

· 辐射剂量 ·

三种双剂量计法估算介入术者有效剂量比较

王强 付强 林琳

213022 常州市疾病预防控制中心

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.12.012

【摘要】 目的 比较 3 种双剂量计算法估算介入术者有效剂量的优劣。**方法** 在仿真人体模内布放热释光剂量片并将体模置于介入术者位置,在体模外穿戴铅防护衣、铅围脖和铅帽,并在铅衣内左前胸和铅围脖外左侧放置个人剂量计,在手术台上放置散射模体,分别为 CIRS 放疗调强体模和 CT 剂量检测模体,模拟介入手术曝光条件曝光一定时间,通过器官组织吸收剂量估算有效剂量;以 3 种双剂量计法计算有效剂量并与体模法结果进行比较。**结果** 得到两组各 4 个有效剂量结果,即使用 CIRS 放疗调强体模时,体模法、NCRP 法、Niklason 法和 Boetticher 法分别为 0.138、0.097、0.161 和 0.173 mSv;使用 CT 剂量检测模体时分别为 0.018、0.013、0.019 和 0.026 mSv。其中, Niklason 法与体模法最为接近。**结论** 对于估算介入术者的有效剂量, Niklason 法更为准确和实用。

【关键词】 介入; 仿真人; 有效剂量; 双剂量计

Estimation of interventional radiology worker's effective dose by using three kinds of double-dosimetry algorithms Wang Qiang, Fu Qiang, Lin Lin

Department of Occupational Disease Prevention, Changzhou Center for Disease Control and Prevention, Changzhou 213022, China

【Abstract】 Objective To compare three kinds of double-dosimetry algorithms used in estimating interventional radiology worker's effective dose. **Methods** TLDs were put in the Alderson Radiation Therapy Phantom (ARTP) dressed with lead apron, lead cap and lead collar. TLDs were put on the front left chest inside the lead apron and on the left outside lead collar, respectively. Radiation scattering models, intensity-modulated radiotherapy body model at one time and CT dose detection model at another time, were put on the operating table. The ARTP was set at the major operator's position exposed to the X-ray, mimicking the real interventional radiology operation. Effective doses were estimated on the basis of organ absorbed doses. Effective doses were also obtained by the use of three kinds of double-dosimetry algorithms. The later three effective doses were compared with the first one. **Results** Two groups of effective doses were obtained, with each including four data. For intensity-modulated radiotherapy body model, effective doses were 0.138 mSv for phantom method, 0.097 mSv for NCRP algorithm, 0.161 mSv for Niklason's algorithm and 0.173 mSv for Boetticher's algorithm, respectively. For CT dose detection model, effective doses were 0.018, 0.013, 0.019 and 0.026 mSv, respectively. The result obtained by using the Niklason's algorithm was the closest to that by using phantom method. **Conclusions** Niklason's algorithm is more accurate and more practical in estimating interventional radiology worker's effective dose.

【Key words】 Interventional radiology; Anthropomorphic phantom; Effective dose; Double-dosimetry

临床上,介入诊断或治疗需近台操作,会受到较大剂量的 X 射线照射,其中主要是散射。目前,介入术者的防护主要有铅衣、铅围脖、铅帽和铅眼镜,但铅眼镜由于较重及佩戴不便较少使用。

介入工作人员从事介入工作时接受的有效剂量,通过佩戴的个人剂量计测量的个人剂量当量经换算得到。单个个人剂量计测量个人剂量当量

可能导致不正确的结果,将剂量计置于铅衣下会低估有效剂量,反之,置于铅衣外会高估有效剂量。采用双剂量计,即一个置于铅衣外,一个置于铅衣内,可以更准确地估算有效剂量。国际放射防护委员会(ICRP)建议介入工作人员应佩戴双剂量计^[1]。目前报道的双剂量计算法较多,较流行且有代表性的有 3 种,即 NCRP 法^[2-3]、Niklason

