

6 MV 光子束放射治疗中发泡胶的剂量学影响

李师, 罗焕丽, 谭霞, 蒙万里, 李博, 李广, 申正文, 钟明松, 王颖, 靳富
重庆大学附属肿瘤医院肿瘤放射治疗中心, 重庆 400030

【摘要】目的:评估发泡胶在6 MV光子束放疗中的剂量学影响。**方法:**制作10块2 cm厚的发泡胶模体, 获取CT影像、导入放疗计划系统(TPS), 计算其平均线性衰减系数, 并用电离室进行测量验证。在固体等效水上表面叠加上述模体成2、4、6、8、10 cm厚度, 计算并测量不同厚度发泡胶的剂量学影响。随机选取8例由发泡胶辅助固定的鼻咽癌患者, 制定9野均分调强计划, 分别计算包含与不包含发泡胶的剂量分布。**结果:**TPS计算得到的平均线性衰减系数为 $0.16 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ 。发泡胶厚度 $>4 \text{ cm}$ 时, γ 通过率($1\%/1 \text{ mm}$) $<90\%$, 且厚度越厚通过率越低。相较于剂量跌落区, 发泡胶对剂量建成区的影响更大, 仅加入2 cm发泡胶时, 表面剂量由16.22%增加到63.73%。发泡胶使靶区PTVnd+nx、PTV1、PTV2的平均剂量分别从 $(72.61 \pm 0.98) \text{ Gy}$ 减少到 $(72.12 \pm 1.00) \text{ Gy}$ 、 $(69.11 \pm 0.79) \text{ Gy}$ 减少到 $(68.72 \pm 0.77) \text{ Gy}$ 、 $(62.61 \pm 1.04) \text{ Gy}$ 减少到 $(62.22 \pm 1.03) \text{ Gy}$, 100%处方剂量靶区覆盖率分别从 $0.97\% \pm 0.01\%$ 降低到 $0.95\% \pm 0.03\%$ 、 $0.98\% \pm 0.01\%$ 降低到 $0.97\% \pm 0.01\%$ 、 $0.94\% \pm 0.04\%$ 降低到 $0.92\% \pm 0.05\%$, 总剂量 γ 通过率($1\%/1 \text{ mm}$)为 $94.06\% \pm 0.86\%$ 。**结论:**发泡胶厚度越厚对剂量扰动越大, 并导致建成区和表面剂量的显著增加, 其衰减作用降低了靶区的平均剂量和处方剂量覆盖率。在临床应用时建议发泡胶厚度不超过4 cm, 并将发泡胶勾画在外轮廓中以评估皮肤剂量是否安全。

【关键词】发泡胶; 皮肤剂量; 固定装置; 剂量衰减; 放射治疗

【中图分类号】R815.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2021)04-0397-07

Dosimetric effects of styrofoam in 6 MV photon beam radiotherapy

LI Shi, LUO Huanli, TAN Xia, MENG Wanli, LI Bo, LI Guang, SHEN Zhengwen, ZHONG Mingsong, WANG Ying, JIN Fu
Radiation Oncology Center, Chongqing University Cancer Hospital, Chongqing 400030, China

Abstract: Objective To evaluate the dosimetric effects of styrofoam in 6 MV photon beam radiotherapy. **Methods** Ten pieces of styrofoam phantoms with 2 cm thick were made, and their CT images were imported into treatment planning system for calculating the average linear attenuation coefficient which was then verified by ionization chamber measurement. The styrofoam phantoms of 2, 4, 6, 8, 10 cm thick which were formed by superimposing one over one another was placed on the surface of a solid equivalent water phantom to estimate the dosimetric effects caused by Styrofoam of different thicknesses. Furthermore, the doses distributions of 9-field intensity-modulated radiotherapy plan for 8 nasopharyngeal cancer patients immobilized with Styrofoam were calculated in the case of body structure contour with styrofoam or not. **Results** The average linear attenuation coefficient calculated by treatment planning system was $(0.16 \times 10^{-2}) \text{ cm}^{-1}$. The gamma passing rate ($1\%/1 \text{ mm}$) was less than 90% when styrofoam thickness was larger than 4 cm, and the thicker the Styrofoam was, the lower the gamma passing rate was. Furthermore, styrofoam had larger effects on dose built-up area than dose-drop area, and the relative surface dose was increased from 16.22% to 63.73% when only a piece of Styrofoam of 2 cm thick was placed on the surface of a solid equivalent water phantom. Due to styrofoam, the mean doses of PTVnd+nx, PTV1 and PTV2 were reduced from $(72.61 \pm 0.98) \text{ Gy}$ to $(72.12 \pm 1.00) \text{ Gy}$, $(69.11 \pm 0.79) \text{ Gy}$ to $(68.72 \pm 0.77) \text{ Gy}$, $(62.61 \pm 1.04) \text{ Gy}$ to $(62.22 \pm 1.03) \text{ Gy}$, respectively, and the corresponding 100% prescription dose coverage rate was decreased from $0.97\% \pm 0.01\%$ to $0.95\% \pm 0.03\%$, $0.98\% \pm 0.01\%$ to $0.97\% \pm 0.01\%$, $0.94\% \pm 0.04\%$ to $0.92\% \pm 0.05\%$, respectively. The gamma passing rate ($1\%/1 \text{ mm}$) of overall dose was $94.06\% \pm 0.86\%$. **Conclusion** The dosimetric effects is increasing with the increasing of styrofoam thickness, which led to a significant dose increase in dose built-up area and surface dose. The attenuation effects of styrofoam reduce both mean dose and 100% prescription dose coverage rates at target areas. It is recommended that the thickness of styrofoam should not exceed 4 cm, and that styrofoam should be included in body structure contour to assess whether the skin dose is safe.

