

·综述·

蒙特卡罗模拟方法结合不同体模在剂量估算中的应用

阎长鑫 刘玉连 焦玲 张文艺

中国医学科学院北京协和医学院放射医学研究所, 天津市放射医学与分子核医学重点实验室, 300192

通信作者: 张文艺, Email: wzhang.irm@163.com

【摘要】 随着核与辐射在人们日常生活中的应用越来越广泛, 其所带来的危害也备受关注。剂量估算是辐射技术应用的重要一环, 估算出人体所受的剂量对评价辐射造成的确定效应与随机效应起着重要作用。蒙特卡罗(MC)模拟与人体参考模型结合可对核事故、医疗照射和环境的辐射剂量进行估算, 是一种快速且对硬件要求较少的剂量估算方法, 目前正面临模型开发和计算耗时的瓶颈, 笔者对此现状进行综述。

【关键词】 蒙特卡罗法; 人体模型; 辐射剂量; 估算

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202003014-00055](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202003014-00055)

Monte Carlo simulation method combined with different phantoms in dose estimation

Yan Changxin, Liu Yulian, Jiao Ling, Zhang Wenyi

Tianjin Key Laboratory of Radiation Medicine and Molecular Nuclear Medicine, Institute of Radiation Medicine, Chinese Academy of Medical Science, Peking Union Medical College, Tianjin 300192, China

Corresponding author: Zhang Wenyi, Email: wzhang.irm@163.com

【Abstract】 With the increasing use of nuclear and radiation in people's daily life, the harm caused by radiation has also received much attention. Dose estimation is an important part of the application of radiation technology. Estimating the radiation dose received by the human body plays an important role in determining the deterministic and random effects of radiation. Monte Carlo simulation combined with the human reference model can estimate radiation doses of nuclear accidents, medical exposures and environmental radiation. It is a fast and low-hardware dose estimation method. Currently, it faces bottlenecks in model development and calculation. This article reviews the research progress.

【Key words】 Monte Carlo method; Manikins; Radiation dosage; Estimation

DOI: [10.3760/cma.j.cn121381-202003014-00055](https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121381-202003014-00055)

随着核技术在各领域的广泛应用, 核与辐射可能带来的潜在危害也逐渐增加。当发生核事故时, 如何快速、准确地做出剂量估算, 为辐射损伤分型、分度提供依据, 对提高受照或受污染人员的救治效果起着至关重要的作用。因此, 剂量估算在核技术和提高患者生存率以及最大化医疗资源利用率方面都至关重要。而常用的物理剂量估算方法主要有电子顺磁共振波谱、热释光、光释光、现场模拟和蒙特卡罗模拟(Monte Carlo 模拟, MC 模拟)。电子顺磁共振波谱技术是通过检测射线在不同物质内产生的自由基来估算受照剂量; 热释光和(或)光

释光则是通过对样品进行热处理和(或)特定光照使材料发出荧光, 发射出的荧光强度与受照剂量成正比, 进而估算剂量; MC 模拟算法是一种比较快速、理想且对计算机硬件要求较少的方法^[1], 其能够摆脱像电子顺磁共振波谱、热释光个人剂量计和生物剂量对实验设备以及人员高要求的束缚, 同时 MC 模拟方法还具有逼真模拟真实物理过程的特点, 可成为解决实验物理中实际问题的有效工具。

1 MC 模拟方法及采用的模型

MC 模拟方法又称为随机抽样方法或统计实

验方法。MC模拟以概率论为基础,通过求解若干个具体观察值的算术平方根来估算所求问题的概率。MC模拟离不开行代码,现在广泛应用于核工程与放射医学领域的程序有FLUKA泛应用于核工程与放射医学领域的程序有FLUKA^[2]、MCNP^[3]、EGSnrc^[4]、PENELOPE^[5]和GEANT4^[6]。每种程序都有不同的设计理念和独特之处:FLUKA程序不是一个工具包,它可以在很宽的能量范围内无缝模拟各种粒子类型和重离子;MCNP程序在中子运输和统计分析方面特别精细;EGSnrc程序和PENELOPE程序仅模拟光子、电子和正电子;GEANT4程序是一个基于当代面向对象软件设计的工具包。MC模拟过程的示意图见图1,其中,介质可以通过人体参考模型形成MC代码,完成对人的模拟导入与构建。在估算过程中,人体模型的构建对估算结果的准确性至关重要,所选模型不同,估算结果有相当大的差异。例如:FLUKA程序估算用时8.43 h,EGS5程序估算用时1.30 h,时间相差约8倍。

