

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.04.001

· 论 著 ·

基于蒙特卡罗模拟的探伤误照器官剂量计算

张震¹, 武祯², 梁婧¹

1. 国家卫生健康委职业安全卫生研究中心, 国家卫生健康委粉尘危害工程防护重点实验室, 北京 102308;

2. 清华大学工程物理系, 北京 100084

摘要: **目的** 计算人员受 3 种 X 射线机和 2 种 γ 放射源误照射情况下的器官剂量及其剂量转换系数, 为事故剂量快速估算提供简便方法。 **方法** 在 FLUKA 模拟软件中构建 X 射线机和 2 种 γ 放射源的辐射源模型并导入中国参考人体素模型, 模拟计算人员在距源项 1 m 处受由前向后照射时的器官吸收剂量、器官吸收剂量与空气比释动能的剂量转换系数和器官吸收剂量与辐射源的转换系数。 **结果** 对肺、心脏、肌肉和软组织、肝脏、皮肤和大脑的吸收剂量与空气比释动能的转换系数范围为 0.30~1.19(Gy/Gy); 对 X 射线机, 这 6 个器官的吸收剂量与输出量的转换系数范围为 $6.12 \times 10^{-3} \sim 2.90 \times 10^{-2} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{min})$; 对 γ 放射源, 6 个器官吸收剂量与活度的转换系数范围为 $1.12 \times 10^{-8} \sim 7.01 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2/(\text{GBq} \cdot \text{s})$ 。 **结论** 器官吸收剂量与空气比释动能的转换系数和器官吸收剂量与探伤机输出量或活度的转换系数可为快速评估类似辐射事故提供重要的剂量学参数。

关键词: X 射线机; γ 放射源; 体素模型; 吸收剂量

中图分类号: R144.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)04-0365-07

Monte Carlo simulation-based dose calculation for organs under accidental radiation exposure in flaw detection

ZHANG Zhen¹, WU Zhen², LIANG Jing¹

1. National Center for Occupational Safety and Health, NHC, NHC Key Laboratory for Engineering Control of Dust Hazard, Beijing 102308 China; 2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084 China

Abstract: **Objective** To calculate the doses and their dose conversion coefficients for the personnel whose organs were under accidental exposure to three types of X-ray machines and two γ radiation sources, and to provide a simple method for rapid estimation of accidental doses. **Methods** The radiation source models of X-ray machines and two γ sources were established with the FLUKA simulation software and a Chinese reference voxel phantom was imported. The organ absorbed dose, dose conversion coefficient between organ absorbed dose and air Kerma, and conversion coefficient between organ absorbed dose and radiation source were calculated for a simulated scenario where the personnel were under antero-posterior exposure to radiation sources 1 meter away. **Results** For the lungs, heart, muscles, soft tissue, liver, skin, and brain, the conversion coefficient between organ absorbed dose and air Kerma was 0.30-1.19 (Gy/Gy). For X-ray machines, the conversion coefficient between organ absorbed dose and output for the six organs ranged from 6.12×10^{-3} to $2.90 \times 10^{-2} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{min})$. For γ radiation sources, the conversion coefficient between organ absorbed dose and activity for the six organs ranged from 1.12×10^{-8} to $7.01 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2/(\text{GBq} \cdot \text{s})$. **Conclusion** The conversion coefficient between organ absorbed dose and air Kerma and the conversion coefficient between organ absorbed dose and output or activity of a flaw detector can provide important dosimetric parameters for rapid assessment of similar radiation accidents.

Keywords: X-ray machine; γ Radiation source; Voxel phantom; Absorbed dose

Corresponding author: LIANG Jing, E-mail: liangbrook@163.com

X、 γ 射线探伤机在工业领域已得到广泛应用^[1-2], 但辐射是一把双刃剑, X、 γ 射线工业探伤导致人员误照射的事故也时有发生^[3-6]。一旦发生辐射事

故, 人体各器官和全身的受照剂量快速估算是人员救治首先要面临的难题, 为解决这一技术难题, 本文基于 FLUKA 模拟软件和中国参考人体素模型, 对 3 种

作者简介: 张震 (1981—), 男, 山东曲阜人, 理学博士, 研究员, 主要从事放射卫生研究工作。E-mail: zhangzhen04@126.com
通信作者: 梁婧, E-mail: liangbrook@163.com

X 射线探伤机和 2 种 γ 放射源产生的射线照射(由前向后照射)人体时器官的能量沉积、吸收剂量,以及器官吸收剂量与 X/ γ 射线入射人体前空气比释动能的转换系数、器官吸收剂量与辐射源的转换系数进行了初步研究,以期在事故情况下受照人员器官吸收剂量快速估算提供重要的剂量学参数。

1 材料与方法

1.1 研究对象 利用中国男性参考人体素模型(CRAM)^[7-8],研究 200~400 kV X 射线机和 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 放射源在距离人体 1 m 处照射时,人体各组织与器官的能量沉积、吸收剂量及其转换系数。CRAM 体模已经在辐射防护领域得到应用^[5,7-10],该体模高度为 1.70 m,重量为 60 kg,体模内有 103 个组织/器官。

