

基于ICRU模型的辐射剂量计算

邢星河, 赵亚丽*, 鲁维, 王红晖, 张晓东, 蒋睿

航天员科研训练中心, 北京
Email: *zhaoyali81@163.com

收稿日期: 2020年12月1日; 录用日期: 2020年12月24日; 发布日期: 2020年12月31日

摘要

不同组织器官辐射敏感性不同, 且处于人体不同深度位置, 因而复杂的空间辐射环境对各组织器官的危害不同。宽能谱质子是空间主要辐射粒子, 获得质子能量和组织器官吸收剂量的对应关系对于飞行前辐射风险评估十分必要。国际辐射单位与测量委员会(ICRU)设定的组织等效模型相对人体模型质量小、形状规则, 从任务实际出发更适于空间辐射监测与评估。本工作通过仿真计算建立了ICRU模型, 分析了不同能量质子及 γ 射线与ICRU模型的相互作用过程, 模拟了不同深度人体组织中探测到的吸收剂量, 建立了基于ICRU模型的剂量监测校准和剂量预估仿真计算体系。

关键词

ICRU模型, 组织等效材料, 空间辐射, 吸收剂量

Radiation Dose Calculation Based on ICRU Model

Xinghe Xing, Yali Zhao*, Wei Lu, Honghui Wang, Xiaodong Zhang, Rui Jiang

Astronaut Center of China, Beijing
Email: *zhaoyali81@163.com

Received: Dec. 1st, 2020; accepted: Dec. 24th, 2020; published: Dec. 31st, 2020

Abstract

Tissues and organs which show various radiosensitivity are in the specific depths of human body, so they suffer different levels of damage caused by the complex space radiation. Proton with wide spectrum is the main particle type in space and it is necessary to acquire the relationship between the energy of proton and the absorbed dose of tissues and organs for radiation-risk evaluation before space missions. The tissue-equivalent model recommended by International Commission on

*通讯作者。

Radiation Units and Measurements (ICRU) is light and regular compared to the phantoms so that it is more suitable in practice for space radiation monitoring and evaluation. The ICRU model was established through simulation in this work. The mechanism of the interaction between ICRU model and protons/gamma-rays with different energies was analyzed and the absorbed dose of tissues and organs in the different depths of human body was calculated. The calibration system for dose monitoring based on ICRU model and the calculation system for dose evaluation was established.

Keywords

ICRU Model, Tissue Equivalent Materials, Space Radiation, Absorbed Dose

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

航天员在深空探索中面临着空间辐射的威胁,在其执行任务前应预先针对复杂的空间辐射环境进行风险评估,才能针对性地提出防护措施,降低航天员飞行过程中所受的空间辐射风险。按照来源不同,空间辐射可分为银河宇宙射线(GCR)和太阳质子事件(SPE),以及在近地轨道中的地磁捕获辐射(TPR)。GCR 辐射粒子能量很高,但其在空间环境中相对稳定且注量率较低;SPE 是随机事件,虽然一年仅出现几次,但 SPE 注量率极高,若无有效措施防护,航天员健康将面临严重威胁。无论是近地还是深空飞行,质子均是航天员受到的主要辐射粒子,在空间中占比 80%以上,其中,GCR 质子的能量相对分散,能量以 10~1000 MeV 为主,而 SPE 质子能量主要集中在 10~100 MeV [1]。

空间质子能量分布宽,不同能量的质子在人体组织器官中会产生不同的吸收剂量。此外,不同组织器官处于人体不同深度位置且辐射敏感性不同,因此空间辐射对各组织器官的危害也不同。获得不同能量的质子在组织器官中的吸收剂量,研究不同能量的质子对人体组织的作用,可为辐射防护策略的制定提供输入,对于飞行前辐射风险评估十分必要。

由于直接获取人体器官剂量数据困难,航天国家使用国际辐射单位与测量委员会(ICRU)设定的组织等效球/板[2]、人体模型[3] [4]等方法进行器官辐射效应研究。人体模型质量大、探测器取放复杂,在航天应用中有一定局限,而 ICRU 球/板与探测器整合构建的监测体系[5] [6]与人体模型相比载荷小、操作简便,是空间监测设备研发和校准的基础工具,从任务实际出发更适于空间辐射监测评估。然而实际制作 ICRU 球/板工艺、辐射源条件等因素会略有差异,不同监测体系的实测结果可能存在偏差,因此,基于 ICRU 球/板进行辐射剂量仿真计算,获得特定照射条件下的吸收剂量,是建立 ICRU 球/板与探测器构成的监测体系的前提,基于 ICRU 球/板进行辐射剂量仿真计算可为剂量监测有效性验证及校准、深部组织剂量预估提供参考和方法体系。本工作基于 Geant4 程序建立了 ICRU 模型,通过仿真计算分析了空间主要能量质子及地面常用辐射源 γ 射线与 ICRU 球和平板相互作用,模拟了不同深度等效人体组织内探测到的吸收剂量,为 ICRU 球/板与探测器整合构建的监测体系的有效性验证和空间辐射风险评估提供了参考依据。

