

放射性核素生态运移与辐射剂量评价 研究现状及趋势

刘森林*, 吴仁杰, 张欣钰, 李金凤

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 放射性核素在生态环境中的输运和转移(简称运移)长期以来受到辐射环境保护领域的特别关注。本文将系统梳理放射性核素在生态环境中的运移机制和模型及参数、人类和非人类生物剂量评价方法,以及在核设施发生事故情况下放射性核素非平衡态运移模型及参数等相关研究现状,并从计算模型、评价方法和参数等多维度探讨放射性核素在生态环境中的运移行为,重点针对放射性核素海洋运移、非人类物种剂量评价、短期事故排放的动态模型、人工智能技术应用等方面开展进一步研究并提出建议,为核与辐射应急响应、环境监测与风险评估等提供科学依据和技术支持。

关键词: 放射性核素运移; 剂量评价; 非平衡态运移模型; 氡; ^{14}C

中图分类号: TL942

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)10-1989-19

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0641

Current Status and Research Trend on Ecological Migration of Radionuclides and Radiation Dose Assessment

LIU Senlin*, WU Renjie, ZHANG Xinyu, LI Jinfeng

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The transport and transfer of radionuclides in the ecological environment (referred to migration) have long been of a particular concern in the field of radiological environmental protection. This paper systematically reviews the current relevant research statuses on mechanisms, models and parameters of radionuclide migration in the ecological environment, and the methods for assessing doses of humans and non-human species, as well as the non-equilibrium migration models and parameters of radionuclide migration in case of accident at a nuclear facility. From multi-dimensional perspectives, such as computational models, evaluation methods, and parameters, etc., this paper explores the transport and transfer behaviors of radionuclides in the ecological environment. In terms of radionuclide migration, this paper systematically reviews the transport processes and migration models of radionuclides from source term release to atmospheric, terrestrial, surface water (rivers, lakes, etc.), groundwater, and marine environments. It elaborates on the basic theories of radionuclide transport and transfer in the ecological environment, compares the characteristics of different transport modes, and

收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-10-08

基金项目: 中国工程院国际合作战略研究与咨询项目(2022-GJ-05); 中国核工业集团有限公司科学技术委员会咨询项目

* 通信作者: 刘森林

summarizes the transport and transfer behaviors of radionuclides in the ecological environment. In terms of environmental radiation exposure assessment, this paper summarizes both individual-related and source-related evaluation methods, describing the basic methods of environmental radiation exposure assessment. It presents a schematic diagram of the main steps and dose estimation models for assessing the impact of radionuclides released into the environment, and sorts out the methods, evaluation models, and dose assessment software for exposure assessment from the perspectives of both the human and non-human species, domestically and internationally. Moreover, for environmental radiation exposure assessment in case of accidents, this paper takes tritium and ^{14}C as examples to provide an overview of short-term migration, accident exposure assessment, and real-time consequence evaluation and decision support for nuclear accidents. It proposes suggestions for further research in the aspects of radionuclide marine transport, dose assessment models for non-human species, short-term accidental release, and the application of artificial intelligence, to provide scientific basis and technical support for nuclear and radiation emergency response, environmental monitoring, and risk assessment.

Key words: radionuclide transport and transfer; dose assessment; non-equilibrium migration model; tritium; ^{14}C

放射性核素在生态环境中的输运和转移(简称运移),长期以来受到辐射环境保护领域的特别关注。自1945年7月16日美国在新墨西哥州开始人类第一次大气层核武器实验以来,大量放射性物质直接进入人类生态环境。在20世纪50年代人们就开始关注到核武器实验落下灰等对动植物及一般公众照射的随机效应。1986年4月26日,前苏联切尔诺贝利核电站事故引起全球尤其是临近地区和邻国,乃至整个欧洲地区环境的严重放射性污染。2011年3月11日,日本福岛第一核电站事故导致大量放射性物质进入大气和海洋环境;2023年8月,日本政府开始把该事故所产生的核污染水经多核素处理系统处理后排放入西太平洋海域,未来该排放将持续至少30年,已引起邻国及包括日本本国民众在内的广大太平洋地区公众的高度关注。放射性核素的生态环境行为及其对生态系统和人类健康的影响引起了全球的关注^[1]。放射性核素在生态环境中的行为受多种因素影响,包括化学性质、物理状态、环境介质的特性以及气候条件等,这些因素的共同作用决定了放射性核素在水生环境、陆生环境、大气环境等人类生态系统中的运移行为^[2]。在水生环境中,放射性核素通过复杂的水文地质路径进行迁移,可能受到平流、扩散或弥散、吸附、生物富集等多种过程的影响^[3]。陆生环境中的放射性核素迁移同样涉及到大气扩散输运^[3]以及陆地生物圈循环^[1]。

此外,放射性核素在生态系统中的转移和积累可以通过食物链传递^[4],对生态环境及人类健康产生深远影响。在核设施严重核事故等极端情况下,短期大量放射性核素的释放及其扩散输运模式尤其需要深入研究^[5]。

本文旨在全面调查分析并系统梳理放射性核素在生态环境中的运移及其对人类和非人类生物的辐射照射评价研究现状,并对该领域的未来科学研究提出一些建议。

1 放射性核素在环境中的运移

1.1 放射性核素在环境中运移的基本理论

放射性核素释放入环境并随环境运移从而进入不同类型的食物链,进而对人类和非人类生物产生辐射照射。放射性核素在环境中的运移是评估它们对公众和非人类生物产生辐射照射的基础。图1系统地描述了放射性核素排放到空气(大气环境)和水体(地表水环境、地下水环境和海洋环境)经各种运移途径进入的行为网络,其修改自文献[6]。

放射性核素在环境中的运移通常遵守质量守恒、动量守恒和能量守恒原理。放射性核素在水环境中的运移机制主要包括扩散、沉积、吸附、淋滤等;放射性核素在大气环境中的运移机制主要包括扩散、干湿沉积、再悬浮等;放射性核素在土壤中的运移机制主要包括扩散、离子交换、沉降、

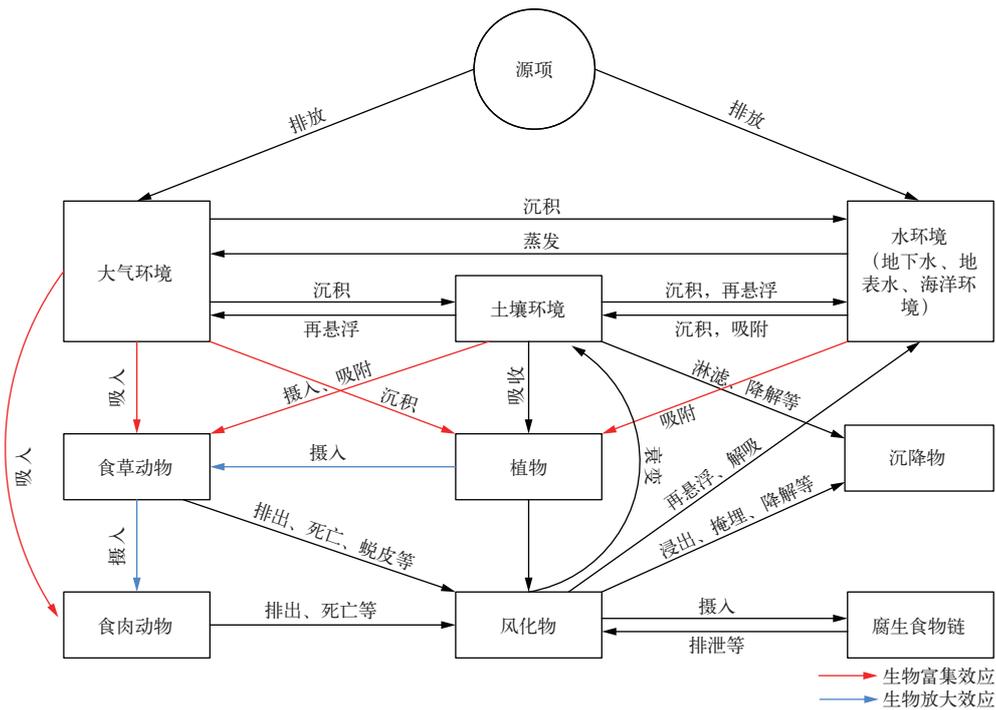


图1 放射性核素在生态环境中的运移行为

Fig. 1 Transport and transfer behavior of radionuclide in environment

化学和物理吸附等。

放射性核素输送理论主要以经放射性核素衰变修正后的浓度梯度输送理论来进行描述^[7]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \lambda C \quad (1)$$

式中: C 为放射性核素浓度; u 、 v 、 w 分别为三维流场速度的分量; k 为比例系数(传输系数), k_x 、 k_y 、 k_z 分别为 k 在 x 、 y 、 z 轴的 3 个分量; λ 为放射性核素的物理衰变常量。根据不同的使用环境, 其边界条件也有所不同。

环境运移流场计算主要用表示动量守恒的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程与表示质量守恒的连续型方程为核心的环境运移流场计算方法进行计算^[8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{F} \\ \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; \mathbf{V} 为流体速度; p 为流体压力; t 为时间; μ 为流体动力黏度; \mathbf{F} 为所有外力合力。

放射性核素在环境中各种介质之间的转移,

一般用分配系数 K_d 以及转移参数(水生生态系统表示为浓集因子 CR ; 陆生生态系统表示为 TF)来进行描述^[4,9]:

$$K_d = \frac{\text{吸附在沉积物上的放射性核素量}}{\text{留在溶液中的放射性核素量}} \quad (3)$$

$$\text{转移参数} = \frac{\text{生物组织中的放射性核素量}}{\text{环境中的放射性核素量}} \quad (4)$$

1.2 大气环境

描述放射性核素在大气中扩散最常用的两种方法是梯度输送理论和统计理论。梯度输送理论核心观点为大气介质中放射性核素浓度服从梯度扩散理论, 输运通量与浓度梯度成正比; 统计理论是从研究物质浓度的脉动平均入手, 追踪粒子运动史实现平均量和脉动量的计算^[7]。描述大气输送与扩散过程的最通用模式仍为连续点源高斯模式, 具有与实验结果吻合、模式方程数学运算简便、物理概念特性清楚等优势^[10]。大气扩散理论自 20 世纪开始研究, 关于污染物质在大气中的弥散, 已有大量的理论和实验研究, 而且在气象观测的基础上, 已能对核设施附近的污染浓度做出较好的估算^[11]。