1.2 计算方法 利用开源的 FLUKA 软件构建辐射源模型和照射事故模型^[11]。参考典型 X 射线机的结构及相关参数构建简化的 X 射线机模型^[12],靶材料设为钨,焦点大小为 2 mm × 3 mm,电子打靶时能量分别设置为 200、300 和 400 keV, X 射线机内部设为真空,过滤材料设为 3 mm 铝或 3 mm 铜,在 X 射线机出束口设 3 mm 有机玻璃作为 X 射线管的管壁,准直器设为圆锥台体,内径 0.6 cm,外径为 4.6 cm,高度 4 cm,出束张角设为常见的 45°, X 射线机自身屏蔽材料保守设为 4 cmPb, X 射线机简化模型示意图见图 1;对 ^{137}Cs 放射源, γ 射线能量设为 661.7 keV,对

^{60}Co 放射源,其 2 种 γ 射线能量取平均值 1.25 MeV,均为各向同性照射。人体模型构建主要是将 CRAM 体模转化为 FLUKA 可以识别的空间体素结构文件^[7-8,11],即把 CRAM 体模中的每个器官各自视为一个复合型的几何区域,每个区域由描述各自器官的体素组成,并分别定义器官的元素组成和密度;周围空间设置为直径 1000 m 的空气球体。为了便于模拟数据的拓展应用,事故情形设为人体与辐射源的距离为单位距离即 1 m,辐射源的高度均设为 1.35 m,照射模式为由前向后照射(AP),事故照射模型见图 1 所示。为保证计算的统计涨落 < 10%,模拟的粒子数量均不少于 2.5×10^8 。

为了便于事故后通过测量探伤机产生的空气比释动能推导器官吸收剂量,即获得器官吸收剂量与空气比释动能的转换系数,需要将器官吸收剂量除以空气比释动能。为获得器官吸收剂量与辐射源对应的转换系数,对 X 射线机,即获得 X 射线机常见显示数值(单位时间单位电流 mA · min)对应的器官吸收剂量转换系数,需要将模拟获得归一后的器官吸收剂量结果乘以打靶的总电子数(即每分钟总电子数 $6.25 \times 10^{15} \times 60$);对放射源,为归一到单位时间单位活度(GBq · s)对应的器官吸收剂量转换系数,需要将单光子的器官吸收剂量结果乘以活度再乘以光子的总发射概率,其中对 ^{137}Cs , γ 的发射概率为 0.864;对 ^{60}Co , γ 的总发射概率取为 2。

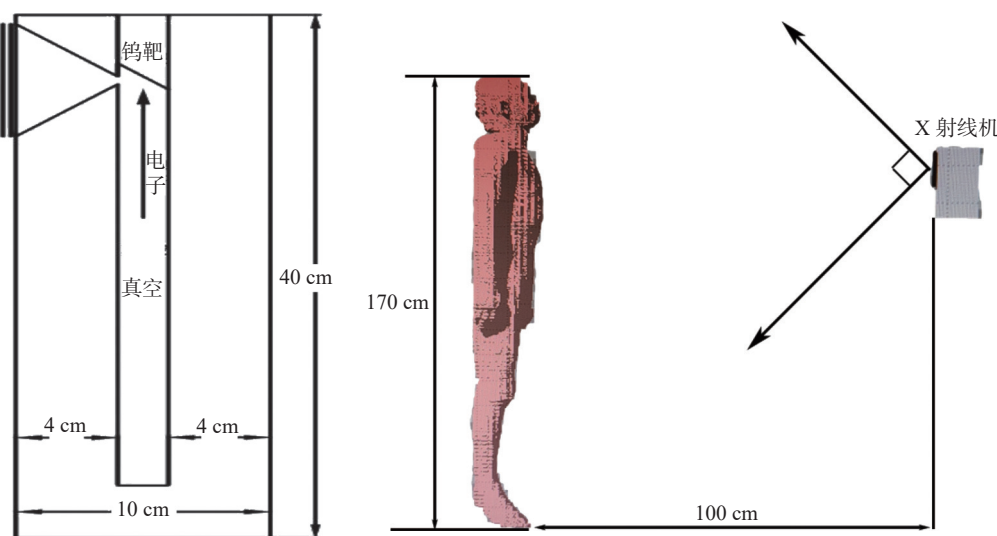


图 1 X 射线机结构示意图和事故照射模型

Figure 1 Schematic diagram of an X-ray machine and model of accidental exposure

1.3 质量控制 本文把 CRAM 体模在 FLUKA 软件中构建后,为保证模拟结果的准确性,分别对 0.03、0.04、0.05、0.06、0.08、0.10、0.15、0.20、0.30、0.40、

0.50、0.60、0.80、1.00、2.00、4.00、6.00、10.00 MeV 的 X/ γ 射线各向同性(ISO)照射人体进行了模拟,并使用文献中基于 GEANT4 的方法开展了相同的模

拟^[7-10], 结果显示单位注量的 X/γ 射线在各器官产生 脑、肺、心脏、肌肉和软组织、肝脏等部分器官的模拟
的剂量结果相差均<5%, 表 1 中列出了 2 种软件对大 结果。

表 1 FLUKA 软件和 GEANT4 软件模拟结果比较 (pGy · cm²)

