

SRS MapCHECK 半导体矩阵用于射波刀脊柱计划剂量验证的应用研究

祝小惠¹, 梁志文¹, 曹婷¹, 韩军¹, 王皓宁², 龙浩², 杨晶¹

1. 华中科技大学同济医学院附属协和医院肿瘤中心, 湖北 武汉 430022; 2. 中南民族大学电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074

【摘要】目的:评估 SRS MapCHECK 半导体矩阵探测器用于射波刀脊柱计划剂量验证工作的适用性。**方法:**将 SRS MapCHECK 探测器安装于专用模体 StereoPHAN 开展研究工作, 测试了射波刀固定和 Iris 可变准直器的单野计划, 以及脊柱临床计划的质量保证(QA)计划, 采用 SNC Patient 软件对比分析实测与计划剂量分布之间的差异, 分别计算在 2 mm/5%、2 mm/3% 和 2 mm/2% 标准下的 γ 通过率。**结果:**在绝对剂量分析模式 2 mm/5%、2 mm/3% 和 2 mm/2% 标准下, 固定和 Iris 可变准直器单野计划的 γ 通过率均为 100.0%, 脊柱 QA 计划的平均 γ 通过率分别为 $(99.3 \pm 1.2)\%$ 、 $(96.5 \pm 2.7)\%$ 和 $(93.5 \pm 5.3)\%$ 。**结论:**SRS MapCHECK 半导体矩阵探测器在 2 mm/5% 和 2 mm/3% 的 γ 分析标准下适合用于开展射波刀脊柱临床计划的剂量验证工作。

【关键词】SRS MapCHECK; 半导体矩阵; 射波刀; 脊柱临床计划; 剂量验证; γ 通过率

【中图分类号】R318; R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)04-0415-06

Application of SRS MapCHECK semiconductor detector array in dose verification for spine CyberKnife plan

ZHU Xiaohui¹, LIANG Zhiwen¹, CAO Ting¹, HAN Jun¹, WANG Haoning², LONG Hao², YANG Jing¹

1. Cancer Center, Union Hospital, Tongji Medical College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430022, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, South-Central Minzu University, Wuhan 430074, China

Abstract: Objective To evaluate the applicability of SRS MapCHECK semiconductor detector in dose verification for spine CyberKnife plan. **Methods** SRS MapCHECK detector was installed in the specific StereoPHAN phantom to conduct research. The single-field plans delivered by CyberKnife fixed and Iris variable collimators, as well as the quality assurance (QA) plans for spine clinical plans were tested. SNC Patient software was used to compare and analyze the differences between the measured and planned dose profiles, and the gamma passing rates for the criteria of 2 mm/5%, 2 mm/3% and 2 mm/2% were calculated. **Results** In absolute dose analysis mode and under the criteria of 2 mm/5%, 2 mm/3% and 2 mm/2%, all the gamma passing rates of the single-field plans delivered by fixed or Iris variable collimators reached 100.0%, and the average gamma passing rates of the spine QA plans were $99.3 \pm 1.2\%$, $96.5 \pm 2.7\%$ and $93.5 \pm 5.3\%$, respectively. **Conclusion** SRS MapCHECK semiconductor detector is suitable for the quick dose verification for spine CyberKnife plans under the gamma criteria of 2 mm/5% and 2 mm/3%.

Keywords: SRS MapCHECK; semiconductor array; CyberKnife; spine clinical plan; dose verification; gamma passing rate

前言

恶性肿瘤病情的恶化通常伴随着肿瘤骨转移, 在乳腺癌、肺癌、前列腺癌等恶性肿瘤中, 骨转移的

发生率高达 80%, 其中脊柱是恶性肿瘤骨转移的常见部位, 约占 50%^[1]。脊柱转移瘤的患者通常疼痛感明显, 严重者会有运动障碍, 对患者生存质量有较大影响。由于脊髓剂量的限制, 常规放射治疗技术难以给予根治剂量, 主要起到缓解脊柱转移瘤患者疼痛的作用。立体定向放射治疗能够形成更加陡峭的剂量分布, 最大程度降低脊髓及周围其它危及器官和正常组织的辐射受量, 从而兼具更好的疗效和更小的副反应^[2-3]。射波刀是非常适合于脊柱部位治疗的立体定向放射治疗设备, 其定位系统可以根据脊柱

