

基于蒙特卡罗方法的核事故碎块 辐射场模拟计算

王浩伟, 蔡幸福*, 郭晓辉, 霍勇刚
(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对核事故产生的材料碎块可能会沾染放射性物质的问题, 为弥补之前研究中未涉及的碎块辐射场分布水平的不足, 分析了其分布的影响因素, 基于蒙特卡罗法, 利用 SuperMC 程序分别研究了核事故碎块姿态、碎块被土壤掩埋的深度、碎块材料分层截面形状对辐射场分布的影响。结果表明: 碎块姿态主要影响辐射场的分布形状; 碎块掩埋深度会对辐射剂量率造成较大影响, 碎块在被土壤完全掩埋后, 其地面剂量率峰值比完全裸露时低 2 个数量级; 分层截面形状的影响较小。

关键词: 辐射场; 蒙特卡罗法; 核事故应急; 模拟计算

中图分类号: O571.51

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)02-032-007

Simulation Calculation of Radiation Field of Nuclear Accident Debris Based on Monte Carlo Method

WANG Haowei, CAI Xingfu*, GUO Xiaohui, HUO Yonggang
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To compensate for the lack of previous studies on the radiation field distribution level of debris, fragments of materials generated by nuclear accidents and be contaminated with radioactive substances, this paper utilized the Monte Carlo method and employed the SuperMC program to investigate how factors such as debris attitude, soil burial depth, and stratified cross-sectional shape influence the distribution of radiation fields. Results indicated that the debris attitude mainly affects the distribution shape of the radiation field. The soil burial depth has a significant impact on the radiation dose rate. After the debris are completely buried in the soil, the peak of radiation dose of the ground is two orders of magnitude lower than that when the debris are completely exposed. The influence of stratified cross-sectional shape is relatively small.

KEYWORDS: radiation field; Monte Carlo method; nuclear emergency; simulation calculation

在核材料运输过程中, 核事故的发生往往是突发性的、不可控的, 可能因意外力的作用而导致核材料在发生化学爆炸后产生带有放射性的碎

块, 核事故应急处理需要将这些带有放射性的碎块进行回收^[1]。Wu 等^[2]开发了用于核事故应急处置演练的模拟仿真系统, 可用于多操作人员协同

收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 国家部委科研基金 (50926050408, QN06202)

第一作者: 王浩伟 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事核能科学与技术研究。E-mail: 1053215675@qq.com

***通信作者:** 蔡幸福 (1983—), 男, 副教授, 主要从事核科学与技术研究。E-mail: 17791477740@sina.com

引用格式: 王浩伟, 蔡幸福, 郭晓辉, 等. 基于蒙特卡罗方法的核事故碎块辐射场模拟计算[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (2): 32-38.

作业的情况, 有助于应急人员熟悉各种事故场景, 规范操作。Cheng 等^[3]设计了核应急演练数据库, 主要针对核电厂事故的后果评估与应急响应的策略制定, 分析了核应急救援和钻探数据的特点, 建立了设备、人员和状态等方面的数据表和模型库, 并对数据的调用方法进行了优化, 为核应急救援队提供了训练手段。但其辐射污染数据表主要收集的是诸如福岛核电站事故的大剂量污染数据, 并未提及核材料化学爆炸产生碎块的辐射污染数据。

Obrador 等^[4]针对切尔诺贝利等释放大量放射性核素的核事故, 对评估人体受辐射剂量过程中需要考虑的因素与辐照后产生的生物效应进行了梳理。Wu 等^[5]使用数值积分的方法计算高纯锗光谱仪对表面 γ 污染的探测效率, 并通过实验验证了该方法的有效性, 但其使用的放射源为 ^{137}Cs 和 ^{60}Co , 均为强辐射源。当前的研究主要针对核电站或核设施发生重大事故的情况, 无法直接用于碎块这类弱辐射源的剂量检测。