Table 1 Comparison of simulation results between FLUKA and GEANT4

能量/MeV	脑		肝脏		肺		皮肤		肌肉和软组织	
	FLUKA	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA	GEANT4	FLUKA	GEANT4
0.03	0.0574	0.0591	0.07868	0.0802	0.0992	0.0988	0.4128	0.4004	0.2076	0.2039
0.04	0.1276	0.1233	0.1324	0.1335	0.1521	0.1498	0.3026	0.2933	0.2056	0.2018
0.05	0.1688	0.1694	0.1664	0.1660	0.1811	0.1829	0.2615	0.2544	0.2061	0.2033
0.06	0.2003	0.1963	0.1885	0.1855	0.2018	0.2014	0.2515	0.2496	0.2144	0.2118
0.08	0.2498	0.2469	0.2295	0.2320	0.2429	0.2403	0.2816	0.2788	0.2506	0.2492
0.10	0.3069	0.3037	0.2789	0.2752	0.2951	0.2933	0.3370	0.3356	0.3039	0.3027
0.15	0.4765	0.4740	0.4169	0.4123	0.4461	0.4444	0.5332	0.5328	0.4716	0.4703
0.20	0.6560	0.6590	0.5682	0.5596	0.6201	0.6172	0.7543	0.7469	0.6597	0.6576
0.30	1.056	1.0602	0.8984	0.9090	0.9765	0.9811	1.1869	1.1763	1.0506	1.0496
0.40	1.448	1.4395	1.2289	1.2284	1.3583	1.3378	1.6077	1.5862	1.4388	1.4467
0.50	1.840	1.8690	1.5662	1.5873	1.7039	1.7068	1.9720	1.9581	1.8233	1.8358
0.60	2.231	2.2573	1.9139	1.9014	2.0857	2.0650	2.3237	2.2865	2.2079	2.2147
0.80	2.925	2.9337	2.5163	2.5324	2.7529	2.7879	2.8470	2.8706	2.9273	2.9353
1.00	3.660	3.6337	3.1566	3.1754	3.4160	3.3862	3.2866	3.2586	3.5971	3.6097
2.00	6.519	6.6938	5.8175	5.8054	6.2292	6.2450	4.7520	4.6659	6.3631	6.3707
4.00	11.04	11.337	9.9827	9.92306	10.6499	10.6752	6.6780	6.5228	10.357	10.313
6.00	14.90	15.101	13.632	13.7429	14.5482	14.529	8.3318	8.1714	13.520	13.496
8.00	18.240	18.388	17.2805	17.3645	18.2857	17.917	9.8600	9.6983	16.249	16.247
10.00	22.094	21.767	20.4474	20.2345	21.6213	21.144	11.262	11.376	18.853	18.876

2 结 果

2.1 X 射线能谱、输出量和周围剂量当量率 为了
避免散射辐射对辐射场的影响, 在无 CRAM 体模时,
分别模拟了 200~400 kV X 射线机、⁶⁰Co 和 ¹³⁷Cs 放射
源产生的剂量分布, 图 2 给出了 200 kV X 射线机产
生的周围剂量当量分布。归一后的 200~400 kV 的
X 射线机打靶时产生的 X 射线能谱分布见图 3。从

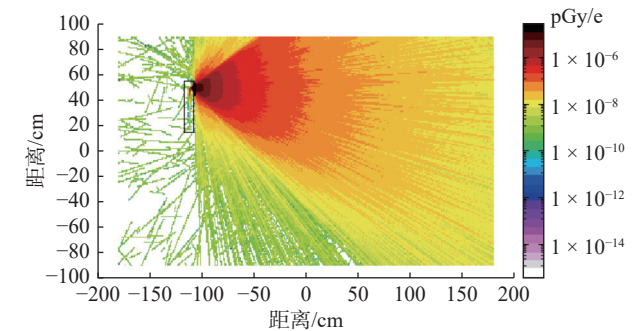


图 2 200 kV X 射线机产生的周围剂量当量分布图
Figure 2 Distribution of ambient dose equivalent of
200 kV X-ray machines

图 3 中可以看到 200 keV 电子打钨靶时在 60~80 keV
产生了明显的特征 X 射线峰, 与文献报道一致^[12]。

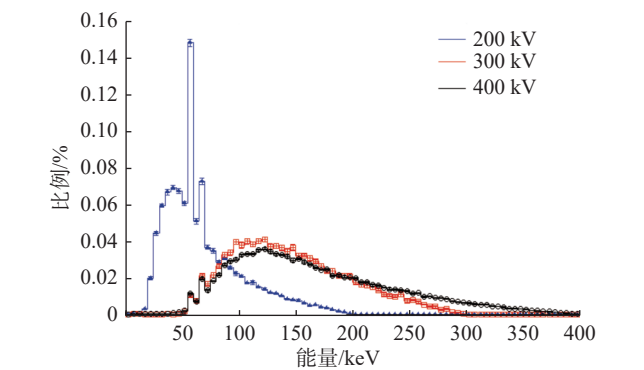


图 3 200~400 kV X 射线机产生的 X 射线能谱分布图
Figure 3 Distribution of X-ray energy spectrum generated by
200-400 kV X-ray machines

根据图 3 中的能谱分布和《用于光子外照射放射
防护的剂量转换系数》(GBZ/T 144—2002)规定的不
同能量的转换系数, 表 2 给出了 X 射线机产生的不
同能量光子所占份额百分比, 并计算出了加权后的周
围剂量当量与空气比释动能比值($H^*(10)/K_a$), 即周