2. 研究方法

2.1. ICRU 模型

国际辐射单位与测量委员会(ICRU)设定的球模型和平板模型如图 1 所示。ICRU 球模型直径为 30 cm,

平板模型尺寸为 $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ ，二者材料均由 71.39% 的 O，14.89% 的 C，10.00% 的 H，3.47% 的 N，0.15% 的 Na 和 0.10% 的 Cl 组成，密度均为 1 g/cm^3 。基于 ICRU 模型，可计算个人剂量 $dp(H)$ 用于辐射监测。通常取深度为 10 mm 的剂量，作为躯干所受有效剂量的近似值；取深度为 3 mm 的剂量，作为晶状体所受当量剂量的近似值；取深度为 0.07 mm 的剂量，作为皮肤所受当量剂量的近似值。

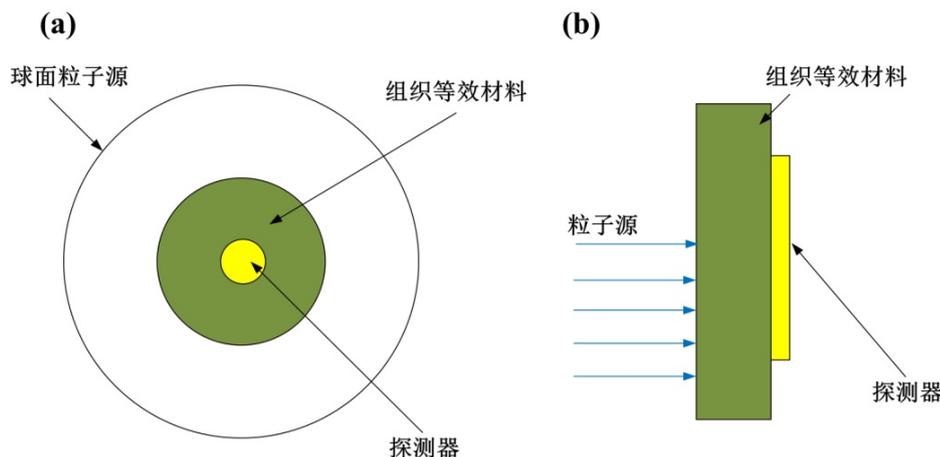


Figure 1. Sphere (a) and slab (b) model recommended by ICRU
图 1. ICRU 设定的球模型(a)和平板模型(b)

2.2. 辐射源

1) 质子

入射质子与靶材料相互作用包括弹性和非弹性物理过程。与阻止介质的核外电子的非弹性碰撞，使核外电子激发或者电离，是质子能量损失的最主要形式。此外，与原子核发生弹性碰撞，原子核因获得动能而发生反冲产生原子位移缺陷，也是质子的能量损失方式之一，而质子与原子核的非弹性碰撞、与核外电子的弹性碰撞的能量损失较小可忽略不计[7]。

质子穿入物质与材料中的电子和原子相互碰撞而损失能量，通常用单位距离上的平均能量损失 $(-dE/dx)$ 对该过程进行描述。质子的能量损失主要为电离能量损失，遵循 Bethe-Block 公式[8]：

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{ion} = \frac{4\pi z^2 e^4 ZN}{m_0 v^2} \left[\ln \left(\frac{2m_0 v^2}{I} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

Bethe-Block 公式中 m_0 是电子静止质量， v 是入射粒子的速度， z 是带电粒子电荷， Z 是阻止介质原子序数， $\beta = v/c$ ， c 是光速， I 是介质原子的平均电离电势。

质子在某物质中沿入射方向穿过的最大距离为质子的射程。图 2 是利用 SRIM 软件，计算的不同能量质子在人体组织等效材料内的射程。质子与物质相互作用时在射程末端形成布拉格(Bragg)峰，随着质子穿入介质的深度增加，不断产生电离，质子能量减少，运动速度降低；而慢速的质子又会引起更多的电离即 Bragg 峰，Bragg 峰后粒子能量基本全部释放，电离能力突变降为 0。