在应急人员处理事故现场时, 碎块释放的 γ 射线会对人员带来辐射损伤。Wei 等^[6]围绕核与辐射事故对人员体内放射性核素的检测方法与手段进行了讨论, 整理了职业、年龄、器官的剂量限值, 其中提及了应急人员的累计剂量应当低于 500 mSv。Abe 等^[7]在福岛核电站事故发生 7 年后, 对 62 名参与事故应急处理的人员的外周血进行了回顾性剂量评估, 发现其中超过三成的人的估计剂量仍超过 189 mGy, 表明辐射对人员生命健康的损伤是持续而深远的。Tilden 等^[8]梳理总结了美国核应急救援小组 (Nuclear Emergency Support Team, NEST) 的成立与发展, 该组织处理的涉及核武器的事故主要包括意外核发射、非核爆炸、核武器燃烧以及在运输过程中的掉落。

综上, 目前的核事故辐射场构建及人员损伤研究多是针对大型核电站事故等大剂量情况, 对核事故碎块形成的辐射场分布情况研究较少, 因此, 亟需开展有关碎块的模拟计算分析。蒙特卡罗程序常被用来计算辐射屏蔽及辐射场分布。SuperMC^[9-11]为我国自研且已经被应用于国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 项目中的辐射场计算与可视化程序。本文将基于该程序对碎块辐射场水平及其分布的影响因素进行分析, 为核事故应急决策的制定提供初步分析。

1 计算方法

蒙特卡罗方法是一种随机论方法, 通过模拟每个粒子的运动轨迹, 在粒子运动过程中分别考虑不同效应作用下方向和能量的变化, 可以得到感兴趣面的注量。

粒子注量 ϕ 为通过计数面的粒子总数:

$$\phi = \frac{dN}{dS}$$

式中: N 为粒子数; S 为计数面的面积。

而后还需要进一步转化成剂量率, 以直观表述辐射场的分布。空间中某点的周围剂量当量值 $H^*(10)$ 可作为该点处人员所受有效剂量的近似值^[12]。空气比释动能 K_a 与剂量当量值和注量都有转化关系, 因此, 可以通过三者之间的转换关系计算出各个点位的剂量值。单能光子自由空气比释动能 K_a 与注量的比值为

$$\frac{K_a}{\phi} = 160.22 \cdot \frac{\mu_{tr}}{\rho} \cdot E_\gamma$$

式中: K_a/ϕ 的单位是 $\text{pGy} \cdot \text{cm}^2$; μ_{tr}/ρ 为空气的质量衰减系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$); E_γ 为光子能量 (MeV)。

能量为 20 keV~10 MeV 的光子周围剂量当量与自由空气比释动能的比值为

$$\frac{H^*(10)}{K_a} = \frac{X}{(aX^2 + bX + c)} + d \cdot \arctan(gX)$$

式中: $H^*(10)/K_a$ 的单位是 $\text{Sv} \cdot \text{Gy}^{-1}$; $X = \ln(E/E_0)$, E 为光子能量, $E_0 = 9.85 \text{ keV}$; $a = 0.9505$, $b = 0.09432$, $c = 0.2302$, $d = 5.082$, $g = -0.6997$; 角度单位为 rad。

将周围剂量当量除以单位时间, 即可得到辐射场中各个点位的剂量率值, 由注量到剂量率的转换系数为剂量转换因子。在程序计算时可以直接调用不同能量光子的剂量转换因子, 本文使用的数据来源于国际辐射防护委员会 (International Commission on Radiological Protection, ICRP) 74 号出版物^[13]。

2 模拟仿真

2.1 方案设计

根据常用的材料结构^[14], 本文研究的碎块由 1.5 cm 厚的钨材料、1 cm 厚的铍材料及 0.615 cm 厚的钚材料组成, 其中铍为中间夹层材料。模拟