围剂量当量与空气比释动能的转换系数,对 200~400 kV X 射线机, $H^*(10)/K_a$ 值的范围为 1.50~1.60。

根据模拟的周围剂量当量分布,可以推导出模拟的 X 射线机输出量和 γ 放射源 1 m 处的周围剂量当

量率,结果详见表 3,对照相关文献报道的理论结果^[12-14], γ 放射源 1 m 处的周围剂量当量率模拟结果与理论结果一致,偏差<2%;X 射线机模拟结果与文献值相比,最大偏差<15%,一致性较好。

表 2 X 射线机产生的不同能量光子所占比例和 $H^*(10)/K_a$ 值

Table 2 The proportion of photons of different energy levels generated by X-ray machines and their $H^*(10)/K_a$ values

光子能量/keV	$H^*(10)/K_a$	200 kV X射线机产生光子能量所占比例%	300 kV X射线机产生光子能量所占比例%	400 kV X射线机产生光子能量所占比例%
20	0.61	0.3	0.0	0.0
30	1.10	6.3	0.0	0.0
40	1.47	19.4	0.0	0.0
50	1.67	12.7	0.2	0.1
60	1.74	27.0	3.8	3.1
80	1.72	13.0	9.6	7.0
100	1.65	12.9	26.7	21.2
150	1.49	7.5	32.8	28.4
200	1.40	0.9	23.4	26.0
300	1.31	0.0	3.5	13.0
400	1.26	0.0	0.0	1.2
加权后 $H^*(10)/K_a$		1.60	1.54	1.50

表 3 X 射线机输出量和 γ 放射源周围剂量当量率常数模拟结果

Table 3 Simulation results of X-ray machine outputs and dose equivalent rate constants around γ radiation sources

辐射源	过滤条件	文献值 1 m 处周围剂量当量率或输出量	模拟值 1 m 处周围剂量当量率或输出量
管电压 200 kV X 射线机	3 mm 铝	20.8 mGy · m ² /(mA · min)	23.4 ± 2.0 mGy · m ² /(mA · min) ^{a)}
管电压 300 kV X 射线机	3 mm 铜	10.4 mGy · m ² /(mA · min)	11.9 ± 1.1 mGy · m ² /(mA · min) ^{a)}
管电压 400 kV X 射线机	3 mm 铜	24.7 mGy · m ² /(mA · min)	27.8 ± 2.6 mGy · m ² /(mA · min) ^{a)}
¹³⁷ Cs 放射源	/	25.6 aSv/s	25.2 ± 0.6 aSv/s
⁶⁰ Co 放射源	/	98.3 aSv/s	99.4 ± 3.0 aSv/s

注: a) 取束流方向 10 cm × 10 cm 照射野内平均值。

2.2 器官能量沉积和吸收剂量 200~400 kV X 射线机和 ¹³⁷Cs、⁶⁰Co 放射源距离人体 1 m 照射时,对模拟出的人体 103 个组织器官能量沉积结果进行分析发现,能量主要沉积在肌肉和软组织、肺、皮肤、肝脏、大脑、心脏等器官,分析原因,主要是由于在 103 个器官中这些器官的质量和体积较大。X、 γ 射线在该 6 个器官和全身的能量沉积结果见表 4,表 4 中对 X 射线机照射时的能量沉积归一到单电子,对

¹³⁷Cs、⁶⁰Co 放射源照射时能量沉积归一到单 γ 光子。

根据表 5 中各器官的质量可获得单位质量的能量沉积,再根据吸收剂量(Gy)与单位质量能量沉积(GeV/g)转换系数(1.6×10^{-7}),可获得人体全身及肺、肌肉和软组织、皮肤、肝脏、大脑、心脏的吸收剂量模拟计算结果,详见表 6。有文献报道⁶⁰Co 放射源在水模中半径 1.5 cm 照射野内的吸收剂量为 2.62~ 2.88×10^{-5} pGy^[15],与本文各器官吸收剂量具有可比性。

表 4 单光子或单电子打靶在人体全身及主要器官产生的能量沉积模拟结果 (GeV)

Table 4 Simulation results of energy deposition generated by single photon or single electron impinging on target in human body and major organs

辐射源	肌肉和软组织	肺	肝脏	皮肤	心脏	大脑	全身
200 kV X射线机	6.58×10^{-9}	3.73×10^{-10}	4.39×10^{-10}	4.45×10^{-10}	2.70×10^{-10}	1.86×10^{-10}	1.22×10^{-8}
300 kV X射线机	4.58×10^{-9}	2.58×10^{-10}	2.96×10^{-10}	2.45×10^{-10}	1.80×10^{-10}	1.98×10^{-10}	7.53×10^{-9}
400 kV X射线机	9.81×10^{-9}	5.61×10^{-10}	6.22×10^{-10}	5.61×10^{-10}	3.60×10^{-10}	4.51×10^{-10}	1.66×10^{-8}
^{137}Cs 源	3.62×10^{-6}	1.50×10^{-7}	1.75×10^{-7}	2.25×10^{-7}	9.60×10^{-8}	1.27×10^{-7}	5.55×10^{-6}
^{60}Co 源	6.58×10^{-9}	3.73×10^{-10}	4.39×10^{-10}	4.45×10^{-10}	2.70×10^{-10}	1.86×10^{-10}	9.64×10^{-6}