法^[4]和 Boettcher 法^[5]。

本研究采用在仿真人体内布放热释光剂量片的方式直接估算介入工作人员从事介入工作时的有效剂量,并与 3 种双剂量算法所得结果进行比较,以确定优劣。

材料与方法

1. 主要仪器设备

(1)数字剪影血管造影(DSA):美国通用电器公司生产,型号为 Innova 3100 IQ。该 DSA 为下 X 射线管,影像接收器斜径 30 cm。实验时,X 射线管至影像接收器距离取 100 cm。诊疗床边设置铅挂帘,体模左前方悬挂铅玻璃屏风,均为 0.5 mm 铅当量。

(2)仿真人体模:由美国奥尔德森公司生产,模拟身高 175 cm,体重 73.5 kg 成年男性。该体模采用组织等效材料制成,其质量密度对应于人体相应组织。体模分为头颈、胸腹和臀部,水平分为 34 个部分,每部分厚 2.5 cm。每一部分都分布有小圆孔,用于布放热释光剂量片。

(3)散射模体:本实验使用两个散射体模,分别是:美国 CIRS 公司放疗调强体模,该体模模仿人体胸部,用组织等效材料制成,能有效区分骨骼和软组织等;德国 IBA 公司生产的 CT 剂量检测模体。

(4)热释光剂量监测系统:读出器为北京防化研究院生产的 RGD-3B 型热释光剂量仪。热释光剂量片为 BR-1000,成分 LiF(Mg,Cu,P),片状。分散性厂家标称为 <1%,经实测为 3%。退火炉为北京康科洛电子有限公司生产的 TLD2000B 远红外精密退火炉。热释光剂量盒型号 CTLD-J4000,具有同时测量个人剂量当量 $H_p(10)$ 和 $H_p(0.07)$ 的能力。读出器和剂量片均经中国计量科学院检定,并在检定有效期内。

2. 测试方法与步骤

(1)扫描模式:DSA 设定为自动条件,在放置散射模体的情况下,具体参数为:使用 CIRS 体模,63 kV,8.6 mA,0.3 mm/Cu,累计曝光时间为 30 min;使用 CT 模体,77 kV,31.2 mA,0.3 mm/Cu,累计曝光时间为 20 min。因 DSA 设定为自动条件,所以实际曝光条件因散射模体不同而异,时间也分别设置为 30 和 20 min,以观察不同条件、不同时间下各算法的一致性。

(2)热释光剂量片的布放:参照 ICRP 103 号出

版物建议的组织、器官,在体模横断面的小孔中放入经过退火的热释光剂量片,每孔 1 个^[6]。唾液腺部位预留孔上面无覆盖物,故以胶布覆盖。具体分布情况为:脑 4 个、唾液腺 2 个、甲状腺 2 个、肺 10 个、食管 1 个、乳腺 2 个、肝 5 个、胃 3 个、结肠 2 个、膀胱 2 个、睾丸 2 个、骨骼 54 个(颅骨 11 个、颌骨 3 个、颈椎 2 个、肱骨 3 个、肩胛骨 3 个、胸骨 3 个、肋骨 10 个、胸椎 4 个、腰椎 4 个、骶椎 3 个、下肢骨 4 个及骨盆 4 个)、其他组织 9 个(眼晶状体 2 个、胸腺 1 个、脾 1 个、胰腺 1 个、肾 2 个、小肠 2 个)、皮肤 5 个(面部、后颈部、胸部、背部及臀部各 1 个),共计 103 个。另外,实验前预留 3 个作为本底。将仿真人体模竖立置于支撑物上,使其与正常成年人等高(175 cm),面向操作台,处于第一术者位置。在仿真人体模外穿铅衣、铅围脖和铅帽,其屏蔽厚度均为 0.5 mm 铅当量。准备两个放置了热释光剂量片的个人剂量盒,一个放在铅衣内左胸前,另一个置于左颈部铅围脖外。

(3)实验过程:按照设置好的条件对散射模体进行曝光至设定时间,扫描完毕后取回剂量片(仿真人体模内和热释光剂量盒内),编号,带回实验室测量。

(4)有效剂量估算:

①仿真人体模器官或组织的吸收剂量 D_T :

$$D_T \approx X_i \cdot C_f \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_T}{(\mu_{en}/\rho)_{air}} \quad (1)$$

式中, D_T 为仿真人体模内器官或组织 T 的吸收剂量, Gy; $\frac{(\mu_{en}/\rho)_T}{(\mu_{en}/\rho)_{air}}$ 为对于单能光子,肌肉、骨骼、脂肪与空气的质量能量吸收系数比^[7],有用线束能量估计值(keV)取有用线束管电压平均值(kVp)的 1/2^[6]; C_f 为刻度因子, X_i 为仪器测量值减去本底。

②骨髓吸收剂量:

$$D_{\text{红骨髓}} = \sum D_T \cdot F_i \quad (2)$$

式中, D_T 为骨组织的吸收剂量, Gy; F_i 为骨组织内红骨髓占全部红骨髓的百分含量,根据文献^[7],头颅骨 13.1%、上肢带 8.3%、胸骨 2.3%、肋骨 7.9%、颈椎 3.4%、胸椎 14.1%、腰椎 10.9%、骶骨 13.9%、下肢带 26.1%。

③有效剂量:

$$E = \sum \omega_T H_T = \sum \omega_T \omega_R D_T \quad (3)$$

式中, E 为有效剂量, Sv; ω_T 是与组织、器官相对应的组织权重因子; ω_R 为辐射 R 的辐射权重因子,本

表 1 3 种双剂量计算公式

Table 1 Three kinds of double-dosimetry algorithms

双剂量算法	公式	含义
NCRP 法	$E = 0.5H_w + 0.025H_n$	H_w 为围裙内腰部测量值 $H_p(10)$; H_n 为铅围脖外颈部测量值 $H_p(10)$
Niklason 法	$E = 0.02(H_{os} - H_u) + H_u$	H_{os} 为铅围脖外颈部测量值 $H_p(0.07)$; H_u 为围裙内腰部测量值 $H_p(10)$
Boettcher 法	$E = 0.84H_{p.c.u} + 0.051H_{p.n.o}$	$H_{p.c.u}$ 为围裙内前胸部测量值 $H_p(10)$; $H_{p.n.o}$ 为铅围脖外颈部测量值 $H_p(10)$

表 2 仿真人体模法所得器官吸收剂量 (mGy)

Table 2 Absorbed doses measured using phantom methods (mGy)

体模	脑	唾液腺	甲状腺	肺	食管	乳腺	肝	胃
CIRS 体模	0.032	0.184	0.038	0	0	0	0	0
CT 模体	0.099	0.480	0.073	0.036	0.031	0.042	0.021	0.028
体模	结肠	膀胱	睾丸	骨表面	红骨髓	皮肤	其他	
CIRS 体模	0	0	0	0.126	0.012	0.004	0.096	
CT 模体	0.019	0.025	0.092	0.785	0.075	0.011	0.724	

实验体模置于 X 射线辐射场中,在 X 射线能量范围内, $\omega_R = 1$ 。

④根据 3 种双剂量算法估算有效剂量:算法及公式列于表 1。

结 果

1. 仿真人体模法测量得到的各组织器官吸收剂量:结果列于表 2。由表 2 可知,在使用 CIRS 体模及 CT 模体时,肺、食管、乳腺、肝、胃、结肠、膀胱和睾丸由于铅衣的保护,其吸收剂量均较低,其中使用 CIRS 体模时已经无法测出;本研究中 DSA 使用自动条件,在使用 CT 模体时其条件较高,由表中可见其各部位吸收剂量均较使用 CIRS 体模时高。

2. 佩戴于铅防护服内外的个人剂量计测量:结果列于表 3。其中,使用 CT 模体条件下各剂量当量均高于使用 CIRS 体模,两种照射条件下 $H_p(10)$ 均高于 $H_p(0.07)$,与其能量及穿透能力一致。

