

# 强激光与粒子束

High Power Laser and Particle Beams

## 束缚核效应对热中子活化的影响

郭志铭 郝建红 张芳 赵强 范杰清 董志伟

### Influence of bound nuclear effects on thermal neutron activation

Guo Zhiming, Hao Jianhong, Zhang Fang, Zhao Qiang, Fan Jieqing, Dong Zhiwei

#### 引用本文:

郭志铭, 郝建红, 张芳, 赵强, 范杰清, 董志伟. 束缚核效应对热中子活化的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2025, 37: 066002. doi: 10.11884/HPLPB202537.240408

Guo Zhiming, Hao Jianhong, Zhang Fang, Zhao Qiang, Fan Jieqing, Dong Zhiwei. Influence of bound nuclear effects on thermal neutron activation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2025, 37: 066002. doi: 10.11884/HPLPB202537.240408

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240408>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于JMCT软件的中子活化数值模拟程序的开发和检验

Development and test of neutron activation simulation program based on JMCT software

*强激光与粒子束*. 2022, 34: 026016-1-026016-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210356>

#### 中子在大气中产生氮俘获 $\gamma$ 的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo simulation of neutron capture  $\gamma$ -rays from nitrogen in the atmosphere

*强激光与粒子束*. 2022, 34: 086002-1-086002-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.220055>

#### 基于加速器DD中子源的钇活化探测系统效率原位标定

In-situ calibration of the efficiency of a yttrium activation detection system by the accelerator-based DD fusion neutron source

*强激光与粒子束*. 2025, 37: 016003-1-016003-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202537.240265>

#### $^{241}\text{Am}$ -Be中子参考辐射的蒙特卡罗模拟研究

Monte Carlo simulation research on reference neutron radiation of  $^{241}\text{Am}$ -Be radionuclide

*强激光与粒子束*. 2020, 32: 056001-1-056001-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202032.190478>

#### 光子吸收剂量的蒙特卡罗计算方法研究

Research on Monte Carlo calculation method for photon absorbed dose

*强激光与粒子束*. 2024, 36: 106003-1-106003-8 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202436.240037>

#### 输运问题蒙特卡罗模拟方法回顾及展望

Retrospect and outlook of Monte Carlo simulated methods for transport problems

*强激光与粒子束*. 2022, 34: 026001-1-026001-7 <https://doi.org/10.11884/HPLPB202234.210402>



## 束缚核效应对热中子活化的影响\*

郭志铭<sup>1</sup>, 郝建红<sup>1</sup>, 张芳<sup>2</sup>, 赵强<sup>2</sup>, 范杰清<sup>1</sup>, 董志伟<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电子科学与技术, 北京 102206; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

**摘 要:** 在地表核泄漏场景下, 辐射中子与物质中原子核经过多次散射后, 能量很快降低到只有几个电子伏的热中子能区, 热中子的活化将对核反应过程产生强烈影响。在固体、液体材料中, 原子核通常以束缚态核的形式存在, 在与物质相互作用反应方面, 束缚核与气态的自由核不同。为更准确地评估核辐射效应, 本文研究了束缚核效应对热中子活化过程的影响。使用蒙特卡罗方法模拟粒子输运, 基于地表核辐射的场景建立了相应的空地界面模型, 模拟了核辐射中子束入射土壤、海水以及混凝土产生的一系列核反应。以热中子的活化反应为重点, 通过替换入射中子在介质中的反应截面引入束缚核效应, 计算并对比了考虑束缚核效应影响前后活化产物次级 $\gamma$ 的注量变化。研究表明, 在活化过程中考虑束缚核效应的影响, 能够使固液介质的热中子活化强度出现明显增强, 从而在一定程度上增强地表次级 $\gamma$ 场的辐射强度。由于元素组成、粒子屏蔽能力等因素的综合作用, 三种介质场景下次级 $\gamma$ 注量的最高涨幅分别为 18%、8% 和 11%, 涨幅随探测距离的变化规律也有所差异。

**关键词:** 热中子活化; 蒙特卡罗方法; 束缚核; 感生放射性; 靶核热运动

中图分类号: TL91; TL929

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202537.240408

## Influence of bound nuclear effects on thermal neutron activation

Guo Zhiming<sup>1</sup>, Hao Jianhong<sup>1</sup>, Zhang Fang<sup>2</sup>, Zhao Qiang<sup>2</sup>, Fan Jieqing<sup>1</sup>, Dong Zhiwei<sup>2</sup>

(1. *Electronic Science and Technology, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;*

2. *Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

**Abstract:** In a surface nuclear leakage scenario, radiation neutrons undergo multiple scatterings with atomic nuclei in the material, rapidly reducing their energy to the thermal neutron range (a few eV). The activation of thermal neutrons significantly impacts the nuclear reaction process. In solid and liquid materials, nuclei typically exist in bound states, differing from free nuclei in gaseous form regarding their interaction with matter. To accurately assess nuclear radiation effects, we investigated the impact of bound-nucleus effects on thermal neutron activation. Using the Monte Carlo method for particle transport simulation, we developed an air-ground interface model based on surface nuclear radiation scenarios. We modeled neutron beam interactions with soil, seawater, and concrete, focusing on thermal neutron activation reactions. By incorporating bound-nucleus effects through adjusted reaction cross-sections, we calculated and compared changes in secondary gamma flux before and after considering these effects. The results show that accounting for bound-nucleus effects enhances thermal neutron activation in solid and liquid media, thereby increasing surface secondary gamma field intensity. Due to factors such as elemental composition and particle shielding, the maximum increases in secondary gamma flux were 18%, 8%, and 11% for the three media, with varying patterns of flux increase over detection distances.