主要围绕碎块的姿态、碎块被土壤掩埋的深度、分层截面形状 3 个方面影响因素进行方案设计，如表 1 所示。

表 1 模拟方案设计
Tab. 1 Design of simulation scheme

序号	姿态(排列)	掩埋深度/cm	截面形状
1	W 上 Be 中 Pu 下	0.000 0	正方形
2	W 上 Be 中 Pu 下	0.000 0	圆形
3	W 上 Be 中 Pu 下	2.000 0	正方形
4	W 上 Be 中 Pu 下	2.000 0	圆形
5	W 上 Be 中 Pu 下	3.115 0	正方形
6	W 上 Be 中 Pu 下	3.115 0	圆形
7	Pu 上 Be 中 W 下	0.000 0	正方形
8	Pu 上 Be 中 W 下	0.000 0	圆形
9	Pu 上 Be 中 W 下	2.000 0	正方形
10	Pu 上 Be 中 W 下	2.000 0	圆形
11	Pu 上 Be 中 W 下	3.115 0	正方形
12	Pu 上 Be 中 W 下	3.115 0	圆形
13	竖立	0.000 0	正方形
14	竖立	0.000 0	圆形
15	竖立	1.692 6	正方形
16	竖立	1.692 6	圆形
17	竖立	3.385 2	正方形
18	竖立	3.385 2	圆形

首先，基于蒙特卡罗程序 SuperMC 设置几何条件，正方形截面的边长为 3 cm，为保证截面积一致，圆形截面的半径取 1.692 6 cm，用来模拟土壤环境的半圆球半径为 50 cm，正方形的中心点、圆形的圆心点，以及球体的球心点均为坐标原点 $O(0, 0, 0)$ ，将地面定义为 xOy 平面。

将不同材料层之间的临界面定义为分层截面。对于分层截面平行于地面的情况，分别计算“W 上 Be 中 Pu 下”的分层组合与“Pu 上 Be 中 W 下”的分层组合。考虑到化爆产生的冲击力，碎块会不同程度地陷入土壤中。当分层截面平行于地面时，分别对碎块完全裸露于土壤上方、掩埋深度为 2 cm 和刚好被完全掩埋的情况进行模拟运算；当分层截面垂直于地面时，分别对完全裸露、半掩埋和完全掩埋的情况进行模拟计算。

其次，设置材料参数。模拟的碎片材料依据文献[15]进行参数设置，空气环境按照真空进行计算，土壤环境按照标准砂土地进行计算。

最后，设置源项条件。即钚材料自发裂变中

子活化放出瞬发 0.185 MeV 的 γ 光子，将所有情况下的粒子数目统一设置为 1×10^8 ，根据注量与剂量率的转化计算公式，可以得到碎块的辐射场分布情况。

2.2 影响因素分析

2.2.1 碎块姿态的影响

碎块姿态可能因为分层截面水平或垂直于地面、材料分层的排列顺序改变而对辐射场分布情况造成影响。对比截面形状与掩埋深度相同，而分层截面与地面位置关系不同的方案结果，即可得到分层截面与地面位置关系对辐射场分布的影响。方案 1、13 的对比如图 1 所示。

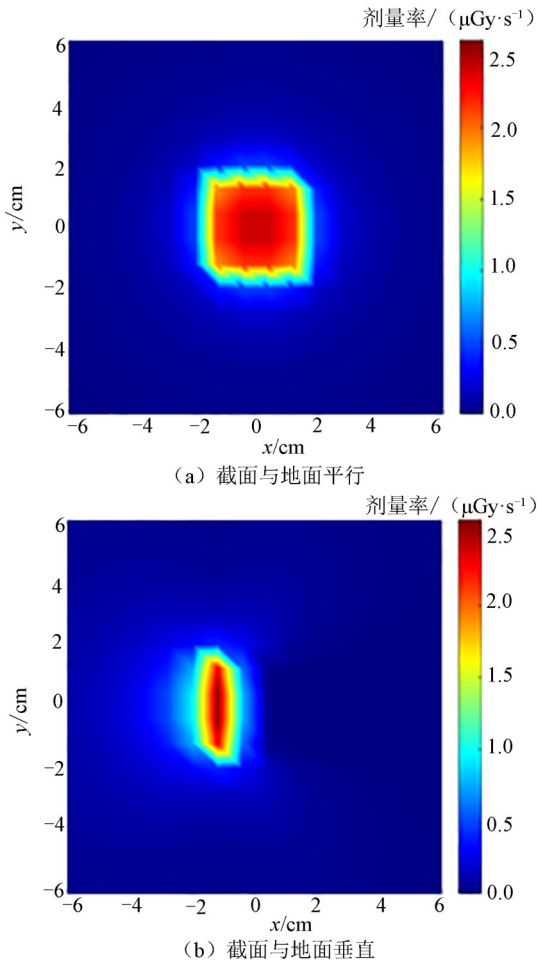


图 1 不同截面方向时的辐射场分布
Fig. 1 Radiation field distribution at different cross-sectional orientations