表 3 铅防护服内外个人剂量计测量值 (mSv)

Table 3 Doses measured from TLDs worn inside and outside lead apron (mSv)

体模	部位	$H_p(10)$	$H_p(0.07)$
CIRS 体模	铅衣内	0.007	0.011
	铅围脖外	0.397	0.643
CT 模体	铅衣内	0.136	0.417
	铅围脖外	1.158	1.396

注: $H_p(10)$ 、 $H_p(0.07)$: 个人剂量当量

3. 经仿真人体模法及 3 种双剂量计法计算的有效剂量:结果列于表 4。表中列出了经仿真人体模法及 3 种算法估算的有效剂量,可见 NCRP 法计算的有效剂量低于经仿真人体模法估算的有效剂量,

而 Niklason 法和 Boettcher 法的计算值高于经仿真人体模法估算的有效剂量。3 种算法中 Niklason 法的结果与仿真人体模法最为接近。

表 4 体模法及 3 种双剂量算法对两种体模估算的有效剂量 (mSv)

Table 4 Effective dose estimated using the phantom method and three kinds of double-dosimetry algorithms (mSv)

估算方法	CIRS 体模	CT 模体
体模法	0.018	0.138
NCRP 法	0.013	0.097
Niklason 法	0.019	0.161
Boettcher 法	0.026	0.173

讨 论

在目前国内的临床实践中,介入放射学工作者受照剂量仅次于核医学,人均年有效剂量为 0.44 mSv^[8],且介入放射学工作人员呈逐年增加的趋势,加之其受照方式的特殊性,对介入工作人员进行准确的受照剂量估算,对其放射防护及监管具有重要意义。对于局部和不均匀照射,ICRP 建议采用有效剂量等效地估算全身剂量^[11]。目前,国内介入放射工作人员仍采用在铅衣内单剂量计法估算有效剂量,其准确性较低,不能真实反映工作人员受照情况。对欧洲 13 个国家进行的调查显示,有 5 个国家建议将个人剂量计戴在铅衣外,7 个国家建议将个人剂量计戴在铅衣内,只有 1 个国家建议常规使用两个剂量计^[9]。

由于介入手术的复杂性,如不同的电压、不同的投照方位等都会对术者所受照射造成影响,以个

人剂量计来估算术者的有效剂量会存在一定偏差。本实验采用两种散射体模拟,得到了两种不同条件下的结果,且结论一致,即 3 种算法中 Niklason 法与仿真结果最相近。本研究采用估算有效剂量的金标准-仿真人体模法对 3 种双剂量算法进行检验,结果发现,NCRP 法计算的有效剂量低于经体模法估算的有效剂量,而 Niklason 法和 Boetticher 法的计算结果高于体模法,其中 Niklason 法的结果与体模法最为接近。Schultz 和 Zoetelief^[10] 研究发现,NCRP 法最高可高估 2.25 倍和最低低估 1.2 倍有效剂量,其中高估 2.25 倍见于单剂量算法,而低估 1.2 倍见于双剂量算法,即本研究所使用的算法,与本研究的结论相近;对于 Niklason 法,Schultz 和 Zoetelief^[10] 认为该法最高可高估 2 倍和最低低估 1.3 倍有效剂量,本研究结果显示,在 63 和 77 kV 条件下,Niklason 法分别高估有效剂量 5.59% 和 16.6%。