【收稿日期】2021-11-25

【基金项目】国家自然科学基金(12075322); 华中科技大学同济医学院附属协和医院院内科学研究(02.03.2018-131)

【作者简介】祝小惠, 硕士, 主管技师, 研究方向: 放射治疗技术, E-mail: zhuxiaohui@hust.edu.cn

【通信作者】杨晶, E-mail: jingy200@hust.edu.cn

骨性结构实时监测治疗靶区位置变化,并通过机器人机械臂对射束方向进行实时调整^[4]。基于射波刀开展的脊柱治疗与常规直线加速器相比技术更加复杂,单次剂量更高,治疗分次少,因此治疗计划的剂量验证工作需更为谨慎细致以确保患者治疗的精准性和安全性。近年来,半导体矩阵电子学设备因其操作便捷,测量结果重复性高等特点,被越来越广泛地应用于放射治疗的剂量验证工作。本文主要介绍一款高空间分辨率的二维半导体矩阵 SRS MapCHECK 用于射波刀脊柱计划剂量验证的研究结果,同时为其它设备使用该矩阵探测器开展剂量验证工作提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 设备

1.1.1 立体定向放射外科系统 研究使用美国 Accuray 公司第五代射波刀系统(CyberKnife VSI)的6 MV 无均整(FFF)光子束,其射束形状为分立的12个尺寸的圆形或十二边形,分别由固定或 Iris 可变准直器限定。

1.1.2 二维半导体矩阵 SRS MapCHECK (Model 1179, Sun Nuclear 公司,美国)二维半导体矩阵(SRS 矩阵),由1013个N型固体二极管探测器交错均匀排列于上下两块印制电路板(PCB),PCB 面对面对齐设计,使上下两层传感器的灵敏区处于同一平面而呈现77 mm×77 mm的探测面积,探测器间的横、纵向间隔均为1.75 mm,对角线方向间隔为2.47 mm。单个二极管探测器面积为0.48 mm×0.48 mm、体积为0.007 mm³、灵敏度约为15 nC/Gy。探测器阵列装载于重1.9 kg的320 mm×105 mm×45 mm聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)中,阵列周围预设有4颗在kV和MV成像下清晰可见的金标,用于射波刀的摆位。

1.1.3 StereoPHAN 模体 StereoPHAN 模体(Model 1255, Sun Nuclear 公司,美国)为顶部半球形的圆筒模体,SRS 矩阵安装于 StereoPHAN 模体圆筒内部的腔体(图1),以开展立体定向放射治疗的剂量验证工作。

1.2 方法

1.2.1 CT扫描及治疗计划系统参数设置 将SRS 矩阵装入 StereoPHAN 模体,使用大孔径CT(Brilliance CT Bigbore, Philips 公司,荷兰)扫描,参数为轴扫层厚0.75 mm,电流400 mA,电压120 kV。将扫描后影像导入射波刀配备的 MultiPlan 5.2 计划系统(TPS),对 StereoPHAN 模体和 SRS 矩阵组成的整套模体设置为1.2 g/cm³的质量密度。