**Key words:** thermal neutron activation, Monte Carlo method, bound nucleus, induced radioactivity, target nucleus thermal motion

瞬发核辐射粒子速度快, 穿透性强, 作用时间很短<sup>[1-2]</sup>, 但在接近地表的核泄露场景下, 由于辐射粒子大量流向地面, 容易与地面物质相互作用产生感生放射性<sup>[3-5]</sup>。如中子被物质中某些元素俘获<sup>[6]</sup>, 使原子核处于不稳定的放

\* 收稿日期: 2024-11-30; 修订日期: 2025-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(12205024)

联系方式: 郭志铭, 1274361086@qq.com。

通信作者: 张芳, fangzhang328@163.com。

射性复合核状态,从而在很短的时间内退激释放次级粒子<sup>[7-8]</sup>,这一过程称之为中子活化。中子与物质中原子核经过多次散射后,逐渐减速至能量极低的热中子能区,这个能量级别的中子自身很难对外界造成影响,但其更容易被土壤、海水、混凝土等介质的原子核俘获,通过 $(n,\gamma)$ 热中子活化过程释放次级粒子 $\gamma$ , $\gamma$ 会产生一系列效应,从而造成物质损伤、材料破坏、环境污染等影响。

在粒子碰撞模拟中,一般认为靶核是自由运动的,但在固体、液体介质材料中,原子核通常以束缚态形式存在,热运动则更多以原子核热振动的形式进行,靶核无法在碰撞过程中自由地反冲<sup>[9]</sup>,故称作束缚核。与气体介质的自由核相比,束缚核的特性会使热中子散射过程产生显著差异,本文称之为“束缚核效应”。当空间介质为固体或液体材料时,考虑束缚核效应会对热中子活化过程及其次级 $\gamma$ 辐射场产生显著影响,所以研究近地强辐射场景下低能中子的活化过程以及束缚核效应在活化过程中的影响对于科学准确评估核辐射效应具有重要意义。

目前,热中子活化反应广泛应用于探测和放射性治疗领域。在探测领域,用中子束照射样本,通过监测其活化产物及次级 $\gamma$ 特征来测定样本组分<sup>[10-11]</sup>,如瞬发 $\gamma$ 中子活化分析(PGNAA)<sup>[12-13]</sup>。在医疗领域,硼中子俘获治疗(BNCT)<sup>[14]</sup>就是基于硼对中子极强的俘获能力以及核反应生成的自由程极短的次级射线 $\gamma$ ,摧毁癌细胞治疗肿瘤。基于研究问题的特点,上述研究的辐射操作仅在探测样本或人体组织的小范围内进行,而针对地表核泄漏强辐射场景下,活化过程受到大面积地表物质(诸如土壤、混凝土建筑材料、海水等)的束缚核效应的影响研究未见报道。其次,Goorley等<sup>[15]</sup>在进行BNCT治疗人脑肿瘤研究中,虽发现是否考虑束缚核效应(自由气体模型的散射截面更改为热中子散射截面)对热中子剂量率的计算结果有明显影响,但没有进一步对活化产物 $\gamma$ 进行检测分析。同样,在热中子反应堆的中子热化问题(热中子在材料中的能量、空间和时间分布)的计算模拟中,王武等<sup>[16]</sup>建立了反应堆模型,研究了束缚核效应对中子热化过程的影响,考虑了反应堆芯中慢化剂轻水的束缚核效应,但研究侧重点在于束缚核效应对裂变链式反应中有效增殖因数 $k_{\text{eff}}$ 计算<sup>[17]</sup>的影响。

本文基于蒙特卡罗方法进行了中子、次级 $\gamma$ 的联合输运模拟,构建了近地强辐射场景的空地界面模拟模型,通过监测地表不同位置的活化产物次级 $\gamma$ 的注量,分析比较了未考虑束缚核效应和考虑束缚核效应两种计算模型的监测结果,以此研究束缚核效应对热中子活化过程的影响规律,为实际情况下核辐射效应模型的更准确模拟提供参考。

## 1 束缚核效应与 $\gamma$ 监测的可行性分析

本节首先比较束缚核热运动与自由原子核热运动的差别,分析束缚核效应以及其影响热中子活化反应的物理机理。其次,由于本文研究的热中子活化的本质是 $(n,\gamma)$ 中子俘获反应,次级 $\gamma$ 的多寡可以直接反映热中子活化反应的强度,所以本文通过监测 $\gamma$ 的注量对活化过程进行模拟研究。最后,考虑中子的其他核反应也会产生一定量的 $\gamma$ 射线,为了估算其他反应对监测结果的影响,将低能截断组与非截断组对比。

### 1.1 束缚核效应及其作用机理

关于自由原子核,最典型的是单原子气体的原子核,例如常见的氦气等惰性气体,它们的核外电子轨道处于全满的状态,不容易生成化学键,常温下以单原子形态稳定存在。由于没有化学键的束缚,这些单原子在碰撞中可以自由地运动,故可称为自由核。另外,对于其他多原子的气体分子,由于气体分子之间的相互作用力比较弱,排列较为稀疏,能够在空间中不受限制地运动,所以在模拟碰撞中也可以作为自由核处理。而在固体或液体材料中,分子排列密集程度远大于气体,相互作用力较强,原子被化学键或晶格束缚致使核无法在空间自由运动,故称之为束缚核。总之,介质中的分子永不停息地做热运动,而自由核与束缚核的热运动方式有所不同,自由核可以随意地在空间中运动,而束缚核则只能在平衡位置上作无规则振动。