人体参考模型根据其所用建模技术的不同可分为3类:几何模型、程式化数学模型(medical internal radiation dose committee, MIRD)、体素模型(voxel model, VM)和面源模型。MRID主要由

球面、圆柱面、椭圆和圆锥体等二次曲面描述构建组织或器官的外观。MIRD虽然模拟了人体器官结构,但是因许多解剖学细节无法用数学公式表达而影响模型的真实性和准确性,从而影响了估算剂量的准确性。随着计算机技术的发展,VM代替了定义简单的数学模型,VM采用交互分割工具,从CT或MRI图像中分割出人体组织和器官。虽然VM真实地建立了人体解剖信息,但是其是个体化的模型,无法调整器官大小和身体结构来模拟其他体貌特征和运动姿势的人,因此研究者使用边界表达,通过非均匀有理基准样条和多边形表达技术把所建立的模型变为标准模型,或是真实场景下的工人、患者,从而完成剂量估算^[7]。

2 MC模拟在核事故中的应用

电离辐射事故后,剂量估算能为医学营救提供治疗依据,从而为受照者提供更准确的医疗救助。李东明等^[8]使用我国人体模型,通过MCNP对秦山三期全身计数器的探测器肺部测量效率进行模拟,并与FastScan2250的标定模型对比得出结论,在模拟时由于参数不同会有所差别,因此在使用中要根据不同参数进行修正。丁艳秋等^[9]利用Geant4模拟外照射并与热释光个人剂量计对比仿真人体心

