

新型闪烁凝胶三维剂量测量装置的 临床研究

李 华^{1,3,*}, 何 良^{1,2,3}, 靳海晶^{1,3}, 闫学文^{1,3}, 张 辉^{1,3}, 芦 莹⁴, 庞国宝⁴

(1. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006; 2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084;

3. 核药研发转化与精准防护山西省重点实验室, 山西 太原 030006;

4. 山西白求恩医院(山西医学科学院), 山西 太原 030032)

摘要: 放射治疗是癌症治疗的常用手段, 剂量验证是放疗计划质量控制的关键。基于电离室等探测器的传统剂量验证方法已很难满足精准放射治疗技术发展对三维剂量验证的需求。结合新型闪烁凝胶材料, 使用三正交视角排布的光学相机测量硬件, 以及基于全变分最小绝对收缩选择算子(LASSO-TV)的三维剂量重建算法, 研制了一套放疗三维剂量测量装置, 并对其进行了临床实验研究。结果表明: 在立体定向放疗(SBRT)单野照射情况下, 与治疗计划系统 TPS 计算值对比, 冠状面、横断面、矢状面的 γ 通过率(3 mm/3%)均在 90% 以上; 与 MapCHECK2 测量值相比, 剂量相对误差小于 5%, 满足 ICRU 对临床剂量测量的要求。研制的三维剂量测量装置可为精准放疗的三维剂量验证提供技术手段。

关键词: 闪烁凝胶; 三维剂量; 剂量验证; 放疗质控

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2023)S1-0263-08

doi: 10. 7538/yzk. 2023. youxian. 0170

Experimental Study on New Scintillation Gel 3D Dose Measuring Device

LI Hua^{1,3,*}, HE Liang^{1,2,3}, JIN Haijing^{1,3}, YAN Xuewen^{1,3},

ZHANG Hui^{1,3}, LU Ying⁴, PANG Guobao⁴

(1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Shanxi Provincial Key Laboratory for Translational Nuclear

Medicine and Precision Protection, Taiyuan 030006, China;

4. Shanxi Bethune Hospital (Shanxi Academy of Medical Sciences), Taiyuan 030032, China)

Abstract: Radiotherapy is a widely used method of cancer treatment, and quality control of radiotherapy plans relies heavily on dose verification. Traditional dose verification methods, such as ionization chambers, cannot provide high spatial resolution for 3D dose verification in the required volumes. This creates difficulties in meeting the requirements for 3D dose verification in precise dynamic radiotherapy techniques, such as IMRT, VMAT, and SBRT. In this paper, a scintillation gel-based detector was

proposed as a novel solution for 3D dose verification in radiotherapy. The scintillation gel material has good properties suitable for dose measurement, including photonic soft tissue equivalence, high luminescence intensity, good dose linearity and energy response, high irradiation endurance ($>1\ 000\ \text{Gy}$), and no dose rate dependence. In addition, the material's pliability makes it a promising candidate for functional physical organ phantoms. Then, a rapid measurement device for 3D dose distribution in radiotherapy was developed, including the novel scintillation gel and a 3D optical measurement system. The 3D optical measurement system hardware consists of cameras positioned in three orthogonal views, lenses, optical mounts, reflectors, calibration boards, a light shield, and a computer. The 3D optical measurement system software includes optical simulation, image acquisition, and data processing modules. The optical simulation module uses ZEMAX software to compute the system response matrix, describe light propagation from the scintillator to the camera, and create the dose equation. The image acquisition module was implemented using MVS software. Data processing was achieved using a MATLAB-based in-house program called Gel3Ddose for data loading, image preprocessing, equation solving, detector calibration, and result analysis, which proposed the LASSO-TV model for dose equation solving. The LASSO-TV model performs total variation minimization, non-negative constraint, and noise suppression during the iterative process. The newly developed rapid 3D dose distribution measurement device was validated in clinical experiments using the Elekta Synergy linear accelerator at Shanxi Bethune Hospital. The high-resolution measurement of the 3D dose distribution inside the scintillator was achieved, and the results were compared and analyzed with the calculation data of the treatment planning system (TPS) and the measurement data of the 2D ionization chamber (MapCHECK2). The results show that in SBRT single beam irradiation, the gamma pass rate (3 mm/3%) for coronal, transverse and sagittal planes based on the treatment planning system calculation is above 90%. The dose relative error compared to the dose measured by MapCHECK2 is less than 5%, meeting the clinical dose measurement requirements set by ICRU. The developed 3D dose measurement device can provide a technical means for 3D dose verification of precision radiotherapy.