束缚核效应可以从以下两个方面分析。第一,在分子热运动方面,当中子能量较高时,核反应一般以弹性碰撞和非弹性碰撞为主,靶核的能量服从由温度决定的麦克斯韦分布,远远低于中子的能量,靶核热运动的影响很小,可以假定靶核静止;但当中子的能量降低到eV能级时,中子能量与靶核能量相当,靶核热运动对中子碰撞过程的影响就变得强烈了。第二,在反应截面方面,若将两种截面形象地称为“自由核”与“束缚核”截面,当中子能量较高时,因其能量远高于化学键结合能,原子核是否被束缚在分子中并不重要,在这种情况下,反应截面采用“自由核”截面近似即可。但当中子能量较低时,因其低于化学键结合能,则应当使用“束缚核”截面。在一般的粒子核反应模拟中,通常不考虑碰撞核的束缚效应,采用“自由核”截面计算。但对于近地核泄漏强辐射场景,涉及到的往往是土壤、水等典型固、液态材料,辐射场中高能中子经过多次散射,能量很快降到热中子量级,此时束缚核效应对

活化过程产生的影响不能忽略, 采用“自由核”截面不能反映符合实际的束缚核热运动方式。因此在粒子输运模拟中应针对能量较低的中子选择特殊的束缚核截面, 本文第三节将通过模拟计算研究分析反应截面的影响, 以合理地评估核辐射效应。

束缚核效应对热中子活化的影响并不是直接的, 首先束缚核效应会影响中子热化过程, 使介质中热中子的能量、空间、时间分布发生变化, 从而致使参与热中子活化反应的中子在数量、能量上产生差异, 以此影响模拟场景中热中子活化反应的总体强度。

## 1.2 热中子活化反应

元素的中子俘获截面随中子的能量变化而变化, 以土壤中富含的  $\text{SiO}_2$  为例, 其中 O 和 Si 的俘获截面<sup>[18]</sup> 随能量变化曲线如图 1 所示, 可以观察到, 大约 10 eV 以下的低能中子有着较大的俘获截面, 材料核对这一能量区间的中子俘获概率较大, 所以相较于高能的中子而言更容易发生俘获辐射, 生成次级  $\gamma$  射线。而 10 eV 以上的中子基本不受束缚核效应的影响, 因此本节将能量截断设置在 10 eV, 并计算活化产物在全部核反应中的占比, 通过实验组比对验证以  $\gamma$  产生量作为活化强度判定标准的合理性和科学性。

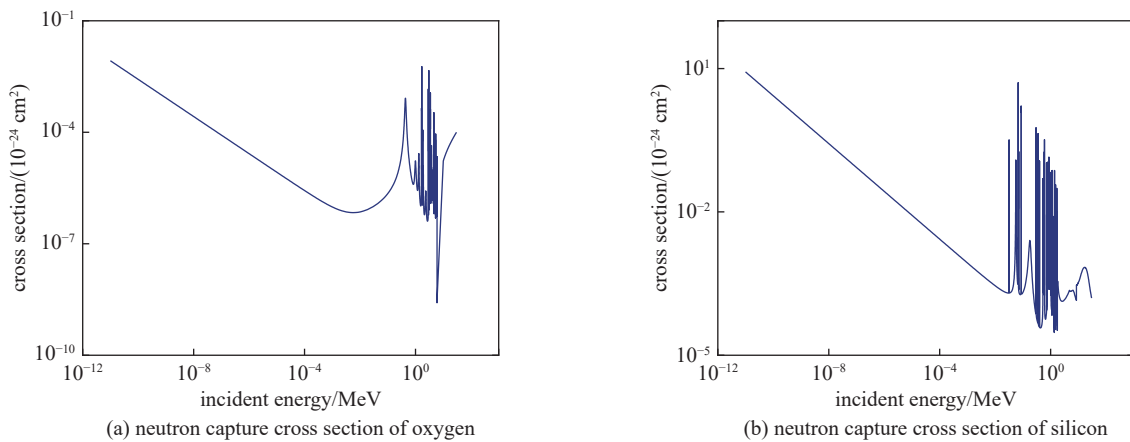


Fig. 1 Neutron capture cross-section of oxygen and silicon

图 1 O 和 Si 的中子俘获截面

研究使用截断组与对照组比较的方法, 截断组使中子能量下降至 10 eV 以下时消失, 不参与后续反应过程, 而对照组则不对中子进行能量截断。分别监测两组地表相同点的次级  $\gamma$  产生量, 根据结果画出次级  $\gamma$  注量的对比图如图 2 所示。