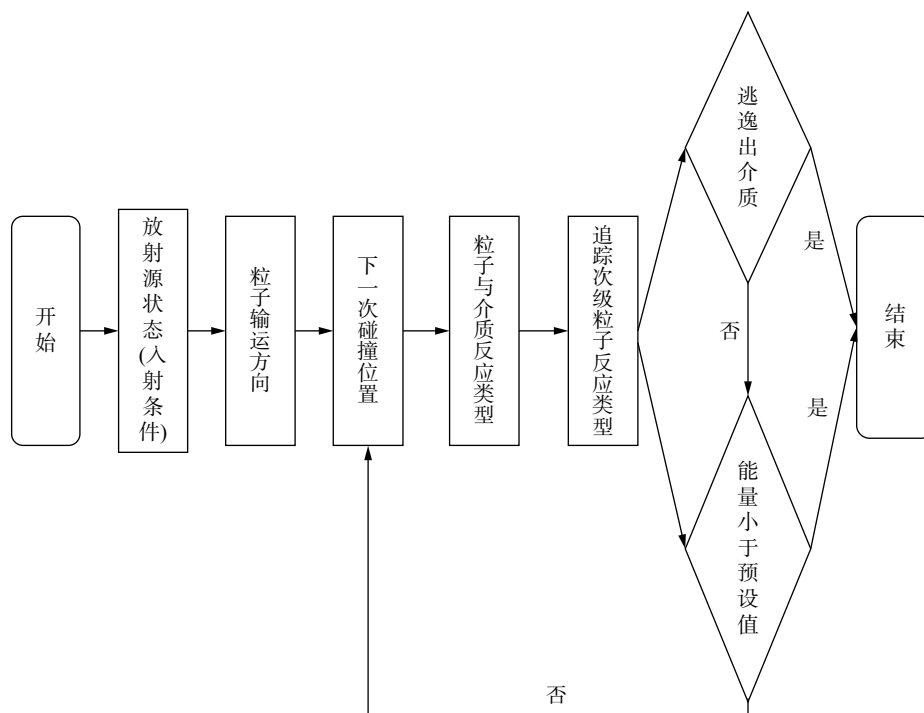


图1 蒙特卡罗模拟过程示意图

Fig. 1 Monte Carlo simulation process diagram

脏、肾脏和肝脏等重要器官,结果显示,正面照射与背面照射会有所偏差。

以上所用的方法是人体 MIRD,这种方法虽然模拟了人体器官结构,但是数学公式并不能完全模拟解剖学细节,从而影响其准确率,VM很好地弥补了这个缺陷。Lu 等^[10]运用基于 Geant4 的 THUDose 模拟了南京“5.7”¹⁹²Ir 源放射事故,建立了像素模型 CNMA 模型(根据中国虚拟人彩色切片照片数据建立)进行模拟估算,结果显示,平均全身剂量与使用生物剂量学获得的结果相当(双着丝粒+着丝粒环在 95%CI 估计的剂量为 1.51 Gy,MC 估算人站立时的剂量为 1.89 Gy),睾丸的吸收剂量与患者的临床症状一致(站立姿势时睾丸的最大吸收剂量为 10.5 Gy)。

Rensselaer Radiation Measurement & Dosimetry Group 已经利用可变性的边界表达建立了 4 维模型模拟人体呼吸与心跳,而动态 3 维模型已经慢慢地成为趋势,同时能在 VR 平台观看到动态模型结合 MC 模拟,可以更好地模拟并进行剂量估算。https://www.rpi.edu/dept/radsafe/public_html/project.htm#1)

3 MC 模拟及其模型在医疗中的应用

3.1 用于影像诊断的剂量估算

随着医学诊断的普及应用,X 射线诊断、介入放射学、核医学和放射肿瘤学等放射诊疗技术已成为现代医学不可或缺的重要手段,同时也显著增加了公众因健康体检和疾病诊治需要而接受各类医疗照射^[11]的机会。因此,在发展放射诊疗技术为公众健康查体与疾病诊治的同时,估算出其所受辐射剂量对于加强医疗照射的防护起到重要作用,这样才能尽可能降低射线诱发癌症等随机性效应的发生概率。虽然可以用非电离辐射的超声检查,但是对于是否存在肺栓塞的胸部 CT 和阑尾炎的腹腔镜来说,都会比其他检查方法更有优势^[12]。并且与正常分裂及不能分裂的生物体相比,处于高度分裂增殖期的生物体有较高的放射敏感性,胎儿及婴儿正是处于高度分裂期的生物体,具有较高的辐射敏感性,所以儿童体模的构建尤为重要。王栋等^[13]基于 1 岁儿童物理模型(Model-704D)的 CT 图像和中国成年男性参考人体模型(CRAM),建立了 1 岁儿童 VM,填补了中国 1 岁儿童体模的空白。潘羽

晞等^[14]基于王栋等^[13]报道的 1 岁儿童模型,利用 MCNP 估算了 X-CT 检查所受的辐射剂量,并比较了单向扫描与螺旋扫描所致 36 个组织或器官受照剂量的差异,结果显示,两种扫描方式的器官剂量估算结果偏差在 5% 以内,同时使用热释光个人剂量计在儿童物理模型 Model-704D 进行相同测量,其模拟值与测量值之间的相对偏差在 25% 以内。

研究结果^[15]表明,孕妇产前暴露于电离辐射可能会导致胎儿先天畸形、精神发育迟滞和继发性癌症。因此保护孕妇及其胎儿免受辐射诱发的风险具有重要意义。孕妇的第一个程式化模型由 Stabin 等^[16]研发,之后由 Chen^[17]在此基础上修改,但是其解剖学特征并不准确。Xu 等^[18]将胎儿模型内部大脑和骨骼解剖结构进行完善, Motavalli 等^[19]研发出高质量的多边形网格模型,为今后的孕妇检测和孕妇剂量估算打下了基础。