Key words: scintillation gel; 3D dose; dose verification; radiotherapy quality control

放射治疗是恶性肿瘤治疗的常用手段。根据世界卫生组织(WHO)统计资料显示,45%的恶性肿瘤患者可以被治愈,其中手术治疗占比22%,放射治疗占比18%,化学药物治疗占比5%^[1]。随着计算机技术和影像科技的发展,三维适形放射治疗(3D-CRT)、调强放射治疗(IMRT)、螺旋断层放疗(TOMO)、立体定向放疗(SBRT)等精准放射治疗技术也开始出现并得到广泛应用^[2-5]。例如,立体定向放射治疗采用大分割照射,单次照射剂量高,要求高剂量区的适形性和靶区外剂量的快速跌落。它的实

施需要保证各环节的高精度,其治疗方案的质量控制(QC)与质量保证(QA)也变得相对复杂^[6-7]。治疗前的剂量验证是QA和QC中的关键一环,是判断治疗计划是否准确实施的重要手段^[8]。传统的剂量验证通常采用在选定的点或平面处使用胶片、热释光剂量计(TLD)、二极管和电离室等低取样效率的剂量测量方法^[9],这些方法由于取样点有限,只能提供低分辨率的点剂量或平面剂量验证,无法给出感兴趣区域内高空间分辨率的三维剂量数据,很难满足立体定向放射治疗等精准放疗技术的三维

剂量验证需求。

目前,新型三维剂量验证技术正在开展攻关研究,具有代表性的如聚合物凝胶测量技术^[10]、多探测器阵列测量技术^[11-12]、辐射变色测量技术^[13]、闪烁光测量技术^[14]等。其中,潜力较好的闪烁光测量技术可以实现高分辨率稳定快速的三维剂量测量,具有广泛的应用前景。其原理是使用有机闪烁体材料结合高分辨率光学成像系统对受照后产生的闪烁光进行收集。由于有机闪烁体的光产额与沉积在其体积中的能量呈比例,与所在位置的剂量率和射线自身能量无关。因此,可通过测量闪烁体内的三维光分布重建出三维剂量的分布。本文基于发光性、组织等效性及剂量线性好的新型闪烁凝胶材料^[15],研制三维剂量测量系统装置,并在放疗机上对其进行初步临床实验研究,验证其在解决精准放疗领域三维剂量验证方面的潜力。

1 新型闪烁凝胶材料

本文采用的新型闪烁凝胶材料,具有较好的 γ 软组织等效性、较强的发光性能以及良好的剂量线性,在剂量测量验证领域具有非常好的应用前景^[15]。水是人体主要的组成部分,特别是在肌肉中水含量丰富,因此在临床实践中通常认为水与人体组织是等效的。目前常用的质控设备:三维水箱、固体水等都是用水等效来代替组织等效。所以将新型闪烁凝胶材料用于临床剂量验证时,为了与现有结果对比,可以测试其水等效性。

放疗采用光子能量范围在 MeV 量级,与物质相互作用以康普顿效应为主^[16]。其质量衰减系数取决于电子密度,采用等效电子密度可以用来衡量该材料和水的接近程度。线性衰减系数是用来描述物质对射线衰减程度的物理量,可用于组织等效性评价。临床实践中 CT 值通过线性衰减系数定义为:

$$CT = 1\,000 \cdot \frac{(\mu_t - \mu_w)}{\mu_w} \tag{1}$$

其中: μ_t 为材料的线性衰减系数; μ_w 为水的线性衰减系数;CT 值的单位为 HU,水的 CT 值为 0。

为了测试新型闪烁凝胶材料对比于传统闪

烁体材料在临床上的优势,将其与商用的塑料闪烁体 HND-S2 以及液体闪烁体 ULTIMA GOLD LLT 进行 CT 值及等效电子密度的实验对比。采用飞利浦公司 16 排大孔径 CT(Philips Brilliance Big Bore CT)模拟定位机扫描 3 种不同的样品,取闪烁体中间截面的 CT 图像计算平均 CT 值及等效电子密度(表 1)。数据显示:新型闪烁凝胶材料的 CT 值更接近于 0,等效电子密度更接近于 1,且与水的电子密度相对差异小于 2%,表明其水等效性较好,可用于临床实验测量。