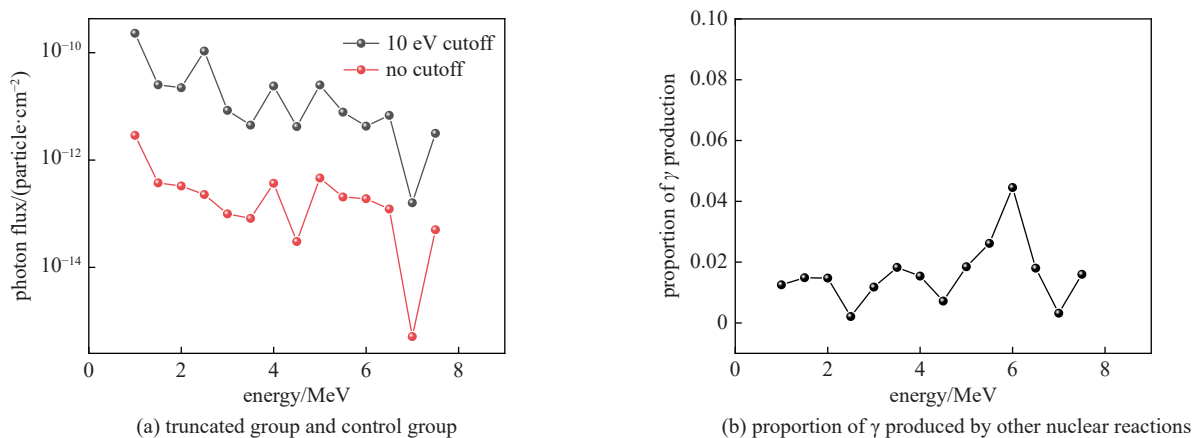


Fig. 2 Comparison of  $\gamma$ -flux between the truncated group and the control group

图 2 截断组与对照组的  $\gamma$  通量对比

由图 2(a) 的对照结果可以看出, 在对低能中子进行截断之后, 地表处产生的不同能量的次级  $\gamma$  注量均出现 2~3 个数量级的降低, 将截断组与对照组  $\gamma$  产生量的比值绘制在图 2(b) 中, 可以得出其他核反应产生的  $\gamma$  在所有  $\gamma$  产生量中的占比, 分能级由 0.2% 至 4.5% 不等。由这一结果得知, (n, $\gamma$ ) 反应的热中子活化过程产生了绝大部分的次级  $\gamma$ , 远大于其他中子核反应生成的  $\gamma$  粒子数量。本次截断对照实验说明热中子活化反应在早期核辐射造成的

次级  $\gamma$  辐射场中占主导作用, 因此研究热中子活化的影响因素对于正确评估核辐射效应是十分必要的。而其他核反应的  $\gamma$  产生量远小于热中子活化, 对模拟计算结果的影响可以忽略不计, 以此验证了使用次级  $\gamma$  作为束缚核效应影响介质材料活化强度的评判依据的科学合理性。

## 2 模型建立

为了定量分析近地核泄露场景地表辐射场强度特性, 计算束缚核效应对热中子活化次级  $\gamma$  辐射场的增强效应, 本节首先围绕空地界面建立场景模型; 其次配置辐射源的粒子类型及能量分布; 最后选取合理的监测方法, 从而监测地表不同位置的活化产物次级  $\gamma$  的注量。

### 2.1 热中子散射截面

蒙特卡罗方法是一种基于统计抽样的数值模拟方法, 也称为随机模拟法, 通过模拟大量点粒子在空间不同材料介质内运动直至消失(被吸收或穿出模型)过程中发生的核反应, 得到大量数值实验的统计值, 将统计结果的平均值作为问题的解。而截面是蒙特卡罗方法模拟粒子碰撞过程的重要参数, 其中总截面决定了抽样粒子在材料中的运输距离以及到达下一个碰撞点的位置, 而各反应截面(散射、吸收、裂变)决定了粒子碰撞原子核的反应类型, 进一步确定出射粒子的能量、方向等状态。在关于热中子的模拟计算问题中, 由于中子的能量极低, 需要引入热中子散射截面以考虑介质中的分子热运动及化学键影响, 在蒙特卡罗计算中有两种热中子散射截面可供选择, 一般使用将所有介质都视为气态的简化模型, 本文研究的束缚核效应实质上就是从气态的简化散射模型转换为针对固液态介质的特殊散射模型后对中子热化过程产生的一系列影响, 这种特殊的热散射截面考虑了固态、液态材料的化学键对原子核的束缚作用, 这种束缚作用在入射中子能量较高时几乎没有影响, 却对能量低至 eV 能级的中子影响强烈。本文通过在模拟碰撞过程中添加介质材料的特殊热中子散射截面以引入束缚核效应, 从而探究束缚核效应对热中子活化过程的影响。

### 2.2 场景模型

近地核辐射场景具有复杂多样性, 本文根据核泄漏实际场景的不同将空地界面简要分为三种: 裸露土壤地表、混凝土表面以及海洋海水表面。建立了上层空气、下层地表物质的空地界面几何模型, 并在模拟计算过程中根据场景的不同分别将下层地表物质调整为不同的材料, 以模拟不同核泄漏辐射场景。

以地表裸露土壤场景为例, 围绕空气-土壤界面搭建近地核辐射场景模型, 其 3D 模型如图 3 所示, 整体呈现圆盘状, 以  $z$  轴为中心轴, 拥有水平分层和垂直分层。

模型的 2D 竖切面视图如图 4 所示, 整个模型分为空气部分和土壤部分, 使用以  $z$  轴为中心、半径分别为 100、200、300、 $\dots$ 、1000 m 的同心圆柱曲面进行水平空间剖分, 再使用水平平面分别对空气和土壤进行垂直分层。