3.2 提高放射治疗剂量估算的速度

MC 模拟不仅在核事故估算和医学检测估算中起到重要的作用,同时也凭借其准确性在放射治疗计划中发挥重要的作用,被称为剂量计算中的“金标准”^[20]。普通的基于 CPU 的 MC 模拟一般需要大约 6 h 的计算时间^[21],耗时长限制了 MC 模拟在临床中的应用。解决这个问题可以从软件与硬件两个方面着手,从软件着手主要是简化物理过程进行 MC 加速,如 MCDOS^[22]、DPM^[23]等。

张斌全等^[24]利用 MCNP 栅元建立 VM,在软件优化上解决了这一问题。通过对比栅元 VM 与栅格 VM 中输运 1 MeV 的光子所用的时间,得出结果,在相同肺部能量沉积的情况下,使用栅元 VM 比栅格 VM 节省了 13% 的时间,粒子在栅元中输运速度比栅格快 32%。杨耕等^[25]在 DOSXYZnrc 的基础上,用 C++ 实现了调用多线程并行的 MC 模拟调强放射治疗的程序—PDMC,并与仿真模体对比了准确性和运行效率,结果显示,偏差值小于 1% 以内,满足调强放射治疗的要求,且时间在 0.74 h 之内(6 核 CPU 的平台比单核的效率提高了 10.5 倍)。

除了在软件上优化时间之外,利用图像处理器等硬件也可以提升其性能并缩短时间。Frezza 等^[26]运用 GPU 图形处理器,(具体硬件是 NVIDIA TeslaTM C2050),在非均匀介质中求解玻尔兹曼中子输运方程,结果表明,MC 中子辐射传输的加

速因子大于 30。对于体现平行的非结构化网格体模的任务,可以容易地获得大于 45 的加速。Jia 等^[27]在 DPM 的基础上利用 GPU 图形处理器开发了 MC 模拟的剂量计算包 gDPM 的几代版本,其中 2.0 版本可以实现 69.1~87.2 倍的加速,标准差小于 1%。

3.3 其他方面的应用

近年来,MC 模拟已经不仅仅局限在对人的全身进行模拟,而是向着人体的重要器官发起挑战,这样就避免了由全身剂量去推算局部或是重要器官的剂量。朱红玉等^[28]利用 MCNP 对中国成年男性眼睛进行精细建模,并找出中国人与西方人晶状体剂量不同的原因,因此,中国人的人体模型对于估算中国人的受照剂量有相当重要的作用。在建立模型时,研究者大多关注比较大的组织和器官,往往忽略了淋巴结。ICRP103 号报告^[29]将淋巴结作为辐射敏感器官,因此在建立模型时应考虑淋巴结。Lee 等^[30]在建立混合体模时自动分割出 16 个部位的淋巴结,但是此模型仅适用于高加索人。刘欢等^[31]在 CRAM 中利用 MATLAB 实现了对人体 17 个部位的淋巴结的分割,并用 MCNP 计算放射性核素¹³¹I 在淋巴结分布时,人体组织或器官的 S 因子。除这些对敏感组织与器官的模拟外,研究已经深入到分子甚至更小的水平。目前的研究结果显示,辐射诱发的细胞凋亡、变异等,主要原因是细胞核中 DNA 的损伤。相应的成熟的模拟宏观尺度下的 MC 物理模型已经不再适用于微观,就要用到纳剂量的 MC,目前国际上有 10 余种此类模型。姜晨星等^[32]建立了比 DNA 体模型更加精细的 DNA 几何模型,并且开发了一套纳剂量的 MC 程序 NASIC,用于光子致 DNA 损伤来计算产额。未来的研究工作可以放在 DNA 修复上,进而可以利用 MC 模拟染色体畸变,从而进行剂量估算。

4 MC 模拟在环境评价中的应用

2011 年福岛第一核电站事故导致日本大片地区沉积了大量放射性核素。为了能让居民返回家中,需要对其室内外的环境进行剂量估算。Furuta 和 Takahashi^[33]、Takuya 等^[34]使用 MC 模拟光子传输计算室内放射性核素剂量率的分布,再通过木屋衰减系数评估沉积在室外地面上的放射性核素。Hirouchi 等^[35]使用 EGS5 程序的剂量率计算检查各