3 种双剂量算法中,NCRP 法和 Niklason 法采用的是 ICRP 60 号出版物^[11] 推荐的组织权重因子来计算有效剂量,而 Boetticher 法采用的是 ICRP 103 号出版物^[12] 的组织权重因子推荐值。新的权重因子推荐值对计算有效剂量有较大影响,特别是铅防护服没有屏蔽的那些部位,如甲状腺、大脑、唾液腺、外胸区及口腔黏膜。上述器官的权重因子份额增加了 1.4 倍,这在本实验中也得到了体现,即 Boetticher 法的计算值高于 Niklason 法,但由于本实验按照目前的临床实践在体模外穿戴了铅围脖及铅帽,所以增加幅度较小;铅帽的穿戴也影响了体模法的有效剂量估算结果,造成其计算值偏低,而 3 种算法都不包括穿戴铅帽,所以相对增加了 3 种算法的计算值。本研究结果显示,躯干部分组织器官的吸收剂量很低,在 CIRS 体模作为散射体的模式下甚至出现了吸收剂量为零的情况,这主要是由于铅衣对射线的衰减所致,因为在 70 ~ 100 kV 条件下,0.5 mm 铅当量铅衣可阻挡掉 96.5% ~ 99.5% 的 X 射线^[13]。CT 模体作为散射体时,电压高于 CIRS 体模,X 射线还是有极小部分透过铅衣。

本研究发现,Niklason 双剂量计法与经仿真方法得到的有效剂量最为接近且偏大,并使用了 $H_p(10)$ 和 $H_p(0.07)$ 两个实用量更好地考虑两者对有效剂量的影响,同时具备准确性和安全性,是一种更为准确和实用的方法。Boetticher 法作为最近出现的算法,采用的 ICRP103 号出版物的组织权重因

子,其结果与 Niklason 法接近,也能较真实地反映实际剂量。3 种算法中,NCRP 法是唯经 ICRP 推荐的,且在欧美等国广泛使用的一种方法,但本研究发现相对于其余两种算法,其存在低估有效剂量的缺陷。

本研究的不足之处是仿真人体模无四肢部分,因此,在计算皮肤剂量时采用头面部及躯干皮肤吸收剂量作为皮肤剂量的估计值。但由于皮肤的组织权重因子只有 0.01,故这一因素对有效剂量的影响较小。

利益冲突 作者无利益冲突,排名无争议。作者的配偶、合作伙伴或子女不存在影响研究结果的财务关系

作者贡献声明 王强负责本论文的设计及撰写,数据收集和整理,热释光剂量剂的准备及数据读出;付强、林琳参与现场实验

参 考 文 献

- [1] Valentin J. Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedures[J]. Ann ICRP, 2000, 30(2): 7-67.
- [2] Rosenstein M, Webster EW. Effective dose to personnel wearing protective aprons during fluoroscopy and interventional radiology[J]. Health Phys, 1994, 67(1): 88-89.
- [3] National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 122. Use of personal monitors to estimate effective dose equivalent to workers for external exposure to low-LET radiation[R]. Bethesda: NCRP, 1995.
- [4] Niklason LT, Marx MV, Chan HP. The estimation of occupational effective dose in diagnostic radiology with two dosimeters[J]. Health Phys, 1994, 67(6): 611-615.
- [5] Boetticher HV, Lachmund J, Hoffmann W. An analytic approach to double dosimetry algorithms in occupational dosimetry using energy dependent organ dose conversion coefficients[J]. Health Phys, 2010, 99(6): 800-805. DOI: 10.1097/HP. 0b013e3181e850da.
- [6] 张琳, 朱建国, 闵楠, 等. 3 种常见介入诊疗中放射工作人员有效剂量的估算[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2011, 3(4): 393. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2011.04.004.
Zhang L, Zhu JG, Min N, et al. Estimation of the effective doses for interventional employees in three common interventional diagnosis and treatment procedures[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2011, 3(4): 393. DOI: 10.3760/cma. J. issn. 0254-5098. 2011.04.004.
- [7] 李士俊. 电离辐射剂量学基础. 苏州: 苏州大学出版社, 2008: 31.
Li SJ. Basic dosimetry for ionizing radiation[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2008.
- [8] 秦永春, 杨小勇, 陈维, 等. 江苏省部分放射工作人员外照射个人剂量五年监测结果分析[J]. 中华放射医学与防护杂志,