根据图 1 中剂量率为 $1 \times 10^{-6} \text{ Gy/s}$ 的等值线分布情况，将截面与地面平行时的辐射场形状看作圆形；将截面与地面垂直时的辐射场形状看作心形，心尖朝向钚材料相对于碎块的方向。此时，钚材料层一侧的辐射距离更远，这一现象可以解

释为铍材料的中子增殖与钨材料对射线的屏蔽吸收与反射的协同作用。

通过对比方案 1、7, 即可得到改变材料的分层排列顺序对辐射场分布的影响, 如图 2 所示。

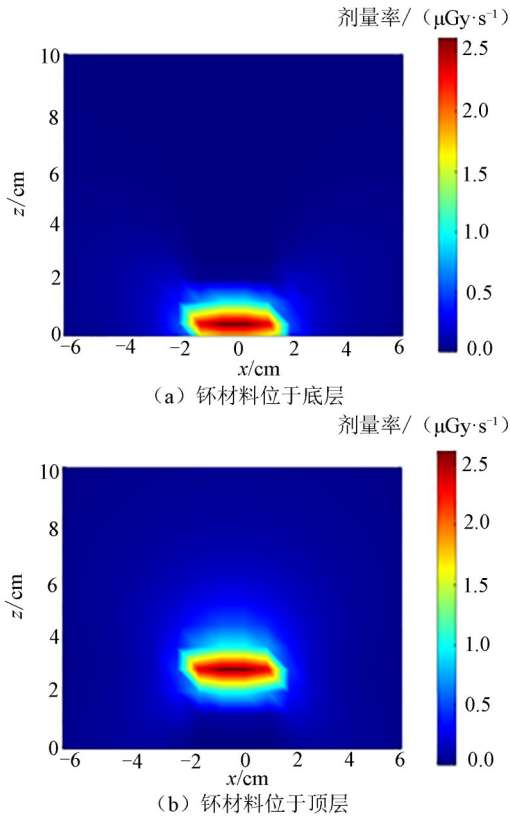


图 2 不同材料排列顺序时的辐射场分布

Fig. 2 Radiation field distribution with different location of plutonium

可以看出, 图 2 中的 2 种情况下, 钚材料所在层对应的 z 坐标范围内, 水平面上的辐射场分布较为接近。钚材料位于底层时, 由图 2 (a) 可知, 在 $-2\text{ cm} \leq x \leq 2\text{ cm}$ 且 $z \leq 2\text{ cm}$ 时, 辐射剂量近乎为 0 Gy/s ; 钚材料位于顶层时, 由图 2 (b) 可知, 在 $-2\text{ cm} \leq x \leq 2\text{ cm}$ 时, 向上方的辐射距离可以达到 10 cm 。因此, 材料分层的排列顺序会极大影响辐射场的分布。

2.2.2 碎块掩埋深度的影响

对掩埋深度的分析可以根据方案 1、3、5 进行, 即对于分层截面平行于地面、截面形状为正方形、钚材料位于碎片底层的情况下, 将碎片在土壤中的掩埋深度分别设置为 0 (未被掩埋)、 2 cm (碎片被部分掩埋, 钚材料被完全掩埋)、 3.115 cm (碎片刚好完全掩埋) 3 种情况。通过模拟计算, 得到图 3。其中, 俯视图为 $z = 0.5\text{ cm}$ 时

的辐射截面, 侧视图为 $y = 0$ 时的辐射截面。

根据图 3 中的辐射场分布情况可知, 部分掩埋后的剂量率峰值比完全裸露情况下的剂量率峰值降低近 1 个数量级, 而完全掩埋后的剂量率峰值能降低 2 个数量级。表明掩埋深度对辐射场的分布情况影响较大。