种污染表面对室内剂量率的影响,也较了室内与室外剂量率的差异。

5 总结与展望

MC 模拟是目前所用几种估算方法中相对简单的方法,只要知道放射源的类型、人员与放射源的距离等因素就可在计算机上进行模拟,但是模拟的精度来源于其对事故现场的还原程度,即模拟中参考人模型是否与事故中的人员相吻合,其模型经历了由数学模型、VM 和 BREP 模型的发展过程,但是其模拟人始终处于静态,这样给估算结果带来了误差。未来的研究工作应该放在动态模型的建立和事故现场的高度还原方面。

MC 模拟方法在各个领域的应用已经相当广泛,但是随之而来的问题也急需解决。随着对人体模型建立得越来越精细、越来越个体化,相应的数据存储已经成为问题,有时模拟一个模型需要占用很大的内存,一个程序运行结束需要很长时间,这时云平台的建立突破了传统单机统计能力限制,提供了很好的解决办法。亚马逊网络提供了两个服务主要模块:弹性计算云和简单存储服务。弹性计算云提供给用户可选大小的虚拟机,来提供数据分析服务;简单存储服务可以完成数据存储服务。将 MC 模拟方法与亚马逊网络结合,后者为前者提供了灵活的计算能力和高效大规模的数据处理平台^[36],随着 MC 模拟中人体参考模型从静态到动态的发展,云计算与 MC 模拟的结合是必然的趋势。

此外由中国科学院最新研发的模拟软件系统 SuperMC (super multi-functional calculation program for nuclear design and safety evaluation),已经在日本京都正式向全球公开发布。中子输运设计与安全评价软件系统 SuperMC 是 FDS 凤麟核能团队研发的一款具有完全自主知识产权的通用、智能、精准的核设计与安全评价软件^[37]。其主要致力于以中子及相关辐射输运计算为核心的自主研发,支持包含核素燃耗、辐射源项、剂量、生物危害、材料活化与嬗变等的全过程中子学计算,支持热工水力学、结构力学、化学和生物学等多物理耦合计算。SuperMC 的几何与物理建模为物理计算提供基于 CAD 或已有 MC 程序计算模型的建模功能,并能与现有 MC 软件 (MCNP、FLUKA、GEANT4) 进行交互,在未来的剂量估算中也会起到相当大的作用。

当然在 MC 模拟的应用上还有许多方面有待提高: 中国的参考模型数量相对比较少, 如孕妇模型; 模型相对来说都是静止模型, 在检测与放射治疗时也会因为呼吸对剂量造成影响; 对于核事故来说, 模型没有做出动作, 研究表明, 坐姿与站姿所受剂量也有差异; 同时对于核事故场所未高度还原, 射线在场所中所产生的次级粒子未进行估算, 从而造成误差。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 阎长鑫负责方法的建立、综述的撰写; 刘玉连、焦玲、张文艺负责综述的审阅及修改。