我国学者在数值模拟研究中, 依据描述方法和应用尺度的不同, 将放射性核素的大气弥散模

式划分为高斯模式、拉格朗日模式、欧拉模式、CFD(计算流体动力学)湍流模式和嵌套模式。对于小于2 km的局部弥散,通常采用CFD湍流模式;在20 km范围内的局地扩散,则较常采用高斯模式;而对于中尺度(20~200 km)和大尺度(超过200 km)的弥散,拉格朗日模式或欧拉模式更为适用,通常使用多种模型嵌套模式来避免单一模式的局限性^[12]。葛宝珠等^[13]对模式中的4项主流模块(核素衰变、输运扩散、大气沉降、辐射剂量诊断)的物理机制等进行了系统性收集、归纳并总结,为针对性地提高模式模拟能力、明确模式发展方向提供了科学依据。

1.3 陆地土壤环境

放射性核素在陆地环境中,一部分通过湿沉降和干沉降的方式被截留,另一部分沉积在地面上,并随着天气变化进入再悬浮过程。土壤表面通常作为放射性污染的主要储存库,风等机械扰动造成的粒子再悬浮是一个普遍性弥散机制,在此过程中,植物冠层的高度和类型、天气类型、土壤类型、动物活动、土壤和沉积物中发生的物理、化学和生物转化过程都将使放射性核素在环境分区中进一步重新分布^[9,14]。

对于放射性核素在土壤中的迁移,在切尔诺贝利事故发生后的10年里,各国通过实验调查较为系统地分析了典型放射性核素在土壤中的迁移过程,结果表明,放射性核素在单一土壤类型中的垂直迁移程度较低,在土壤中的短期迁移受土壤类型的影响较小,长期迁移受土壤质地等因素的影响较大^[15-22]。在研究过程中, K_d 作为评价放射性核素在土壤和沉积物中的分配系数,其实验测量及理论计算是一个关键环节。国际土壤学会将土壤粒子按其性质大致分为4类,并给出单克重中粒子数和表面积估值,国际原子能机构(IAEA)以此分类为基础编制第479号技术报告,给出预测陆地和淡水环境中放射性核素转移参数值^[9],数据收集过程中参考了许多国家的经验和方法,已被视为具备国际参考价值。

串行隔室模型与对流扩散方程以及其他统计分布函数一开始是用来预测¹³⁷Cs在土壤中的迁移,后被广泛用于模拟放射性核素在土壤中的迁移^[9]。放射性核素计划排放对环境的影响可通过近似放射性核素通过环境隔室转移的数学模型进

行评估,这些模型也可以成为评估性工具,用作评价为减少放射性核素意外释放的影响、预测地下废物处置库释放的未来影响而所采取的对策有效性。

当前我国放射性核素迁移研究主要针对放射性废物安全处置评价。李建国^[4]将我国放射性核素生态转移的实验研究、辐射环境监测及调查工作中积累的数据整理成放射生态学转移参数使用手册,介绍元素在部分土壤分类中的 K_d 参数推荐值。在工程应用中,王金生等^[23]将对流-扩散方程与非平衡吸附关系式相结合,开发了放射性核素在非饱和孔隙介质中迁移的二维非平衡吸附数值模式与计算机程序NESOR。刘建琴等^[24]分析了高放废物地质处置系统中放射性核素在地质屏障中的迁移途径,采用库室模型方法,通过Goldsim软件对放射性核素在花岗岩裂隙中的迁移模型(平面单裂隙迁移模型)进行了求解,模拟了放射性核素在地质屏障中的迁移释放,给出了放射性核素的释放率结果。李静晶等^[25]利用中子活化方法测量了环境介质和生物体内稳定元素浓度,并计算了 K_d 与CF,可广泛应用于厂址环境数据缺失状态下生态转移参数的获取。

1.4 陆地水生环境

1.4.1 地表水环境 放射性核素在地表水中的迁移过程分为初始混合、完全混合和长距离弥散3个阶段^[26],在该阶段放射性核素浓度服从梯度扩散理论^[7]。由于放射性核素在不同环境(如河流、湖泊或水库等^[27])下的迁移特点不同,因此放射性核素在地表水中的迁移计算可以根据具体情况和所需的精度选择不同的方法。通过已有的数学模型进行计算是目前较为常见的方法,各国学者以对流-扩散方程^[28]、Navier-Stokes方程^[29]、湍流理论^[30]、有限元法^[31]、高阶插值^[32]等方法为基础,考虑地表水的流动、扩散等过程后,完成所需精度的模型建立,通过数值求解计算出放射性核素在水体中的弥散与迁移行为。此外,一些简化的统计估算方法也可用于估算放射性核素迁移的影响,也有学者通过使用克里金插值法来分析元素的空间分布特征^[33]。这些方法可以单独应用或结合使用,以适应不同情况下的需求和精度要求。

此外,在完全混合和长距离弥散阶段,放射性核素会与水体中的固相物质发生离子交换、化合

物沉淀、络合和水解等作用,产生沉积现象,使水相中的放射性核素浓度下降^[34-35]。沉积现象通常使用 K_d 来表示,采用实验方法进行测量而得到。为了能够获得更加准确的 K_d , IAEA 放射性废物管理第四工作组(MODARIA WG4)开展了相关研究^[36],第四工作组针对淡水环境给出了 49 种元素的 K_d ,为后续涉及到放射性核素迁移的 IAEA 技术报告提供了数据支持。

1) 河流输运

河流输运的特点是基于强平流和湍流的宽浅水体,放射性核素在水平和垂直的方向上均有一定的扩散。综合河流迁移特点与弥散机制,若忽略河流迁移中全部的瞬态变化,有学者研究了稳态水流模型,如图 2 所示^[37],该模型能够用于放射性核素向河流的连续常规排放,可应用于由于河流弯曲引起的弥散不显著的河流。

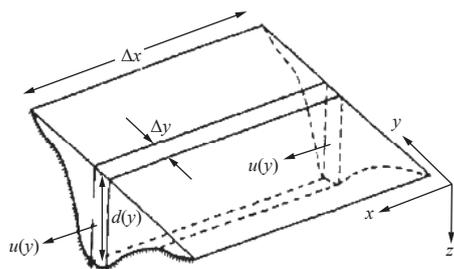


图 2 河流横断面模型
Fig. 2 River cross section model

关于河流沉积研究主要包括建立沉积学数据库、沉积机理、沉积模式、沉积分类、储层建模及预测等方面^[35]。对于河流的沉积计算,目前有多种方式,例如非稳态一维模式以及沉积物混合槽模式(水槽沉积模式)^[7]等。此外,也有学者将光滑粒子流体动力学和浅水波方程结合开发了 SPH-SWE

模型,对保守型河流污染物的扩散过程进行模拟,结果表明该模型也具有较强的预测能力^[38]。

2) 湖泊和水库输运

湖泊和水库的特点在于纵向深度大但水流速度较慢,可以认为是一个封闭或者半封闭系统。在该种条件下,放射性核素的迁移特征可以简化为恒定流量输入、输出与沉积,在计算该条件下放射性核素的弥散可以通过质量守恒方程对浓度进行求解。针对湖泊沉积,美国核管理委员会(NRC)根据其沉积特点,提出了双层湖泊沉积模式^[39],该模式将湖泊以水层和沉积层的界面为限,分别建立水层与沉积层的放射性核素质量守恒方程,通过边界条件以及两层之间存在的交换关系进行求解。表 1 列出了河流、湖泊和水库的输运特点。

为了解决更加复杂的环境迁移问题,国际上相关组织开发了一些可模拟放射性核素在河流、湖泊和海洋中的迁移模型或软件,如 Delft3D^[40]、SWAT^[41]、区域海洋模式系统(ROMS)^[42]等,如表 2 所列,可以考虑更多复杂的因素,如水体的地形、植被、湍流效应等,从而提高模拟的准确性。

1.4.2 地下水环境 放射性核素在地下水的迁移过程与地表水类似,在地下水的载带下进行迁移与扩散,同时对沿途的土壤岩石进行离子交换与沉积。输运方面,其基本理论大多建立在反映水在土壤岩石孔隙中渗流规律的达西定律之上^[7];沉积方面,通常通过标准定量混合实验对 K_d 进行测量。因此,针对放射性核素在地下水中的迁移问题研究主要集中在输运过程的模拟与计算。

国内外关于求解地下水输运模式主要分为解析模式与数值模式^[43]。解析模式是使用数学方程

表 1 不同输运方式的特点

Table 1 Characteristic of different transport methods

输运方式	特点	覆盖范围	水体交换	季节影响	层化现象	生态影响	沉积影响
河流输运	动态变化快; 河流流速快, 流向明确, 导致放射性核素迁移速度快, 响应时间短; 强烈的季节性和事件影响: 暴雨洪水等自然事件可导致放射性核素快速迁移和重新分布; 表层吸附作用显著: 河流中的悬浮颗粒物与沉积物是放射性核素吸附和沉积的主要介质	视河流规模而定	快	大		小	大
湖泊和水库输运	封闭系统特性: 湖泊通常为封闭或半封闭系统, 放射性核素在湖泊中的迁移受到限制, 停留时间较长, 易于在水体或沉积物中积累; 层化现象: 湖泊水体可能出现温度或化学成分的层化, 从而影响放射性核素的垂直分布和行为	视湖泊规模而定	慢	小	有	视湖泊规模而定	大

表2 地表水输运计算软件的特点

Table 2 Characteristic of surface water transport calculation software

软件名称	特点
Delft3D	功能全面,提供可视化图形界面,可接入其他软件(如GIS),提供开源社区
SWAT	大流域尺度的长时间水文模拟综合性强,可模拟较多过程,不适用于短期模拟(洪水模拟),对小尺度或高精度模拟的适应性较弱
ROMS	高分辨率,支持多种网格结果,适用于各种尺度的模拟,具有先进的物理过程,提供开源社区,有一定使用门槛,占用的计算资源高

直接求解地下水流程和溶质输运的方法。这种方法通常适用于边界条件简单、地质构造均匀的情况。解析解可以提供清晰的物理和化学过程,但在现实复杂多变的地下水环境中,其应用可能受到限制。数值模式是处理复杂地下水问题的常用方法,特别是在复杂地质和边界条件情况下,该模式得到广泛应用。通过离散化地下水流程和溶质输运方程模拟放射性核素在地下水中的迁移和扩散。

当前,广泛使用的数值模拟软件有MODFLOW、MT3DMS、GMS、PHREEQC等,如表3所列。MODFLOW广泛用于模拟地下水流动,能够

处理复杂的水文地质结构和多种水文条件^[44-45]; MT3DMS^[46]则是专门用于模拟地下水中溶质迁移和扩散的软件;GMS提供了图形用户界面,简化了地下水模拟的设置和分析过程,使得模拟工作更为直观和容易操作^[47]。这些工具在功能上互补,能够联合使用,形成一套完整的地下水模拟系统。例如,可以使用MODFLOW来模拟地下水流动,然后用MT3DMS处理溶质迁移问题,PHREEQC则用于模拟水化学反应和水质变化^[48-50]。这种联合使用可以极大地提高模拟的准确性和效率,能够更好地理解和预测地下水系统的行为。

