基于 CDP 面元模型的光子外照射剂量转换系数计算及分析

熊良胤 樊庆文 裴宏亮
（四川大学机械工程学院 四川 成都 610065）

摘要：外照射剂量转换系数是用于计算不同辐射环境下人体各器官当量剂量、有效剂量，评价人体辐射安全的重要参数。目前常用的外照射剂量转换系数是由国际放射防护委员会（ICRP）基于高加索人种的参考体模给出的，不适合用于中国人体特征的辐射安全评价。成都剂量体模是根据中国人体特征设计、国际辐射单位与度量委员会（ICRU）认可的辐射等效体模，被称为 CDP 模型。根据 CDP 模型 CT 图片集，建立面元体模 MCDP，利用蒙特卡罗软件 GATE 模拟四种照射方向，计算出不同辐射能量下的光子辐射场中 MCDP 肺、心脏、胃等十个器官的光子剂量转换系数并和 ICRP 116 号出版物推荐值以及 ICRP 面元模型 MRCP 进行对比分析。验证了基于 MCDP 得到的剂量转换系数和 ICRP 116、MRCP 的变化趋势是相同的，量值是吻合的，可以用于计算中国人体器官的当量剂量、有效剂量，对评价中国人体的辐射安全具有重要意义。

关键词：面元体模；外照射剂量转换系数；蒙特卡罗；CDP

0 引言

成都剂量体模是由四川大学林大全等人研制的首例符合中国人体 50 百分位身高特征的实体组织辐射等效模型，该体模于 1992 年被国际辐射单位与度量委员会 (International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU)48 号报告收录，并将其命名为“成都剂量体模 (Chengdu Dosimetric Phantom,CDP)”，是目前 ICRU 唯一认可的符合中国人体特征的辐射等效模型。根据 CDP 模型 CT 图片集，重建 CDP 模型器官、组织的三维模型为 MCDP；利用蒙特卡罗软件 GATE(GEANT4 Application for Tomographic Emission)，计算四种标准照射方式下不同能量点的光子辐射场中 MCDP 肺、心脏、胃等十余个符合中国人体特征器官、组织的光子剂量转换系数，选取肺、胃、肝脏三个典型器官与 ICRP 116 号出

1 CDP 面元模型三维重建

CDP 模型包含了肺、胃等十余种器官和组织，是符合中国人体特征的辐射等效体模。用 CT 机扫描 CDP 模型，获得由 507 张 CT 图片组成的 CT 数据集，CT 图片的分辨率为 512×512，图像是 DICOM 格式，层间距为 3mm。首先对 CT 图像进行阈值处理 (Thresholding)，划分出所需的器官蒙版，然后对蒙版进行修改 (Edit Masks)，利用区域计算工具 (Calculate Part) 即可获得表面较为粗糙的 CDP 模型器官和组织三维面元模型（以 STL 格式保存），然后对各器官、组织三角面片模型进行空洞填补、平滑处理，提高器官和组织三维模型的质量，最后将器官和组织模型进行装配，得到 CDP 面元模型 (简称 MCDP)，如图 1 所示。

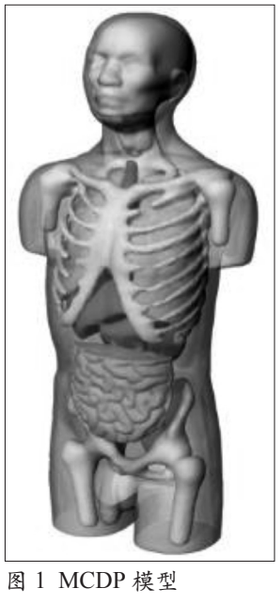

图 1 MCDP 模型

2 MCDP 剂量转换系数计算

GATE(GEANT4 Application for Tomographic Emission) 是由 openGATE 组织以 GEANT4 为核心研发的，具有交互友好特点的开源蒙特卡罗模拟软件，可以模拟计算不同辐射场下各器官、组织的沉积量，进而计算各器官、组织的剂量转换系数。具体计算过程如下：