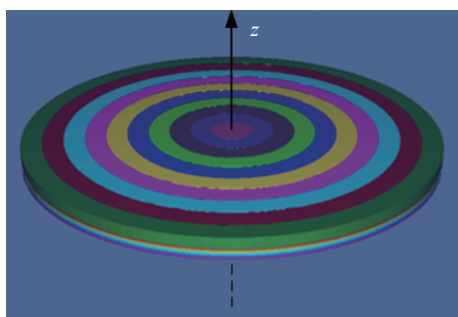


Fig. 3 Three-dimensional geometric model of surface nuclear radiation scene

图 3 地表核辐射场景 3D 几何模型

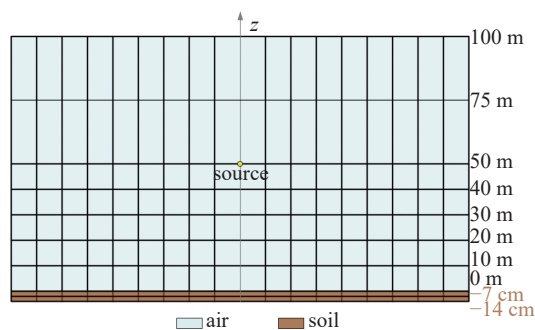


Fig. 4 Vertical cross-sectional diagram of surface nuclear radiation scene model

图 4 地表核辐射场景模型竖切面示意图

从兼顾低空核辐射场景和避免计算模拟中不必要的传输碰撞以节省计算机时两个方面考虑, 空气部分总高度设置为 100 m, 辐射源放置在原点正上方 50 m 处。如图 4 所示, 空气部分从地面向上垂直分为 7 层, 地表到 50 m 高度每 10 m 分一层, 50 m 到 100 m 平均分为两层, 源以上的部分为运输过程中粒子的反向散射预留足够的空间。上述水平分层与垂直分层的目的是通过合理配置区域粒子重要性, 减少抽样中子在到达土壤之前的数量衰减<sup>[19]</sup>, 从而保证模拟过程中有足够的粒子数, 提高模拟计算的可靠性。

土壤部分垂直分为两层, 每层厚度均为 7 cm, 低能量的中子在土壤中的穿透深度有限, 且深层产生的次级  $\gamma$  达

到地表也会有很大的能量衰减, 所以不考虑更深层土壤中的反应情况。

### 2.3 源的选择

本文主要聚焦于核辐射早期核泄露, 研究中子束入射土壤后发生的活化反应, 以及土壤中束缚核对活化反应的影响, 源只需要为活化反应提供可靠的辐射粒子, 不需要考虑核泄露源的体积或形状<sup>[20]</sup>, 在模拟过程中采用各向同性的点源是合理的。

源的能谱选用公开 Littleboy 中子能谱<sup>[21]</sup>, 如图 5 所示, 涵盖从 0 到 17 MeV 能量范围的中子, 能量范围广且低能量的中子占比较高, 能够为活化过程提供大量的低能中子, 作为研究热中子活化问题的辐射源较为适合。

### 2.4 探测方式

考虑到中子源各向同性以及场景模型相对于  $z$  轴的旋转对称性, 选择划定环形探测区域监测活化产物  $\gamma$  的数量水平, 将环半径设置为探测点到源投影的水平距离, 通过计算平均通量, 在实现点探测相同监测效果的前提下, 大大降低监测误差。探测环俯视结构以及横截面如图 6 所示, 其中蓝色实线为探测环的中心线,  $R$  为探测区域的环半径, 代表探测环中心线与原点之间的水平距离,  $r$  为探测环横截面圆的半径, 可以称为探测环的邻域半径,  $h$  代表探测环中心线距地面的高度。

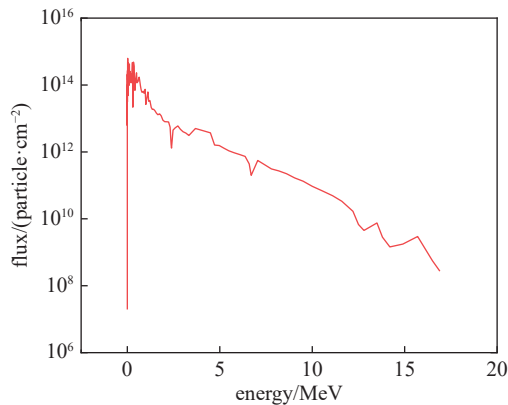


Fig. 5 Neutron source energy spectrum

图 5 中子源能谱

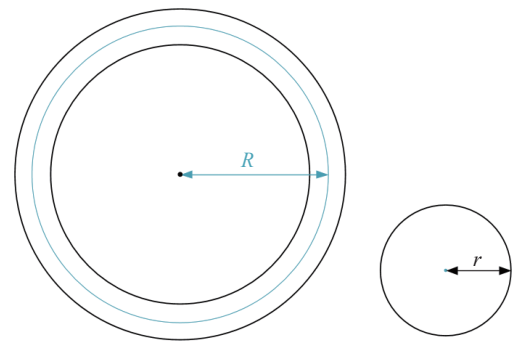


Fig. 6 Schematic diagram of the top view structure (left) and cross-section (right) of the annular detector

图 6 探测环俯视结构(左)及横截面(右)示意图

计算模拟中, 为监测从地表土壤中发射出来的次级  $\gamma$  射线, 将环形探测区域贴近地面, 环中心的高度  $h$  设置为 1.5 m, 探测邻域半径  $r$  设置为 1 m, 设置环半径  $R$  分别为 50、100、150、...、500 m 的 10 个探测环监测距离源由近到远的粒子通量。

## 3 不同材料中束缚核效应对中子活化强度的影响

根据核辐射场景的不同, 本节将从空地界面、空海界面、空气混凝土界面三种辐射场景入手, 研究热中子在土壤、海水、混凝土三种材料中的活化强度受束缚核效应的影响程度, 分析不同材料受影响程度差异的因素。从监测结果入手, 比较添加束缚核效应后次级  $\gamma$  注量的差异, 并探索这一差异随探测距离的变化关系。