表3 地下水输运计算软件的特点

Table 3 Characteristic of groundwater transport calculation software

软件名称	特点
MODFLOW	可处理复杂的水文地质情况及多种边界条件,核心功能侧重于地下水流的模拟,对于复杂的化学反应和生物过程的模拟能力有限
MT3DMS	易于使用,求解精确,支持吸附、解吸、化学反应和生物降解等过程的模拟,可与多种软件耦合,更侧重于模拟地下水中污染物的迁移和扩散,若需要描述地下水流动则需要耦合其他软件
GMS	可视化图形界面,综合多种已有模型,可以模拟大多数与地下水有关的水流和溶质输运问题,支持模块化操作
PHREEQC	可处理地表水和地下水的化学平衡及输运问题,能够处理各种热力学平衡反应,可正向模拟和反向模拟,完全开源

1.5 海洋环境

放射性核素直接排放入海洋环境或在经过河流输运到河口处排放最终汇入海洋,海洋环境也是放射性核素在地表水迁移的最终接纳水体。放射性核素海洋迁移基本的计算方法是以质量守恒、动量守恒为原理,服从梯度扩散理论,主要涉及对流、扩散等过程的模拟。这些过程通常通过Navier-Stokes方程、连续方程和物质守恒等方程来描述。近些年数值解法如有限差分法、有限体积法或有限元法也被广泛用于求解这些方程。有学者通过计算流体动力学来模拟流体流动和混合过程^[51],结合雷诺平均Navier-Stokes方程、 $k-\epsilon$ 湍流模型和梯度扩散模型等建立三维区域的海洋扩散模型,模拟放射性核素在水体中的输运行为。也有研究采用箱式模型将水体或更大范围的区域

海洋作为框架,通过计算每个箱体的平均浓度,求解箱体之间相关联的变量完成计算^[52]。模型的建立和运算需要根据具体的物理环境、目标物质和所需的精度来选择合适的参数和算法。

在海洋沉积方面,由于海洋中沉积物浓度和 K_d 都较小,一般认为沉积作用对海洋海域影响不大^[7]。若要考虑海洋沉积,沉积模式需要使用二维以上的模型。除了建模方式,我国学者通过放射性核素示踪技术来研究中国南海海洋沉积过程中的物质来源、沉积速率以及再悬浮过程^[53]。但通过该方法得到的结果低于中国多个近岸海域的实测沉积速率。

为了进一步提升大尺度的海洋放射性核素迁移的准确模拟,国内外目前通用的研究方法是将已有的放射性核素输运方程与海洋环流数值模型

相结合,从而建立大范围的海洋放射性核素输运模型。国际上海洋环流模型研究方面,目前使用较为广泛的是ROMS,李宇轩等^[54]基于ROMS建立了覆盖北太平洋的高分辨率海洋动力模式,同时结合被动示踪实验,模拟了福岛第一核电站排入海的放射性核素5年时间的分布情况。结果表明,放射性核素在排海后主要随黑潮延伸体向东移动,但仍有部分放射性核素由于西南向回流、涡旋活动及模态水潜沉过程,向西南方向抵达中国外海。此外,ROMS目前也用于日本东京电力公司关于福岛第一核电站事故释放的放射性环境影响评价中,已使用海水中铯活度浓度的环境监测值对该模型进行了验证^[55]。

除了ROMS,多个国际研究机构也开发了不同海域的海洋计算模型,如法国国家科学研究中心联合英国气象局等机构开发了欧洲海洋核心模型(nucleus for European modelling of the ocean, NEMO)^[56]。NEMO基于质量连续性方程、动量守恒方程、盐度和温度方程,利用有限差分方法进行空间离散。该模型主要包括以下几个核心组件:用于海洋动力学模拟的NEOM-OCE模块,涵盖求解原始方程;用于模拟海冰的形成、融化、动力学和热力学过程的NEOM-ICE模块;以及海洋示踪剂输运的NEMO-TOP-PISCES组件。NEMO遵循长期开发战略,现今仍在不断优化,以增强其在海洋动力学及相关领域中的应用。

国内关于海洋环流模型的研究,自然资源部第一海洋研究所完整的地球流体力学控制方程组为基础,采用前后欧拉差分格式,结合正逆两重空间平滑,开发了三维海洋环流数值模式MASNUM^[57],是世界首个采用双时间层显格式的海洋环流模式,也是世界上较为先进的第3代海洋数值模式,目前该模型的结果已经得到了论证和应用。赵云霞等^[58]以福岛第一核电站事故为背景,将MASNUM与Perianez等^[59]提出的放射性核素输运模型相结合,在忽略海洋沉积的前提下建立了西北太平洋的区域放射性核素的输运扩散模式,模拟了¹³⁷Cs在该区域20年内的扩散行为。此外,中国科学院大气物理研究所建立了国际上首个全球1 km性能可移植的海洋环流模式(LICOMK++)^[60],实现了全球水平分辨率1 km和全海深真实海洋环流模拟,成功地模拟了海洋中尺度和亚中尺度

结构。LICOMK++在东方和新神威超算平台上的模拟速度均突破了每天1模式年(SYPD),取得了超越SOTA(state-of-the-art)的优化效果。

除了传统的海洋环流数值模型方法,近年来随着人工智能(AI)与机器学习技术的快速发展,AI技术也在该领域中发挥了显著作用,尤其在通过机器学习和深度学习技术预测和追踪放射性核素迁移路径方面展示了巨大潜力。在海洋环流迁移研究方面,有学者利用通过海洋动力学得到的三维涡流数据对其开发的识别网络3D-U-Res-Net进行训练^[61],从而进行更深层次的研究,也有学者构建卷积神经网络ConvLSTM开展对南极海冰的预测^[62],其结果表明,该方法在南极海冰预测中具有巨大的潜力。

在放射性核素输运方面,华北电力大学开发了放射性核素在中国近海迁移预测软件^[63],通过建立中国近海域水动力模型,获得水动力特性,并选取核电站临近海域建立放射性核素迁移计算模型,可提供放射性核素的迁移路径、扩散范围和活度浓度变化。周涛等^[64]在该模型基础上研究了福岛第一核电站事故后泄漏的放射性核素的扩散规律及不同排放方式的预测情况。结果显示,核污染水随海流迁移并扩散,高活度浓度区域沿海岸向北,再向东北方向螺旋前进。船运排放的放射性核素扩散较慢,以排污点为中心逐渐呈带状分布,约15天后到达日本沿海。无论沿海或1 km排放,放射性核素都会快速扩散至近岸区域,并主要向东北方向移动。该模型的模拟结果与实测值吻合良好,显示出较高的可靠性和准确性。李子超等基于拉格朗日方法^[65]以及欧拉方法^[66]分别建立了近岸海域放射性核素扩散模型,分析了事故后放射性核素在核电站近岸海域的迁移规律,结果表明¹³¹I和¹³⁷Cs在核电站近岸海域的迁移方向基本一致,沿海岸线向东迁移并向南扩散。应急响应中,¹³⁷Cs因物理半衰期较长,可忽略衰变影响,而¹³¹I因物理半衰期较短,衰变对其活度浓度的影响较大。

许鹏^[67]选取海阳核电站发生假想核泄漏事故以及福岛核污染水排放时间为研究对象,基于ROMS模型耦合实时气象数据和放射性核素输运模型,分别建立中国海域放射性核素海洋扩散模型和福岛核污染水放射性核素海洋扩散模型,利

用该模型对放射性核素的扩散范围及活度浓度分布进行预测计算,并建立了一种适用于放射性核素海洋扩散模型的可信度计算方法。

在关于海洋中放射性核素输运与活度浓度监测方面,为了加强地区监控和分析亚太地区海洋生态系统中核设施排放的放射性物质潜在影响的能力,IAEA 组织开展了亚太区域合作 RAS7028 号项目。该项目建立了亚太地区海洋放射性数据库,该数据库涵盖的主要样本为海水、沉积物和生物,包含 ^{14}C 、 ^{40}K 、 ^{90}Sr 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 、 ^{226}Ra 等在内的众多放射性核素。截止到 2020 年已有超过 40 689 个数据点。此外,该项目还发布了《海洋基质取样、制备和放射性分析文件指南》,为海洋放射性核素的监测提供技术指导。在提高区域风险建模能力方面,2019 年在我国开展了关于中国剂量评估和风险分析建模的区域技术交流^[68]。

2 环境辐射照射评价

2.1 环境辐射照射评价基本方法

环境辐射照射评价包括个体相关评价方法和源相关评价方法^[69-70]。个体相关评价方法是评估环境中受到辐射照射的个体(包括公众中的个人和非人类生物中的种群个体)接受到的所有源的辐射照射剂量。源相关评价方法是评估某单个源释放到环境对个体所产生的辐射照射剂量。在公众照射评价中,常用的基本量包括公众年有效剂量 E 、公众年集体有效剂量 S 和非人类生物种群吸收剂量 D 。个体相关评价结果需与年剂量限值进行比较;源相关评价结果需与剂量约束值进行比较,是辐射防护最优化的约束条件,其集体有效剂量评价结果用于源的辐射防护方案或防护措施的优化迭代。

2.2 公众照射评价

图 3 所示为评价释放到环境中的放射性核素的影响的主要步骤与剂量估算模式,其修改自文献^[27, 71]。

在核设施环境影响评价中,主要评价指标包括代表人的有效剂量和评价区域的集体有效剂量。研究的重点已从单一介质的迁移规律转向多系统的综合研究,特别关注放射性核素在土壤-地下水系统和植物-土壤系统中的迁移与转化,研究方法涵盖室内实验、野外现场实验、计算机模拟

和示踪实验^[72]。评价方法的关键环节是建立放射性核素转移的照射途径库室网络图,鉴别并确定转移参数,预测体系的响应方法分为平衡态的浓集因子(CF)方法和非平衡态的系统分析(SA)方法,两种方法的准确性依赖于参数灵敏度与模式稳健度^[7]。IAEA 与国际放射生态学家联合会开发了名为“野生动物转移数据库”的在线数据库,以提供用于环境放射性影响评价的参数值,从而估计放射性核素向非人类物种(即野生动物)的转移,旨在为进行评估和开发/维护评估模型的学者提供一个持续和不断发展的放射性核素在土壤中的富集系数(CR)信息来源。

