

射波刀 Monte Carlo 与 Ray-Tracing 算法在胰腺癌中的剂量学比较

曹洋森, 于春山, 张火俊, 孙永健
上海长海医院放疗科, 上海 200433

【摘要】目的:对比射波刀 Monte Carlo(MC)算法与 Ray-Tracing(RT)算法在胰腺癌中的剂量学差异。**方法:**回顾分析 50 例射波刀治疗的胰腺癌患者,行 CT 模拟定位并勾画靶区和危及器官。分别使用 RT 算法和 MC 算法进行剂量计算和评估。比较两种算法计算的靶区剂量、适形指数(CI)、新适形指数(nCI)、均匀指数(HI)和危及器官受量。**结果:**两种算法计算出 PTV D₉₀ 的差异很小,没有统计学意义。使用 MC 算法精算后 CI 和 nCI 比 RT 算法平均减小了 0.01,胃、十二指肠、空回肠、脊髓的体积剂量分别降低了 0.61、0.53、0.60、0.68、1.10 Gy,差异均具有统计学意义。**结论:**胰腺癌射波刀治疗计划中 MC 算法与 RT 算法在 PTV D₉₀ 的差异不大,RT 算法比 MC 算法高估了胃、十二指肠、空回肠、脊髓的剂量。

【关键词】射波刀;射线追踪;蒙特卡罗;剂量分布;胰腺癌

【中图分类号】R811.1;R735.9

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)10-1008-04

Comparison of dose distribution calculated by Monte Carlo algorithm and ray-tracing algorithm for CyberKnife treatment of pancreatic cancer

CAO Yang-sen, YU Chun-shan, ZHANG Huo-jun, SUN Yong-jian

Department of Radiation Oncology, Shanghai Changhai Hospital, Shanghai 200433, China

Abstract: Objective To compare the dose distributions calculated by Monte Carlo (MC) algorithm and ray-tracing (RT) algorithm separately in CyberKnife treatment for pancreatic cancer. **Methods** Totally, 50 pancreatic cancer patients treated with CyberKnife were retrospectively analyzed. CT simulative location was carried out, and the planning target volume (PTV) and organs at risk (OAR) were delineated. MC and RT algorithms were preformed separately for the dose calculation and evaluation. The dose of PTV, conformal index (CI), new conformal index (nCI), homogeneity index (HI) and the dose of OAR were compared between MC and RT algorithms. **Results** Small differences were found in PTV D₉₀ between MC and RT algorithms, without statistical significance. Compared with RT algorithm, the CI and nCI calculated by MC algorithm reduced by 0.01, and the volume dose of stomach, duodenum, jejunum, ileum and spinal cord reduced by 0.61, 0.53, 0.60, 0.68 and 1.10 Gy, respectively, with statistically significant differences. **Conclusion** The difference in PTV D₉₀ between MC and RT algorithm in CyberKnife treatment for pancreatic cancer is not significant. Compared with MC algorithm, the dose of stomach, duodenum, jejunum, ileum and spinal cord are overestimated by RT algorithm.

Key words: CyberKnife; ray-tracing; Monte Carlo; dose distribution; pancreatic cancer

前言

射波刀 MultiPlan® 治疗计划系统配备了 Ray-Tracing(RT)算法和 Monte Carlo(MC)算法。RT 算法模型简单,在计算过程中仅调用组织模体比(Tissue-

Phantom Ratio, TPR)、中心离轴比(Off-Center Ratio, OCR)和射野输出因子(Output Factor, OF)3 组参数^[1-2],计算速度快,但在非均匀介质中仅基于一个简单入射路径进行非均质密度校正,剂量计算精度较差^[3]。MC 算法采用随机抽样,模拟了光子在入射路径上包含次级电子分布的实际物理过程以及剂量沉积,算法不断追踪光子及粒子,自动记录光子与介质相互作用积存的能量在介质每个体素上的分布,不断迭代循环,直至计算完成每个射束在介质内的剂