2.1 几何定义

GATE 继承了 GEANT4 的几何构造方式，支持 STL 格式的模型文件。首先需要定义一个最大几何体 (World)，定义 MCDP 的各器官、组织为子几何体，并定义器官和组织的空间坐标、文件路径，依次将各器官和组织模型写入 Geometry 宏文件。

2.2 材料赋予

计算剂量转换系数还需要对各器官、组织的材料进行赋值，部分器官和组织的元素组成、密度如表 1 所示。

2.3 Actor 定义

利用 GATE 计算剂量转换系数还需要定义各器官、组织模型的 Actor，用于计算各器官、组织的辐射沉积量 (Edep)。选择“Dose Actor”作为计算辐射沉积量的 Actor，在 Rhino 软件中获取各器官、组织“最大包围盒”的坐标信息，计算

表 CDP 辐射组织等效材料的元素组成

组织	元素构成（质量百分含量 %）						密度 (g/cm^3)
	H	C	N	O	Cl	其他元素	
肌肉脂肪混合组织	4.59	62.92	10.85	21.55	-	-	1.0
躯干骨	6.33	78.92	-	8.00	-	Ca(6.66)	1.42
脑	1.59	63.25	2.63	30.41	2.10	-	1.03
肺	11.70	82.90	0.20	-	-	Fe(1.00),Mg(1.00), S(2.77)	0.25 (无血)

77-96 综合 7月下 第21期 .indd 91 2022/1/14 10:12:16

出各器官、组织中心位置坐标。由于只需要获取器官的总沉积量，定义 Dose Actor 的分割精度均为 1×1×1，“体积”与器官和组织模型自动匹配。各器官和组织沉积量计算结果的输出格式为 txt 格式。

2.4 辐射源定义

在实际环境中，人体各器官、组织受到的辐射剂量还与辐射源的分布、方向角密切相关。在 GATE 中用 Source 宏文件定义正向照射 (AP)、背向照射 (PA)，左侧照射 (LLAT)，右侧照射 (RLAT) 四种标准辐射方向，用变量 Ekin 替代光子能量数值。将辐射源类型定义为四边形平面 (Rectangle)，平面边长为 80cm×100cm 。

2.5 物理模型选择

GATE 可供选择的电磁物理过程模型有 emstandard、emstandard_opt1、emlivermore 等。选择电磁模型 emstandard 计算剂量转换系数，该模型可以计算 0 至 100TeV 的光子、电子等多种粒子电磁作用物理过程。设置初级光子数目为 5×10^5。