在实际研究中,重点关注几种特殊放射性核素的评价模式。 ^3H 及 ^{14}C 元素是生命的构成元素,参与生物链转移, ^{85}Kr 与 ^{129}I 具有物理半衰期长的特点,在评价中同样具有特殊性。 ^3H 全球模式的基本假定是 ^3H 以 HTO 方式参与水圈循环而无甄别作用,单库模式将全球可循环水作为 1 个库室,库室内水中 ^3H 活度浓度均匀,混合瞬时完成^[14]。碳循环的主要库室是大气、海洋和陆地生物圈之间相互交换碳和 ^{14}C 。放射性碘同位素中寿命最长的核素为 ^{129}I ,经长时间运移后分布于全球环境,在大气及水环境中一般在短于物理半衰期的时间内进入海洋环境。Kocher^[73] 于 1979 年提出了评价 ^{129}I 对全球居民照射的 9 隔室全球模式,并估算了释放 3.7×10^{10} Bq 的 ^{129}I 进入陆地大气后对全球人口所造成的辐射剂量。 ^{85}Kr 设定为双隔室全球模式,假定只要释放到北半球或南半球的大气中就立即均匀混合,实际上仍存在明显纬度差别,精细考虑则要增加隔室^[7,14]。

^3H 、 ^{14}C 对人体产生照射的估算通常采用比活度模式,基础是假设照射接受者体内的放射性核素活度浓度和环境中的放射性核素活度浓度已经达到平衡,涉及的参数少,不确定度相对较小,属于稳态评价模型。表 4 列出 4 种放射性核素评价模式的特点。

2.3 非人类物种照射评价

联合国原子辐射影响科学委员会(UNSCEAR)从 1996 年开始关注非人类物种的辐射影响问题^[74]。国际放射防护委员会(ICRP)认为有必要适当地扩大环境保护的范围,而不仅局限于对人类的适当保护^[75],并建议非人类物种与人类采用共同的防

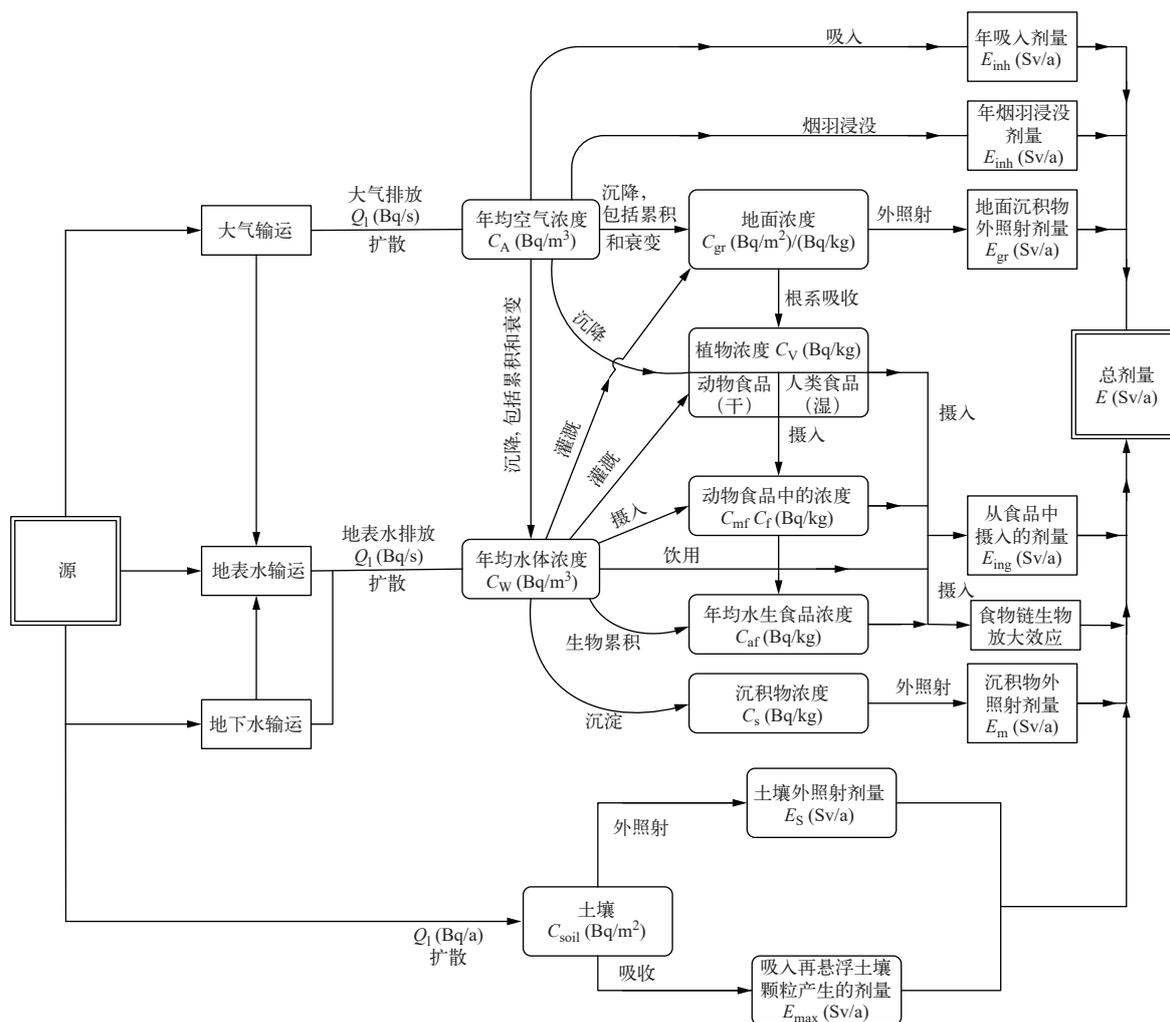


图3 评价释放到环境中的放射性核素的影响的主要步骤与剂量估算模式

Fig. 3 Main step and dose estimation model for assessing impact of radionuclides released into environment

表4 ³H、¹⁴C、⁸⁵Kr、¹²⁹I 评价模式的特点

Table 4 Characteristic of ³H, ¹⁴C, ⁸⁵Kr, ¹²⁹I evaluation model

核素	评价模式	特点
³ H	Evans 比活度模式	假设人体(有机分子与体液)被均匀标记,反推出 ³ H的剂量换算系数
	NCRP(美国国家辐射防护与测量委员会)模式	假设参考人需水量为3 L/d,公式计算出单位活度浓度 ³ H的年有效剂量。需对饮用水中的氡活度浓度(C _w)、食物中水的氡活度浓度(C _n)、由于食物消化产生的氧化水中的氡活度浓度(C ₂)、大气水中的氡活度浓度(C _a)进行规定
¹⁴ C	比活度模式	实际测定 ¹⁴ C含量,结合实际摄入碳平均值得出照射剂量
⁸⁵ Kr	双隔室全球模式	假设一旦释放到北半球或南半球的大气中,气体便会迅速均匀混合
¹²⁹ I	9隔室全球模式	假设释放到环境中的 ¹²⁹ I性质与天然存在的稳定碘相同

护与评价方法(图4),并于2003年出版了其第91号出版物《评价非人类物种电离辐射影响框架》^[76]。由于生态环境中生物物种数超过100万,无法开展每种生物的辐射剂量评价。为了能够科

学有效地评价电离辐射对非人类物种的影响,2008年ICRP在其第108号出版物中提出了与参考人对应的参考动植物RAP(reference animal or plant)以及次级参考动植物(secondary reference an-

imals and plants)的概念^[75]。参考生物的确是进一步开展生物剂量评价的基础,其主要属性包含:几何形状、生物体组成、生活习性、环境参数等。不同地区及环境中的参考生物存在较大差异,因此不同生物剂量模型中所选取的参考生物存在一定的差异。此外,还提出了通过使用导出关注参考水平(derived consideration reference level, DCRL)来作为比较的参考。对每种参考动植物都有特定的DCRL范围,在DCRL范围内长期暴露可能会产生辐射生物影响。ICRP还在其出版物中选取了12种陆地和水生动植物作为参考生物,并给出了相对应的DCRL值。在其随后的第124号出版物^[77]、第136号出版物^[78]及第148号出版物^[79]中分别从不同照射情况、剂量评价模型修正以及参考动植物的辐射权重等方面对非人类生物的辐射影响进行了更深入的研究与讨论。

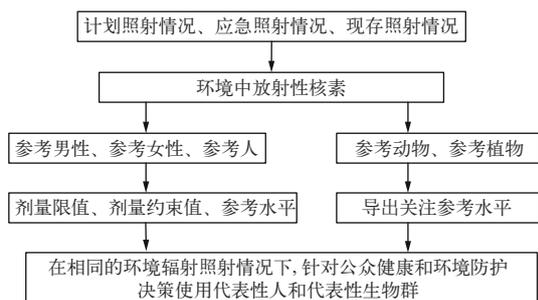


图4 辐射环境下的人类与非人类物种的防护与评价方法^[75]

Fig. 4 Methods of protection and evaluation of human and non-human species in radiation environment^[75]

国内外学者针对不同生物群个体从剂量计算、模型对比等方面开展了相关研究。中国原子能科学研究院在20世纪末针对大亚湾海域的海洋生物以及少数陆地生物的辐射剂量和生物转移参数开展了相关实验研究^[80]。随后,姚青山^[81]对美国的GRADED方法和欧盟的FASSET计划进行研究分析,并结合我国的具体情况和特点,提出适合我国在非人类物种辐射剂量评价方面工作的思路 and 方案。同时,以我国某厂蒸发池环境条件开发了赤麻鸭的剂量评价模型,开展了剂量分析和评估。近年来,李静晶等^[82]使用MCNP 4C程序对⁶⁰Co和⁵¹Cr发射的不同 γ 射线在生物体内的输运情况进行模拟,计算了⁶⁰Co和⁵¹Cr对中华鲟的剂量换算系数,并与ERICA程序进行对比,二者计算结果在数量级上保持一致。