### 3.1 土壤

首先在空气-土壤界面进行地表核泄露场景下次级  $\gamma$  辐射场的模拟计算, 场景模型及各项模拟参数已在第一节中详细介绍, 以是否考虑束缚核效应为变量, 分别监测次级  $\gamma$  在地表各处的注量, 并将两次结果进行观察比较, 分析在土壤中束缚核效应对热中子活化强度的影响。

土壤元素组成由表 1 给出, 由组成成分可以得知, 土壤中占比较高的元素为 H、O 和 Si, 对应的物质为  $H_2O$  和  $SiO_2$ , 所以在热中子活化模拟中, 主要考虑这两种物质的束缚核效应。

图 7 为是否考虑束缚核效应影响两种情况下地表次级  $\gamma$  的注量对比, 黑色曲线在计算中将土壤视为热平衡气体进行散射模拟, 红色曲线则通过替换低能中子对于  $H_2O$  和  $SiO_2$  的热散射截面, 在活化模拟中引入了束缚核效应的影响。观察两条曲线可以发现, 相较于将靶核视为自由核的简化散射模型, 引入束缚核影响后, 不同距离的各个

表 1 土壤元素构成

Table 1 Element composition of soil

element	mass fraction	atomic fraction
H	0.023 834	0.316 843
O	0.598 899	0.501 587
Al	0.080 446	0.039 952
Si	0.296 821	0.141 618

探测点监测到的次级 $\gamma$ 注量都出现显著增长,增长幅度最高可达18%,差值约为 $1.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。

因此可以得出结论,在考虑束缚核影响的情况下,土壤中热中子的活化 $\gamma$ 场强度增强,对于热中子的活化反应计算评估更加全面。

为了进一步分析不同探测距离随束缚核影响造成的 $\gamma$ 注量增长率的变化规律,将各个距离探测的 $\gamma$ 注量增长率以柱状图的形式在图7中表现出来。观察发现,在0到200 m范围内,随着距离的增加, $\gamma$ 增长率逐渐由18%下降至9%。但是超过200 m后,随着入射中子的逐渐减少,次级 $\gamma$ 的注量也快速下降,随着数量级的变化,增长率计算中的随机性增加,导致200 m后的增长率变化失去了随距离增加逐渐降低的趋势。

### 3.2 海水

经过3.1的模拟计算,在中子入射土壤的情况下,考虑束缚核效应的影响会在一定程度上增加地表次级 $\gamma$ 的注量,本小节尝试在空气-海水界面重复地表核泄露场景模拟,观察束缚核效应在海水介质中对热中子活化次级 $\gamma$ 辐射场的影响情况。

海水元素构成如表2所示,占比较高的元素为H和O,在模拟计算中主要引入 $\text{H}_2\text{O}$ 的束缚核效应。

图8为是否考虑束缚核效应影响两种情况下海面次级 $\gamma$ 的注量对比,观察两条曲线可以发现,考虑束缚核影响后, $\gamma$ 的注量出现增长,最高在8%左右,差值约为 $1.8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。相较于土壤,海水的元素构成中O原子数量占比减少,Si原子等相对原子质量较大的元素占比较少,仅有H原子数量占比增多,占据首位,而H核对低能中子的俘获能力与O和Si相比较弱,所以在添加束缚核效应之后占比最多的H元素对整体次级 $\gamma$ 增长的贡献反而较小,导致海面场景下束缚核效应对活化强度的影响程度小于土壤场景。

表2 海水元素构成

Table 2 Element composition of sea water

element	mass fraction	atomic fraction
H	0.107974	0.661583
O	0.858766	0.331501
Na	0.010785	0.002897
Mg	0.001284	0.000326
S	0.000906	0.000174
Cl	0.019471	0.003392
K	0.000399	0.000064
Ca	0.000415	0.000064

将各个探测距离的 $\gamma$ 注量增长率以柱状图的形式在图8中表现出来,与土壤相同的是,在0到200 m范围内,随着距离的增加, $\gamma$ 增长率逐渐由8%下降至5%,超过200 m后就失去了这种趋势;与土壤不同的是,在海水中,各个距离探测点的 $\gamma$ 增长率差值较小,变化较为稳定。

### 3.3 混凝土

在城市场景中,地面被大片的混凝土所覆盖,建筑也多为混凝土结构,所以在热中子的活化研究中加入混凝土环境是很有必要的。本节在空气-混凝土界面进行地表核泄露场景模拟,观察束缚核效应在混凝土介质中对热中子活化次级 $\gamma$ 辐射场的影响情况。

混凝土的元素组成如表3所示,占比较高的为O元素与Si元素,来自混凝土的主要成分 $\text{SiO}_2$ ,所以在模拟计算过程中主要引入 $\text{SiO}_2$ 的束缚核效应。