【收稿日期】2016-06-17

【作者简介】曹洋森,男,硕士研究生,主管技师,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: caoyangsen@163.com

【通信作者】张火俊,男,副主任医师,E-mail: chyzzhj@163.com

量分布情况^[4],所以MC算法是目前最精确的剂量计算算法^[5]。

RT算法与MC算法在非均匀介质中的剂量计算存在较大差异。Wilcox等^[6]研究结果表明,RT算法计算得到的PTV的最大剂量是MC算法计算结果的1.63倍。Sharma等^[7]研究结果表明,RT算法高估了PTV的剂量覆盖,MC算法计算后的平均覆盖率下降了28.7%。Miura等^[8]、Kang等^[9]和曹洋森等^[10]的研究结果表明RT算法比MC算法分别高估了计划靶区(PTV)剂量19.6%、21%和16.87%。RT算法为射波刀标配,MC算法为选配,截至2016年5月,中国大陆完成装机的射波刀一共21台,其中第三代射波刀(G3)10台,均未配备MC算法,另外11台第四代(G4)和第五代(VSI)射波刀也仅有部分单位选配了MC算法。检索国内外对射波刀两种剂量算法差异的研究均集中于肺部肿瘤^[6-10],暂无研究比对两种算法在胰腺肿瘤治疗计划中的剂量差异。本研究旨在比较两种算法在胰腺癌中的剂量学差异,对未配置MC算法的射波刀用户起到一定的指导作用。

1 材料与方法

1.1 临床资料

回顾性分析2015年1月~2015年12月期间行射波刀治疗的50例胰腺癌患者。入组标准为经病理活检确诊为胰腺癌,年龄18~80岁,无法手术或拒绝手术的患者,病灶位于胰头,最大径≤5 cm,预计生存期>6个月,美国东部肿瘤协作组(ECOG)评分≤2;排除有放疗史、多发病灶、局部淋巴结及远处转移的患者。

入组患者男性32名,女性18名;平均年龄64.7岁,中位年龄65.5岁;肿瘤直径平均值3.85 cm,中位值3.86 cm。PTV的处方剂量为37.5~45.0 Gy/5分次,平均剂量38.13 Gy,中位剂量37.50 Gy。

1.2 定位方法

采用真空垫固定患者,体位为仰卧位,患者双手自然放置于身体两侧。使用荷兰飞利浦16排大孔径CT模拟定位机扫描定位。扫描条件为120 kVp、400 mAs、1.5 mm层厚无间隔螺旋扫描,扫描螺距为0.938。主图像为平扫,在患者吸气末屏气的情况下扫描,界限范围为肿瘤上下界各自增加15 cm。辅助图像为碘造影剂增强扫描,在患者呼气末屏气的情况下扫描,界限范围为肿瘤上下界各自增加5 cm。

1.3 靶区和危及器官勾画

射波刀数据管理系统(CDMS)导入患者CT影像,影像配准融合后,由肿瘤临床医师完成肿瘤靶区

(GTV)和危及器官(OAR)的勾画。OAR要求包括脊髓、肝脏、肾脏、胃、十二指肠、空回肠。对于无法放置金标,采用脊柱追踪的患者,GTV和OAR的勾画需要同时兼顾吸气末和呼气末的主辅图像。勾画完成后对GTV外放3 mm为PTV。

1.4 治疗计划设计

治疗计划系统采用美国Accuray公司的MultiPlan®计划系统,版本号4.0.2。50例患者全部采用Xsight™ Spine追踪模式,利用Sequential模块进行计划优化。

计划优化完成后拉大计算框覆盖的范围,使其覆盖患者所有CT影像体素,用高密度的计算网格对计划进行精算、归一。为便于两种算法剂量学差异的比较,首先使用RT算法进行精算并依照处方剂量包绕90% PTV体积的标准进行归一,记录下靶区和危及器官的各项剂量指标后,保持计划所有参数不变,使用MC算法重新精算。