生态系统是一个极其复杂的系统,通常是在生物种群或群落层次上观察对生态系统的影响。但是目前关于电离辐射的生物学效应研究,大多数现有的数据仅涉及个体而不是种群,目前还不能在任何较大的种群水平上得出普遍结论。由于利用实验室条件开展非人类生物种群的辐射影响研究难度较大,目前只有很少的研究成果。Alonzo等^[83]通过实验研究并结合切尔诺贝利事故禁区现有生物学效应观察数据,估算了老鼠和蚯蚓的种群生物学终点效应对应的最小外照射剂量率,结果表明,引起老鼠个体生长率和种群繁殖率下降10%的最低 γ 剂量率分别为140 μ Gy/h和340 μ Gy/h;引起蚯蚓个体生长率和种群繁殖率下降10%的最低 γ 剂量率分别为3800 μ Gy/h和3810 μ Gy/h。由于影响因素较多,以上模式估算结果是一个比较宽的范围值,研究者指出上述结论并不具有普遍意义。法国辐射防护与核安全研究院(IRSN)研究了慢性照射条件下⁶⁰Co对蚯蚓和²⁴¹Am对水蚤的种群增长的影响,并建立了种群增长预测简单模型^[84]。结果表明,随着剂量率的升高,种群增长的延迟时间越长,在⁶⁰Co γ 照射剂量率达到11 mGy/h时,蚯蚓种群增长的延迟时间为0.6代;在²⁴¹Am α 照射剂量率达到15 mGy/h时,水蚤种群增长的延迟时间为0.8代。生长速度快的水蚤种群繁殖力比生长速度慢的蚯蚓更容易受到辐射的影响。由于生物种类的多样性和照射条件的复杂性,不同类型生物对电离辐射的敏感程度可以相差6个数量级。这说明从生物分子水平、个体水平到种群水平的电离辐射效应之间的作用机制和相互关系需要进行深入细致的研究。

随着各国学者关于电离辐射对生态系统影响研究不断深入,多个国际组织和部分国家陆续建立了生物剂量评价模型以开展电离辐射对非人类物种的影响评价。如表5所列,ICRP提出了构建参考动植物的方法框架;NRC在考虑生物的生命周期、饮食习惯、体型等因素基础上开发了RESRAD-BIOTA计算程序;欧盟建立了基于三级筛选方法的ERICA程序;IRSN建立了EDEN评估方法,通过输入描述电离辐射源和照射接受者相对位置的几何形状及其主要特性等相关参数,期望得到更加贴近实际照射情境的非人类物种剂量计算等。这些方法综合考虑了生物体的生命周期、

表5 不同生物剂量评价软件的特点
Table 5 Characteristic of different biological dose assessment softwares

名称	国家或组织	特点
BiotaDC ^[78]	ICRP	具有用户自定义环境中生物体的质量、形状和位置等特点,能够计算生物体的内外照射以及 ICRP 第 107 号出版物中所有放射性核素的剂量换算系数
RESRAD-BIOTA ^[85]	美国	提供了放射性核素通过食物链在生物体内积累的模式
FASSET ^[86]	欧盟	初步提出生物剂量评估框架,其模型涉及到 31 种参考生物
ERICA ^[87]	欧盟	按照生态系统(淡水、海水、陆地生态系统)和具体生物特征对生物进行分类,可以给出具体参考生物的辐射剂量估算结果,还可以根据需要并结合厂址特征添加新的参考生物进行计算。2021 年发布 ERICA2.0 版本
EPIC Doses3D	欧盟	生物模型采用解析几何体,同时生物模型中区分了部分的组织与器官
R&D128 ^[88]	英国	将生态系统划分为淡水、海水、陆地生态系统。淡水生态系统考虑了 12 类生物和 16 种放射性核素,海洋生态系统考虑了 13 类生物和 16 种放射性核素,陆地生态系统考虑了 18 类生物和 17 种放射性核素。已于 2023 年 4 月停止使用 ^[89]
EDEN ^[90]	法国	通过输入描述电离辐射源和目标相对位置的几何形状以及目标主要特性的相关参数完成计算。可以处理生物和环境介质的相对位置,计算结果为剂量转换系数
AECL ^[91]	加拿大	以加拿大研究文献中涉及到的生物浓集因子为基础计算靶生物体内的活度浓度
LIETDOS-BIO ^[92]	立陶宛	以通用数据库和特定数据库作为原始数据,结合蒙特卡罗方法推导出模型描述的方法,可以计算出任何大小或形状的生物体的剂量转换系数
DosDimEco ^[93]	比利时	使用放射性核素动态转移模型,通过文献得出生物体的浓度比(CR)后进行计算,部分生物中的活度浓度是通过摄入和滞留模型计算得出的,可以用于水生生态系统
ECOMOD ^[94]	俄罗斯	使用动态模型,适用于类似于生物活性化学元素或生物活性化学元素同位素的放射性核素
K-BIOTA ^[95]	韩国	采用了与 RESRAD-BIOTA 类似的分级评价方法

饮食习惯、体型等因素,以更准确地评估生物体暴露于环境辐射的实际情况。

目前国际上使用最多的评价软件是 ERICA,该软件是在 ERICA 框架项目的基础上开发的,可以用来计算水生生物和陆生生物所受到的辐射剂量,ERICA 采用了三级筛选的方法:一级筛选是对比环境中放射性核素浓度与导出环境介质浓度限值(EMCL),从而判断生物是否存在潜在危险;二级筛选则需要结合特定场址中具体生物的放射生态学参数来计算各生物受到的辐射剂量率;三级筛选则是在二级筛选的基础上引入统计学方法得到各生物具有统计意义的辐射剂量率。ERICA 还链接了在线的生物效应数据库,同时提供了放射性核素的转移环境模型。2021 年 10 月发布了 ERICA 评估工具 2.0 版^[96],该版本采用 ICRP 第 136 号出版物中的 BiotaDC 方法计算剂量系数,能够评估惰性气体和氡的内照射剂量,以及评估衰变链中子代剂量率的修订方法。此外,该版本对基础评估参数数据库以及 EMCL 也进行了更新。

3 事故情况下环境辐射照射评价

3.1 短期运移

近年来,核事故释放期间放射性核素的短期运移成为国际关注的重点领域,主要集中在预测短期释放条件下放射性核素在环境中的时空动态分布及行为。³H 及 ¹⁴C 作为生命构成元素且参与生物链转移过程,因放射性核素在短期内的运移存在空间和环境介质分布波动性较大,而成为研究工作的焦点。研究涉及多个层面,包括实验研究、理论模型的计算与比较等。IAEA 的辐射安全环境模型(environmental modelling for radiation safety, EMRAS)计划工作组开展了较为全面的研究,包括一系列针对 ³H 和 ¹⁴C 在常规排放和事故释放后的环境行为模型测试和比对研究^[97-98],最终形成核设施事故释放后氡在环境中的迁移评估方法技术报告^[70]。该计划第七工作组的一项重要工作是对有机氡在水生食物链中的动态学进行研究,提出一种新的动态氡转移模型 AQUATRIT,该模型有效解决了溶解性有机氡(DOT)的特殊处理问题,

为氙的动态迁移研究提供了更精确的分析工具。

Nie 等^[99-100]以我国秦山核电站为例,系统研究了氟化水在土壤中的迁移动力学特征及其蒸散效应,讨论了在正常连续释放和突发性短期释放条件下,不同土壤类型、降水和蒸发等时变环境因素对氙迁移行为的影响,并对氟化水动态蒸散所导致的辐射剂量进行了估算。结果表明,强降水对氙的迁移速率有显著影响,蒸散因素对浅层土壤中氙的迁移影响较小,在事故短期释放条件下,土壤中氙浓度和根系吸收率在经过一年的迁移扩散后会显著下降。

Le Dizès 等^[101]描述了从大气到土壤-植物系统的氙动态隔室模型 TOCATTA,模拟了氙在几种农作物(如蔬菜、牧草及一年生作物)中的迁移过程。TOCATTA 模型相对简单,具有有限数目的隔间和适合其在操作模式下使用的输入参数,应用情况表明该模型存在一定局限性,在实验中植物体内自由水氙(TFWT)转化为有机氙的动力学仍存在不确定性。原因在于:对土壤中的迁移过程(和相关转移途径)的敏感性较低;模型假设自由水氙和有机氙遵循单独的、不相关的吸收途径;在模拟二者动力学时,优先选择植物粗生长动力学参数。

3.2 事故照射评价

考虑到核事故发生后,往往会出现放射性核素的短期较高的环境释放率,准确描述放射性烟

云造成的放射性污染范围及准确估计其辐射剂量十分重要。瞬态下要求事故后果评价程序或系统具有快速、易于使用、无需复杂输入信息的特点,国际上对此类事件开发了3种类型程序:

1) 第一类代表性程序为 HOTSPOT。HOTSPOT 采用高斯烟羽模式和 ICRP 第 30 号出版物提出的剂量估算方法,对于连续或间隙释放、爆炸释放、燃料着火、大面积污染等不同释放情形分别使用 PLUME、EXPLOSION、FIRE 和 RESUSPENSION 4 个程序。此外, HOTSPOT 还包含针对核事故中氙、钚、铀释放的初步评估程序^[5]。

2) 第二类代表性程序为 RASCAL,可为采取防护行动提供辅助决策。RASCAL 由 NRC 组织开发,适用于核电站事故后果评价、乏燃料存储及运输事故的预测和评估等^[102]。1997 年, IAEA 在第 955 号技术文件中首次正式推荐 InterRAS V1.1 (即 RASCAL V2.X 版本)供 IAEA 各成员国使用^[5]。

3) 第三类代表性程序为 NARAC。该系统集成了多种扩散模式,并耦合拉格朗日粒子扩散模型,用于计算核事故中放射性污染物的扩散范围及其浓度分布,并结合实时气象数据、在线源项信息、地形地理数据以及剂量数据库,可快速准确的提供计算结果,为全球范围内的核事故应急响应提供可靠的技术支持^[103]。表 6 总结了部分代表性核事故实时后果评价与决策支持系统。

表 6 核事故实时后果评价与决策支持系统^[5]

Table 6 Real-time consequence evaluation and decision support system for nuclear accident^[5]

系统名称(开发机构/国家)	中小尺度大气扩散模式
NARAC(劳伦斯利弗莫尔国家实验室/美国)	粒子扩散模式
RODOS(欧盟)	分段高斯烟羽模式、高斯烟团模式、拉格朗日烟团模式等
RECASS(俄罗斯)	高斯烟团模式、三维数值模式、蒙特卡罗模式
SPEEDI(日本原子能研究所/日本)	粒子扩散模式

福岛第一核电站事故发生后,我国学者通过对该事故释放的¹³⁷Cs 开展局部尺度扩散模拟,研究了拉格朗日粒子扩散模型的4种浓度计算方法(箱式计数法、高斯核、均匀核和抛物线核)的有效性^[104]。在源项反演方面,刘蕴等^[105]采用了截断总体最小二乘变分事故源项反演模型(TTLS-VAR),利用大中尺度范围内的¹³⁷Cs 空气活度浓度监测数据,修正扩散模型算子与监测向量以降