图9为是否考虑束缚核效应影响两种情况下混凝土表面次级 $\gamma$ 的注量对比,观察两条曲线可以发现,引入束

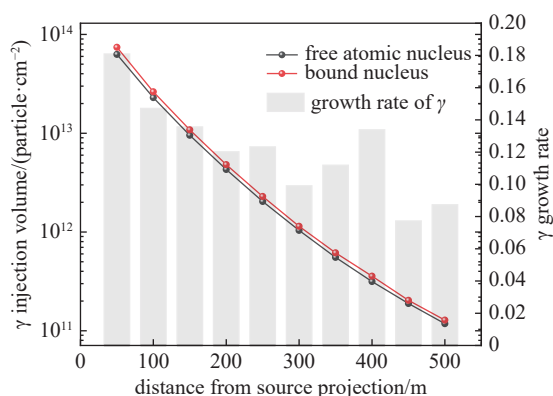


Fig. 7 Comparison of secondary  $\gamma$ -ray dose rates at the Earth's surface

图7 地表次级 $\gamma$ 注量比较

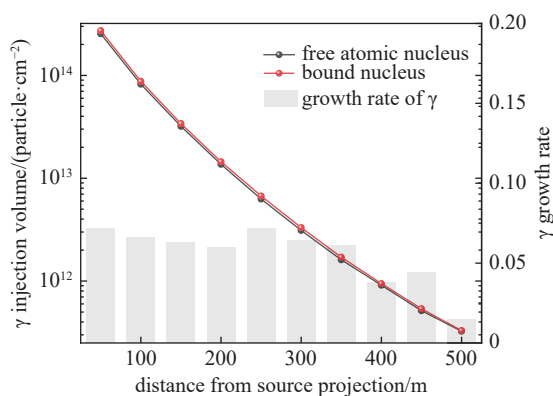
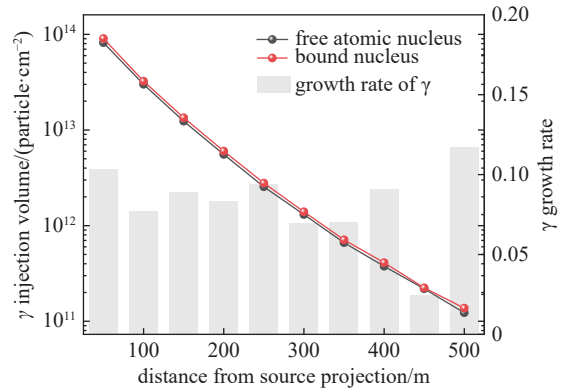


Fig. 8 Comparison of secondary  $\gamma$ -ray dose rates at the sea surface

图8 海面次级 $\gamma$ 注量比较

表 3 混凝土元素构成

element	mass fraction	atomic fraction
H	0.004 000	0.078 437
O	0.482 102	0.595 591
Na	0.002 168	0.001 864
Mg	0.014 094	0.011 462
Al	0.069 387	0.050 830
Si	0.277 549	0.195 334
K	0.013 010	0.006 577
Ca	0.080 229	0.039 567
Fe	0.057 461	0.020 338

Fig. 9 Comparison of secondary  $\gamma$ -ray dose rates at the surface of concrete图 9 混凝土表面次级  $\gamma$  剂量比较

束缚核效应影响后,各探测点监测到的  $\gamma$  注量均有所增长,最大增幅在 11% 左右,差值约为  $0.85 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 。相较于土壤,混凝土中的 Si 与 O 元素的原子数量占比增多, H 元素占比减少,增幅理应大于土壤场景,但由于混凝土具有较强的粒子屏蔽特性,中子穿透深度不及土壤,到达混凝土内的低能中子较少,经模拟计算,未添加束缚核效应时,混凝土场景下到达地表以下 7 cm 平面的低能中子仅为土壤场景下的 84%,添加束缚核影响后,这一比例降低至 80%,可知混凝土场景下参与反应的低能中子基数较少,故导致次级  $\gamma$  场强度的增幅小于土壤场景。

将各个探测距离的  $\gamma$  注量增长率以柱状图的形式在图 9 中表现出来。在混凝土的情况下,  $\gamma$  增长率随探测距离的变化规律较为杂乱,仅在 100 m 的范围内出现随距离增加而降低的趋势,由 11% 降低至 7%,超过 100 m 后增长率起伏不定,因为混凝土密度大于土壤和海水,所以表面的反射能力较高,且粒子穿透能力在混凝土中有所下降,这两点导致参与活化反应的中子数量减少,故监测结果随距离的变化规律体现出较高的不确定性。

## 4 结 论

本文基于蒙特卡罗粒子输运模拟计算方法,结合空地界面的场景模型搭建,模拟了核泄露作用于地表的辐射场场景,通过监测活化产物次级  $\gamma$ ,研究分析了土壤、海水、混凝土三种材料中束缚核效应对热中子活化  $\gamma$  辐射场的影响。研究表明,在活化过程中考虑束缚核效应的影响,会使活化产物次级  $\gamma$  的注量出现明显增长,在活化材料分别为土壤、海水、混凝土的情况下,次级  $\gamma$  的最高涨幅分别为 18%、8% 和 11%,从而得出结论:束缚核效应会增强固体、液体材料的热中子活化强度,通过影响中子热化过程,改变了热中子的能量、时间以及空间分布,从而在一定程度上加剧了热中子的活化反应,最终导致介质表面次级  $\gamma$  的注量增长。为了更准确地评估地表核辐射效应,应充分考虑固体、液体材料的束缚核效应,合理模拟计算热中子活化产生的次级  $\gamma$  场强度,以实现辐射场的准确预测,为做好相应的防护及加固工作奠定理论基础。