表 1 不同闪烁体材料 CT 值和等效电子密度对比
Table 1 Comparison of CT value and equivalent electron density of different scintillator materials

材料	CT 值/ HU	等效电子 密度/Ed
塑料闪烁体 HND-S2	-24.2	0.976 8
液体闪烁体 ULTIMA GOLD LLT	-67.0	0.943 0
新型闪烁凝胶	-16.4	0.984 4

2 三维剂量测量系统研发

2.1 剂量重建原理

闪烁凝胶发光机理^[17]与有机分子的电子能级结构有关:分子价电子能级上的电子受入射粒子的激发,使价电子跃迁到高能级,经过短暂时间后退激发到不同的能级上,同时发出荧光,采用光学相机可对荧光进行采集测量。本文采用三维光学测量系统(图 1)进行三维剂量重建,采用了 3 个正交视角分布的相机对闪烁体内的闪烁光成像。闪烁体内的三维剂量分布是由若干个剂量体素构成,每个体素下的剂量数据与该区域产生的光强相关,而光强是由相机传感器记录的,其表现为像素值。对于每个相机,剂量重建方程数学表达式为:

$$p = A \cdot D \tag{2}$$

其中: $p = \{p_j; j \in \{1, \cdots, n\}\}$ 为像素值的向量, n 为所使用相机的传感器像素的数量; $D = \{D_i; i \in \{1, \cdots, m\}\}$ 为三维剂量分布的向量, m 为闪烁体体积中剂量体素的数量; A 为维度为 $n \times m$ 的系统响应矩阵,该系统响应矩阵的每个元素 A_{ji} 表示第 i 个剂量体素对第 j 个像素的贡献。

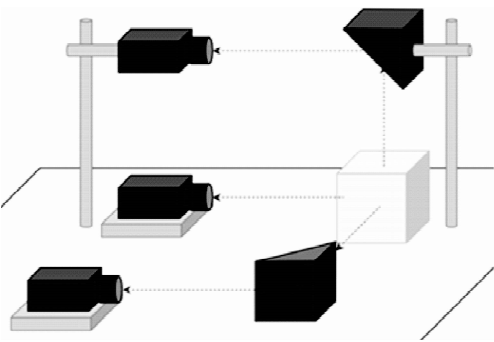


图 1 三维光学测量系统示意图
Fig.1 Schematic diagram
of 3D optical measurement system

2.2 系统响应矩阵求解

系统响应矩阵 A 决定了三维剂量重建系统的精度,本文采用光学软件 ZEMAX 模拟求解系统响应矩阵。ZEMAX 是美国 ZEMAX 公司开发的光学设计优化软件^[18]。ZEMAX 可采用非序列模式进行光线追踪,此模式下任何光线都没有预定义路径,光线射出并投射到光路中的任意物体上可能发生反射、折射、衍射、散射、分裂为子光线等多种物理过程,更接近于真实场景,可用于模拟光在闪烁体中的传播和成像。

采用 ZEMAX OpticStudio15 进行相机系统建模,模拟闪烁光三维测量装置平台所使用的 MVL-KF3528M-12MPE 镜头,焦距 35 mm,镜头畸变 0.02%。输入几何参数,确定光源面与成像面后,可采用成像分析功能进行模拟成像,并使用 ZEMAX 编程语言更改光源面参数进行批量光线追踪采集,模拟 10^6 次光线从相机的不同物平面出发至相平面,得到不同像素对剂量体素的响应,即系统响应矩阵 A 。