低大气扩散模型误差的影响,对福岛第一核电站事故¹³⁷Cs 释放源项进行了反演计算,为福岛第一核电站事故后果评价、公众辐射防护及环境影响评价提供了计算依据。

4 讨论与展望

4.1 讨论

1) 放射性核素在海洋环境中的运移计算方法

和模型存在局限性。

放射性核素在环境中的运移是一个复杂的过程,受众多因素的影响,世界各国学者也因此开发了不同精度的计算方法和模型。这些方法模型从简化的理想条件逐步扩展到复杂的大时间尺度的三维模型,尤其在福岛第一核电站事故发生之后,这些计算方法在描述和预测海洋输运方面起到了关键作用。但目前已有的计算方法几乎都是基于稳态模型假设,没有考虑历史沉积物再悬浮或生物群集体迁移事件等对放射性核素短期运移的影响。此外,模型的开边界条件如何设定也会显著影响模型的预测结果,进而限制了其应用范围。其次,对于放射性核素在海洋中的行为,可用的实验数据和观测数据往往非常有限,这不仅限制了模型的校准和验证能力,也增加了模型预测的不确定性。最后,如何准确地描述放射性核素在食物链中的传递和生物放大作用,需要更加深入的研究。

2) 放射生物学效应缺乏种群水平研究,国外生物剂量评价模式在我国生态环境中的适用性和合理性有待进一步验证。

生态系统是一个复杂的有机整体,通常只能在种群或群落层面进行长期观察以评估其影响。目前国内外主要集中在人类及其他非人类生物种群个体层面辐射效应的研究,而对于特定生物种群的辐射影响,现有的研究案例数及工作深度都尚不能在种群层次上得出有价值的结论。关于生物剂量评价,目前国内缺失核设施流出物排放对生态环境影响的评价标准,包括非人类生物种群的剂量限制体系、参考生物群及其剂量评估模型和方法。国外开发的主流程序如欧盟 ERICA 程序和美国 RESRAD-BIOTA 程序是否完全符合我国核设施环境管理要求,其适用性和合理性都有待进一步验证。

3) 长寿命放射性核素的生物放大效应与短期大量释放的生态环境转移动态模型及参数研究存在不足。

长寿命放射性核素在生物体内的长期累积而导致食物链中某生物所谓的“生物放大效应”(即生物体内某放射性核素的活度浓度远高于其生存环境中的活度浓度),有针对性的研究及其成果较少。同时,无论是事故释放还是计划排放,由

于海洋无限开域条件因而在海洋排放点附近周围地区不存在海水与海洋生物体内放射性核素活度浓度平衡状态,因此,虽然对于 ^3H 、 ^{90}Sr 、 ^{137}Cs 等放射性核素在特定生物体内的滞留情况开展了一些研究,但是在事故期间放射性核素短期大量释放时,实际生态系统中放射性核素转移的动态变化及潜在风险却被忽视。因此,生物放大效应和短期大量释放时生物体内放射性核素转移的动态模型及参数尚待深入研究。

4) 事故短期释放情景下放射性核素迁移的动态模型及参数研究不足。

目前国际上对放射性核素迁移的动态机制及参数研究主要集中在氡的研究上。在生物体有机氡的研究中,目前应用的氡动态隔室模型存在一定局限性,需要对初始条件进行进一步细化,特别是考虑氡及其他放射性核素在空气、土壤、雨水和植物等介质中的不同形式随时间可能发生的转化反应,以确保环境条件得到有效控制。此外,尽管现有的三维模型和计算软件功能强大,但其参数获取及设置通常都假设放射性核素在生态环境中处于平衡态的稳态条件下,这使其在处理核设施事故放射性核素短期大量释放时表现出一定的局限性。因此,需加强对 ^{14}C 、 ^{137}Cs 、 ^{129}I 等放射性核素动态迁移模型的研究,改进模型的灵活性和适用性,以便全面评估放射性核素在事故情景下对生态系统和人类健康的潜在影响。

5) 使用传统的数值解析方法来描述放射性核素微观动态运移机制及复杂参数求解较为困难。

当前放射性核素运移研究主要依赖数值解析技术来解偏微分方程和构建数学模型来模拟放射性核素在环境中的迁移路径。这些方法在处理复杂的环境问题时,通常涉及高度复杂的计算过程和精确的参数求解,这不仅增加了研究的难度,还提高了对计算资源的需求。此外,传统的数值解析方法在描述核素在空气、水和土壤等不同介质交界处的微观动态迁移,以及在高放废物地下处置和裂隙流条件下达西定律失效等复杂问题上的适用性也较差。因此,需要开发新的技术或方法来加强这些方面的研究。

4.2 展望

1) 提高海洋环境条件下放射性核素运移模拟的准确度及适用范围。

为了提高迁移模型的适用范围及准确性,建议未来的发展方向从多尺度模型的整合方面入手,将微观尺度的化学反应模型与宏观尺度的流体动力学模型结合,开发放射性核素在海洋水体各介质间的运移模型;加强包括海洋生物放大效应在内的特殊因素对海洋放射性核素运移的影响研究,更全面地模拟放射性核素在环境中的运移过程。

2) 开展非人类物种种群水平辐射影响研究,开发适用于我国生物种群特点的生物剂量评价模式。

在开展野外非人类生物种群的辐射水平评估前,建议创建能够反映中国国情的参考生态系统。这涉及到参考生态系统中的环境介质(如水、土壤或空气)中的放射性核素活度浓度,从而影响低营养级生物中放射性核素的积累。经过一段时间,可以测量处于食物链最高营养级的生物种群显示出辐射效应的剂量阈值,这个阈值视为最高临界点。在参考生态系统的评价过程中,由于生物的富集效应,通过测量计算这一营养级的辐射剂量并与最高临界点对比。如果剂量未超过临界点,则可以初步判断该生态系统的辐射水平是安全的;如果超过临界点,那么系统内其他物种的辐射剂量也可能超标,需要进一步按级别检测与甄别。这一研究方法基于一个假设:随着生物营养级的升高,其对辐射的敏感性增加。但实际情况可能与假设不同,需要进一步验证。

在此基础上,建议开发适用于我国生态环境国情和生物种群特点的生物剂量评价模式,包括建立生态数据库、开发计算模型等,并根据我国具体的生态环境和生物特性对模型参数以及风险评估方法进行本土化优化调整,为生态环境影响评价的实施提供依据。建立持续的生态环境监测系统 and 定期评价机制,及时调整和更新生物剂量评价模式和生态环境标准,定期进行迭代更新。

3) 加强长寿命放射性核素在食物链中生物放大效应的研究。

食物链中的生物放大效应会导致放射性核素在食物链中的逐级放大,最终在高位营养级生物中形成高剂量积累,影响生物的正常生命体征。因此,建议加强在生态系统生物链长期放大效应等领域的理论与技术研究,包括不同放射性核素通过食物链转移后的辐射剂量放大因子研究、在

考虑辐射剂量放大因子后的辐射剂量计算公式修正等,进一步提高环境剂量评价工作的准确度,形成以具备快速准确评估和应对国内外核设施严重事故情况下废水排放长期环境影响的能力。

4) 加强事故短期释放情景下放射性核素的动态运移研究。

建议进一步优化现有的动态隔室模型,特别是针对初始条件的设定,在模型中详细考虑不同放射性核素在空气、土壤、雨水和植物等不同介质中随时间发生的转化反应。同时,建议在三维模型和计算软件的开发中,增加对非稳态条件下放射性核素运移的模拟能力,以增强其在核设施事故排放情景中的适用性,从而扩展其应用范围。应重视并加强短期事故排放情景下放射性核素的动态运移模型及参数研究,用以辅助评估事故后可能对生态系统和人类健康的潜在影响,及时采取防护措施,减少健康风险

5) 加强 AI 等新兴技术在放射性核素迁移领域的应用与发展。

为了实现更高精度的求解和模拟效率的优化,可以考虑引入 AI 等新兴技术在放射性核素生态运移中的应用及研发,不断提高其模拟的真实性和有效性。第一,利用机器学习,能够处理大量复杂的环境数据,对放射性核素的迁移路径和转移模式进行更准确的模拟和预测;第二, AI 以帮助研究人员计算和优化模型参数以及对模型的不确定性进行量化分析,通过算法自动调整和测试不同的参数设置,找到最符合实际观测数据的模型配置;第三, AI 可以从新的监测数据中开展自适应学习,不断迭代和优化理论模型,从而适应复杂环境下的放射性核素迁移行为。因此,建议在现有数值解析和数值模型的研究基础上,引入 AI 来解决复杂参数求解问题;利用 AI 来模拟空气、水和土壤等不同介质交界面的物理和化学过程;开发不完全依赖于传统理论、更加准确的环境运移新理论模型;通过机器学习方式研究例如达西定律在高放废物地下处置和裂隙流条件下失效等一系列复杂问题。

参考文献:

- [1] 史建君. 放射性核素对生态环境的影响[J]. 核农学报, 2011, 25(2): 397-403.