参 考 文 献

- [1] 张良安, 王丹, 徐志勇, 等. 放射外照射事故剂量重建中的蒙特卡罗模拟方法[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2004, 24(6): 565-568. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2004.06.031.
- Zhang LA, Wang D, Xu ZY, et al. Dose reconstruction in external irradiation accident using Monte Carlo simulating method[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2004, 24(6): 565-568. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2004.06.031.
- [2] Battistoni G, Bauer J, Boehlen TT, et al. The FLUKA code: an accurate simulation tool for particle therapy[J/OL]. *Front oncol*, 2016, 6: 116[2019-06-02]. <http://www.frontiersin.org/oncology>. DOI: 10.3389/fonc.2016.00116.
- [3] Goorley T, James M, Booth T, et al. Features of MCNP6[J]. *Ann Nucl Energy*, 2016, 87(2): 772-783. DOI: 10.1051/snamc/201406011.
- [4] Kawrakow I. Accurate condensed history Monte Carlo simulation of electron transport. I. EGSnrc, the new EGS4 version[J]. *Med Phys*, 2000, 27(3): 485-498. DOI: 10.1118/1.598917.
- [5] Sempau J, Fernández-Varea JM, Acosta E, et al. Experimental benchmarks of the Monte Carlo code PENELOPE[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 2003, 207(2): 107-123. DOI: 10.1016/S0168-583X(03)00453-1.
- [6] Guatelli S, Cutajar D, Oborn B, et al. Introduction to the geant4 simulation toolkit[J/OL]. *AIP Conf Proc*, 2011, 1345(1): 303-322[2019-06-02]. <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.3576174>. DOI: 10.1063/1.3576174.
- [7] Na YH, Zhang B, Zhang J, et al. Deformable adult human phantoms for radiation protection dosimetry: anthropometric data representing size distributions of adult worker populations and software algorithms[J]. *Phys Med Biol*, 2010, 55(13): 3789-3811. DOI: 10.1088/0031-9155/55/13/015.
- [8] 李东明, 贾书海, 李厚文. 基于 MCNP 使用中国人体模型对全身计数器的效率模拟研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2013, 33(12): 1502-1506. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.12.017.
- Li DM, Jia SH, Li HW. A study of chinese adult counting efficiency calibration factors for a whole body counter by MCNP[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2013, 33(12): 1502-1506. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2013.12.017.
- [9] 丁艳秋, 李明生, 刘运宏, 等. 应用仿真人模型估算辐照场所受照人员物理剂量的方法研究[J]. *中国医学装备*, 2015, 12(2): 8-10. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2015.02.003.
- Ding YQ, Li MS, Liu YH, et al. The research on dose estimation of irradiated persons in radiation source accident by anthropomorphic phantom[J]. *China Med Equip*, 2015, 12(2): 8-10. DOI: 10.3969/J.ISSN.1672-8270.2015.02.003.
- [10] Lu W, Wu Z, Qiu R, et al. Physical dosimetric reconstruction of a radiological accident at Nanjing (China) for clinical treatment using thudose[J]. *Health Phys*, 2017, 113(5): 327-334. DOI: 10.1097/HP.0000000000000711.
- [11] 郑钧正, 李君利. 关注现代医学物理进展, 加强医用辐射防护[J]. *辐射防护*, 2008, 28(6): 377-384. DOI: CNKI:SUN:FSFH.O.2008-06-005.
- Zheng JZ, Li JL. Reinforcing the protection against ionizing radiation in medical uses through following the progress in modern medical physics[J]. *Radiat Prot*, 2008, 28(6): 377-384. DOI: CNKI:SUN:FSFH.O.2008-06-005.
- [12] Goldberg-Stein S, Liu B, Hahn PF, et al. Body CT during pregnancy: utilization trends, examination indications, and fetal radiation doses[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2011, 196(1): 146-151. DOI: 10.2214/AJR.10.4271.
- [13] 王栋, 邱睿, 潘羽晞, 等. 基于物理体模 CT 图像的 1 岁儿童体素体模构建[J]. *原子能科学技术*, 2016, 50(4): 757-762. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.04.0757.
- Wang D, Qiu R, Pan YX, et al. Construction of 1-year-old child voxel phantom based on CT image of physical phantom[J]. *Atomic Energy Sci Technol*, 2016, 50(4): 757-762. DOI: 10.7538/yzk.2016.50.04.0757.
- [14] 潘羽晞, 邱睿, 郑钧正, 等. 利用蒙特卡罗建模及估算儿童 X-CT 检查受照剂量[J]. *辐射防护*, 2016, 36(3): 129-134. DOI: CNKI:SUN:FSFH.O.2008-03-001.
- Pan YX, Qiu R, Zheng JZ, et al. Modeling and dose estimation of pediatric X-CT examination using Monte Carlo technique[J]. *Radiat Prot*, 2016, 36(3): 129-134. DOI: CNKI:SUN:FSFH.O.2008-03-001.
- [15] Hoseinian-Azghadi E, Rafat-Motavalli L, Miri-Hakimabad H. Development of a 9-months pregnant hybrid phantom and its internal dosimetry for thyroid agents[J]. *J Radiat Res*, 2014, 55(4): 730-747. DOI: 10.1093/jrr/rrt223
- [16] Stabin MG, Watson EE, Cristy M, et al. Mathematical models and specific absorbed fractions of photon energy in the nonpregnant adult female and at the end of each trimester of pregnancy[R/OL]. Tennessee: Oak Ridge National Lab., TN (United States), 1995: 1-140[2019-06-02]. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc791641/>. DOI: 10.2172/91944.