2) γ 射线

γ 射线本身不带电，因而用相互作用截面、能量转移和能量吸收的几率来描述其在物质中的行为。 γ 射线与物质相互作用最主要的方式为光电效应、康普顿效应、电子对效应等， γ 射线能量主要转换为次级电子能量，通过计算次级电子能量沉积可得到 γ 射线能量沉积。

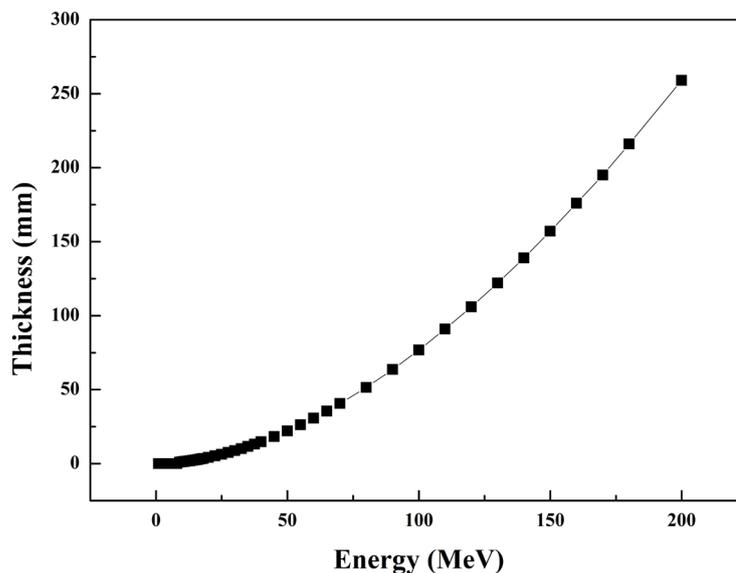


Figure 2. The range of protons in the tissue-equivalent materials

图 2. 质子在人体组织等效材料内的射程

2.3. 方法程序

蒙特卡罗方法是使用随机数或伪随机数来解决大量随机样本中某一事件发生概率的方法[9]。在辐射评估方面,参与核反应的辐射粒子在物质中运输的过程具有一定的统计规律性,适用蒙特卡罗方法分析。运用蒙特卡罗方法,通过在计算机上随机的模拟粒子的运动过程,并追踪这些粒子的运动信息,从而得出这些粒子运动的统计规律,分析粒子在物质中的运输问题。该方法的核心是随机数产生器目前蒙特卡罗方法中随机数并行化的技术已经较成熟,常见的蒙特卡罗程序包有 MCNP、FLUKA、GEANT 等。