表 5 人体主要器官的质量

Table 5 Mass of major human organs

器官	肺	心脏	肌肉和软组织	肝脏	皮肤	大脑	全身
质量/g	1250	744	40524	1460	2401	1565	60000

表 6 单光子或单电子打靶在人体全身及主要器官的吸收剂量模拟结果 (pGy)

Table 6 Simulation results of absorbed dose of single photon or single electron impinging on target in human body and major organs

辐射源	肌肉和软组织	肺	肝脏	皮肤	心脏	大脑	全身
200 kV X射线机	2.60×10^{-8}	4.77×10^{-8}	4.81×10^{-8}	2.97×10^{-8}	5.81×10^{-8}	1.90×10^{-8}	3.25×10^{-8}
300 kV X射线机	1.81×10^{-8}	3.30×10^{-8}	3.24×10^{-8}	1.63×10^{-8}	3.87×10^{-8}	2.02×10^{-8}	2.01×10^{-8}
400 kV X射线机	3.87×10^{-8}	7.18×10^{-8}	6.82×10^{-8}	3.74×10^{-8}	7.74×10^{-8}	4.61×10^{-8}	4.43×10^{-8}
^{137}Cs 源	1.43×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.50×10^{-5}	2.06×10^{-5}	1.30×10^{-5}	1.48×10^{-5}
^{60}Co 源	2.50×10^{-5}	3.26×10^{-5}	3.17×10^{-5}	2.37×10^{-5}	3.51×10^{-5}	2.36×10^{-5}	2.57×10^{-5}

X 射线机和放射源产生的吸收剂量空间分布分别见图 4 和图 5, 从图 4 中可以看出, 200~400 kV X 射线机距离人体 1 m 时产生的 X 射线照射野基本覆盖了人体头、胸和腹部的主要器官。

2.3 器官吸收剂量的转换系数 表 7 给出了人体主要器官吸收剂量与照射野中心轴 1 m 处空气比释动能(无人散时)的转换系数, 本文定义的转换系数以 1 m 处的空气比释动能作为除数, 主要是考虑实际检测时具有代表性和可操作性。X 射线探伤机和 γ 放射源对肺、心脏、肌肉和软组织、肝脏、皮肤和大脑的吸收剂量转换系数范围为 0.30~1.19(Gy/Gy)。

表 8 给出了人体主要器官吸收剂量与工业探伤机输出量或活度的相关的转换系数, 对 X 射线探伤机, 肺、心脏、肌肉和软组织、肝脏、皮肤和大脑的吸收剂量转换系数范围为 $6.12 \times 10^{-3} \sim 2.90 \times 10^{-2} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2/(\text{mA} \cdot \text{min})$; 对 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 放射源, 肺、心脏、肌肉和软组织、肝脏、皮肤和大脑的吸收剂量转换系数范围

为 $1.12 \times 10^{-8} \sim 7.01 \times 10^{-8} \text{ Gy} \cdot \text{m}^2/(\text{GBq} \cdot \text{s})$ 。

3 讨论

本文在 FLUKA 软件中构建了 CRAM 体模和 X 射线机简化模型, 初步研究了 3 种 X 射线机和 2 种放射源在单位距离(1 m)处照射人体时, 人体各组织器官的吸收剂量与空气比释动能的转换系数、组织器官的吸收剂量与辐射源相关的转换系数, 该结果可为受照剂量快速估算提供剂量数据, 需要指出, 不同的照射距离会导致辐射场的分布不同, 计算出的转换系数也会有所不同, 当距离较远时可近似看作均匀辐射场, 而事故时可能发生近距离照射, 因此不同的照射距离还需下一步分别建模研究。对吸收剂量与工业探伤机输出量换算系数, 在实际应用中需要注意的是还需乘以实际输出量与模拟输出量比值, 另外还要考虑实际高度和距离的影响。本文研究的照射模式为由前向后照射(AP), 在后续的研究中还可继续

