

文章编号: 1001-098X(2003)06-0281-04

辐射环境质量评价模式的建立

商照荣, 吴浩, 刘华

摘要: IAEA(国际原子能机构)对电离辐射照射伴有的危险的防护和可能产生这种照射的放射源安全提出了基本要求, 强调“对放射源所致照射的性质、程度和可能的后果要进行评价”。很明显, 要对释放到环境中的放射性所致辐照剂量进行评价, 一定形式的环境评价模式是必不可少的。综合近年来辐射防护和放射生态学研究的有关文献, 对建立辐射剂量评价模式的基本要求进行了初步归纳。

关键词: 辐射环境; 核素迁移; 评价模式

中图分类号: X591 **文献标识码:** A

Development of model for assessment of radiation discharge to the environment

SHANG Zhao-rong, WU Hao, LIU Hua*

(Nuclear Safety Centre, State Environment Protection Administration, P.O.Box 8088, Beijing 100088, China;

*National Nuclear Safety Administration, Beijing 100035, China)

Abstract: International Atomic Energy Agency (IAEA) establish basic and detailed requirements for protection against the risks associated with exposure to radiation and for the safety of radiation sources that may deliver such exposure, in which, particularly emphasize to “make an assessment of the nature, magnitude and likelihood of the exposures attributed to the source”. It is clear that the assessment of the consequential radiation exposure arising from any releases of radioactive materials to the environment will have to rely on some form of model. This paper summary recent progress in radiation protection policy and radioecology research and primary concludes the basis requirements in assessment model development.

Key words: radiation environment; nuclide transfer; assessment model

IAEA(国际原子能机构)以 ICRP(国际辐射防护委员会)1990年建议书和其他 IAEA 安全报告书为基础出版的《国际电离辐射防护和放射源安全的基本安全标准》(BSS)^[1]对电离辐射照射伴有的危险的防护和可能产生这种照射的放射源安全提出了基本要求, 并在安全标准第 WS-G-2.3 号报告中

详细地介绍了这些安全基本要求的细则和所需要的步骤, 其中强调“对放射源所致照射的性质、程度和可能的后果要进行评价”^[2]。

1991年, ICRP-60 报告基于辐射防护三原则而建立的放射性废物排放管理的概念框架包括: 源项, 在环境中的转移, 照射途径, 剂量估算, 与释放限值的比较。很明显, 要对释放到环境中的放射性所致辐照剂量进行评价, 一定形式的环境评价模式是必不可少的。IAEA 于 1989 年推荐了建立模式的基本架构(图 1), 2001 年安全报告丛书第 19 号又对其进行了补充^[3]。

1 放射性核素在环境中的转移

放射性核素可以气态和液态的形式向环境中排放, 一般地, 释放源附近的放射性污染要高于

收稿日期: 2003-06-06

作者简介: ①商照荣(1964-), 男, 国家环保总局核安全中心(北京, 100088)副研究员, 博士, 主要从事核素迁移研究和辐射环境评价工作。

②吴浩(1960-), 男, 国家环保总局核安全中心副研究员, 学士, 主要从事核材料安全和辐射环境评价工作。

③刘华(1959-), 男, 国家核安全局(北京, 100035)研究员, 硕士, 主要从事辐射防护和辐射环境管理工作。

审校者: 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 李开宝

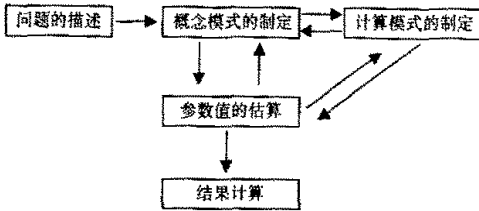


图1 环境评价模式建立的基本架构

其他地方，在剂量评价时需要加以特别考虑。如果放射性核素的排放量随时间不断变化，或是短寿命放射性核素排放，评价模式就应该是动态的，模式也更复杂。而对于距离释放源较远的区域，就可以合理地使用假设的平衡状态下的评价模式。

在放射性核素排放进入大气、地面或地下水后，人们首先关心的就是它在这些路径中的分布与迁移情况。评价模式的应用就是为了适应这一要求，将各种环境因素、地理因素与放射性核素的迁移相整合，得到一个全面的综合的预值。但是，由于一些因素可以被一个假定的参数所代替，或者一些因素对最终结果的贡献极小，或者由于某些资料的不足，最终并没有被包含在评价模式中。IAEA 于 1982 年提出的有关评价模式的概念框图见图 2 和图 3。