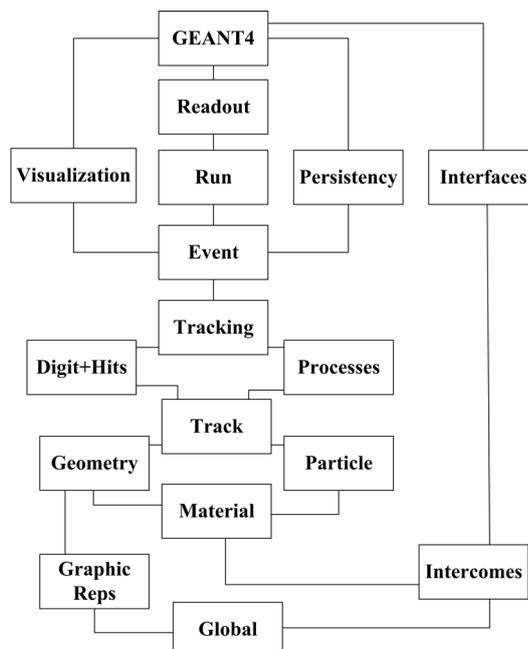


Figure 3. Main module structure diagram of GEANT4

图 3. GEANT4 的主要模块结构图

GEANT4 是欧洲核子中心(CERN)开发的一种蒙特卡洛程序,在核物理实验模拟、空间辐射、加速器模拟、放射医学等领域均有广泛应用。该程序程序代码开放,采用面向对象的 C++语言编写,具备完整的粒子与物质相互作用过程的材料库,包括几何跟踪,探测器响应,可视化和用户界面等模块的软件包,是粒子物理与核物理实验模拟最好的工具之一。本工作选用 GEANT4 程序基于 ICRU 模型对吸收剂量进行模拟计算。GEANT4 主要模块图如图 3 所示。其中 Global 模块包含了程序所需要的常数、单位、数值运算以及随机数产生等, Particle 和 Material 模块描述粒子和材料的物理特性, Tracking 和 Track 模块与粒子的运输过程有关, Process 模块描述粒子与物质相互作用,可设置粒子的能量、动量以及种类、对参与过程的物质等, Run 是对模拟事件的控制指令, Visualization 模块可以将探测器、粒子径迹等转化为图形。在模拟时,首先要明确粒子会与物质会发生哪些重要的物理过程。在各种粒子与物质的相互作用的过程中, Geant4 中主要有 7 种物理过程包括电与磁相互作用、强子之间相互作用过程、原子核的衰变过程、光轻子与强子之间的相互作用过程、光学的光子的过程、设置参数过程以及粒子输运过程。

2.4. 输入条件

本计算使用 Geant4.9.6 版本,根据 ICRU 平板模型和球模型的几何构造和元素组成建立了物理模型,采用质子和 γ 射线两种辐射源进行仿真计算,选用的物理模型有强相互作用 G4QGSM 模型,光电效应、康普顿效应、电子效应、EM 输运等物理模型,粒子的截止阈值为 1 mm [10]。

1) 基于空间质子能谱及地面质子加速器试验能段范围,质子能量选取 10 MeV、20 MeV、40 MeV、50 MeV、60 MeV、80 MeV、100 MeV、120 MeV、150 MeV 及 200 MeV;基于空间舱内屏蔽后的 γ 能谱分布、地面钴 60 的 γ 平均能量 1250 keV, γ 射线能量选取 1000 keV、1173 keV、1320 keV、1500 keV、2000 keV、2500 keV、3000 keV 及 3500 keV;

2) 质子、 γ 射线均采用入射角为 \cos 分布、度数 0~90 度之间照射;

3) 质子注量选取 SPE 典型恶劣环境注量 10^7 cm^{-2} 且为归一化常数, γ 射线注量与质子一致;

4) ICRU 模型深度选取 0.07 mm、3 mm、10 mm、30 mm 及 100 mm,探测在该深度下的吸收剂量。

3. 结果与讨论

3.1. ICRU 球模型中辐射剂量分布

表 1 列出了球模型中注量 10^7 cm^{-2} 的归一化吸收剂量与质子能量、入射深度的对应关系。通过表 1 中深度为 0.07、3、10 mm 归一化吸收剂量与实际粒子注量的乘积,可近似得到特定能量质子照射下,皮肤、晶状体所受当量剂量以及躯干所受有效剂量,为辐射评估提供参考依据。

Table 1. The normalized absorbed dose ($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$) in sphere model of different detecting depths caused by protons of different energies

表 1. 不同探测深度下不同能量质子造成的球模型中归一化吸收剂量($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$)

厚度 (mm)	10 MeV	20 MeV	40 MeV	50 MeV	60 MeV	80 MeV	100 MeV	120 MeV	150 MeV	200 MeV
0.07	2.12×10^{-1}	1.91×10^{-1}	1.54×10^{-1}	1.24×10^{-1}	1.13×10^{-1}	8.09×10^{-2}	6.84×10^{-2}	5.96×10^{-2}	5.09×10^{-2}	4.28×10^{-2}
3	1.64×10^{-8}	1.79×10^{-1}	1.29×10^{-1}	1.15×10^{-1}	9.27×10^{-2}	8.24×10^{-2}	7.62×10^{-2}	6.42×10^{-2}	6.16×10^{-2}	5.91×10^{-2}
10	1.46×10^{-8}	2.75×10^{-7}	2.69×10^{-1}	1.66×10^{-1}	1.32×10^{-1}	1.29×10^{-1}	1.09×10^{-1}	9.79×10^{-2}	8.44×10^{-2}	8.41×10^{-2}
30	1.27×10^{-8}	2.17×10^{-7}	8.58×10^{-6}	4.47×10^{-6}	8.92×10^{-1}	7.81×10^{-1}	5.89×10^{-1}	5.07×10^{-1}	4.21×10^{-1}	3.48×10^{-1}
100	1.08×10^{-8}	1.38×10^{-7}	5.89×10^{-7}	9.18×10^{-7}	1.07×10^{-6}	8.49×10^{-6}	1.01×10^{-5}	7.47×10^{-1}	7.26×10^{-1}	7.18×10^{-1}