1.2.2 SRS MapCHECK 校准 SRS 矩阵测量射波刀计划前需调用其专用软件 SNC Patient (Version 8.1.1,

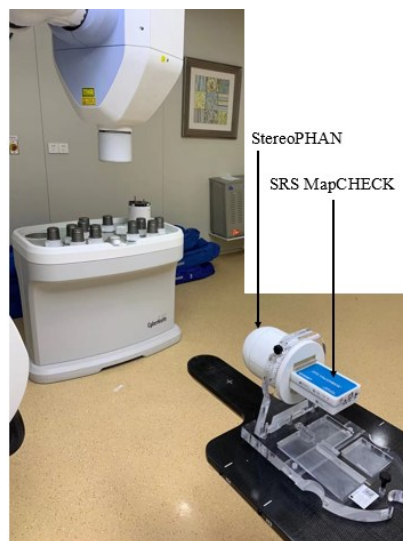


图1 SRS矩阵与 StereoPHAN 模体

Figure 1 SRS MapCHECK array and StereoPHAN phantom

Sun Nuclear 公司,美国)进行阵列和绝对剂量校准。阵列校准包括6 MV 光子束和6 MV FFF 光子束两部分。其中6 MV 光子束基于直线加速器(Trilogy, Varian 公司,美国)进行校准,校准过程已在前期研究中详细叙述^[5]。6 MV FFF 光子束采用射波刀进行校准,利用TPS中基于金标追踪方式的单射束模板,制定射束垂直于SRS 矩阵探测平面的单射束计划。射束大小为固定准直器的60 mm,射束等中心设置为SRS 矩阵探测平面中心探测器(源至探测点距离800 mm),跳数200 MU。调用单射束计划,利用金标图像配准复位SRS 矩阵,垂直照射SRS 矩阵正面。由于射波刀治疗头无法移动至治疗床下方从SRS 矩阵反面照射,因此调用相同的单射束计划,在出束照射前,将SRS 矩阵在 StereoPHAN 模体固定不动的情况下翻转180°,垂直照射SRS 矩阵反面。对SRS 矩阵正、反面的两次照射补充了阵列校准6 MV FFF 光子束部分所需要的数据。绝对剂量校准时将单射束计划的跳数改为100 MU后另存为绝对剂量校准计划,调用SNC 软件绝对剂量校准程序,射波刀执行绝对剂量校准计划后,将TPS 计算出的SRS 矩阵探测平面中心剂量值(77.89 cGy)输入SNC 软件完成校准。

1.2.3 单射束和脊柱质量保证(Quality Assurance, QA)计划的制定及剂量验证 单射束测试计划同绝对剂量校准计划,在保持射束方向及跳数不变的情况下,通过更改准直器类型及尺寸,另存为单射束测试计划,包括12种尺寸(5~60 mm)的固定准直器和11种尺寸(7.5~60 mm)的 Iris 可变准直器(5 mm 被限制单独选择用于制定计划)。脊柱QA 计划基于17例已行射波刀脊柱治疗的临床计划生成,靶区体积范围10.5~119.0 cm³,平均体积(42.6±27.5) cm³。如图2

所示,通过计划影像中心重合的方法,将患者计划映射至SRS矩阵,此时射束数量、方向、跳数均保持一致,重新高精度剂量计算,获得脊柱临床计划施照于SRS矩阵的剂量分布,保存为脊柱QA计划。射波刀

执行以上制定的计划,由SNC软件实时记录剂量测量结果,计划执行结束后将TPS计算的剂量分布(剂量文件DICOM RT Dose)导入SNC软件进行剂量对比分析,见图3。