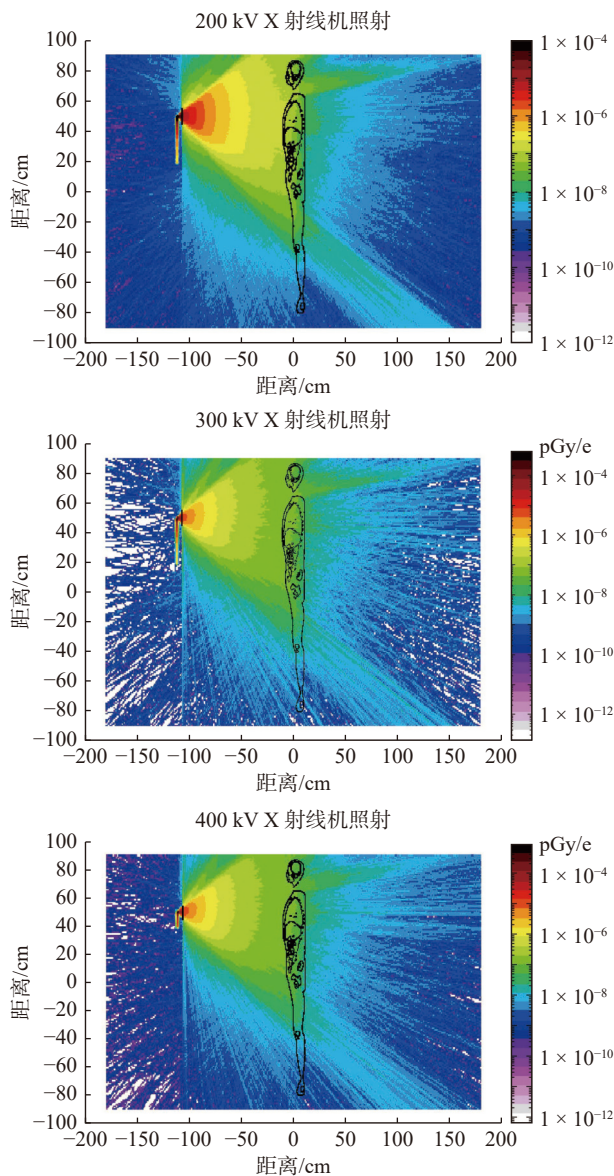


图 4 200~400 kV X 射线机照射人体时的吸收剂量分布
Figure 4 Distribution of absorbed dose in human body irradiated by 200-400 kV X-ray machines

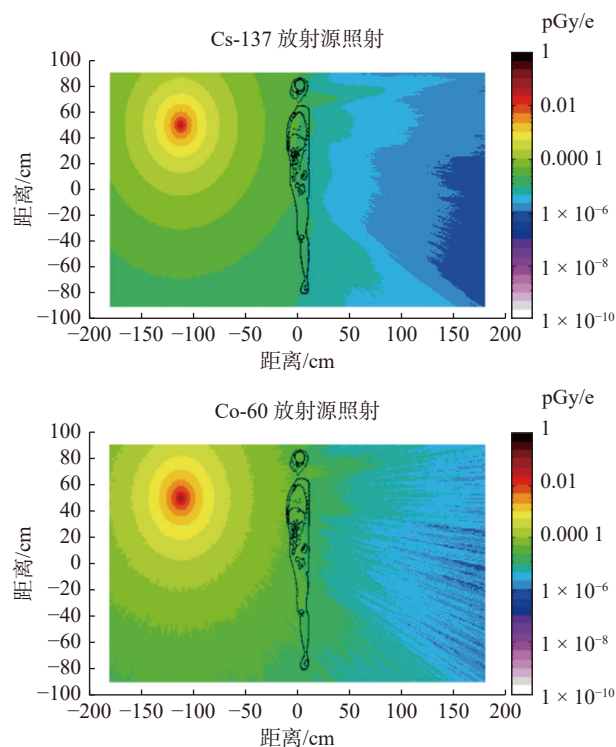


图 5 ¹³⁷Cs 和 ⁶⁰Co 放射源照射人体时的吸收剂量分布
Figure 5 Distribution of absorbed dose in human body irradiated by ¹³⁷Cs and ⁶⁰Co sources

研究由后向前照射(PA),由左侧面照射(LLAT)和由右侧面照射(RLAT)模式。

本文仅对能量沉积多的器官的剂量转换系数进行了初步研究,针对特定辐射事故,如果对具体的敏感器官(如红骨髓、睾丸、晶状体)或某个器官局部区域感兴趣,可进行有针对性的建模分析。另外,本研究中人体皮肤的吸收剂量与空气比释动能的转换系数为 0.42~0.59,而《电离辐射所致皮肤剂量估算方法》GBZ/T 244—2017 中给出的 50~600 keV X 射线

表 7 人体主要器官的吸收剂量与照射野中心轴 1 m 处空气比释动能的转换系数 (Gy/Gy)

Table 7 Conversion coefficients between major organ absorbed dose in human body and air kerma at 1 m from the central axis of the irradiation field

辐射源	肌肉和软组织	肺	肝脏	皮肤	心脏	大脑
200 kV X射线机	0.42	0.76	0.77	0.47	0.93	0.30
300 kV X射线机	0.56	1.02	1.00	0.50	1.19	0.62
400 kV X射线机	0.53	0.98	0.93	0.51	1.06	0.63
¹³⁷ Cs源	0.58	0.78	0.78	0.61	0.84	0.53
⁶⁰ Co源	0.59	0.77	0.75	0.56	0.83	0.56

表 8 人体主要器官的吸收剂量与工业探伤机输出量或活度的转换系数

Table 8 Conversion coefficients between major organ absorbed dose in human body and output or activity of industrial flaw detectors

辐射源	肌肉和软组织	肺	肝脏	皮肤	心脏	大脑
200kV X射线 ^a	9.74×10^{-3}	1.79×10^{-2}	1.80×10^{-2}	1.11×10^{-2}	2.18×10^{-2}	7.13×10^{-3}
300kV X射线 ^a	6.78×10^{-3}	1.24×10^{-2}	1.22×10^{-2}	6.12×10^{-3}	1.45×10^{-2}	7.59×10^{-3}
400kV X射线 ^a	1.45×10^{-2}	2.69×10^{-2}	2.56×10^{-2}	1.40×10^{-2}	2.90×10^{-2}	1.73×10^{-2}
¹³⁷ Cs源 ^b	1.23×10^{-8}	1.66×10^{-8}	1.66×10^{-8}	1.30×10^{-8}	1.78×10^{-8}	1.12×10^{-8}
⁶⁰ Co源 ^b	5.01×10^{-8}	6.53×10^{-8}	6.33×10^{-8}	4.73×10^{-8}	7.01×10^{-8}	4.72×10^{-8}