- SHI Jianjun. Nuclear accident impact on the ecological environment[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2011, 25(2): 397-403(in Chinese).
- [2] 于澍娟. 岩洞处置库关键核素迁移行为研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [3] 张俊芳, 黄莎, 姚仁太, 等. 内陆核电厂址大气扩散特征研究[J]. *中国科技成果*, 2022, 23(7): 68.
- [4] 李建国. 放射生态学转移参数手册[M]. 北京: 原子能出版社, 2006.
- [5] 姚仁太. 核事故后果评价研究进展[J]. *辐射防护通讯*, 2009, 29(1): 1-10, 17.
- YAO Rentai. Review and progresses in studies of nuclear accident consequence assessment[J]. *Radiation Protection Bulletin*, 2009, 29(1): 1-10, 17(in Chinese).
- [6] CLEMENT C H, STRAND P, BERESFORD N, et al. Environmental protection: Transfer parameters for reference animals and plants[J]. *Annals of the ICRP*, 2009, 39(6): 1-111.
- [7] 张永兴, 陈晓秋. 核设施环境影响评价方法学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2015.
- [8] 于海明, 邓杰文, 周岭. 流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [9] BALONOV M, BARNETT C L, BELLI M, et al. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in terrestrial and freshwater environments[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010.
- [10] 潘自强. 电离辐射环境监测与评价[M]. 北京: 原子能出版社, 2007.
- [11] 国家核安全局. HAD 101-02 核电厂厂址选择的大气弥散问题[S]. 北京: 国家核安全局, 1987.
- [12] 刘爱华, 蒯琳萍. 放射性核素大气弥散模式研究综述[J]. *气象与环境学报*, 2011, 27(4): 59-65.
- LIU Aihua, KUAI Linping. A review on radionuclides atmospheric dispersion modes[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2011, 27(4): 59-65(in Chinese).
- [13] 葛宝珠, 陆芊芊, 陈学舜, 等. 放射性核素大气扩散数值模拟研究综述[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(5): 1599-1609.
- GE Baozhu, LU Qianqian, CHEN Xueshun, et al. A review of the numerical simulations of the atmospheric dispersion of radionuclides[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2021, 41(5): 1599-1609(in Chinese).
- [14] 魏切尔, 舒尔茨. 放射生态学[M]. 俞誉福, 唐静娟, 译. 北京: 原子能出版社, 1988.
- [15] 王榕树, 冯为. 放射性核素在地质介质中的迁移研究[J]. *核化学与放射化学*, 1994, 16(2): 117-121.
- WANG Rongshu, FENG Wei. The study on radionuclide migration in geologic media[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 1994, 16(2): 117-121(in Chinese).
- [16] ZHUK I V, LOMONOSOVA E M, YAROSHEVICH O I, et al. Investigation of vertical migration of alpha-emitting nuclides in soils for southern regions of the Republic of Belarus[J]. *Radiation Measurements*, 1995, 25(1-4): 385-387.
- [17] FORSBERG S, ROSÉN K, FERNANDEZ V, et al. Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr in undisturbed soil profiles under controlled and close-to-real conditions[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2000, 50(3): 235-252.
- [18] 马腾, 王焰新. 放射性核素在地下介质中迁移机理与模型研究[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(2): 78-82.
- MA Teng, WANG Yanxin. Mechanism and models on migration of radionuclides in subsurface media[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2000, 19(2): 78-82(in Chinese).
- [19] 刘金英, 杨天行, 徐红敏, 等. 放射性核素在裂隙介质中迁移模型研究综述[J]. *世界地质*, 2000, 19(1): 66-68.
- LIU Jinying, YANG Tianxing, XU Hongmin, et al. Summary of the research of radionuclide migration in fracture media[J]. *Global Geology*, 2000, 19(1): 66-68(in Chinese).
- [20] KAGAN L M, KADATSKY V B. Depth migration of Chernobyl originated ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils of Belarus[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1996, 33(1): 27-39.
- [21] LUJANIENE G, PLUKIS A, KIMTYS E, et al. Study of ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{238}Pu and ^{241}Am behavior in the Chernobyl soil[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2002, 251(1): 59-68.
- [22] FROIDEVAUX P, STEINMANN P, POURCELOT L. Long-term and long-range migration of radioactive fallout in a karst system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(22): 8479-8484.
- [23] 王金生, 李书绅, 王志明, 等. 核素在非饱和带中迁移的非平衡吸附数值模式——NESOR[J]. *辐射防护*, 2000, 20(2): 62-67.
- WANG Jinsheng, LI Shushen, WANG Zhiming, et al. NESOR—A numerical model for radionuclide migration in unsaturated zone with non-equilibrium sorption[J]. *Radiation Protection*, 2000, 20(2): 62-67(in Chinese).
- [24] 刘建琴, 熊小伟, 贾梅兰, 等. 放射性核素在花岗岩地质圈中的迁移计算[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(增

- 刊 1): 495-498.
- LIU Jianqin, XIONG Xiaowei, JIA Meilan, et al. Nuclide transport model in granite geosphere of HLW geological disposal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(Suppl.1): 495-498(in Chinese).
- [25] 李静晶, 陈凌, 罗兰英, 等. 中子活化分析在生态转移参数预测中的应用[J]. *原子能科学技术*, 2015, 49(6): 1122-1127.
- LI Jingjing, CHEN Ling, LUO Lanying, et al. Application of neutron activation analysis in predicting for ecological transfer parameter[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2015, 49(6): 1122-1127(in Chinese).
- [26] JIRKA G H, STOLZENBACH K D, ADAMS E E. Buoyant surface jets[J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1981, 107(11): 1467-1487.
- [27] BARRY P G A, BENINSON D. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001.
- [28] 吴佳昕. 降雨条件下山区河流污染物迁移数值模拟[D]. 成都: 四川大学, 2021.
- [29] CHARTIER M. Manual and user guide of the tridimensional model of general circulation: OCEAN[R]. France: CEA Centre d'Etudes Nucleaires de Fontenay-aux-Roses, 1987.
- [30] ONISHI Y, DUMMULLER D C, TRENT D S. Preliminary testing of turbulence and radionuclide transport modeling in deep ocean environment[R]. USA: Pacific Northwest National Lab (PNNL), 1989.
- [31] CHEN C, LIU H, BEARDSLEY R C. An unstructured grid, finite-volume, three-dimensional, primitive equations ocean model: Application to coastal ocean and estuaries[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(1): 159-186.
- [32] DING Z, ZHU J, CHEN B, et al. A two-way nesting unstructured quadrilateral grid, finite-differencing, estuarine and coastal ocean model with high-order interpolation schemes[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(3): 335.
- [33] WU R J, XIA J, CHEN K Y, et al. Spatiotemporal interpolation of surface chloride content for marine RC structures based on non-uniform spatiotemporal Kriging interpolation method[J]. *Structural Safety*, 2023, 103: 102329.
- [34] 张永兴, 郭择德. 放射性核素在地表水体中之沉积模式[J]. *辐射防护*, 2000, 20(5): 257-260.
- ZHANG Yongxing, GUO Zede. A sedimentation model of radionuclides in surface water bodies[J]. *Radiation Protection*, 2000, 20(5): 257-260(in Chinese).
- [35] 张昌民, 张祥辉, 王庆, 等. 分支河流体系沉积学工作框架与流程[J]. *岩性油气藏*, 2024, 36(1): 1-13.
- ZHANG Changmin, ZHANG Xianghui, WANG Qing, et al. Research framework for distributive fluvial system[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(1): 1-13(in Chinese).
- [36] BOYER P, WELLS C, HOWARD B. Extended K_d distributions for freshwater environment[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, 192: 128-142.
- [37] 李小飞, 张谈贵, 张学东, 等. 河流放射性核素水体弥散模型及其应用[J]. *生态毒理学报*, 2019, 14(2): 280-287.
- LI Xiaofei, ZHANG Tangui, ZHANG Xuedong, et al. Modelling the dispersion of radionuclide in river water and its application[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2019, 14(2): 280-287(in Chinese).
- [38] 田丽蓉, 余金玲, 吴玉帅, 等. 基于 SPH-SWE 方法对河流保守型污染物扩散的模拟[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2021, 39(1): 85-92.
- TIAN Lirong, YU Jinling, WU Yushuai, et al. Simulation of conservative pollutant diffusion in rivers based on SPH-SWE method[J]. *Journal of Qinghai University (Natural Science)*, 2021, 39(1): 85-92(in Chinese).
- [39] TILL J E, MEYER H R. A textbook on environmental dose analysis[R]. Washington: Nuclear Regulatory Commission, 1983.
- [40] Delft3D 4-open source community[EB/OL]. [2024-05-15]. <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>.
- [41] PLUNGE S, SCHÜRZ C, ČERKASOVA N, et al. SWAT+ model setup verification tool: SWATdoctR[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2024, 171: 105878.
- [42] ARANGO H G, WILKIN J L, MOORE A M. Regional ocean modeling system (ROMS)[J]. *Progress in Oceanography*, 2011, 91(1): 34-49.
- [43] 国家核安全局. HAD 101-06 核电厂厂址选择与水文地质的关系[S]. 北京: 国家核安全局, 1991.
- [44] HARBAUGH A W, BANTA E R, HILL M C, et al. Geological survey modular ground-water model-user guide to modularization concepts and the ground-water flow process[R]. USA: U. S. Geological Survey, 2000.
- [45] U. S. Geological Survey. Software-MODFLOW[EB/OL]. [2024-05-15]. <https://www.usgs.gov/software/software-modflow>.
- [46] ZHENG C, HILL M C, CAO G, et al. MT3DMS: Mod-

- el use, calibration, and validation[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(4): 1549-1559.
- [47] GMS. Groundwater modeling system introduction [EB/OL]. [2024-05-15]. <https://www.aquaveo.com/software/gms-groundwater-modeling-system-introduction>.
- [48] 毛晓敏, 刘翔, BARRY D A. PHREEQC 在地下水溶质反应-运移模拟中的应用[J]. *水文地质工程地质*, 2004, 31(2): 20-24.
MAO Xiaomin, LIU Xiang, BARRY D A. Application of PHREEQC on solute reactive transport modeling in groundwater[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2004, 31(2): 20-24(in Chinese).
- [49] U. S. Geological Survey. PHREEQC version 3[EB/OL]. [2024-05-15]. <https://www.usgs.gov/software/phreeqc-version-3>.
- [50] 杜洋. 721 矿尾矿库中核素(铀、钍)迁移特征及其对库区水环境影响[D]. 抚州: 东华理工大学, 2014.
- [51] GUO D, WANG J, GE D, et al. Oceanic radionuclide dispersion method investigation for nonfixed source from marine reactor accident[J]. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2022, 2022: 2822857.
- [52] WANG X, YU Z, FAN W, et al. Nutrient fluxes in the Changjiang River Estuary and adjacent waters-a modified box model approach[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(1): 176-193.
- [53] 林武辉, 余克服, 王英辉, 等. 海洋沉积过程的轴系放射性核素示踪技术: 物源识别、沉积、再悬浮[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(1): 60-70.
LIN Wuhui, YU Kefu, WANG Yinghui, et al. Using uranium-series radionuclides as tools for tracing marine sedimentary processes: Source identification, sedimentation rate, and sediment resuspension[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(1): 60-70(in Chinese).
- [54] 李宇轩, 赵昌, 杨德周, 等. 福岛以东放射性核素进入中国海关键途径的三维数值模拟研究[J]. *原子能科学技术*, 2024, 58(10): 2008-2021.
LI Yuxuan, ZHAO Chang, YANG Dezhou, et al. Three-dimensional numerical modeling of the critical pathway for radionuclides east of Fukushima entering the China Seas[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2024, 58(10): 2008-2021(in Chinese).
- [55] IAEA. IAEA review of safety related aspects of handling ALPS treated water at TEPCO's Fukushima dai-ichi nuclear power station[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022.
- [56] NEMO. Community ocean model for multifarious space and time scales[EB/OL]. [2024-07-21]. <https://www.nemo-ocean.eu/>.
- [57] HAN L. A two-time-level split-explicit ocean circulation model (MASNUM) and its validation[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(11): 11-35.
- [58] 赵云霞, 韩磊, 曲大鹏, 等. 福岛核事故释放的¹³⁷Cs 在西北太平洋海水中运输的模拟与预测[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 221-233.
ZHAO Yunxia, HAN Lei, QU Dapeng, et al. Numerical study and prediction of ¹³⁷Cs transport from the Fukushima nuclear accident in the northwest Pacific Ocean[J]. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 221-233(in Chinese).
- [59] PERIANEZ R, ABRIL J M, GARCIALEON M. Modelling the dispersion of non-conservative radionuclides in tidal waters, Part 1: Conceptual and mathematical model[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1996, 31(2): 127-141.
- [60] WEI Junlin, HAN Xiang, YU Jiangfeng, et al. A performance-portable kilometer-scale global ocean model across various heterogeneous supercomputers[C]//CCF HPC China 2024. China: [s. n.], 2024.
- [61] XU G, XIE W, LIN X, et al. Detection of three-dimensional structures of oceanic eddies using artificial intelligence[J]. *Ocean Modelling*, 2024, 190: 102385.
- [62] DONG X, YANG Q, NIE Y, et al. Antarctic sea ice prediction with a convolutional long short-term memory network[J]. *Ocean Modelling*, 2024, 190: 102386.
- [63] 王建龙. 研发放射性污染监测处置技术构建海上核安全保障体系[J]. *科技成果管理与研究*, 2024, 19(7): 71-72.
- [64] 周涛, 许鹏, 毛赏, 等. 福岛核污水排放预测计算研究[J]. *核科学与工程*, 2023, 43(2): 451-460.
ZHOU Tao, XU Peng, MAO Shang, et al. Study on the prediction and computation of Fukushima nuclear contaminated water discharge[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2023, 43(2): 451-460(in Chinese).
- [65] 李子超, 周涛, 司广成, 等. 基于拉格朗日方法的核素近海迁移计算[J]. *核动力工程*, 2020, 41(2): 72-77.
LI Zichao, ZHOU Tao, SI Guangcheng, et al. Calculation of radionuclide migration in coastal waters based on Lagrangian method[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2020, 41(2): 72-77(in Chinese).
- [66] 李子超, 周涛, 司广成, 等. 基于欧拉方法的核素近海迁移计算[J]. *核科学与工程*, 2020, 41(2): 256-263.
LI Zichao, ZHOU Tao, SI Guangcheng, et al. Research on radionuclide migration in coastal waters based on Euler method[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2020,