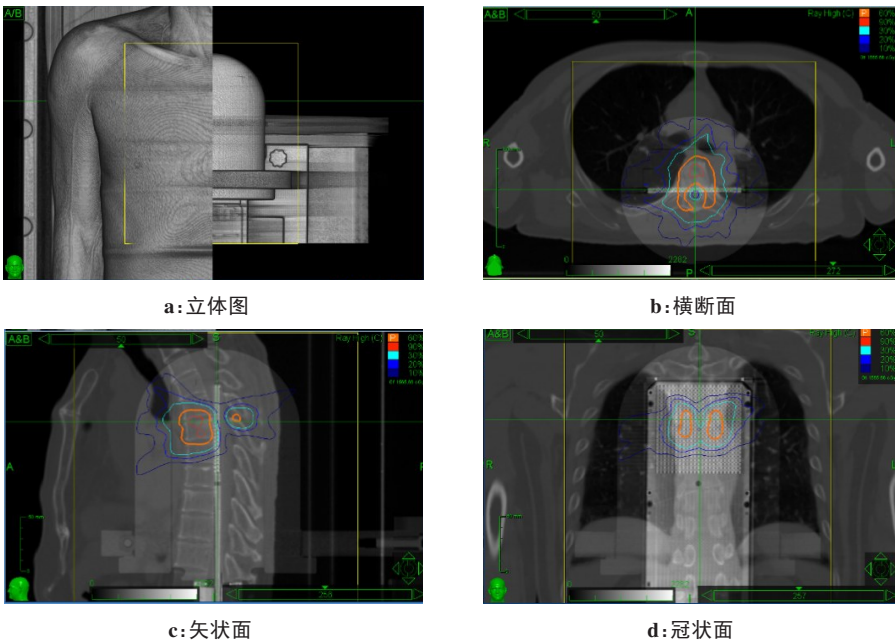


图2 射波刀脊柱计划映射至SRS矩阵的QA计划

Figure 2 QA plan based on spine CyberKnife plan mapping to SRS MapCHECK

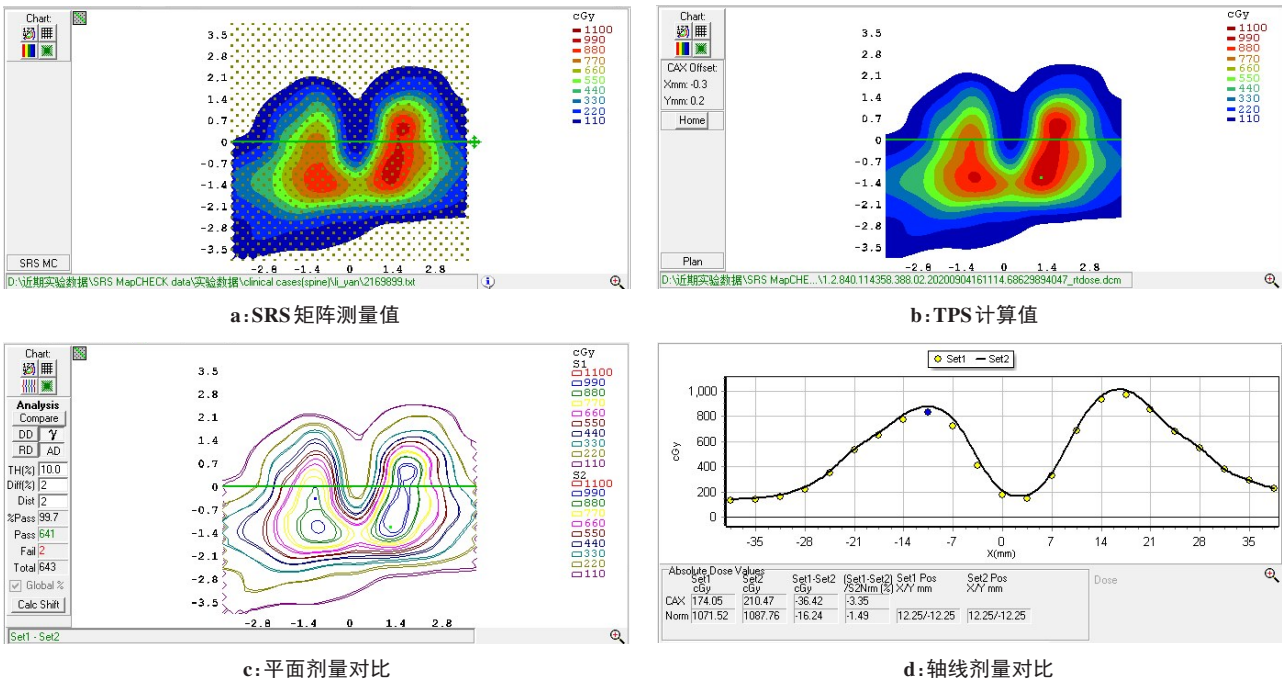


图3 TPS计算与SRS矩阵测量的二维剂量分布比较

Figure 3 Comparison of two-dimensional dose profiles between TPS calculations and SRS MapCHECK measurements

1.2.4 分析方法 采用 γ 分析方法^[6],分别在2 mm/5%、2 mm/3%和2 mm/2%的标准下,设置10%的低剂量阈值,对单射束和脊柱QA计划进行绝对剂量(AD)分析。

对于测量点 r_M , $\gamma(r_M)$ 定义为:

$$\gamma(r_M) = \min \Gamma(r_M, r_R) \tag{1}$$

其中,

$$\Gamma(r_M, r_R) = \sqrt{\frac{(r_M - r_R)^2}{\Delta r^2} + \frac{[D_M(r_M) - D_R(r_R)]^2}{\Delta D^2}} \quad (2)$$

其中, $D_M(r_M)$ 和 $D_R(r_R)$ 分别为测量点 r_M 和参考点 r_R 处的剂量相对参考分布最大剂量的归一值, Δr 和 ΔD 分别为 γ 分析的距离吻合 (Distance-to-Agreement, DTA) 和剂量百分差异 (Dose Percent Difference, DD) 标准。对于每个测量点 r_M , 其与参考分布上的所有点均会计算出相应的 Γ , 其中最小值为测量点 r_M 的 γ 指数, γ 指数 ≤ 1 即