Keywords: styrofoam; skin dose; immobilization device; dose attenuation; radiotherapy

【收稿日期】2020-11-23

【基金项目】国家自然科学基金(11575038, 11805025, 81972857); 2018年重庆市院士牵头科技创新引导专项

【作者简介】李师, 初级工程师, 研究方向: 放射医学物理, E-mail: 2272482753@qq.com

【通信作者】靳富, 高级工程师, 研究方向: 放射医学物理, E-mail: jfzj@126.com

前言

固定装置能够最小化患者运动,同时提高患者摆位的准确性和分次间的可重复性,使得放射治疗能够准确实施^[1]。随着放疗技术的不断发展,传统固定方式已经逐渐被现代材料和技术所取代,例如热塑性材料和3D打印技术用于辅助患者摆位^[2-3]。发泡胶因其采用主动塑性方式改善了患者体位舒适性,且具有较强的硬度、不易变形、不漏气特点,从而提高了放疗期间的摆位可重复性和准确性^[4-8]。发泡胶虽属于低密度材料,但射束穿过该材料时仍会发生衰减和散射,然而这种影响在临床中常常被忽视。多项研究表明,放疗过程中使用体位固定装置会导致剂量分布改变^[9-12],碳纤维治疗床对后斜入射野的剂量影响最高可达10%^[13]。Gerig等^[14]研究发现等效水深度为6.3 mm的碳纤维治疗床对6 MV光束最大衰减可以达到7%,且表面剂量从17%(无治疗床)增加到88%(加入治疗床)。AAPM 176号报告强调了体位固定装置对剂量的扰动效应,建议放疗物理师应引起关注^[15]。

Chen等^[16]曾将发泡胶、碳纤维床和热塑膜在内的头颈部固定装置勾画在外部轮廓中,利用放疗计划系统(TPS)计算该固定装置对临床鼻咽癌计划的剂量学影响。然而,该研究并未单独说明发泡胶对剂量扰动贡献。覃仕瑞等^[17]虽然单独研究了发泡胶对鼻咽癌计划的剂量学影响,但其涵盖分期广,靶区体积相差大,导致结果偏差较大,且没有分析靶区覆盖率、均匀性、适形度等剂量参数的变化。两项研究中均没有探究不同角度射野穿过发泡胶后的剂量变化。另外,发泡胶厚度具有特异性,在制作时由于人体部位压力不同而导致发泡胶厚度不同,特别是重量轻的颈部,发泡胶通常较厚,且人与人之间也存在体质量特异性。因此,本文研究发泡胶对放疗的剂量学影响,分别比较TPS计算与实际测量中得到的发泡胶衰减系数,并定量评估不同厚度的发泡胶对剂量学影响,以及发泡胶对临床鼻咽癌计划的剂量学影响。

1 材料与方法

1.1 发泡胶的衰减系数

制作发泡胶实验模体:A液(异氰酸酯)、B液(复合聚醚类多元醇)各300 mL,将A、B两种液体快速混合摇匀后倒入透气防水袋中,在防水袋上放置质量约为80 kg的物块,直到完全发热膨胀并冷却固化塑形。将冷却后的发泡胶裁剪成10块长方体发泡胶模体,厚度约2 cm,边长约16 cm(兼顾到大于标称射野

尺寸10 cm并节省材料),每块密度略有差别,10块模体的平均密度值为0.04 g/cm³,CT值为(-937±7) HU。

本文采用两种不同方法计算和测量得到3组发泡胶的线性衰减系数。其中,方法一基于线性衰减系数的定义,通过TPS计算不同厚度发泡胶在等中心点剂量衰减,将结果数据线性拟合得到发泡胶的衰减系数。由于每块相同厚度的发泡胶密度不同,衰减也略有不同;方法二则通过TPS计算并实际测量每块发泡胶等中心点剂量衰减,计算每块相同厚度发泡胶的线性衰减系数,然后取其平均值。由于两种方法彼此独立,可互相验证线性衰减系数的正确性。