2.6 计算光子剂量转换系数

根据公式 (1) 即可计算出各器官、组织的平均吸收剂量 D_T（单位：Gy）。

$$D_T = 1.602\times10^{-13}\times\frac{Edep}{m_T} \qquad (1)$$

式中，m_T 是器官、组织质量。

根据公式 (2) 可以计算各器官、组织的剂量转换系数 DCC_ϕ（单位：pGy · cm^2）。

$$DCC_\phi = \frac{D_T}{\phi} \qquad (2)$$

式中，ϕ 为粒子注量，单位：cm^{-2}。

光子辐射剂量转换系数通常采用器官、组织吸收剂量和空气比释动能的比值 DCC_k（单位：Gy · Gy^{-1}）来表示，如公式 (3) 所示。

$$DCC_k = \frac{D_T}{K_a} = \frac{DCC_\phi}{K_a/\phi} \qquad (3)$$

式中，K_a/ϕ 为单能光子单位注量与空气比释动能的转换系数，单位：pGy · cm^2, 可由 ICRU 47 号出版物查得，和模型无关。

3 计算结果与分析

如图 2 所示为 AP、PA、LLAT、RLAT 照射方式下，MCDP 肺器官光子剂量转换系数、ICRP 116 号出版物推荐值以及 MRCP 的对比情况。随着光子能量的增加，各辐射场下 MCDP 的肺器官剂量转换系数变化趋势与 ICRP 116、MRCP 基本一致，剂量转换系数峰值所在光子能量点均相同。AP 方向，转换系数达到峰值后（照射能量为 0.08MeV），MCDP 的剂量转换系数与 ICRP 116 的误差小于 3.3%，和 MRCP 的差值小于 4.5%；PA 方向照射时 MCDP 与 MRCP 的最大差值可达 17.6%，其主要原因是高加索人种的背部组织厚度大于亚洲人种。LLAT、RLAT 方向，MCDP 的肺器官剂量转换系数均远大于 ICRP 116 和 MRCP，主要原因是

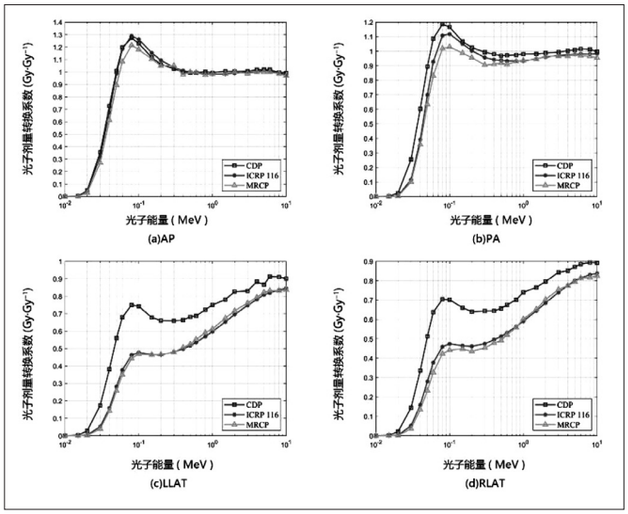

图 2 不同照射方向肺器官光子剂量转换系数比较

CDP 模型不包含手臂部分，

4 结语

利用成都剂量体模 (CDP) 实体模型 CT 数据集重建了基于中国人体特征的三维面元模型 (MCDP)，用蒙特卡罗软件 GATE 模拟了 4 种照射方式 (AP、PA、LLAT、RLAT) 和 25 个不同能量 (10keV~100MeV) 的光子辐射环境，获得了不同照射方式、不同光子能量下各器官、组织的辐射沉积量，得到了一套符合中国人体特征的器官、组织光子剂量转换系数。通过比较分析，证明基于中国人体特征的面元模型计算得到的光子外照射剂量转换系数可以用于计算中国人体光子辐射剂量，作为评估中国人体辐射安全评价的参考依据。

基金项目：四川省苗子工程项目 (2020JDRC0029)。

参考文献：

[1] 林大全，张纪淮，王星泉，等 .《中国模拟人》—非均匀组织等效辐照体模的研制 [J]. 医学物理 ,1985(03):23-26.

[2]White D R,Buckland-Wright J C,Griffith R V,et al.Report 48[J].Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements,1992,os25(1):NP-NP.

[3]Jan S,Santin G,Strul D,et al.GATE: a simulation toolkit for PET and SPECT[J].Physics in Medicine and Biology,2004,49(19):4543-4561.

[4]Jan S,Benoit D,Becheva E,et al.GATE V6: a major enhancement of the GATE simulation platform enabling modelling of CT and radiotherapy[J].Physics in Medicine and Biology,2011,56(4):881-901.

[5] 崔甜甜，张书源，王一迪，等 .GATE 在计算人体体素模型光子剂量转换系数的应用分析 [J]. 核技术 ,2018,41(04):51-58.

[6] 蒋伟，林大全，樊庆文，等 . 成都剂量体模 (CDP) 组织等效材料辐射等效性评价 [J]. 中国测试技术 ,2006(06):69-71.

[7]Portal G,Cross W G,Dietze G,et al.Report 47[J].Journal of the International Commission on Radiation Units and Measurements,1992,os24(2):NP-NP.

77-96 综合 7月下 第21期 .indd 92 2022/1/14 10:12:16