2.3 剂量重建方程求解

剂量重建的过程需要求解超定方程组。一般来说,超定方程组无解,需要求出近似解。对于三角度相机进行剂量重建的实际问题,系统响应矩阵稀疏,本文提出 LASSO-TV 模型进行剂量方程求解。LASSO 即最小绝对收缩和选择算子^[19],其基本思想是在回归系数的绝对值之和小于一个常数的约束条件下,使残差平方和最小化,从而产生某些严格等于 0 的回归系数,得到解释力较强的模型,很适用于稀疏重建的情况。同时为了在迭代过程中对噪声进行

抑制,由于剂量分布是连续平滑且非负的,可对重建结果进行全变分(TV)最小化和非负约束,该方法的求解模型表示为:

$$D^\# = \arg \min_{D \geq 0} TV(D) + \beta \|D\|_1 + \frac{1}{2} \|AD - P\|_2^2 \tag{3}$$

其中:TV(D)为 D 的全变分; $\|D\|_1$ 为 D 的 L1 范数; $\|AD - P\|_2$ 为 $AD - P$ 的 L2 范数; α 和 β 为正则化项的相对权重。

2.4 测量系统搭建

三维剂量测量系统由闪烁体和三维光学测量装置组成。闪烁体作为将三维剂量分布转化为三维光分布的探测材料,同时又是射线进行能量沉积的测量模体。对于探测材料而言,闪烁体应当具有较高的发光强度、合适的发射光谱、较短的时间响应、较低的光吸收和光散射程度等;作为测量模体,闪烁体的物理密度和元素组成应与水(医学物理领域的标准测量介质)尽量接近从而具有相似的辐射衰减特性,此外闪烁体还应具有可塑性、使用便捷性等。本测量装置除了可采用闪烁凝胶作为闪烁体外,传统的塑料闪烁体和液体闪烁体也可使用,不同闪烁体材料性能对比列于表 2。

表 2 不同闪烁体材料性能对比
Table 2 Property comparison
of different scintillator materials

材料	发光性	组织等效性	可塑性	便捷性
塑料闪烁体	较好	一般	一般	好
液体闪烁体	好	一般	较好	一般
闪烁凝胶	较好	较好	好	一般

三维剂量测量的实物装置示于图 2,光学测量装置包含:相机(3 个正交视角)、镜头、光学支架、反射镜、标定板、遮光罩、连接线、交换机、计算机。其中相机和镜头可根据成像精度及成像距离进行更换。

配套上述硬件部分,测量系统的软件包括两部分:图像采集软件 MVS 和数据处理软件 Gel3Ddose。本文中采用海康威视配套的 MVS 软件,开启 3 台相机的精准时间协议(PTP)功能,使用软触发实现 3 台相机的同步曝光,触发时间差可控制在 10 ms 量级。完成数据采集

后,采用数据处理软件 Gel3Ddose 处理得到三维剂量分布。Gel3Ddose 基于 MATLAB 开发,该程序包含数据载入、图像预处理、方程求解、剂量刻度、结果分析等功能。数据载入是指载入采集图像和系统响应矩阵,图像预处理主要是图像去噪,方程求解采用 LASSO-TV 模型,剂量刻度是指采用刻度场对方程求解值进行刻度,结果分析是指与临床参考数据进行对比。后续实验中将 10 cm×10 cm×10 cm 剂量重建区域划分为 100×100×100 的空间像素,重建剂量分辨率为 1 mm。采集数据后图像处理可在几分钟内完成,实现三维剂量场快速高分辨测量。