图 4 为球模型中归一化吸收剂量随质子能量(a)和材料厚度(b)的变化。由图 4(a)可见, 随着质子能量增加, 吸收剂量先增大后然后逐渐下降, 在某个能量下达到峰值, 且随着探测深度增加, 峰值对应的质子入射能量逐渐增大。这与图 2 中质子在组织等效材料的射程有关, 质子与等效人体组织相互作用不断产生电离而损失能量, 能量沉积在靶物质中。当探测深度固定, 质子能量小射程小时, 探测深度大于质子射程, 因此该能量的质子对吸收剂量贡献小; 随着质子能量增加, 探测深度与质子射程接近, 吸收剂量达到峰值, 而后随着质子能量继续增加, 射程逐渐超过探测厚度, 吸收剂量逐渐减小, 且随着探测厚度增加, 达到吸收剂量峰值需要的质子入射能量增大。结合表 1 数据, 由图 4(b)可见, 质子能量在 0~50 MeV 时, 随着探测深度增加吸收剂量减小, 若等效为人体剂量, 则人体内部器官相对皮肤受到辐射的剂量较小。当质子能量大于 60 MeV, 30 mm 探测深度的吸收剂量超过 0.07, 3, 10 mm 探测深度的值, 即深部器官相对皮肤受到的辐射剂量更大。

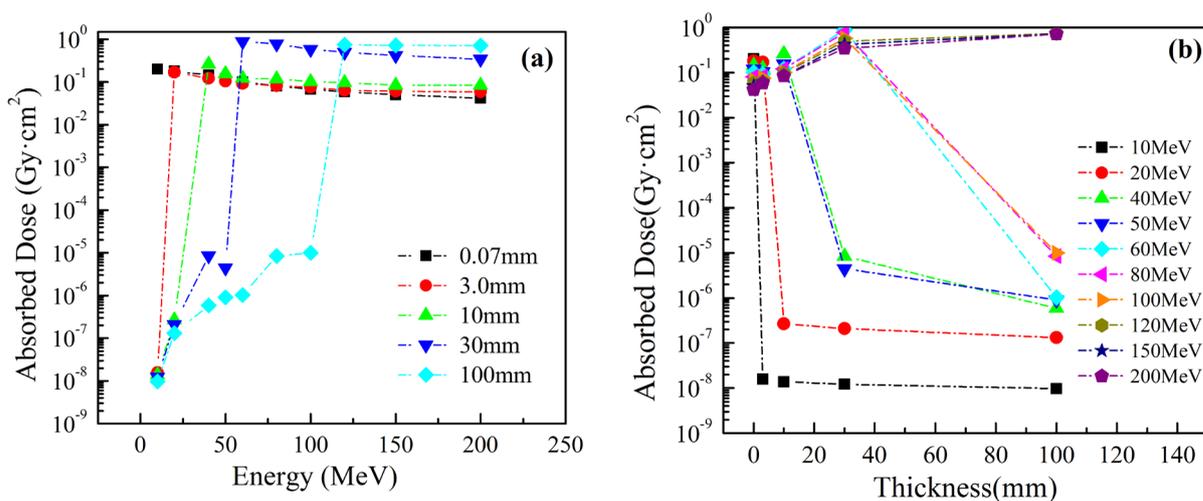


Figure 4. The proton energy (a) and material thickness (b) dependence of the normalized absorbed dose ($Gy \cdot cm^2$) in sphere model

图 4. 球模型中归一化吸收剂量随质子能量(a)和材料厚度(b)的变化

表 2 列出了不同探测深度下不同能量 γ 射线造成球模型中的注量 $10^7 cm^{-2}$ 的归一化吸收剂量。 γ 射线为地面常用辐射源。通过表 2 中归一化吸收剂量与实际粒子注量的乘积得到特定注量下的吸收剂量, 可作为 ICRU 球的地面试验验证的参考。

Table 2. The normalized absorbed dose ($Gy \cdot cm^2$) in sphere model of different detecting depths caused by γ ray of different energies

表 2. 不同探测深度下不同能量 γ 射线造成球模型中的归一化吸收剂量($Gy \cdot cm^2$)