为通过, γ 指数通过的测量点数与总测量点数的百分比即为 γ 通过率。

2 结果

2.1 单射束 QA 计划

12 个尺寸的固定准直器和 11 个尺寸的 Iris 可变准直器单射束 QA 计划在 2 mm/5%、2 mm/3% 和 2 mm/2% 标准下的 γ 通过率均为 100.0%。图 4 为 5、60 mm 固定准直器和 7.5、60 mm Iris 可变准直器单射束 QA 计划的 TPS 计算与实测剂量分布叠加对比结果。

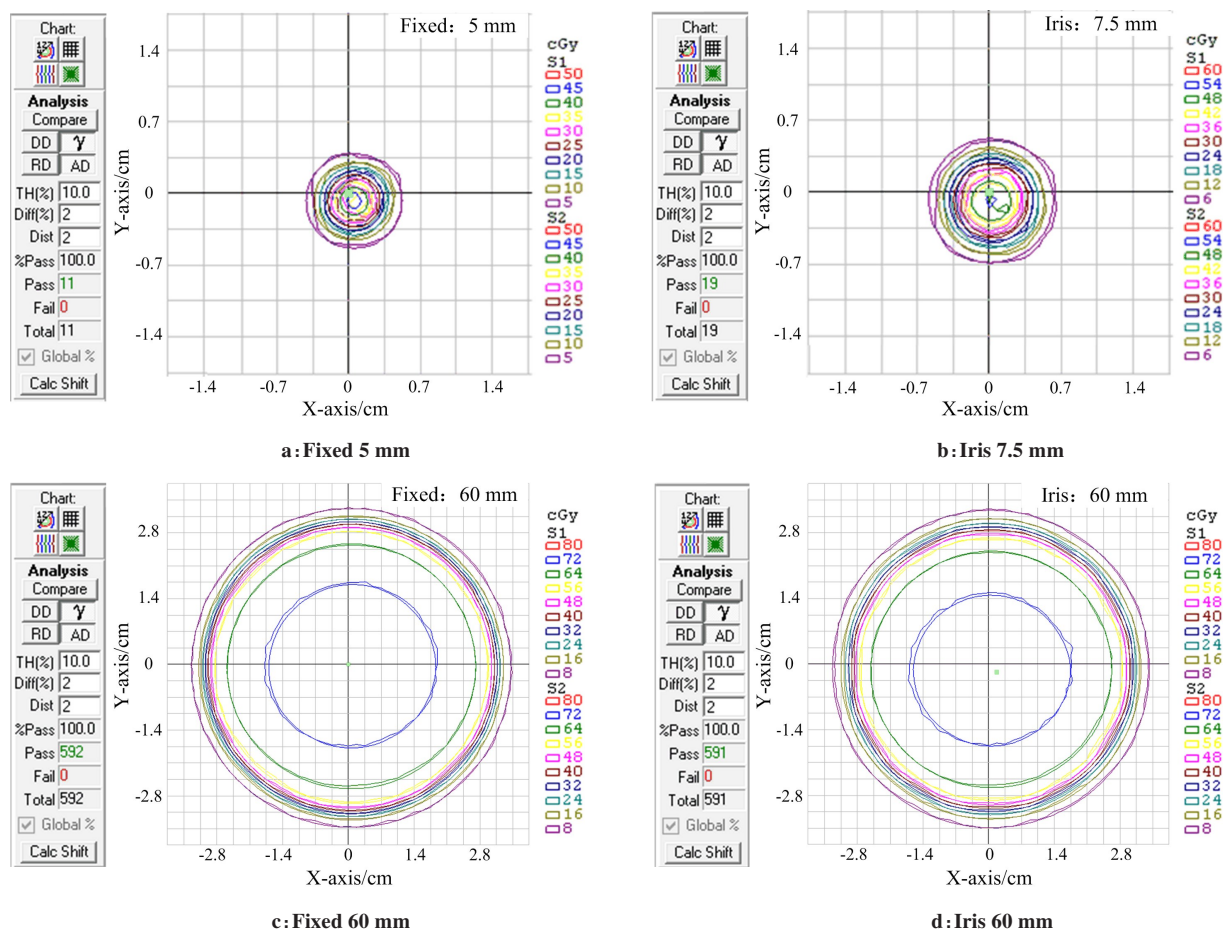


图4 不同准直器 TPS 计算与 SRS 矩阵测量的单射束 QA 计划剂量叠加

Figure 4 Dose overlays between TPS calculations and SRS MapCHECK measurements for single-beam QA plans delivered by different collimators