2.2.3 截面形状的影响

通过对比方案 1 与方案 2、方案 5 与方案 6, 可以得到不同分层截面形状对辐射场分布的影响, 结果如图 4 所示。

由图 4 (c) 和图 4 (d) 可以看出, 尽管对于近碎块 $1\sim 2\text{ cm}$ 范围内的辐射剂量率值因截面形状不同而有不同的分布, 但是对 2 cm 以外的外围辐射场形状没有影响, $2.5 \times 10^{-8}\text{ Gy/s}$ 及其以下的剂量率值等值线都呈圆形分布。

2.2.4 数值统计分析

对于辐射场分布的变化情况, 可以通过对 18 种方案中碎块两侧及上方的相同点位处的剂量率值进行统计分析得出。在点位坐标的选取上, 为避免因距离碎块过近而导致屏蔽材料层对结果产生影响, 对于单一条件下辐射场分布的分析研究, 选取距离碎块表面 2 cm 的左侧点 $(-4, 0, 2)$ 、右侧点 $(4, 0, 2)$ 以及上方点 $(0, 0, 5)$, 结果如图 5 所示。

由图 5 可以得出, 剂量率的变化主要取决于碎块的姿态, 分层截面的形状对辐射场分布情况的影响并不明显。当碎块分层截面水平于地面时, 对于不同的材料分层顺序, 钚材料位于最下层且被刚好掩埋进土壤里时的辐射剂量率峰值为 $1.2 \times 10^{-6}\text{ Gy/s}$, 与钚材料位于最上层且刚好被土壤掩埋的辐射剂量率峰值 $1.8 \times 10^{-6}\text{ Gy/s}$ 近似相等, 但是钚材料上层的其他材料会改变辐射场在碎块上方的辐射场分布情况。W 上 Be 中 Pu 下排列的碎块在水平方向上的辐射范围随着碎块被土壤掩埋深度的增加而减少, 但在竖直方向上的辐射范围变化不明显。Pu 上 Be 中 W 下排列的碎块在竖直方向上的辐射范围变化明显, 但在水平方向上变化不明显。当碎块分层截面垂直于地面时, 总体变化趋势与截面水平于地面的情况相似。但是 W 层一侧的点位处, 剂量率值随着碎块被土壤掩埋深度的增加而有所增加, 甚至碎块在被完全掩埋时所测得剂量率值远高于碎块完全裸露于地面的情况。这主要是因为碎块未被完全掩埋的 2 种情况下, W 层都会对射线起到屏蔽作用。