靶区剂量评估参数包括PTV D₉₀、PTV的适形指数(CI)、新适形指数(nCI)、均匀指数(HI)、覆盖率。CI=PIV/TIV,式中,PIV为处方剂量所包绕的体积,单位cm³;TIV为处方剂量所包绕的靶区体积,单位cm³。nCI=CI/覆盖率,式中,覆盖率为靶区接受的超过处方剂量的体积占靶区总体积的百分比。HI=D_{max}/RxDose,式中,D_{max}为全局最大剂量,RxDose为处方剂量,单位:cGy。危及器官受量评估参数包括空回肠、胃、十二指肠、脊髓的最大点剂量和体积剂量,其中最大点剂量定义为0.035 cm³体积剂量,空回肠观察5 cm³体积剂量,胃观察10 cm³体积剂量,十二指肠观察5 cm³、10 cm³体积剂量,脊髓观察0.35 cm³体积剂量,标准均参照美国医学物理学家协会(AAPM)101号报告给出的限定值^[11]。其余计划参数要求CI<1.30,nCI<1.44,1.30<HI<1.55。

1.5 统计学方法

数据以均数±标准差表示。采用SPSS 19.0统计软件进行数据处理,对两种算法计算结果的参数比较采用配对t检验。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 PTV 剂量学差异

RT算法平均精算时间为1.59 min,MC算法平均精算时间为37.45 min。MC算法与RT算法计算后PTV的剂量比较结果列于表1。由表1可知,使用MC算法计算后,PTV D₉₀的剂量略有降低,但是差异没有统计学意义(P>0.05);PTV适形性变好,CI有所

减小,差异有统计学意义($t=2.68, P<0.05$);nCI 同样有所减小,差异有统计学意义($t=3.93, P<0.05$);PTV HI 数值无变化。

表1 MC算法与RT算法的PTV剂量学差异($n=50, \bar{x} \pm s$)
Tab.1 Dose difference in PTV between RT algorithm and MC algorithm ($n=50, Mean \pm SD$)

Algorithm	PTV D ₉₀ /Gy	CI	nCI	HI
RT	38.13±1.68	1.14±0.06	1.26±0.07	1.42±0.06
MC	38.06±1.61	1.13±0.06	1.25±0.07	1.42±0.06
<i>t</i> value	1.00	2.68	3.93	-
<i>P</i> value	0.32	0.01	0.00	-

PTV: Planning target volume; -: No difference; RT: Ray-tracing; MC: Monte Carlo; CI: Conformal index; nCI: New conformal index; HI: Homogeneity index

2.2 危及器官剂量学差异

MC算法与RT算法计算后危及器官的剂量比较结果列于表2。由表2可知,使用MC算法计算后,空回肠的最大点剂量有所降低,差异有统计学意义($t=6.58, P<0.05$);空回肠5 cm³体积的剂量有所降低,差异有统计学意义($t=11.92, P<0.05$);胃的最大点剂量有所降低,差异有统计学意义($t=3.56, P<0.05$);胃10 cm³体积的剂量有所降低,差异有统计学意义($t=11.43, P<0.05$);十二指肠的最大点剂量有所降低,差异有统计学意义($t=4.13, P<0.05$);十二指肠5 cm³体积的剂量有所降低,差异有统计学意义($t=10.46, P<0.05$);十二指肠10 cm³体积的剂量有所降低,差异有统计学意义($t=12.15, P<0.05$);脊髓的最大点剂量有所降低,差异有统计学意义($t=24.15, P<0.05$);脊髓0.35 cm³体积的剂量有所降低,差异有统计学意义($t=25.37, P<0.05$)。

表2 MC算法与RT算法的危及器官剂量学差异($n=50, \bar{x} \pm s$)
Tab.2 Difference between dose of organs at risk calculated by RT algorithm and MC algorithm ($n=50, Mean \pm SD$)