厚度(mm)	1 MeV	1.17 MeV	1.32 MeV	1.5 MeV	2 MeV	2.5 MeV	3 MeV	3.5 MeV
0.07	2.85×10^{-5}	2.78×10^{-5}	2.64×10^{-5}	2.48×10^{-5}	2.11×10^{-5}	1.79×10^{-5}	1.58×10^{-5}	1.47×10^{-5}
3	4.14×10^{-5}	4.67×10^{-5}	4.99×10^{-5}	5.37×10^{-5}	5.36×10^{-5}	5.17×10^{-5}	4.65×10^{-5}	4.41×10^{-5}
10	4.16×10^{-5}	4.66×10^{-5}	4.98×10^{-5}	5.49×10^{-5}	6.56×10^{-5}	7.49×10^{-5}	8.35×10^{-5}	8.82×10^{-5}
30	3.89×10^{-5}	4.35×10^{-5}	4.76×10^{-5}	5.21×10^{-5}	6.39×10^{-5}	7.32×10^{-5}	8.27×10^{-5}	8.99×10^{-5}
100	2.87×10^{-5}	3.31×10^{-5}	3.72×10^{-5}	4.15×10^{-5}	5.19×10^{-5}	6.11×10^{-5}	6.88×10^{-5}	7.76×10^{-5}

图 5 为球模型中注量 $10^7 cm^{-2}$ 的归一化吸收剂量随 γ 射线能量(a)和探测厚度(b)的变化, 与图 4 对比

可见, γ 射线与质子的作用效果不同。图 5(a)中, 当探测深度小于 3 mm 且质子能量较大时, 吸收剂量随能量上升而下降, 这是由于 γ 射线在物质中产生的次级电子还未达到平衡; 当深度大于 3 mm 时, 次级电子逐渐平衡, 因此随入射 γ 射线能量增大, 组织等效材料的吸收剂量也变大。图 5(b)中曲线前半段吸收剂量随厚度上升, 这是正面碰撞产生的次级电子的积累作用造成, 后半段随着深度增加, 由于电离损耗逐渐减小, 吸收剂量下降。

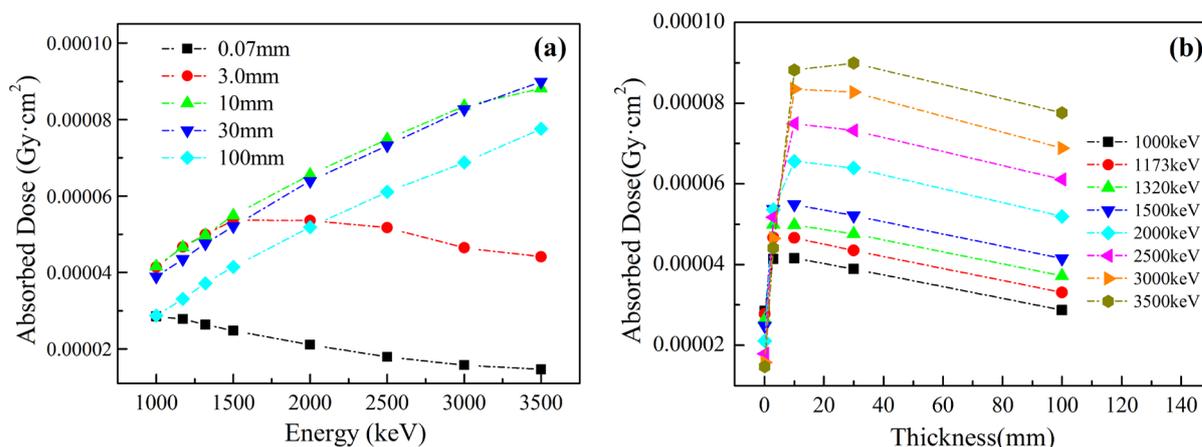


Figure 5. The γ -ray energy (a) and material thickness (b) dependence of the normalized absorbed dose ($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$) in sphere model

图 5. 球模型中归一化吸收剂量随 γ 射线能量(a)和探测厚度(b)的变化

3.2. ICRU 平板模型中辐射剂量分布

平板模型地面模拟照射实验可行性高, 是作为地面材料试验验证的有效参考。因此表 3 中列出了不同探测深度下不同能量质子造成的平板模型中注量 10^7 cm^{-2} 的归一化吸收剂量, 可作为 ICRU 平板实物地面照射的对照, 为不同深度辐射剂量评估提供参考依据。与表 1 数据对比可见, 相同辐照条件下, 球模型吸收剂量大于平板模型, 这是因为球模型是 4π 照射, 次级粒子散射到同一探测深度的概率较大。通过表 3 中的数据作图, 得到图 6 中平板模型中注量 10^7 cm^{-2} 的归一化吸收剂量随质子能量(a)和材料厚度(b)的变化, 通过对比可见, 平板模型中吸收剂量的变化规律与图 4 球模型中的规律一致, 均先变大, 达到一定阈值后缓慢衰减。

Table 3. The normalized absorbed dose ($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$) in slab model of different detecting depths caused by protons of different energies

表 3. 不同探测深度下不同能量质子造成的平板模型中的归一化吸收剂量($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$)