2.2 临床脊柱病例的 QA 计划

如表 1 所示, 临床脊柱病例 QA 计划 AD 分析模式下 2 mm/5%、2 mm/3% 和 2 mm/2% 标准的平均 γ 通过率分别为 (99.3 \pm 1.2)%、(96.5 \pm 2.7)% 和 (93.5 \pm 5.3)%。

3 讨论

射波刀因其治疗技术相对传统加速器更为复杂, 其 QA 项目也更多, 涉及机器人和治疗室安全、加速器、影像子系统、计划系统等方面, 其中端到端

(End-to-End, E2E) 测试能够验证机器靶区定位照射总体精度, 通常用于患者治疗前的最终测试项目, 而基于患者临床计划的剂量验证工作常常未被提及。美国医学物理学家协会 (AAPM) 在 TG-135 报告中提出由于 E2E 测试缺乏靶区治疗剂量的总体精度信息, 建议基于模体定期选择每个追踪治疗模式最初的个别患者计划开展剂量验证工作^[7]。相对于传统剂量验证工作中使用的辐射自显影胶片, 半导体矩阵电子学设备具有操作便捷, 测量重复性高和测量成本

表1 射波刀临床脊柱病例QA计划 γ 通过率
Table 1 Gamma passing rates of QA plans for spine CyberKnife plans

计划	PTV 体积/cm ³	准直器尺寸/mm	射束数量	γ 通过率/%		
				2 mm/5%	2 mm/3%	2 mm/2%
1	10.5	10, 20	135	100.0	100.0	100.0
2	12.9	10, 15, 25	166	99.7	97.3	96.2
3	16.3	10, 20	166	99.1	98.3	97.1
4	17.8	10, 20, 30	144	100.0	99.9	99.5
5	21.0	12.5, 20	177	96.8	92.9	91.0
6	27.0	10, 20, 30	131	100.0	100.0	99.7
7	28.0	12.5, 20	188	95.7	91.5	90.3
8	31.1	10, 20, 40	164	100.0	99.6	99.0
9	34.8	15, 25	222	98.8	92.6	86.1
10	45.5	12.5, 30	218	99.4	94.9	87.7
11	49.4	12.5, 30	196	100.0	94.5	91.7
12	51.9	15, 30	229	99.6	97.0	95.2
13	55.4	12.5, 25, 40	219	99.9	97.4	93.5
14	58.8	15, 25, 40	172	99.0	92.8	80.0
15	60.2	10, 20, 35	198	100.0	97.7	96.3
16	85.1	25, 30	197	100.0	97.6	92.1
17	119.0	20, 35, 50	180	100.0	97.3	93.5
平均值±标准差	42.6±27.5	-	182.5±29.1	99.3±1.2	96.5±2.7	93.5±5.3

低的特点。本研究基于空间高分辨率的SRS矩阵开展射波刀计划剂量验证工作,病例选择脊柱计划,主要考虑到其是靶区剂量与危及器官限量矛盾的充分凸显,相对常规颅内或肺部计划更为复杂,有利于充分测试SRS矩阵性能。

表1中,所选脊柱病例的计划设计采用了TPS中自动选择2个或3个准直器尺寸的功能,研究表明基于2个或3个准直器尺寸制定脊柱计划的计划质量没有统计学差异^[8],临床实践中,选择3个准直器(增加了一个中等尺寸的准直器),有利于提高复杂靶区的计划优化效率。脊柱病例的QA计划是临床计划中上百个射束在照射方向和跳数不变的前提下对于SRS矩阵的真实复合(True Composite, TC)投照,这也是AAPM在TG-218报告中推荐的患者计划剂量验证方式^[9]。但就针对射波刀计划剂量验证的DTA/DD标准目前世界范围内仍没有共识,仅能参照已发布的相关指南和报告,加拿大医学物理学家组织(COMP)制定的射波刀技术质控指南分别推荐5%/2 mm和5%/3 mm作为静态和动态计划剂量验证标准^[10];TG-218报告推荐调强相关联放疗技术剂量验证标准为3%/2 mm^[9];TG-135报告分别推荐2%/2 mm和3%/3 mm作为射波刀静态和动态计划剂