- 2015, 35 (9): 702-704. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2015.09.016.
- Qin YC, Yang XY, Chen W, et al. Analysis on personal doses of occupational external exposure of part of the radiation workers in Jiangsu province in a period of five years[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2015, 35 (9): 702-704. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2015.09.016.
- [9] Jarvinen H, Bult N, Clerinx P, et al. Overview of double dosimetry procedures for determination of the effective dose of the interventional radiology staff[J]. Radiat Prot Dosim, 2008, 129 (1-3): 333-339. DOI:10.1093/rpd/ncn082.
- [10] Schultz FW, Zoetelief J. Estimating effective dose for a cardiac catheterisation procedure with single and double personal dosimeters [J]. Radiat Prot Dosim, 2006, 118 (2): 196-204. DOI:10.1093/rpd/ncl018.
- [11] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection [R]. Oxford: Pergamon Press, 1991.
- [12] International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection [R]. Oxford: Pergamon Press, 2007.
- [13] National Council on Radiation Protection and Measurements. NCRP Report No. 49. Structural shielding design and the evaluation for medical use of X rays and gamma rays of energies up to 10 MeV [R]. Bethesda: NCRP, 1976.

(收稿日期:2016-05-31)

应用 PEAKFINDER 测量点扫描碳离子束深度剂量分布

李明生 袁继龙 程金生

100088 北京,中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所 辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心重点实验室

通信作者:程金生, Email: addila@qq.com

DOI:10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.12.013

PEAKFINDER-based measurement of carbon ion beam depth dose distribution Li Mingsheng, Yuan Jilong, Cheng Jinsheng
Key Laboratory of Radiological Protection and Nuclear Emergency, China CDC, National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China
Corresponding author: Cheng Jinsheng, Email: addila@qq.com

近些年,国内出现了两家利用碳离子束流治疗癌症的放疗装置,分别为兰州近代物理研究所研制的散射碳粒子束治疗设备与上海市质子重离子医院的主动式点扫描碳离子治疗设备。这两台设备代表了两种不同类型的碳离子束流:散射束流与点扫描束流。碳离子散射束流主要指的是经过散射体和射程调制器扩展后的碳离子束流;主动式点扫描束流,也称为笔形束,它利用偏转磁铁控制束流扫描位置,能量变化调节碳离子束流的深度分布形成类似笔形的碳离子束流^[1-2]。碳离子治疗装置在投入临床治疗前,需要进行大量的质量控制测试,其中,碳离子深度剂量分布是碳离子治疗装置质量控制检测的重要内容。通过测量碳离子束流深度剂量分布可以了解治疗装置的最大剂量点(布拉格峰)位置以及最大穿透深度等重要信息。

碳离子束流深度剂量分布可采用平行板电离室或者胶片进行测量^[3-4]。本研究参考国外文献,采用了 PEAKFINDER(属于平行板电离室)对于上海市质子重离子医院的放疗设备碳离子束流深度剂量分布进行了质量控制

测量,获得相关的参数,并对测量结果进行讨论。

一、材料与方法

1. 测量设备介绍:PEAKFINDER 是德国 PTW 公司生产的用于测量质子和重离子水中剂量分布以及布拉格峰位置的仪器。PEAKFINDER 包含两个充满水的波纹管,其中一个作为吸收射线的水吸收体,另外一个在远端作为蓄水池,水吸收体的厚度范围在 1.5 到 35.5 cm,厚度变化值最小可达 0.01 mm(具体量厚度由用户设定)。PEAKFINDER 内置两个布拉格峰电离室,分别作为测量和参考电离室,测量电离室电极直径 81.6 mm,测量体积 10.5 cm³。该电离室可以收集所有散射粒子,精确的确定粒子位置,其空间精度在 10 μm。PEAKFINDER 测量步进精度可以调节,本次测量对于重点关注区域设置了 0.02 mm 步进精度,其余剂量分布区域设置了 1 mm 步进精度,低能区域测量范围 20 ~ 100 cm,中能区域测量范围 20 ~ 200 cm,高能区域测量范围 20 ~ 320 cm。

2. 束流参数:上海质子重离子医院的粒子治疗设备可