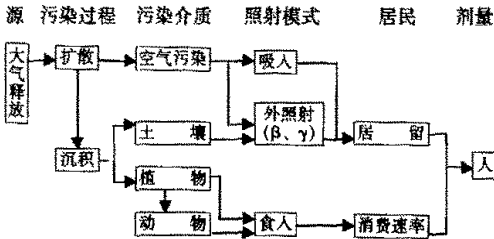


图2 大气排放的环境评价模式概念框图

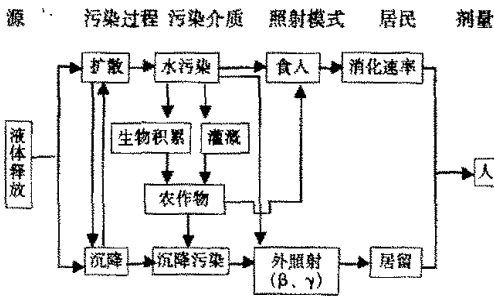


图3 液体排放的环境评价模式概念框图

1.1 放射性核素在大气中的分布与沉降

放射性核素排放进入大气后的行为受天气条件的影响。就像我们不能非常准确地预报天气形势一样，我们不可能准确地预测一些短期释放的放射性核素在几天后的动向。虽然一些模型可用于分析这些放射性核素在大气中的未来趋势，但这些模型是基于有限的数据和计算方法而建立的，不可能十分准确。对于连续性排放，可以参考以往的气象资料，应用蒙特卡罗方法计算排放点周围的累积趋势。半经验的高斯烟羽模型就是被广为应用的评价方法，有关它的应用可见文献[4, 5]。

大气中的放射性核素在飘移过程中逐渐减少，一方面是由于其本身的衰减，另一方面是随干湿沉降而转移到地表的农作物、土壤和水体中。对于烟羽迁移过程中的湿沉降，已有模式公布^[9]。干沉降同样也是一个复杂的过程，它是一个烟羽下方的放射性核素与地表土壤或植物互相结合的过程，在建立模型时，首先应该考虑沉降速率 ($Bq \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) 与地表空气中浓度 ($Bq \cdot m^{-3}$) 的关系。

1.2 放射性核素在海岸水域的弥散

染料示踪试验是最早用于预测放射性物质在海岸水域随风及潮汐变化规律的方法。这一方法由于所得结果只能用于释放源附近水域，因而后期发展了箱模型(box model)用于预测区域对流迁移的变化。箱模型描述了排放的放射性核素瞬时均匀地从一个箱到另一个箱的转移过程，以系数表示该核素在箱中滞留的程度，所要分析的对象越多，箱就越多^[6]。底质在模型中被分为一个或多个箱，用以描述对放射性核素的吸收，通常以平衡状态下的 K_d (分布系数) 表示。然而，大部分参数与真实情况有较大差距，尤其是将多个过程综合成一个单一参数时，不确定性很大。为了改进这一问题，又发展了更为详细的二维或三维模型用于描述复杂的海水及海床的变化规律对放射性核素分布的影响^[7]。无疑，这些复杂的模型需要的是更大量的数据和对计算能力的更高要求。但是，越复杂并不一定越精确，因为模型只是用于模拟放射性核素从局部到某一区域的行为的工具。

有人用非放射示踪方法，如盐度测量所得的数据对放射性核素在海岸水域弥散模型进行校准刻度^[6]；也有利用模型由一种放射性核素推导出另一种核素的结果，如 ^{137}Cs 、 ^{239}Pu 和 ^{240}Pu ^[8]。

2 放射性核素的照射途径

放射性污染的弥散模型提供了放射性在大气、水、沉积物、土壤和植物中的迁移,及其相应的浓度,这就为评价外照射剂量,以及由于吸入和食入放射性物质而引起的内照射剂量提供了前提条件。但是,首先我们应该对照射途径加以明确。

2.1 来自空气的外照射

根据1995年欧盟公布的辐射防护第72号报告^[4],将来自空气的外照射分为三类:(1)能量小于20keV的 γ 射线辐照,其烟羽几乎在所有情况下都可以认为是均匀的整体,在这一整体的任何一点,吸收能可以认为是辐射能量的一半;(2)能量大于20keV的 γ 射线辐照,须用模型才可以确定放射性核素在烟羽中的分布,以及吸收、散射等能量的转换;(3)烟羽中的 β 粒子总是不确定,对人体表面的剂量率相当于空气中的50%。很显然,在进行剂量评估时,需要一些复杂的小模型进行辅助计算,第72号报告对这些模型进行了归纳。