- 41(2): 256-263(in Chinese).
- [67] 许鹏. 核电站严重事故下核素海洋扩散计算及可信度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [68] IAEA. Project progress report (2020) IAEA/RCA RAS7028 project “enhancing regional capabilities for marine radioactivity monitoring and assessment of the potential impact of radioactive releases from nuclear facilities in Asia-Pacific marine ecosystems (RCA)” [R]. Vienna: IAEA, 2020.
- [69] 刘森林, 张永兴. 环境辐射影响评价方法讨论——公众照射源相关剂量负担模式基础[J]. 辐射防护, 1997, 17(3): 53-61.
LIU Senlin, ZHANG Yongxing. Discussion on the methods of the assessment of radiological environmental impact—the basis of source-related dose commitment model for the assessment of public exposure[J]. Radiation Protection, 1997, 17(3): 53-61(in Chinese).
- [70] 张永兴, 刘森林, 刘新河. 环境辐射影响评价方法讨论——另一种与源相关的评价模式[J]. 辐射防护, 1994(2): 81-97.
ZHANG Yongxing, LIU Senlin, LIU Xinhe. Discussion on the methods of the assessment of radiological environmental impact—Another source-related assessment model[J]. Radiation Protection, 1994(2): 81-97(in Chinese).
- [71] NCRP. Radiological assessment: Predicting the transport, bioaccumulation, and uptake by man of radionuclides released to the environment[R]. Washington: National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP), 1984.
- [72] 刘媛媛, 魏强林, 高柏, 等. 放射性核素在不同介质中的迁移规律研究现状及进展[J]. 有色金属 (冶炼部分), 2018(6): 76-82.
LIU Yuanyuan, WEI Qianglin, GAO Bo, et al. Current status and progress on migration of radionuclides in different media[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(6): 76-82(in Chinese).
- [73] KOCHER D C. A dynamic model of the global iodine cycle and estimation of dose to the world population from releases of iodine-129 to the environment, ORNL/NUREG-95[R]. [S. l.]: [s. n.], 1979.
- [74] UNSCEAR. Source and effects of ionizing radiation[R]. Vienna: UNSCEAR, 1996.
- [75] ICRP. Environmental protection: The concept and use of reference animals and plants[R]. UK: ICRP Publication, 2008.
- [76] ICRP. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species[R]. UK: ICRP Publication, 2003.
- [77] ICRP. Protection of the environment under different exposure situations[M]. UK: Pergamon Press, 2014.
- [78] ICRP. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation[R]. UK: ICRP Publication, 2017.
- [79] HIGLEY K, REAL A, CHAMBERS D. Radiation weighting for reference animals and plants[M]. USA: Sage, 2023.
- [80] 唐文乔, 潘自强, 夏益华, 等. 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(17): 1846.
- [81] 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.
- [82] 李静晶, 刘森林, 毛亚蔚, 等. 水生生物的辐射剂量率估算方法[J]. 辐射防护, 2010, 30(4): 236-241.
LI Jingjing, LIU Senlin, MAO Yawei, et al. A method for estimating radiation dose rates to aquatic biota[J]. Radiation Protection, 2010, 30(4): 236-241(in Chinese).
- [83] ALONZO F, BATTLE J V I, HERTEL-AAS T, et al. Life history traits, radiosensitivity and population modeling: Methods to extrapolate from individual endpoints to population dynamics[R]. [S. l.]: [s. n.], 2013.
- [84] ALONZO F, HERTEL-AAS T, GILEK M, et al. Modelling the propagation of effects of chronic exposure to ionising radiation from individuals to populations[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(9): 1464-1473.
- [85] RESRAD Family of Codes. RESRAD-BIOTA[EB/OL]. [2024-05-15]. <https://resrad.evs.anl.gov/codes/resrad-biota/>.
- [86] LARSSON C M. The FASSET framework for assessment of environmental impact of ionising radiation in European ecosystems—an overview[J]. Journal of Radiological Protection: Official Journal of the Society for Radiological Protection, 2004, 24(4A): A1-A12.
- [87] BROWN J E, ALFONSO B, AVILA R, et al. The ERICA tool[J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2008, 99(9): 1371-1383.
- [88] 白晓平, 王晓亮, 杜红燕, 等. R&D 128 和 ERICA 模型在陆生生物辐射剂量估算中的应用研究[J]. 辐射防护, 2014, 34(3): 177-182.
BAI Xiaoping, WANG Xiaoliang, DU Hongyan, et al. Application of R & D 128 and ERICA model in calculating radiological dose of terrestrial biota[J]. Radiation Protection, 2014, 34(3): 177-182(in Chinese).

- [89] Environment Agency. Impact assessment of ionising radiation on wildlife[EB/OL]. [2024-05-15]. <https://www.gov.uk/government/publications/impact-assessment-of-ionising-radiation-on-wildlife>.
- [90] BEAUGELIN-SEILLER K, GARNIER-LAPLACE J, GARIEL J C, et al. EDEN: A tool for the estimation of dose coefficients for non-human biota[J]. *Radioprotection*, 2005, 40: S921-S926.
- [91] BERESFORD N A, BALONOV M, BEAUGELIN-SEILLER K, et al. An international comparison of models and approaches for the estimation of the radiological exposure of non-human biota[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2008, 66(11): 1745-1749.
- [92] NEDVECKAITĖ T, FILISTOVIČ V, MARČIULIONIENĖ D, et al. LIETDOS-BIO assessment approach to the environment non-human biota exposure by ionizing radiation[J]. *Lithuanian Journal of Physics*, 2010, 50(1): 151-160.
- [93] VIVES I B J, BALONOV M, BEAUGELIN-SEILLER K, et al. Inter-comparison of absorbed dose rates for non-human biota[J]. *Radiation and Environmental Biophysics*, 2007, 46(4): 349-373.
- [94] SAZYKINA T G. ECOMOD: An ecological approach to radioecological modelling[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2000, 50(3): 207-220.
- [95] KEUM D K, JUN I, LIM K M, et al. Characteristics of the graded wildlife dose assessment code K-BIOTA and its application[J]. *Journal of Radiation Protection and Research*, 2015, 40(4): 252-260.
- [96] ERICA Tool. A flexible software system to assessing the radiological risk to biota[EB/OL]. [2024-05-15]. <https://erica-tool.com/>.
- [97] DAVIS P A, BALONOV M, VENTER A. Activities of the EMRAS tritium/C14 working group[J]. *Fusion Science and Technology*, 2005, 48(1): 423-430.
- [98] MONTE L, PERIAÑEZ R, KIVVA S, et al. Testing of models for predicting the behaviour of radionuclides in freshwater systems and coastal areas report of the aquatic working group of EMRAS theme 1 environmental modelling for radiation safety (EMRAS) programme [M]//Companion CD Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012.
- [99] NIE B, WU S, YANG D, et al. Quantitative prediction of dynamic HTO migration behavior in the soil and non-negligible evapotranspiration effect[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 425: 127772.
- [100] NIE B, NI M, JIANG J, et al. Dynamic evaluation of environmental impact due to tritium accidental release from the fusion reactor[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, 148: 137-140.
- [101] Le DIZÈS S, AULAGNIER C, HENNER P, et al. TOCATA: A dynamic transfer model of ^3H from the atmosphere to soil-plant systems[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2013, 124: 191-204.
- [102] 王韶伟, 侯杰, 陈海英, 等. RASCAL 及其在核事故后果评价中的应用[J]. *核电子学与探测技术*, 2014, 34(12): 1411-1415
WANG Shaowei, HOU Jie, CHEN Haiying, et al. RASCAL and its application in nuclear accident consequences assessment[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2014, 34(12): 1411-1415(in Chinese).
- [103] 王川, 周昌, 郑谦. 核事故后果评价与应急决策支持系统研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2013, 33(5): 647-651.
WANG Chuan, ZHOU Chang, ZHENG Qian. Study on nuclear accident consequence assessment and emergency decision support system[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2013, 33(5): 647-651(in Chinese).
- [104] 杨力, 王存友, 陈义学, 等. 四种拉格朗日粒子浓度计算方法的评估——箱式计数法、高斯核、均匀核和抛物线核[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(7): 3404-3415.
YANG Li, WANG Cunyou, CHEN Yixue, et al. Evaluation of four Lagrangian particle concentration calculation methods—Box counting, Gaussian kernel, uniform kernel and parabolic kernel[J]. *China Environment Science*, 2023, 43(7): 3404-3415(in Chinese).
- [105] 刘蕴, 刘新建, 李红, 等. 福岛核事故 ^{137}Cs 释放源项反演研究[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2019(4): 290-296.
LIU Yun, LIU Xinjian, LI Hong, et al. Estimation of ^{137}Cs source term from Fukushima nuclear accident[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2019(4): 290-296(in Chinese).