量验证标准^[7]。以上参考中,计划可执行阈值都推荐为剂量验证 γ 通过率>90%。

本研究纳入了多方推荐, γ 分析结果表明基于固定准直器或Iris可变准直器的单射束QA计划在所推荐的5%/2 mm、3%/2 mm和2%/2 mm标准下,通过率均为100%,这为后续更为复杂的TC脊柱病例QA计划剂量验证提供了基准。因为复合射束QA计划的测量可能将好的和不好的单射束剂量分布平均在一起,掩盖潜在误差,而完美的单射束QA计划分析结果可以排除单射束剂量分布误差的影响。脊柱病例QA计划在所推荐各DTA/DD标准下平均 γ 通过率分别为(99.3±1.2)%、(96.5±2.7)%和(93.5±5.3)%。整体均值满足 γ 通过率>90%的计划可执行条件,但在2%/2 mm标准下出现3例<90%的情况(病例9、10和14),这是由于DD标准趋于严格后剂量百分误差检测能力增强的结果,这正是COMP指南与AAPM TG-135报告的分歧点。为探究使用更严格的DD分析是否必要,我们仔细审查了这3例计划的验证结果,发现不通过的测量点主要集中在高剂量区(对应于靶区以内),对于本单位的常规射波刀脊柱计划,处方剂量选取为计划最大剂量的60%~70%范围内,靶区内剂量远超处方剂量,而这部分剂量即使误差

超过5%,也不会导致靶区欠量,因此认为对于本单位剂量验证工作更倾向于COMP指南。另一方面,基于SRS矩阵在传统C型臂加速器上开展的剂量验证结果,在更严格的2%/1 mm标准下获得(97.2±1.3)%的 γ 通过率,同时验证了其与胶片的等效性^[11]。探讨本研究未达到相同水平的 γ 通过率的原因:一方面可能归结于射波刀技术固有的复杂性,较复杂的射束方向(非等中心/非共面/近全空间入射角度),较多的射束数(182.5±29.1)和较长的单次治疗时间(30~50 min);另一方面由于半导体探测器响应受剂量率、温度、射束入射角度和射束能量影响^[12-17],SRS矩阵的半导体响应校正技术可能还无法完全满足2%/2 mm及更高标准下的射波刀计划剂量验证工作。为更深入探讨在特定DTA/DD标准下的 γ 通过率阈值,有待于开展SRS矩阵用于射波刀脊柱计划剂量验证的敏感性和特异性研究^[18-21]。

综上所述,射波刀技术较常规加速器放射治疗技术更为复杂,其剂量验证设备的选择须经过充分测试。SRS矩阵在COMP指南推荐的2 mm/5%以及AAPM TG-218报告推荐的2 mm/3% γ 分析标准下适合用于便捷开展基于固定或Iris可变准直器的射波刀系统脊柱计划剂量验证工作。在AAPM TG-135推荐的2 mm/2%及更严格 γ 分析标准下SRS矩阵的适用性有待更深入研究。