## 参考文献:

- [1] Glasstone S, Dolan P J. The effects of nuclear weapons[M]. 3rd ed. Washington: Department of Defense & Department of Energy, 1977: 3-10.
- [2] 刘晓红,王伟力,孟涛,等. 早期核辐射损伤效应空间建模及剖切算法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(9): 190-192,197. (Liu Xiaohong, Wang Weili, Meng Tao, et al. Research on 3D spatial data models for early nuclear radiation damage effects and slitting algorithm[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(9): 190-192,197)
- [3] Khasanov S, Yang Bo, Su Youwu, et al. Induced radioactivity at particle accelerators: a short review[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2021, 5(4): 481-492.
- [4] 王韬,庞建,赵良超,等. 回旋加速器束探头感生放射性实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(7): 1779-1782. (Wang Tao, Pang Jian, Zhao Liangchao, et al. Experimental investigation on induced radioactivity in beam probe for compact cyclotron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(7): 1779-1782)
- [5] 邹士亚,张文仲,毛用泽. 中子弹核爆炸战场目标毁伤效应数学模型[J]. 核电子学与探测技术, 2006, 26(2): 132-136. (Zou Shiya, Zhang Wenzhong, Mao Yongze. The damage effect math-model of field objects for neutron bomb nuclear explosion[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2006, 26(2): 132-136)
- [6] 商鹏,黄流兴,牛胜利,等. 核爆炸地面感生放射性辐射环境的蒙特卡罗模拟[J]. 现代应用物理, 2022, 13: 010201. (Shang Peng, Huang Liuxing, Niu Shengli, et al. Monte Carlo simulation of ground environment of induced radioactivity radiation produced by neutrons of nuclear explosion[J]. Modern Applied

- Physics, 2022, 13: 010201)
- [7] 赵健. GTAF 装置数字化数据获取系统的研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2013: 1-8. (Zhao Jian. The study of digital data acquisition system on GTAF[D]. Hengyang: University of South China, 2013: 1-8)
- [8] 张奇玮, 贺国珠, 栾广源, 等. 基于 HI-13 串列加速器的中子俘获反应截面测量方法[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 046001. (Zhang Qiwei, He Guozhu, Luan Guangyuan, et al. Cross section measurement of neutron capture reaction based on HI-13 tandem accelerator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 046001)
- [9] 陈朝斌, 陈义学, 胡泽华, 等. MCNP 程序用热中子散射数据制作和检验[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(11): 1335-1340. (Chen Chaobin, Chen Yixue, Hu Zehua, et al. Generating and validation of thermal neutron scattering library for MCNP[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2010, 44(11): 1335-1340)
- [10] 姚永刚, 肖才锦, 王平生, 等. 嫦娥五号月壤中子活化分析研究[J]. 同位素, 2022, 35(1): 70-74. (Yao Yonggang, Xiao Caijin, Wang Pingsheng, et al. Instrumental neutron activation analysis for lunar samples returned by Chang'E-5[J]. *Journal of Isotopes*, 2022, 35(1): 70-74)
- [11] Massoud A, Abdou F S, Yousif M. Evaluation of mineral compositions of surface and subsurface rock samples by neutron activation analysis[J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2023, 103(3): 528-545.
- [12] 王兴华, 孙洪超, 姚永刚, 等. PGNA 方法学的发展与现状[J]. 同位素, 2014, 27(4): 251-256. (Wang Xinghua, Sun Hongchao, Yao Yonggang, et al. Development and status of Prompt Gamma Neutron Activation Analysis technique methodology[J]. *Journal of Isotopes*, 2014, 27(4): 251-256)
- [13] 耿书群. 基于热中子的瞬发伽马射线活化成像技术的模拟研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 13-14. (Geng Shuqun. Simulation study of prompt gamma activation imaging technology based on the thermal neutron[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 13-14)
- [14] Younous K, El Kafhali M, Bouadel I, et al. Efficacy and safety of boron neutron capture therapy: a systematic review[J]. *International Journal of Radiation Biology*, 2024, 100(12): 1611-1621.
- [15] Goorley J T, Kiger III W S, Zamenhof R G. Reference dosimetry calculations for neutron capture therapy with comparison of analytical and voxel models[J]. *Medical Physics*, 2002, 29(2): 145-156.
- [16] 王武, 夏虹, 李伟, 等. 基于 MCNP 的反应堆建模方法[J]. 应用科技, 2021, 48(4): 92-97. (Wang Wu, Xia Hong, Li Wei, et al. Reactor physical modeling method based on MCNP[J]. *Applied Science and Technology*, 2021, 48(4): 92-97)
- [17] 钟兆鹏, 施工, 胡永明. MCNP 程序在反应堆临界计算中的应用[J]. 核动力工程, 2003, 24(1): 8-11. (Zhong Zhaopeng, Shi Gong, Hu Yongming. Application of MCNP in the criticality calculation for reactors[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2003, 24(1): 8-11)
- [18] National Nuclear Data Center. Evaluated nuclear data file (ENDF)[EB/OL]. Brookhaven National Laboratory. (2024-08-30). <https://www.nndc.bnl.gov/endl/>.
- [19] 邱有恒, 邓力, 李百文, 等. 几种重要性函数在粒子输运蒙特卡罗模拟中的应用[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(s1): 673-677. (Qiu Youheng, Deng Li, Li Baiwen, et al. Application of several important functions on Monte Carlo simulation of particle transport[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2013, 47(s1): 673-677)
- [20] 郭思禹, 程引会, 郭俊. 无风条件下近地爆烟尘的大气  $\gamma$  电离辐射环境模拟[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36: 043027. (Guo Siyu, Cheng Yinhui, Guo Jun. Simulation of atmospheric  $\gamma$  ionizing radiation environment of near-ground nuclear explosion fallout under windless conditions[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2024, 36: 043027)
- [21] Holmes R L, White S W. Standardized unclassified Little Boy and Fat Man outputs[R]. Defense Threat Reduction Agency, 2013.