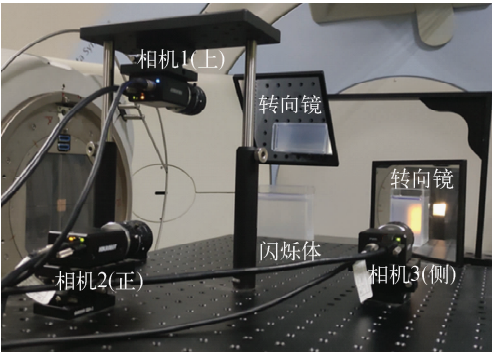


图2 三维剂量测量装置
Fig.2 3D dose measuring device

3 临床实验

为了验证本文提出的新型闪烁凝胶三维剂量测量装置的实用性,依托山西白求恩医院 Synergy 医用电子直线加速器,进行三维剂量测量临床研究。

3.1 评价标准

为了评价三维剂量测量的准确性,需要将本文中的剂量测量装置测量得到的三维剂量分布与治疗计划系统计算得到的评估剂量分布进行比较,同时还需要与二维半导体电离室矩阵测量值进行对比。当前 γ 分析是剂量验证的“金标准”^[20], γ 通过率则是统计 γ 值小于等于 1 的点占有统计比较点的百分比数。本文使用的 γ 通过率评价标准是阈值水平 5%、位置偏差 3 mm、剂量相对偏差 3%。相对误差 δ 的表达式如式(4)所示:

$$\delta = \frac{D_M - D_R}{D_R} \times 100\% \tag{4}$$

其中: D_M 为本文剂量测量装置测量得到的剂量分布; D_R 为 TPS 或者电离室矩阵测量得到的参考剂量分布。其中 TPS 数据由 Monaco 放射治疗计划系统(图 3)得出,实测数据由二维半导体电离室矩阵 MapCHECK2 给出。

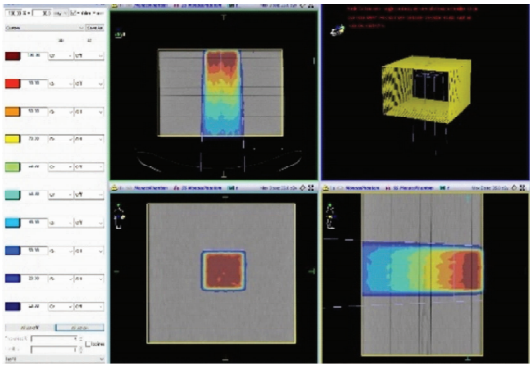


图3 Monaco 放射治疗计划系统
Fig.3 Monaco radiotherapy TPS

3.2 剂量刻度

采用标准光源和光度计标定,归一化 3 个相机的发光响应后进行剂量刻度实验。本文使用 8 cm×8 cm 的方形场均匀射束从上方对闪烁体进行照射,射束强度选取 600 MU/min,共进行 10 次照射,照射时长从 1 s 到 10 s,步长 1 s。每次照射时 3 台相机同步曝光 10 s 采集数据。采用算法求解得到未刻度的剂量分布为 D_0 ,与 TPS 对比时,导出方形场均匀射束的 TPS 计算结果作为参考场剂量 D_{ref} ;与二维半导体电离室矩阵对比时,采用同样照射条件对 MapCHECK2 进行照射并采集数据作为参考场剂量 D_{ref} 。采用中心 5 cm×5 cm 区域取均值进行剂量刻度。闪烁凝胶剂量重建求解值与 TPS 数据刻度结果如图 4 所示。

3.3 剂量验证

剂量验证时采用颅内肿瘤立体定向放疗 (SBRT) 真实病人照射计划中垂直入射的单个子野照射闪烁体样品,并采用该子野射束照射 MapCHECK2 得到实测参考场剂量,导出该子野射束的 TPS 计算结果得到相应的 TPS 计算参考场剂量。图 5 为闪烁凝胶剂量重建结果及与 TPS 计算结果的相对误差。取冠状面(−15.92 cm)、横断面(1.33 cm)、矢状面(−0.40 cm)3 个截面作为与 TPS 计算结

果比较 γ 通过率的区域。TPS 计划分辨率为 1 mm,感兴趣区域为 3 cm 左右,为了更好地显示效果以突出感兴趣区域,图 5 中对 3 个截面中分别取中心 5 cm $\times$ 5 cm 区域,共计 50 $\times$ 50 个剂量点进行剂量显示与相对误差计算。实验结果表明,两者相对误差均小于 5%,符合 ICRU 对剂量测量的要求。

比较不同闪烁体剂量测量值与 TPS 计算结果时,为比较所有剂量重建点的剂量准确性,取最大重建区域 10 cm $\times$ 10 cm,共计 100 $\times$ 100 个剂量点计算 γ 通过率,得到的结果列于表 3。所有截面的 γ 通过率均大于 90%,满足临床实践要求。

