidelines for environmental risk assessment on projects[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2004.
- [2] 中华人民共和国水利部. SL/Z 467—2009 生态风险评价导则[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL/Z 467—2009 Guideline for ecological risk assessment[S]. Beijing: China Water Power Press, 2009.
- [3] 毛小琴, 刘阳生. 国内外环境风险评价研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2003, 11(3): 266—273.
Mao Xiaoling, Liu Yangsheng. Current progress of environmental risk assessment research[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2003, 11(3): 266—273.
- [4] Committee on the Institutional Means for Assessment of Risks to Public Health, National Research Council National Academy of Sciences. National academy of sciences, risk assessment in the federal government: Managing the process[M]. Washington, DC: Nation Academic Press, 1983.
- [5] United States Environmental Protection Agency. FRL-6011-2 Guidelines for ecological risk assessment[R]. Washington, DC: Risk Assessment Forum, 1998.
- [6] 毛小琴, 倪晋仁. 生态风险评价研究述评[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 646—654.
Mao Xiaoling, Ni Jinren. Recent progress of ecological risk assessment [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2005, 41(4): 646—654.
- [7] 胡二邦. 环境风险评价实用技术、方法和案例[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
Hu Erbang. Practical technology, methods and cases of environmental risk assessment[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009.
- [8] United States Nuclear Regulatory Commission. Reactor safety study: An assessment of accident risks in U.S. commercial nuclear power plant, WASH-1400[R]. Washington, DC: United States Nuclear Regulatory Commission, 1975.
- [9] 潘自强. 非人类物种电离辐射防护的进展[J]. 辐射防护, 2004, 24(增1): 1—10.
Pan Ziqiang. Process of radiation protection of non-human species[J]. Radiation Protection, 2004, 24(Suppl 1): 1—10.
- [10] Valentin J. ICRP Publication 91. A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species[J]. Annals of the ICRP (Ann ICRP), 2003, 33(3): 207—266.
- [11] 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.
- [12] Saaty T L. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation[M]. New York, London: McGraw-Hill International Book Co, 1980: 1—85.
- [13] 汪应洛. 系统工程[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2003.
Wang Yingluo. Systems engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [14] 孙冬川. 管理的数量方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Sun Dongchuan. Quantitative methods of management[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] 杜静. 生态风险评价的数学模型及应用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
Du Jing. Model and application of ecological risk assessment[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [16] 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.
Zhou Yongzeng. Biological effect of radiation on non-human species [J]. Radiation Protection Bulletin, 2004, 24(4): 1—9.
- [17] Whicker F W, Schulz V. Radioecology: Nuclear energy and the environment[M]. Volume II. Florida: CRC Press, 1982.
- [18] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionising radiation reports to the general assembly with scientific annex[R]. New York: United Nation, 1996.
- [19] United States Environmental Protection Agency. Generic ecological assessment endpoints (GEAEs) for ecological risk assessment[R]. Washington, DC: Risk Assessment Forum, 2003.
- [20] United States Nuclear Regulatory Commission. 51FR30028 Safety goals for the operations of nuclear power plants[S]. Washington, DC: United States Nuclear Regulatory Commission, 1986.

(责任编辑 王媛媛)