- [17] Chen J. Mathematical models of the embryo and fetus for use in radiological protection[J]. *Health Phys*, 2004, 86(3): 285–295. DOI: [10.1097/00004032-200403000-00005](https://doi.org/10.1097/00004032-200403000-00005).
- [18] Xu XG, Tararenko V, Zhang J, et al. A boundary-representation method for designing whole-body radiation dosimetry models: pregnant females at the ends of three gestational periods—RPI-P3, -P6 and -P9[J]. *Phys Med Biol*, 2007, 52(23): 7023–7044. DOI: [10.1088/0031-9155/52/23/017](https://doi.org/10.1088/0031-9155/52/23/017).
- [19] Motavalli LR, Hakimabad HM, Azghadi EH. Fetal and maternal dose assessment for diagnostic scans during pregnancy[J]. *Phys Med Biol*, 2016, 61(9): 3596–3608. DOI: [10.1088/0031-9155/61/9/3596](https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/9/3596).
- [20] Rogers DWO. Fifty years of Monte Carlo simulations for medical physics[J]. *Phys Med Biol*, 2006, 51(13): R287–R301. DOI: [10.1088/0031-9155/51/13/R17](https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R17).
- [21] Paganetti H, Jiang H, Parodi K, et al. Clinical implementation of full Monte Carlo dose calculation in proton beam therapy[J]. *Phys Med Biol*, 2008, 53(17): 4825–4853. DOI: [10.1088/0031-9155/53/17/023](https://doi.org/10.1088/0031-9155/53/17/023).
- [22] Ma CM, Li JS, Pawlicki T, et al. A Monte Carlo dose calculation tool for radiotherapy treatment planning[J]. *Phys Med Biol*, 2002, 47(10): 1671–1689. DOI: [10.1088/0031-9155/47/10/305](https://doi.org/10.1088/0031-9155/47/10/305).
- [23] Sempau J, Wilderman SJ, Bielajew AF. DPM, a fast, accurate Monte Carlo code optimized for photon and electron radiotherapy treatment planning dose calculations[J]. *Phys Med Biol*, 2000, 45(8): 2263–2291. DOI: [10.1088/0031-9155/45/8/315](https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/8/315).
- [24] 张斌全, 马吉增, 程建平, 等. 体素模型在 Monte Carlo 模拟计算中的描述[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(z1): 1085–1088. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0054.2007.z1.045](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0054.2007.z1.045).
Zhang BQ, Ma JZ, Cheng JP, et al. Modeling of voxel phantoms for Monte Carlo simulations[J]. *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2007, 47(z1): 1085–1088. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0054.2007.z1.045](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0054.2007.z1.045).
- [25] 杨耕, 戴振晖, 蔡春雅, 等. 快速蒙特卡洛模拟调强放疗剂量计算的研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2018, 35(4): 384–388. DOI: [10.3969/j.issn.1005-202X.2018.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-202X.2018.04.003).
Yang G, Dai ZH, Cai CY, et al. Fast Monte Carlo simulation for dose calculation in intensity-modulated radiotherapy[J]. *Chin J Med Phys*, 2018, 35(4): 384–388. DOI: [10.3969/j.issn.1005-202X.2018.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-202X.2018.04.003).
- [26] Frezza A, Joachim-Paquet C, Chauvin M, et al. Validation of irtGPUMCD, a GPU-based Monte Carlo internal dosimetry framework for radionuclide therapy[J]. *Phys Med*, 2020, 73: 95–104. DOI: [10.1016/j.ejmp.2020.04.010](https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.04.010).
- [27] Jia X, Schuemann J, Paganetti H, et al. WE-F-105-03: Development of GPMC V2.0, a GPU-Based Monte Carlo dose calculation package for proton radiotherapy[J]. *Med Phys*, 2013, 40(6): 498. DOI: [10.1118/1.4815619](https://doi.org/10.1118/1.4815619).