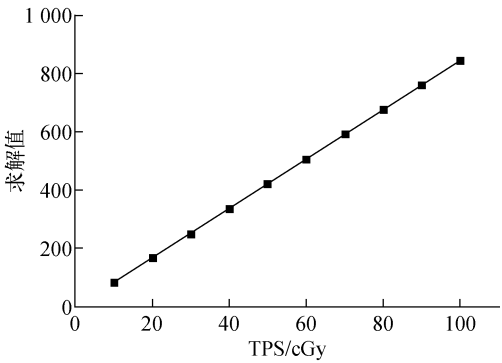


图 4 闪烁凝胶剂量重建求解值与 TPS 数据刻度结果

Fig. 4 Calibration result of scintillation gel dose reconstruction and TPS data

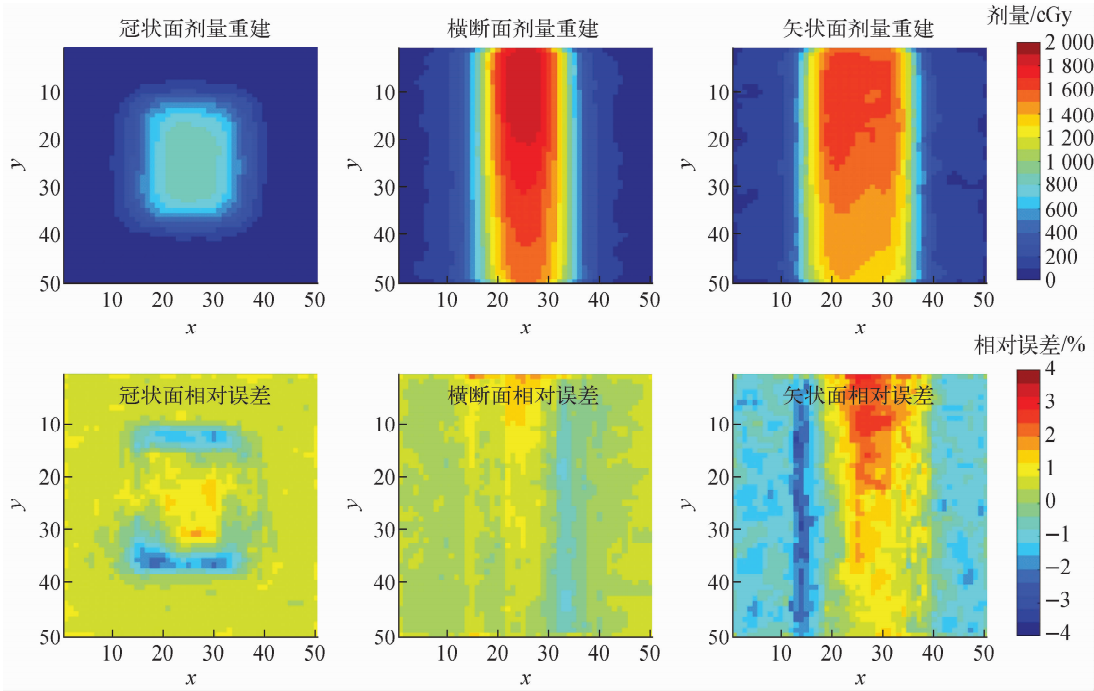


图 5 闪烁凝胶剂量重建结果及与 TPS 计算结果相对误差

Fig. 5 Dose reconstruction result of scintillation gel and relative error with TPS calculation result

表 3 不同闪烁体剂量测量值与 TPS 计算结果比较的 γ 通过率 (3 mm/3%)

材料	γ 通过率/%		
	冠状面	横断面	矢状面
塑料闪烁体	98.68	97.69	94.32
液体闪烁体	98.45	96.58	95.18
闪烁凝胶	98.38	96.73	94.57

表 4 列出了不同闪烁体剂量测量值与 MapCHECK2 测量值对比。与 MapCHECK2 实测参考场剂量对比时,取冠状面数据,剂量阈值 5%,平均相对误差 $\bar{\delta}$ 为阈值范围内所有点相对误差 δ 绝对值的平均,最大相对误差 δ_m 为阈值范围内所有点相对误差 δ 的最大值。MapCHECK2 进行采样时探测间距为 0.707 cm,所以对比时需要将剂量测量值进行抽样,选取最近的剂量点进行相对误差计算。