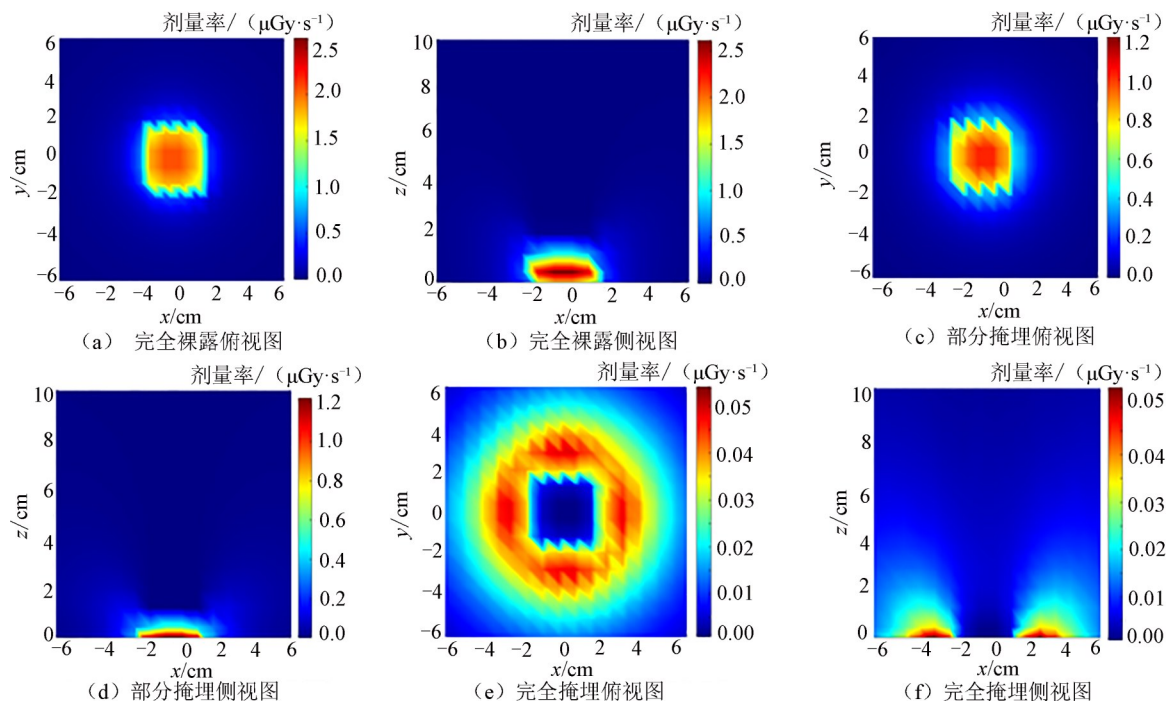


图 3 不同掩埋深度情况下的辐射场分布

Fig. 3 Radiation field distribution at different burial depths

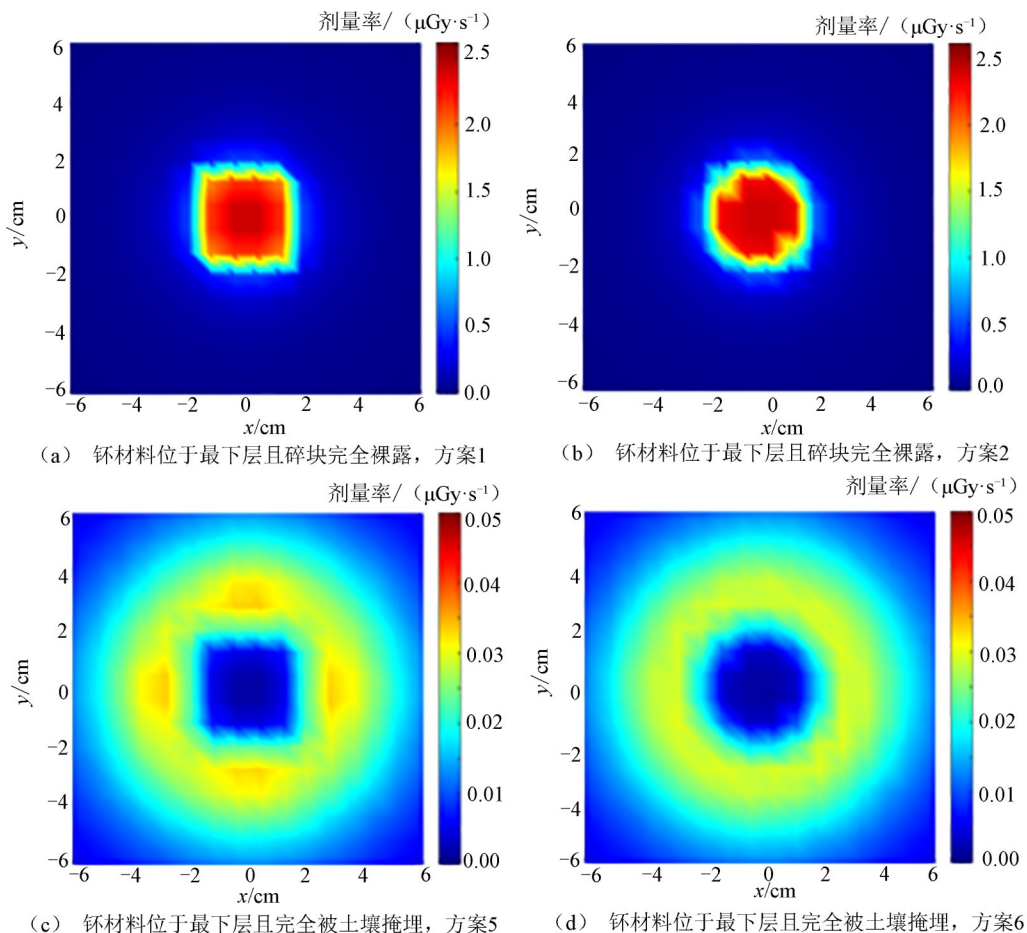


图 4 不同截面形状条件下的辐射场分布

Fig. 4 Radiation field distribution under different cross-sectional shapes

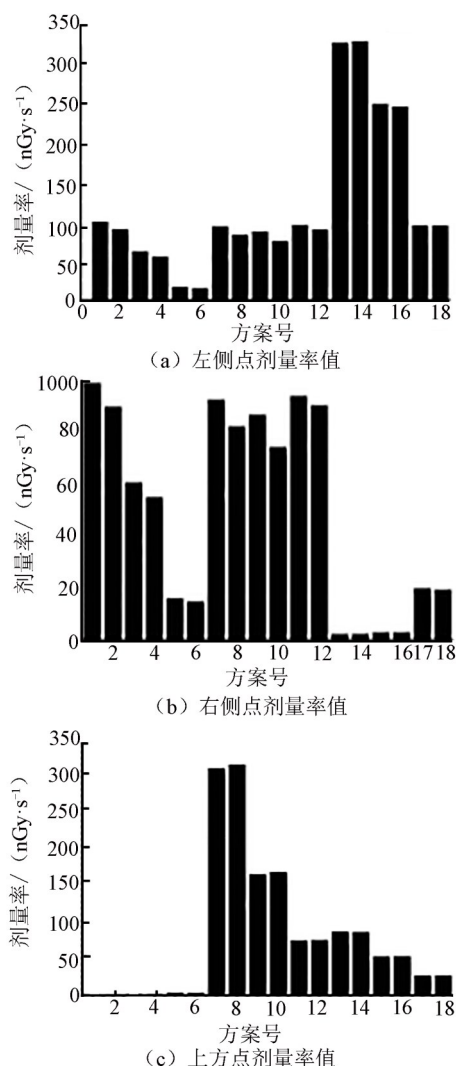


图5 不同点位在不同方案下的剂量率变化

Fig. 5 Radiation dose rate variations at different sites under different combination conditions

3 结论

根据以上对可能影响碎块辐射场分布情况的影响因素分析, 可以得出以下结论:

(1) 碎块姿态, 即分层截面平行于地面或垂直于地面时, 对辐射场分布的影响最大, 直接影响了辐射场分布的形状与最长辐射半径;

(2) 碎块被土壤掩埋的深度对辐射场分布的影响也很大, 在完全裸露和完全被掩埋2种情况下, 地面辐射剂量率峰值相差了2个数量级;

(3) 不论截面是正方形还是圆形, 其水平面上辐射场分布的外围形状总是呈圆形, 且剂量率值相近。即截面形状对辐射场的影响可以忽略。

下一步将围绕碎块姿态和被掩埋深度不尽相同的多碎块情况进行辐射场的模拟仿真, 进一步

贴近实际情况, 为事故情况下的辐射场快速计算与后果评估提供原始输入。

参考文献:

- [1] 袁伟, 李藐, 陈显波. 某型装备典型核事故场景模拟训练系统的设计与实现[J]. 应用科技, 2022, 49(4): 99-106, 112.
YUAN W, LI M, CHEN X B. The design and implementation of a scenario simulation training system for a typical major nuclear accident of military equipment[J]. Applied Science and Technology, 2022, 49(4): 99-106, 112.
- [2] WU Q, TIAN S J, YANG Z H, et al. Design and application of training simulation system for nuclear accident emergency drill[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, 41(2): 88-99.
- [3] CHENG Y, CHEN C H, ZHU J X, et al. Nuclear emergency rescue drill database design and implementation[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, 166: 108744.
- [4] OBRADOR E, SALVADOR-PALMER R, VILLAESCU J I, et al. Nuclear and radiological emergencies: Biological effects, countermeasures and biodosimetry[J]. Antioxidants, 2022, 11(6): 1098.
- [5] WU Z Q, WANG B R, SUN J. In-situ measurement of surface radioactivity in nuclear emergency response[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 197: 110146.
- [6] WEI Y, DEWJI S A. A comprehensive review of dose limits, triage systems and measurement tools for consequence management of nuclear and radiological emergencies[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, 217: 111533.
- [7] ABE Y, TAKASHIMA Y, AKIYAMA M, et al. A preliminary report on retrospective dose assessment by FISH translocation assay in FDNPP Nuclear Emergency Worker Study (NEWS) [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2023, 199(14): 1565-1571.
- [8] TILDEN J A, BOYD D. Nerds, ninjas, and neutrons: the story of the Nuclear Emergency Support Team[J]. Bulletin of the Atomic Scientists, 2023, 79(2): 87-94.
- [9] 吴宜灿, 宋婧, 胡丽琴, 等. 超级蒙特卡罗核计算仿真软件系统SuperMC[J]. 核科学与工程, 2016, 36(1): 62-71.
WU Y C, SONG J, HU L Q, et al. Super

- Monte Carlo simulation program for nuclear and radiation process: SuperMC[J]. Nuclear Science and Engineering, 2016, 36(1): 62-71.
- [10] 祝璞, 吴斌, 何鹏. SuperMC 在硼中子俘获治疗剂量计算中的初步应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2023, 40(11): 1321-1326.
- ZHU P, WU B, HE P. Preliminary application of SuperMC in dose calculation for boron neutron capture therapy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2023, 40(11): 1321-1326.
- [11] 曹佩, 甘隼, 曹承龙, 等. SuperMC 可视化方法及其在 ITER Clite 模型上的验证[J]. 核科学与工程, 2021, 41(5): 899-906.
- CAO P, GAN Q, CAO C L, et al. The visualization method of SuperMC and its validation on ITER Clite model[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41(5): 899-906.
- [12] 中华人民共和国国家卫生部. 用于光子外照射放射防护的剂量转换系数: GBZ/T 144—2002[S]. 北京: 法律出版社. 2004.
- [13] ICRP. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation: Adopted by the ICRP and ICRU in September 1995. [J]. Annals of the ICRP, 1996, 26(3-4): 1-205.
- [14] 黄孟, 朱剑钰, 伍钧. 基于武器级铀的核弹头内部炸药的放射性核素分析[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(10): 1910-1914.
- HUANG M, ZHU J Y, WU J. Radionuclide analysis of explosive in nuclear warhead with weapons-grade uranium[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(10): 1910-1914.
- [15] 郭春营, 李虹轶, 林源根, 等. MC 法模拟核部件自发裂变中子活化瞬发 γ 能谱[J]. 核电子学与探测技术, 2017, 37(1): 60-63.
- GUO C Y, LI H Y, LIN Y G, et al. Calculating method with MC for prompt γ spectrums from the nuclear components activated by the neutrons [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2017, 37(1): 60-63.

“辐射防护”专题征稿

辐射防护是原子能科学技术的一个重要分支, 是一门综合性的边缘学科, 基本任务是保护从事放射性工作人员、公众及其后代的健康与安全, 保护环境, 促进原子能事业的发展。其中, 涉及了诸多关键科学问题, 具有典型的多学科交叉融合特色, 必须充分借鉴前沿科技成果, 研究解决辐射防护工作中面临的突出矛盾和现实问题。

本专题聚焦辐射防护领域的前沿热点方向, 围绕辐射探测、环境保护、剂量估算、安全评价等关键技术问题, 诚邀相关基础理论研究、实际工程应用和前沿科学问题探究等方面的国内专家、学者和科研人员积极投稿。

投稿方式

军网网址: <http://xb.epgc.mtn>

电子邮箱: depbxb@126.com

联系电话: 029-84744009

通信地址: 陕西省西安市灞桥区同心路 2 号学报编辑部

邮政编码: 710025

《火箭军工程大学学报》编辑部