2.2 来自污染地面的外照射

从空中沉降于地表的放射性核素同样对人类形成外照射。欧盟辐射防护第72号报告假设这些核素可在自然状态下向土壤内部浸透30cm,其辐射剂量率设为地表上方1m处。 β 射线辐照由于范围有限,只设定地表与空气的接触面为其影响范围。报告书归纳了一些核素的评价结果。

2.3 吸入放射性气体所致内照射

放射性核素可循两条途径由呼吸道进入人体,一个是吸入放射性烟羽,另一个是吸入再悬浮粒子。再悬浮粒子是随干湿沉降到达地表的部分,由于自然风或人工耕作等原因而再入空气中。这是一个相对比较复杂的过程,至今还没有一个动力学模型可以模述它。由于再悬浮的偶然性,评估再悬浮剂量时要依据当时详细的背景资料,由再悬浮空气中的浓度($Bq \cdot m^{-3}$)与地表面沉积浓度($Bq \cdot m^{-2}$)比值决定的再悬浮因子(m^{-1})可用于表述这一行为。实际上有研究表明,与吸入放射性烟羽相比,吸入再悬浮粒子所致辐射是微不足道的。

2.4 食入被污染食物和饮水所致内照射

(1)陆地食物。事实上,放射性烟羽对陆地动植物的污染要比图2和图3概念框图所描述的复杂,其中的每一条途径含有更加复杂的循环路径。目

前,已有很多描述陆地食物链的模型,它们依据环境的生态条件而分为平衡态和动态两种。平衡态模型以大量的数据资料做依据,评估模型中各因子之间的关系;动态模型则主要用于评价均匀的持续排放的结果,库室模型就是典型的动态模型。在实际应用中,有两个方法可简化模型的应用:①在土壤迁移、植物吸收和向动物转移这三个主要库室中设立子模型,使计算过程和评估简单直接,易于观察,并可随时对应地域性的改变而进行修饰;②通过对食物链归类(如将食物归为叶菜、根菜、谷物、肉、蛋、奶,将动物归为牛、羊、猪、鸡等)可压缩庞大的食物链结构,使模型应用简化。即使如此,模型仍然十分复杂,而且不可能设计出一个完全的动态模型用于描述这些食物链的全过程。在利用模型得出食物中动态的放射性核素含量后,运用进食量和摄入剂量因子推导出辐射剂量率就相对简单了^[5]。

(2)海产食物。对于海洋生态系,大部分海洋放射性污染的评价模式是应用实验中获得平衡状态浓集因子,依据不同时期的海水放射性污染程度计算出放射性核素在海产品中的含量。而对于淡水生态系,目前则趋向于发展更复杂的动态生物累积模式,即放射性核素沿水→浮游植物→浮游动物→鱼的食物链转移模式^[6]。在海洋生态系中,海岸水域的剂量评价最为重要,为此目的开展了一些方法学研究用于确定对海产品(鱼、甲壳类、软体类及海草)的采食量,以及对重要人群组的识别^[4,7]。这些资料和放射性核素在食物中的含量及摄入剂量因子构成了剂量估算的基础。

(3)饮水。与食入途径相比,饮用水所致辐照剂量的评价要相对直接一些。湖泊或河流中的放射性核素含量一经确定,就可直接应用模型得到所需结果。另外,被污染水源通过其他途径,如灌溉进入食物链的情况应该予以考虑。

3 剂量模型

ICRP于1996年公布的吸入及食入剂量常数总结了过去50年剂量模型研究的结果。应该注意到,剂量模型只是一个一般性的剂量估算模式,它依据的是由参考人确定的体模数据,这一参考人现在又增加了婴儿(3个月)、儿童(1岁和5岁)和少年(10岁和15岁)^[8]。