注:^a单位Gy·m²/(mA·min),使用时还需乘以实际输出量与模拟输出量比值;^b单位Gy·m²/(GBq·s)。

空气比释动能与男性皮肤吸收剂量的转换系数 C_{ks} 值在 1 左右, 转换系数数值不同主要是由于两个转换系数的定义不同所致。

另外, 对 X 射线机输出量的模拟和计算时需注意的影响因素有准直器及其张角(可导致 1~2 倍差别)、周围剂量当量与空气比释动能的换算系数(不考虑可导致 1.5~1.6 倍差别)和人体模型的散射辐射(可导致 1.2~1.4 倍差别)^[12], 其他影响较小的因素有焦点大小、X 射线管真空度及其体积等, 这些经验可为 X 射线探伤机的模拟研究提供参考。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展, 排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 张震负责研究方案设计、模拟软件的运行及数据分析工作; 武祯负责中国男性参考人体素模型建立工作; 梁婧负责模型构建、文章撰写和修改工作

参考文献

- [1] 周晓剑, 陈栋梁, 党磊, 等. 我国放射源安全监管信息化现状分析及建议[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2018, 38 (11): 855-858. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.11.011.
Zhou XJ, Chen DL, Dang L, et al. Analysis and suggestion about informatization of radioactive source safety oversight system in China[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2018, 38 (11): 855-858. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2018.11.011.
- [2] 解未易, 李玉祥, 朱凯, 等. 北京市宠物医院 X 射线机使用及防护情况调查[J]. *中国辐射卫生*, 2020, 29 (6): 653-656. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.06.019.
Xie WY, Li YX, Zhu K, et al. Investigation on the use and protection of X-ray machines of pet hospital in Beijing[J]. *Chin J Radiol Health*, 2020, 29 (6): 653-656. DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2020.06.019.
- [3] 李小华, 王翊年, 李俊杰, 等. 1998 年伊斯坦布尔 ^{60}Co 源辐射事故概况与分析[J]. *核安全*, 2021, 20 (2): 44-58. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2021.02.008.
Li XH, Wang YN, Li JJ, et al. Overview and analysis of the Cobalt-60 radiological accident in Istanbul in 1998[J]. *Nucl Saf*, 2021, 20 (2): 44-58. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2021.02.008.
- [4] 孙亮, 刘玉龙, 郭凯琳, 等. 南京“5.7” ^{192}Ir 源放射事故患者早期物理剂量估算[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2016, 36 (5): 340-344. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.05.006.
Sun L, Liu YL, Guo KL, et al. Physical dose estimation for the patient in early stage of “5.7” ^{192}Ir source accident in Nanjing[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2016, 36 (5): 340-344. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.05.006.
- [5] 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.
- [6] 李小华, 王翊年, 王家豪, 等. 2014 年秘鲁 ^{192}Ir 工业探伤辐射事故概况与分析[J]. *核安全*, 2020, 19 (3): 34-52. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2020.03.006.
Li XH, Wang YN, Wang JH, et al. Overview and analysis of ^{192}Ir industrial crack detection radiological accident in Peru in 2014[J]. *Nucl Saf*, 2020, 19 (3): 34-52. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2020.03.006.
- [7] 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.
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.
- [8] Chen YZ, Qiu R, Li CY, et al. Construction of Chinese adult male phantom library and its application in the virtual calibration of *in vivo* measurement[J]. *Phys Med Biol*, 2016, 61 (5): 2124-2144. DOI: 10.1088/0031-9155/61/5/2124.
- [9] 潘羽晞, 邱睿, 刘立业, 等. 辐射防护用中国参考人体素模型建立、应用及最新进展[J]. *辐射防护*, 2014, 34 (4): 199-205.
Pan YX, Qiu R, Liu LY, et al. Chinese reference human voxel phantoms for radiation protection: development, application and recent progress[J]. *Radiat Prot*, 2014, 34 (4): 199-205.
- [10] 路伟, 武祯, 邱睿, 等. 基于中国参考人体素模型环境外照射剂量转换系数的计算[J]. *计算物理*, 2016, 33 (5): 613-624. DOI: 10.19596/j.cnki.1001-246x.2016.05.014.
Lu W, Wu Z, Qiu R, et al. Dose coefficient calculation of external exposure of radionuclides based on Chinese reference voxel phantom[J]. *Chin J Comput Phys*, 2016, 33 (5): 613-624. DOI: 10.19596/j.cnki.1001-246x.2016.05.014.
- [11] Ferrari A, Sala PR, Fasso A, et al. FLUKA: a multi-particle transport code[R]. Menlo Park: SLAC National Accelerator Lab., 2005. DOI: 10.2172/877507.
- [12] 李德平, 潘自强. 辐射防护手册, 第一分册, 辐射源与屏蔽[M]. 北京: 原子能出版社, 1987.
Li DP, Pan ZQ. Radiation protection handbook, volume 1, radiation sources and shielding[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1987.
- [13] 李士骏. 发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数(续 II)[J]. *辐射防护*, 2000, 20 (4): 228-239. DOI: 10.3321/j.issn.1000-8187.2000.04.007.
Li SJ. Dosimetric constants for isotropic point source of radionuclides emitting photons[J]. *Radiat Prot*, 2000, 20 (4): 228-239. DOI: 10.3321/j.issn.1000-8187.2000.04.007.