- [28] 朱红玉, 邱睿, 李君利, 等. 中国成年男性精细眼模型[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(6): 614–619. DOI: [CNKI:SUN:QHXB.O.2017-06-010](https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/6/614).
Zhu HY, Qiu R, Li JL, et al. Modeling and dose estimation of pediatric X-CT examination using Monte Carlo technique[J]. *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2017, 57(6): 614–619. DOI: [CNKI:SUN:QHXB.O.2017-06-010](https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/6/614).
- [29] International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103[J]. *Ann ICRP*, 2007, 37(2-4): 1–332. DOI: [10.1016/j.icrp.2007.10.003](https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003).
- [30] Lee C, Bolch W. MO-F-110-09: Development of computational lymph node models for pediatric hybrid phantoms for nuclear medicine dosimetry[J]. *Med Phys*, 2011, 38(6 Part 27): 3729–3729. DOI: [10.1118/1.3613031](https://doi.org/10.1118/1.3613031).
- [31] 刘欢, 邱睿, 潘羽晞, 等. 中国成年男性参考人体素模型 CRAM 淋巴结的建立及其在放射性核素治疗中的应用[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2016, 56(12): 1290–1296. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2016.25.039](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2016.25.039).
Liu H, Qiu R, Pan YX, et al. Development of lymphatic nodes in the Chinese reference adult male voxel model (CRAM) with applications to radionuclide therapy[J]. *J Tsinghua Univ (Sci Technol)*, 2016, 56(12): 1290–1296. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2016.25.039](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2016.25.039).
- [32] 姜晨星, 李春艳, 邱睿, 等. 低能光子致 DNA 链断裂的蒙特卡罗模拟研究[J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(5): 916–921. DOI: [10.7538/yzk.2017.51.05.0916](https://doi.org/10.7538/yzk.2017.51.05.0916).
Jiang CX, Li CY, Qiu R, et al. Research on Monte Carlo simulation of DNA strand break induced by low energy photon[J]. *Atomic Energy Sci Technol*, 2017, 51(5): 916–921. DOI: [10.7538/yzk.2017.51.05.0916](https://doi.org/10.7538/yzk.2017.51.05.0916).
- [33] Furuta T, Takahashi F. Analyses of radiation shielding and dose reduction in buildings for gamma-rays emitted from radioactive cesium in environment discharged by a nuclear accident[R/OL]. Japanese: Japan Atomic Energy Agency, 2014: 1–100[2019-06-02]. <https://doi.org/10.11484/jaea-research-2014-003>. DOI: [10.11484/JAEA-RESEARCH-2014-003](https://doi.org/10.11484/JAEA-RESEARCH-2014-003).
- [34] Takuya F, Fumiaki T. Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials[J]. *J Nucl Sci Technol*, 2015, 52(6): 897–904. DOI: [10.1080/00223131.2014.990939](https://doi.org/10.1080/00223131.2014.990939).
- [35] Hirouchi J, Takahara S, Iijima M, et al. Identification of penetration path and deposition distribution of radionuclides in houses by experiments and numerical model[J]. *Radiat Phys Chem*, 2017, 140: 127–131. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2017.02.005](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.02.005).
- [36] 伍兴国. 基于 AWS 云平台的蒙特卡洛模拟[J]. *现代信息技术*, 2018, 2(12): 75–78. DOI: [10.3969/j.issn.2096-4706.2018.12.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-4706.2018.12.026).
Wu XG. Monte Carlo simulation based on AWS cloud platform[J]. *Mod Inform Technol*, 2018, 2(12): 75–78. DOI: [10.3969/j.issn.2096-4706.2018.12.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-4706.2018.12.026).
- [37] Wu Y. Multifunctional neutronics calculation methodology and program for nuclear design and radiation safety evaluation[J]. *Fusion Sci Technol*, 2018, 74(4): 321–329. DOI: [10.1080/15361055.2018.1475162](https://doi.org/10.1080/15361055.2018.1475162).