厚度 (mm)	10 MeV	20 MeV	40 MeV	50 MeV	60 MeV	80 MeV	100 MeV	120 MeV	150 MeV	200 MeV
0.07	5.88×10^{-2}	3.92×10^{-2}	2.03×10^{-2}	1.68×10^{-2}	1.45×10^{-2}	1.16×10^{-2}	9.79×10^{-3}	8.59×10^{-3}	7.35×10^{-3}	6.11×10^{-3}
3	8.38×10^{-8}	6.65×10^{-2}	2.24×10^{-2}	1.79×10^{-2}	1.52×10^{-2}	1.19×10^{-2}	1.00×10^{-2}	8.77×10^{-3}	7.50×10^{-3}	6.24×10^{-3}
10	3.73×10^{-10}	7.00×10^{-7}	3.28×10^{-2}	2.15×10^{-2}	1.70×10^{-2}	1.27×10^{-2}	1.05×10^{-2}	9.08×10^{-3}	7.74×10^{-3}	6.43×10^{-3}
30	2.42×10^{-8}	4.28×10^{-7}	6.13×10^{-6}	4.09×10^{-6}	4.80×10^{-2}	1.16×10^{-2}	1.19×10^{-2}	9.91×10^{-3}	8.22×10^{-3}	6.70×10^{-3}
100	1.21×10^{-8}	3.19×10^{-8}	4.74×10^{-7}	9.08×10^{-7}	7.79×10^{-7}	4.35×10^{-6}	9.65×10^{-6}	1.95×10^{-2}	1.45×10^{-2}	1.04×10^{-2}

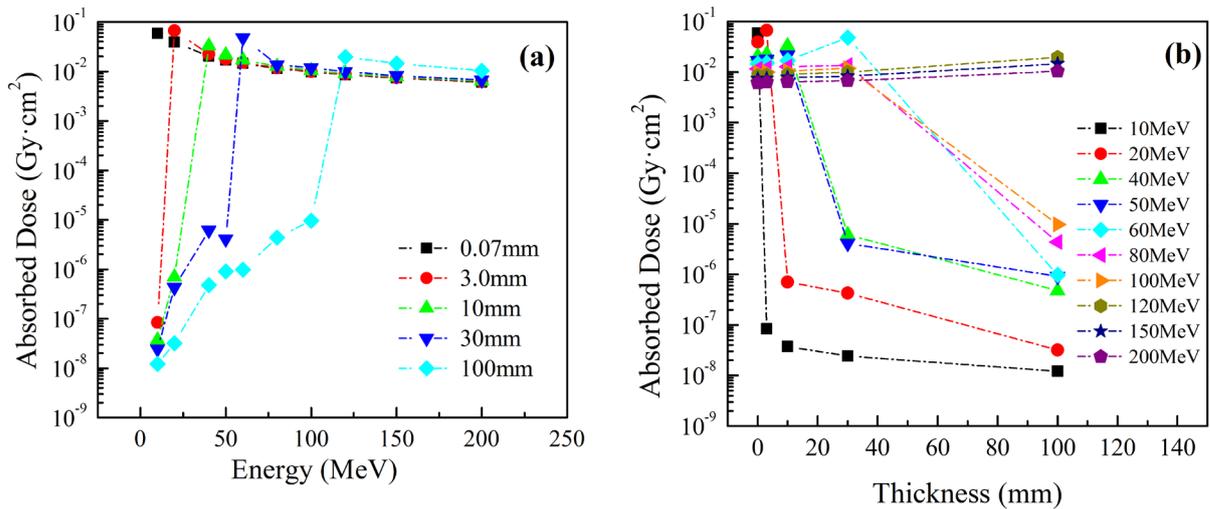


Figure 6. The proton energy (a) and material thickness (b) dependence of the normalized absorbed dose ($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$) in slab model

图 6. 平板模型中归一化吸收剂量随质子能量(a)和材料厚度(b)的变化

表 4 列出了平板模型中注量 10^7 cm^{-2} 的归一化吸收剂量与 γ 射线能量、入射深度的对应关系。 γ 射线为地面常用辐射源，通过计算归一化吸收剂量与实际粒子注量的乘积得到特定注量下的吸收剂量，可作为 ICRU 平板实物地面试验验证的参考。与表 2 相比，相同辐照条件下，平板模型相同深度的吸收剂量与球模型基本一致，差异在 5% 以内，因此，平板模型的吸收剂量随 γ 射线能量和探测深度的变化规律与图 4 球模型中的一致。