实验结果表明,最大相对误差 δ_m 小于 5%,符合 ICRU 对剂量测量的要求。

表 4 不同闪烁体剂量测量值与 MapCHECK2 测量值对比
Table 4 Comparison between different scintillator dose measurement and MapCHECK2 measurement

材料	平均相对 误差 $\bar{\delta}/\%$	最大相对 误差 $\delta_m/\%$
塑料闪烁体	1.31	3.25
液体闪烁体	1.36	3.47
闪烁凝胶	1.41	3.38

取冠状面中线的 50 个剂量点进行对比分析(图 6),可看到闪烁凝胶剂量测量数据和 TPS 计算数据、MapCHECK2 测量数据误差都较小,与 MapCHECK2 这种测量方式相比,分辨率优势明显。结果表明新型闪烁凝胶三维剂量测量装置具有较大的应用潜力。

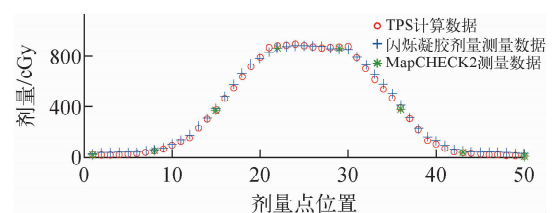


图 6 闪烁凝胶剂量重建结果
及 MapCHECK2 测量结果

Fig. 6 Dose reconstruction result of scintillation gel and MapCHECK2 measurement result

3.4 结果分析

新型闪烁凝胶、塑料闪烁体、液体闪烁体 3 种闪烁体材料测量结果相近,验证了闪烁凝胶材料的实用性。SBRT 单子野照射情况下,新型闪烁凝胶三维剂量测量装置可在单次测量时快速得到三维剂量分布,且与 TPS 计算数据及 MapCHECK2 测量数据相比误差较小,符合临床剂量验证需求。

但目前对于多角度照射的复杂情况,还需要进行进一步的研究。因为高速带电粒子在非真空的透明介质中穿行,当粒子速度大于光在这种介质中的相速度时,会产生切伦科夫辐射^[21],本实验中,射束由上往下垂直入射,该方

向的切伦科夫光不会被相机收集,这种情况下切伦科夫辐射对测量结果没有影响。但在临床实际中,射束是多个角度入射,切伦科夫光会在特定角度影响到闪烁光的收集,进行剂量重建时需要考虑切伦科夫光的矫正。同时,三维测量装置中光学平板和支架采用铝合金材料,如果射线从平板穿过时会受到衰减而引入误差。后续可改进测量系统结构和材料设计,尽可能减小测量装置带来的误差。

4 结论

本文结合新型闪烁凝胶材料,使用三正交视角排布的光学相机测量硬件,以及基于全变分最小绝对收缩选择算子(LASSO-TV)的三维剂量重建算法,研制了用于放疗的三维剂量测量装置,并进行了临床实验研究。通过 CT 扫描数据可知,所采用的新型闪烁凝胶材料水等效性好,CT 值和等效电子密度比商用液体闪烁体和塑料闪烁体更接近于水。同时,闪烁凝胶的可塑性强,可有望塑形为人体仿真器官模型,实现更准确的剂量测量,具有较好的临床应用前景。三维剂量测量装置初步的临床实验表明,在 SBRT 单射野照射情况下,测量结果与 TPS 计算数据对比,冠状面、横断面、矢状面的 γ 通过率(3 mm/3%)均在 90% 以上;与 MapCHECK2 测量值相比,剂量相对误差小于 5%,满足 ICRU 对临床剂量测量要求。对比传统测量手段,采用新型闪烁凝胶三维剂量测量装置进行剂量测量分辨率优势明显,更适用于精准放疗中剂量梯度变化陡峭的情形,可为精准放疗的三维剂量验证提供技术支持,具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 陈勇,包尚联,黄斐增,等. HW-Plan 放射治疗计划系统的实验验证[J]. 中国医学物理学杂志, 2005(6):691-694.
CHEN Yong, BAO Shanglian, HUANG Fei-zeng, et al. Experimental verification of HW-plan treatment planing system[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2005 (6): 691-694 (in Chinese).
[2] 朱煜和,易忠诚,肖明勇. 放射治疗剂量验证的现状 & 进展[J]. 生物医学工程学杂志,2013,30