【参考文献】

- [1] KLIMO P J, SCHMIDT M H. Surgical management of spinal metastases[J]. *Oncologist*, 2004, 9(2): 188-196.
- [2] BAUMAN G, CHARETTE M, REID R, et al. Radiopharmaceuticals for the palliation of painful bone metastasis-a systemic review[J]. *Radiother Oncol*, 2005, 75(3): 258-270.
- [3] BENZIL D L, SABOORI M, MOGILNER A Y, et al. Safety and efficacy of stereotactic radiosurgery for tumors of the spine[J]. *J Neurosurg*, 2004, 101(Suppl 3): 413-418.
- [4] 王晓光, 刘群, 袁智勇, 等. CyberKnife 治疗脊柱脊髓肿瘤的初步观察[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2008, 17(4): 317-318.
WANG X G, LIU Q, YUAN Z Y, et al. Primary observation on the treatment of spinal cord tumor with CyberKnife[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2008, 17(4): 317-318.
- [5] 杨晶, 梁志文, 刘洪源, 等. SRS MapCHECK 半导体矩阵探测器的校准及临床计划质量保证应用[J]. *中国医学装备*, 2020, 17(6): 29-33.
YANG J, LIANG Z W, LIU H Y, et al. Calibration and assessment of the SRS MapCHECK diode matrix detector and the application of clinical treatment plan QA[J]. *China Medical Equipment*, 2020, 17(6): 29-33.
- [6] LOW D A, HARMS W B, MUTIC S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions[J]. *Med Phys*, 1998, 25(5): 656-661.
- [7] DIETERICH S, CAVEDON C, CHUANG C F, et al. Report of AAPM TG 135: quality assurance for robotic radiosurgery[J]. *Med Phys*, 2011, 38(6): 2914-2936.
- [8] 王小深, 鞠忠建, 解传滨, 等. 射波刀准直器个数对脊柱转移瘤放疗计划的影响[J]. *中国医学物理学杂志*, 2016, 33(2): 195-197.
WANG X S, JU Z J, XIE C B, et al. Effects of number of collimators on CyberKnife radiotherapy for spinal metastatic tumor[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2016, 33(2): 195-197.
- [9] MIFTEN M, OLCH A, MIHAILIDIS D, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM Task Group No. 218[J]. *Med Phys*, 2018, 45(4): e53-e83.
- [10] VANDERVOORT E, PATROCINIO H, CHOW T, et al. COMP Report: CPQR technical quality control guidelines for CyberKnife® technology[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(2): 29-34.
- [11] AHMED S, ZHANG G, MOROS E G, et al. Comprehensive evaluation of the high-resolution diode array for SRS dosimetry[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(10): 13-23.
- [12] FENWICK J D, KUMAR S, SCOTT A J, et al. Using cavity theory to describe the dependence on detector density of dosimeter response in non-equilibrium small fields[J]. *Phys Med Biol*, 2013, 58(9): 2901-2923.
- [13] LECHNER W. Detector comparison for small field output factor measurements in flattening filter free photon beams[J]. *Radiother Oncol*, 2013, 109(3): 356-360.
- [14] WEGENER S, SAUER O A. Energy response corrections for profile measurements using a combination of different detector types[J]. *Med Phys*, 2018, 45(2): 898-907.
- [15] YARAHMADI M, WEGENER S, SAUER O A. Energy and field size dependence of a silicon diode designed for small-field dosimetry[J]. *Med Phys*, 2017, 44(5): 1958-1964.
- [16] SAUER O A, WILBERT J. Measurement of output factors for small photon beams[J]. *Med Phys*, 2007, 34(6): 1983-1988.
- [17] FRANCESCO P, KILBY W, SATARIANO N, et al. Monte Carlo simulated correction factors for machine specific reference field dose calibration and output factor measurements using fixed and iris collimators on the Cyberknife system[J]. *Phys Med Biol*, 2012, 57(12): 3741-3758.
- [18] 闫慧芳, 刘洪源, 杨志勇, 等. 基于日志文件分析PerFRACTION系统的敏感度和特异度[J]. *中国医学物理学杂志*, 2021, 38(4): 404-410.
YAN H F, LIU H Y, YANG Z Y, et al. Analysis of sensitivity and specificity of PerFRACTION system based on log files[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2021, 38(4): 404-410.
- [19] MARCO C, CHARMAINNE C, ALEJANDRA R, et al. ROC analysis in patient specific quality assurance[J]. *Med Phys*, 2013, 40(4): 042103.
- [20] BANOS-CAPILLA M C, LAGO-MARTIN J D, GIL P, et al. Sensitivity and specificity analysis of 2D small field measurement array: patient-specific quality assurance of small target treatments and spatially fractionated radiotherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2021, 22(10): 104-119.
- [21] MCKENZIE E M, BALTER P A, STINGO F C, et al. Toward optimizing patient-specific IMRT QA techniques in the accurate detection of dosimetrically acceptable and unacceptable patient plans[J]. *Med Phys*, 2014, 41(12): 121702.

(编辑:薛泽玲)