近年来,由于ICRP强调放射性废物处置过程中可能对自然界动植物产生影响,从而引起人们对日益增多的辐照可能产生的对自然界野生动植物影响研究的兴趣,其中包括剂量模型的建立^[12]。另外,由于海洋生物种类的庞大和生存环境的广阔,很难对它们全部做出详细的分析。在建立剂量模型时,要在较大的剂量率范围内选择海洋参考生物,可选择的种类是很多的。但从近来的文献看,大部分研究并没有得到放射性核素在海洋生物体内分布的详细资料,通常只强调整个体水平。利用海水弥散模型,我们可依据海水放射性浓度($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)以及平衡状态下的浓集因子和 K_d 值,得到海水中放射性核素在海洋生物中的吸收量和内照射剂量,以及在海洋沉积物上的浓集量和外照射剂量。

对于陆地环境,一般动植物的剂量估算方法与海洋生物相似^[13],所不同的是,陆地动植物体依据的是空中放射性水平($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)和沉降水平($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$),同时还要考虑放射性核素在地表土壤中的比活度($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

4 剂量估算的应用

由于评价模式只是以参数形式反映环境变化的信息,因而不同的模式所得的结果不同,尤其对于不同类型的模式,比如库室模型与水文动态模型所反映的海洋动态变化差距就很大。IAEA近来公布的一些不同模式对相同源项评价的不同结果就是实例^[14]。所以,在发表评价结果时,应首先公布评价模式的结构、假设条件和所利用的数据资料的详细内容,以消除对不同评价结果的误解。这又一次强调了在应用评价模式时的“针对性”,即评价模式的应用一定要结合当地实际情况有目的地进行。

在考虑人类所受的辐照时,利用剂量模式所得出的单位剂量率,通过与相应的剂量限值的比较,可以作为制定放射性核素限制排放的标准。与之相对应,在监测放射性排放过程中,监测数据可用于修正在特定条件下的各项参数,以提高剂量模型的可靠性。

参考文献:

[1] IAEA. Safety Series No.115. International Basic Safety

Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources[M]. Vienna: IAEA,1997.1-10.

- [2] IAEA. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment, Safety Standards No. WS-G-2.3[M]. Vienna: IAEA, 2000. 1-29.
- [3] IAEA. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment, Safety Reports Series No.19 [M]. Vienna: IAEA, 2001. 1-110.
- [4] EC. Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment, Radiation Protection 72, Report No. EUR 15760 [M]. Luxembourg: European Communities, 1995. 1-49.
- [5] Gurbutt PA, Kershaw PJ, Durance JA. Modelling the distribution of soluble and particle-adsorbed radionuclides in the Irish Sea [A]. Guay JC, Guegueniat P and Pentreath RJ. Radionuclides: A Tool for Oceanography[C]. London: Elsevier Applied Science, 1988. 395-406.
- [6] Abril JM and Garcia León M. A marine dispersion model for radionuclides and its calibration from non-radiological information[J]. J Environ. Radioactivity, 1992, 16:127-146.
- [7] Aldridge JN. CSERAM: A model for the prediction of marine radionuclide transport in both particulate and dissolved phases[J]. Radiat Prot Dosim, 1998, 75(1-4): 99-103.
- [8] ICRP. Age-Dependent Doses to Members of the General Public from Intake of Radionuclides: Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Dose Coefficients[J]. Annals of the ICRP, 1996, 26(1): 1-91.
- [9] IAEA. Modelling of the Transfer of Radiocaesium from Deposition to Lake Ecosystems, IAEA-TECDOC-1143[M]. Vienna: IAEA, 2000. 1-32.
- [10] Hunt GJ, Hewitt CJ, Shepherd JG. The identification of critical groups and its application to fish and shellfish consumers in the coastal area of the north-east Irish Sea [J]. Health Phys, 1982, 43: 875-889.
- [11] Leonard DRP and Hunt GJ. A study of fish and shellfish consumers near Sellafield: assessment of the critical groups including consideration of children [J]. J Soc Radiol Prot, 1985, 5:129-138.
- [12] IAEA. Effects of Ionizing Radiation on Plants and Animals at Levels Implied by Current Radiation Protection Standards, Technical Reports Series No. 332[M]. Vienna: IAEA, 1992. 1-22.
- [13] Amiro BD. Radiological dose conversion factors for generic non-human biota used for screening potential environmental impacts[J]. J Environ Radioactivity, 1997, 35: 37-51.
- [14] IAEA. Radiological Conditions of the Western Kara Sea: Assessment of the Radiological Impact of the Dumping of Radioactive Waste in the Arctic Seas[M]. Vienna: IAEA, 1998. 1-17.