Table 4. The normalized absorbed dose ($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$) in slab model of different detecting depths caused by γ -rays of different energies

表 4. 不同探测深度下不同能量 γ 射线造成的平板模型归一化吸收剂量($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$)

厚度(mm)	1 MeV	1.17 MeV	1.32 MeV	1.5 MeV	2 MeV	2.5 MeV	3 MeV	3.5 MeV
0.07	2.80×10^{-5}	2.71×10^{-5}	2.59×10^{-5}	2.43×10^{-5}	2.03×10^{-5}	1.77×10^{-5}	1.56×10^{-5}	1.41×10^{-5}
3	4.04×10^{-5}	4.59×10^{-5}	4.97×10^{-5}	5.27×10^{-5}	5.37×10^{-5}	5.11×10^{-5}	4.61×10^{-5}	4.32×10^{-5}
10	4.05×10^{-5}	4.58×10^{-5}	4.95×10^{-5}	5.41×10^{-5}	6.52×10^{-5}	7.46×10^{-5}	8.29×10^{-5}	8.72×10^{-5}
30	3.86×10^{-5}	4.29×10^{-5}	4.68×10^{-5}	5.12×10^{-5}	6.29×10^{-5}	7.26×10^{-5}	8.18×10^{-5}	8.97×10^{-5}
100	2.82×10^{-5}	3.25×10^{-5}	3.68×10^{-5}	4.06×10^{-5}	5.11×10^{-5}	6.02×10^{-5}	6.84×10^{-5}	7.73×10^{-5}

4. 结论

本工作建立了 ICRU 球模型和平板模型，基于 Geant4 软件获得了 ICRU 模型不同深度的吸收剂量与质子、 γ 射线能量的对应关系，建立了空间辐射剂量监测校准和剂量预估仿真计算体系。由仿真结果可见，平板模型和球模型中组织等效材料的吸收剂量随着质子能量和探测深度变化的规律一致，随着单能质子能量的增加，吸收剂量均先变大，达到一定阈值后缓慢衰减；由于 4π 方向入射，相同条件下球模型的吸收剂量比平板模型略高。对地面常用参考辐射源 γ 射线进行了仿真计算，结果表明不同能量 γ 射线、不同探测深度下， γ 射线在平板模型和球模型中的作用规律和吸收的剂量基本一致。

致 谢

本文是在航天员科研训练中心各位领导和专家支持下完成，向各位表示衷心的感谢！

基金项目

本项目由航天员科研训练中心计量课题、实验技术研究青年基金项目 2017SY54C0401 支持。

参考文献

- [1] Dietze, G., Bartlett, D.T., Cool, D.A., *et al.* (2013) ICRP Publication 123: Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. *Annals of the ICRP*, **42**, 1-339. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2013.05.004>
- [2] Arefev, I.M., Krivokhizha, S.V., Kyzylasov, Y.I., *et al.* (1985) Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources. The Commission, Bethesda, MD.
- [3] Dettmann, J., Reitz, G. and Gianfiglio, G. (2007) Matroshka—The First ESA External Payload on the International Space Station. *Acta Astronautica*, **60**, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2006.04.018>
- [4] Beck, P., Berger, T., Hajek, M., *et al.* (2009) MATSIM: Development of a Voxel Model of the MATROSHKA Astronaut Dosimetric Phantom Exposed Onboard ISS. 2009 *European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems*, Bruges, 352-355. <https://doi.org/10.1109/RADECS.2009.5994675>
- [5] Park, S.H., Kim, J.K. and Kim, J.O. (2001) Simultaneous Calibration of TLDs Using the ICRU Slab and Photon Beams. *Radiation Physics & Chemistry*, **61**, 473-474. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00304-8](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00304-8)
- [6] Wilson, J.W., Slaba, T.C., Badavi, F.F., *et al.* (2014) 3D Space Radiation Transport in a Shielded ICRU Tissue Sphere. NASA/TP-2014-218530 NASA Langley Research Center, Hampton, VA.
- [7] 凌球. 核辐射探测[M]. 北京: 原子能出版社, 1992.
- [8] Marmier, P. and Sheldon, E. (1969) Physics of Nuclei and Particles. *American Journal of Physics*, **39**, 851. <https://doi.org/10.1119/1.1986310>
- [9] 许淑艳. 蒙特卡罗方法在实验核物理中的应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2006.
- [10] 耿长冉, 汤晓斌, 谢芹, 陈达. 空间辐射环境及人体剂量蒙特卡罗模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(12): 3028-3032.