- 体混合均匀性影响[J]. *中国辐射卫生*, 2022, 31 (2) : 172-180. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2022.02.008](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2022.02.008).
- Zheng JG, Cheng WY, Wang CX, et al. Computational fluid dynamics analysis of influence of different pipe structures on gas mixing uniformity[J]. *Chin J Radiol Health*, 2022, 31 (2) : 172-180. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2022.02.008](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2022.02.008).
- [6] 邓景成, 刘思伟, 张冬阳. 大风条件下的交通污染物扩散路径模拟研究[J]. *环境科学与管理*, 2023, 48 (4) : 39-44. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1212.2023.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1212.2023.04.010).
- Deng JC, Liu SW, Zhang DY. Simulation study on diffusion path of traffic pollutants under strong wind[J]. *Environ Sci Manag*, 2023, 48 (4) : 39-44. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1212.2023.04.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-1212.2023.04.010).
- [7] Röckle R. Bestimmung der Strömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen[D]. Germany: Vom Fachbereich Mechanik, der Technischen Hochschule Darmstadt, 1990.
- [8] Singh B, Hansen BS, Brown MJ, et al. Evaluation of the QUIC-URB fast response urban wind model for a cubical building array and wide building street canyon[J]. *Environ Fluid Mech*, 2008, 8 (4) : 281-312. DOI: [10.1007/s10652-008-9084-5](https://doi.org/10.1007/s10652-008-9084-5).
- [9] Nelson MA, Williams MD, Zajic D, et al. Evaluation of an urban vegetative canopy scheme and impact on plume dispersion[C]//8th Symposium on the Urban Environment. Phoenix: American Meteorological Society, 2009.
- [10] Lundquist JK, Chow FK, Mirocha JD, et al. An improved WRF for urban-scale and complex-terrain applications[C]//7th Symposium on the Urban Environment. San Diego: American Meteorological Society, 2007.
- [11] Gromke C, Buccolieri R, Di Sabatino S, et al. Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations –evaluation of CFD data with experimental data[J]. *Atmos Environ*, 2008, 42 (37) : 8640-8650. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2008.08.019](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.019).
- [12] Moonen P, Gromke C, Dorer V. Performance assessment of Large Eddy Simulation (LES) for modeling dispersion in an urban street canyon with tree planting[J]. *Atmos Environ*, 2013, 75: 66-76. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2013.04.016](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.016).
- [13] 严磊, 李妍, 何旭辉, 等. 高山峡谷桥址处风场特性的大涡模拟研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2023, 54 (1) : 137-145. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2023.01.013](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2023.01.013).
- Yan L, Li Y, He XH, et al. Large-eddy simulation study of wind characteristics at bridge sites in high mountain canyons[J]. *J Central South Univ (Sci Technol)*, 2023, 54 (1) : 137-145. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2023.01.013](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2023.01.013).
- [14] 高杨, 王占朝. 应用AERMOD模型预测大气污染物浓度的影响因素分析[J]. *环境影响评价*, 2021, 43 (3) : 55-60. DOI: [10.14068/j.ceia.2021.03.012](https://doi.org/10.14068/j.ceia.2021.03.012).
- Gao Y, Wang ZC. Analysis of the influencing factors of applying AERMOD model to predict the concentration of air pollutants[J]. *Environ Impact Assess*, 2021, 43 (3) : 55-60. DOI: [10.14068/j.ceia.2021.03.012](https://doi.org/10.14068/j.ceia.2021.03.012).

(收稿日期:2023-02-13)

(上接第 371 页)

- [14] 李士骏. 发射光子的放射性核素各向同性点源的剂量学常数(续 I)[J]. *辐射防护*, 2000, 20 (3) : 166-174. DOI: [10.3321/j.issn.1000-8187.2000.03.006](https://doi.org/10.3321/j.issn.1000-8187.2000.03.006).
- Li SJ. Dosimetric constants for isotropic point source of radionuclides emitting photons[J]. *Radiat Prot*, 2000, 20 (3) : 166-174. DOI: [10.3321/j.issn.1000-8187.2000.03.006](https://doi.org/10.3321/j.issn.1000-8187.2000.03.006).
- [15] 杨振, 雷明军, 涂青松, 等. 用蒙特卡罗方法计算 γ 射线在水体膜中的吸收剂量(英文)[J]. *中国现代医学杂志*, 2003, 13 (17) : 57-60. DOI: [10.3969/j.issn.1005-8982.2003.17.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-8982.2003.17.021).
- Yang Z, Lei MJ, Tu QS, et al. Calculation of the absorbed dose for the γ -ray in the water phantom by Monte Carlo method[J]. *China J Mod Med*, 2003, 13 (17) : 57-60. DOI: [10.3969/j.issn.1005-8982.2003.17.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-8982.2003.17.021).

(收稿日期:2022-12-21)