Algorithm	Jejuno-ileum/Gy		Stomach/Gy		Duodenum/Gy			Spinal cord/Gy	
	D _{max}	D _{5cc}	D _{max}	D _{10cc}	D _{max}	D _{5cc}	D _{10cc}	D _{max}	D _{0.35cc}
RT	20.75±3.52	15.34±2.72	22.02±4.83	13.98±2.78	18.63±4.65	10.74±3.25	8.88±2.88	6.06±1.56	5.61±1.38
MC	20.39±3.58	14.66±2.80	21.78±4.92	13.37±2.87	18.37±4.77	10.21±3.39	8.28±3.01	5.00±1.52	4.51±1.33
<i>t</i> value	6.58	11.92	3.56	11.43	4.13	10.46	12.15	24.15	25.37
<i>P</i> value	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

3 讨论

MC算法基于大样本光子随机采样,模拟其在介质中的运输和能量累积的算法。模拟次数越多,样本量越大,获得的计算结果就越接近真实值。所以MC算法在均匀介质和非均匀介质中都能获得比较准确的剂量分布。人体组织密度差异最大的部位是胸部,在肺部肿瘤中,RT算法会高估PTV D₉₅的剂量约16.8%~21.0%^[6-10]。两种算法的剂量差异,与肺组织密度、肿瘤大小、肿瘤位置都有一定的相关性^[10]。Accuray公司对MultiPlan®治疗计划系统进行最终剂量评估时给出的指导意见是,颅内肿瘤可以使用RT算法,其余肿瘤建议使用MC算法^[12]。Sharma等^[7]报道使用非均匀模体来验证射波刀Multiplan 2.1.0治疗计划系统MC算法的准确性,MC计划的剂量通过率为96%~100%。Xiang等^[13]报道使用CIRS的非均匀胸部模体、EBT2胶片和FilmQA Pro验证射波刀MC

算法的准确性,结果显示MC算法的通过率为98.4%~100.0%,RT算法的通过率只有27.1%~49.7%。Chan等^[14]报道使用CIRS的可编程同步运动的非均匀胸部模体,分别对7种运动模型下的模体进行4DCT的定位以验证射波刀Multiplan 4.0.x版本MC算法的4D计划剂量的准确性,结果表明MC算法在非均匀介质中四维剂量的通过率均达到95%以上。这些研究通过实际测量,从不同版本、不同模体、不同验证方法证明了射波刀Multiplan治疗计划系统内置的商业MC算法在非均匀介质中的剂量计算结果相比RT算法具有很高的准确性。在射波刀非均匀组织的临床计划设计过程中应该使用MC算法进行最终的剂量计算。

对于腹部肿瘤,尤其是胰腺肿瘤尚未有研究给出RT算法与MC算法的剂量学差异。本研究入组了50例胰腺癌患者的临床资料,回顾性分析比对了两

种算法在靶区及危及器官方面的剂量学差异。结果显示,靶区 PTV D₉₀ 的剂量差异没有统计学意义,而危及器官的最大点剂量和体积剂量均有所降低,胃 10 cm³、十二指肠 5 cm³、10 cm³、空回肠 5 cm³ 的体积剂量分别被高估了 0.61、0.53、0.60、0.68 Gy,差异具有统计学意义。胰腺肿瘤通常为实质性的软组织密度组织,两种算法在 PTV 上不存在显著的剂量学差异。胰腺周围则是由胃、十二指肠、空回肠所包绕,这些空腔脏器内均会包含一定体积的气体。分析 MC 算法计算得到的结果发现,光子在低密度组织中的实际能量累积结果要低于解析算法给出的计算结果,所以在空腔脏器所包含的空气部分,MC 算法得出的剂量分布要低于 RT 算法计算的结果。脊髓被椎体的骨质结构所包绕,由致密骨组织到软组织密度脊髓,同样是一个高密度到低密度的非均匀区域,组织密度落差也造成了脊髓 0.35 cc 体积受量平均被 RT 算法高估了 1.1 Gy。