- (6); 1 358-1 361.
- ZHU Yuhe, YI Zhongcheng, XIAO Mingyong, et al. Present situation and progress of dose verification in radiotherapy[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2013, 30(6): 1 358-1 361(in Chinese).
- [3] 王文,程梦云,杨琪,等. 基于 MCNP 源子程序的放射治疗剂量计算验证方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(1): 13-16.
- WANG Wen, CHENG Mengyun, YANG Qi, et al. A dose verification method based on MCNP source subroutine for radiotherapy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2015, 32(1): 13-16 (in Chinese).
- [4] GOTSTEDT J, HAUER A K, BACK A. Complexity metric as a complement to measurement based IMRT/VMAT patient-specific QA[J]. Journal of Physics, 2015, 573: 012016.
- [5] YOUNG T, XING A. Sensitivity of collapsed arc QA method for delivery errors in volumetric modulated arc therapy (VMAT)[J]. Journal of Physics, 2015, 573: 012021.
- [6] MALICKI J. The importance of accurate treatment planning, delivery, and dose verification [J]. Reports of Practical Oncology and Radiotherapy, 2012, 17(2): 63-65.
- [7] IBBOTT G S. QA in radiation therapy: The RPC perspective[J]. Journal of Physics, 2010, 250: 012001.
- [8] POGUE B W, GLASER A K, ZHANG R X, et al. Cherenkov radiation dosimetry in water tanks-video rate imaging, tomography and IMRT & VMAT plan verification[J]. Journal of Physics, 2015, 573: 012013.
- [9] 昌胜. 放射治疗计划系统独立剂量验证的发展[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36(10): 790-796.
- CHANG Sheng. Development of the independent dose verification for treatment planning system in radiotherapy[J]. Chin J Radiol Med Prot, 2016, 36(10): 790-796(in Chinese).
- [10] BALDOCK C. Polymer gel dosimetry[J]. Med Biol, 2010, 55: 1-63.
- [11] LOW D. The importance of 3D dosimetry[J]. Journal of Physics, 2015, 573: 012009.
- [12] BACK A. Quasi 3D dosimetry (EPID, conventional 2D/3D detector matrices) [J]. Journal of Physics, 2015, 573: 012012.
- [13] OLDHAM M. Radiochromic 3D detectors [J]. Journal of Physics, 2015, 573: 012006.
- [14] BEDDAR S. Real-time volumetric scintillation dosimetry[J]. Journal of Physics, 2015, 573: 012005.
- [15] 闫学文,薛大海,李华,等. 用于放疗剂量测量的新型闪烁凝胶材料研制与优化[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(增刊): 414-421.
- YAN Xuewen, XUE Daha, LI Hua, et al. Development and optimization of new scintillation gel material for radiotherapy dose measurement[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(Suppl.): 414-421(in Chinese).
- [16] 陈伯显,张智. 核辐射物理及探测学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- [17] BEDDAR S, BEAULMIEU L. Scintillation dosimetry[M]. USA: CRC Press, 2016.
- [18] 林晓阳. ZEMAX 光学设计超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
- [19] DAUBECHIES I, DEFRISE M, De MOL C. An iterative thresholding algorithm for linear inverse problems with a sparsity constraint[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics: A Journal Issued by the Courant Institute of Mathematical Sciences, 2004, 57(11): 1 413-1 457.
- [20] 苗利,孙彦泽,李新民. 放射治疗剂量验证中常用剂量分布比较方法及分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2012, 30(4): 247-251.
- MIAO Li, SUN Yanze, LI Xinmin, et al. Analysis of the most commonly used dose distribution comparison methods in radiotherapy dosimetric verification[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2012, 30(4): 247-251 (in Chinese).
- [21] JELLEY J V. Cerenkov radiation and its applications[J]. British Journal of Applied Physics, 1958, 6(7): 227-232.