【参考文献】

- [1] SHARMA S C, OTT J T, WILLIAMS J B, et al. Commissioning and acceptance testing of a CyberKnife linear accelerator [J]. J Appl Clin Med Phys, 2007, 8(3): 119-125.
- [2] HAWKSWORTH S A, QURESHI M M, XIANG H, et al. Ray-Trace is inferior to Monte Carlo dose calculation algorithm for intracranial robotic radiosurgical treatment: a comparative dosimetry study [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 81(2): S859.
- [3] SHARMA S, OTT J, WILLIAMS J, et al. Dose calculation accuracy of the Monte Carlo algorithm for CyberKnife compared with other commercially available dose calculation algorithms [J]. Med Dosim, 2011, 36(4): 347-350.
- [4] DENG J, GUERRERO T, MA C M, et al. Modelling 6 MV photon beams of a stereotactic radiosurgery system for Monte Carlo treatment planning [J]. Phys Med Biol, 2004, 49(9): 1689-1704.
- [5] FIPPEL M, HARYANTO F, DOHM O, et al. A virtual photon energy uence model for Monte Carlo dose calculation [J]. Med Phys, 2003, 30(3): 301-311.
- [6] WILCOX E E, DASKALOV G M, LINCOLN H, et al. Comparison of planned dose distributions calculated by Monte Carlo and Ray-Trace algorithms for the treatment of lung tumors with cyberknife: a preliminary study in 33 patients [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 77(1): 277-284.
- [7] SHARMA S C, OTT J T, WILLIAMS J B, et al. Clinical implications of adopting Monte Carlo treatment planning for CyberKnife [J]. J Appl Clin Med Phys, 2010, 11(1): 3142.
- [8] MIURA H, MASAI N, OH R J, et al. Clinical introduction of Monte Carlo treatment planning for lung stereotactic body radiotherapy [J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(1): 38-46.
- [9] KANG K M, JEONG B K, CHOI H S, et al. Combination effects of tissue heterogeneity and geometric targeting error in stereotactic body radiotherapy for lung cancer using CyberKnife [J]. J Appl Clin Med Phys, 2015, 16(5): 193-204.
- [10] 曹洋森, 于春山, 张火俊, 等. 射波刀蒙特卡罗与射线追踪算法在肺部肿瘤中的剂量学比较 [J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(4): 97-99.
- [11] CAO Y S, YU C S, ZHANG H J, et al. Comparison of dose distributions calculated by monte carlo and ray-tracing algorithms for the treatment of lung tumors with CyberKnife [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2016, 37(4): 97-99.
- [12] BENEDICT S H, YENICE K M, FOLLOWILL D, et al. Stereotactic body radiation therapy: the report of AAPM Task Group 101 [J]. Med Phys, 2010, 37(8): 4078-4101.
- [13] WILCOX E E, DASKALOV G M, LINCOLN H. Stereotactic radiosurgery-radiotherapy: should Monte Carlo treatment planning be used for all sites? [J]. Pract Radia Oncol, 2011, 1(4): 251-260.
- [14] XIANG H F, FISHER K, RUSSO G A, et al. Measurements of CyberKnife stereotactic body radiation therapy (SBRT) dose to target volumes in a dynamic lung phantom and comparison with Monte Carlo *versus* Ray-Tracing dose calculations [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 81(2): S868.
- [15] CHAN M K, KWONG D L, NG S C, et al. Accuracy and sensitivity of four-dimensional dose calculation to systematic motion variability in stereotactic body radiotherapy (SBRT) for lung cancer [J]. J Appl Clin Med Phys, 2012, 13(6): 303-317.

(编辑:薛泽玲)