(1)方法一:将上述模体全部叠加放在固体等效水(边长20 cm,高15 cm,有机玻璃,除特别说明,本文固体水均指有机玻璃固体等效水)上表面成20 cm厚。采用放疗专用大孔径螺旋CT(Brilliance-16, Philips Medical Systems Inc.)获取图像,扫描范围包含整个固体水和发泡胶。扫描层厚1 mm,扫描电压120 kV,曝光250 mAs。将所得CT图像通过Aria系统传输到Eclipse(Version 13.6, Varian Medical Systems)TPS中,选择重建厚度3 mm(观察到重建层厚对剂量计算的影响较小,可以忽略不计)。然后使用TPS勾画工具,勾画出包含整个固体水和不同厚度(0~20 cm,间隔1 cm)发泡胶的外轮廓。使用医用直线加速器Varian IX(配备120片Millennium MLC,叶片在等中心宽度为5~10 mm),能量6 MV的X射线,剂量率400 MU/min。放疗计划均采用一个标称射野[尺寸(10×10) cm²,角度0°],输出100 MU,源轴距105 cm保持不变(模拟绝对剂量校准条件,即源到固体水表面距离保持100 cm,记录水下5 cm处点剂量)。TPS计算该计划在包含不同厚度发泡胶外轮廓中的剂量分布,并分别记录了固体水下5 cm中心点剂量。

(2)方法二:将每块模体单独放在固体水上表面同一位置,并将指形电离室(0.6 cm³, PTW30013)插入固体水中。然后进行CT扫描,扫描条件与上述相同,扫描范围包含整个固体水和发泡胶。将所得10套CT图像传输到TPS后,对每套CT图像勾画出两种不同的外轮廓分别含发泡胶与不含发泡胶。放疗计划同样采用一个标称射野,输出100 MU,源轴距105 cm,分别在这两种外轮廓下计算剂量分布,记录插入电离室处的中心点剂量。以此计算发泡胶的线性衰减系数, μ 表示线性衰减系数,单位cm⁻¹, D_{open} 和 D 分别表示在同一位置射线未穿过和穿过发泡胶的剂量, T 表示发泡胶的厚度,计算公式如下:

$$\mu = \left(LN \frac{D_{\text{open}}}{D} \right) / T \quad (1)$$

另外,实际测量加速器真实出束情况下发泡胶对射束的衰减,同样利用式(1)计算线性衰减系数。采用相同的标称射野,输出 100 MU,源轴距 105 cm。在固体水中插入指形电离室以测量点剂量,使用 UnidoseE 剂量仪(PTW)测量在电离室产生的电离量,将每块发泡胶模体单独放置在固体水顶部中央同一位置,最后一组不放置发泡胶,为了减少实际测量的不确定性,每组测量重复 10 次,共测量了 11 组。

1.2 不同厚度发泡胶的剂量学影响

(1)本研究实际测量了不同厚度发泡胶对 MapCHECK(Sun Nuclear, Sun Nuclear Corp.)等中心冠状面剂量影响。在已校准和刻度过的 MapCHECK 设备上放置 3 块聚苯乙烯固体水(边长 20 cm,高 1 cm)以测量等效水深度 5 cm 的二维剂量。采用一个标称射野,输出 100 MU,依次在表面叠加放置发泡胶成 0、2、4、6、8、10 cm 厚度进行测量。将放置了聚苯乙烯固体水和不同厚度发泡胶的 MapCHECK 设备进行 CT 扫描,扫描层厚 3 mm,重建厚度 3 mm,扫描电压 120 kV,曝光 250 mAs。CT 图像导入 TPS 后,勾画含不同厚度发泡胶的 Mapcheck 外轮廓,并在相同射野条件下计算剂量。使用 SNC Patient 软件(Sun Nuclear)进行分析,为了验证 TPS 计算发泡胶剂量的正确性,以 TPS 计算所得含不同厚度发泡胶的剂量为参考分布,以实际测量所得含不同厚度发泡胶剂量为待评估分布。为了分析不同厚度发泡胶对剂量的影响,以实际测量所得不含发泡胶剂量为参考分布,以实际测量所得含不同厚度发泡胶剂量为待评估分布。

(2)TPS 计算不同厚度发泡胶对固体水等中心冠状面剂量影响。将上述方法一 TPS 计算结果导入 SNC Patient 软件,以 TPS 计算所得不含发泡胶剂量为参考分布,以 TPS 计算所得含不同厚度发泡胶剂量为待评估分布。

(3)TPS 计算不同厚度发泡胶对固体水中心轴深度剂量的影响。将上述方法一中源轴距保持 105 cm 更改为源皮距保持 100 cm(模拟百分深度剂量测量条件,即源到发泡胶的距离 100 cm),在 TPS 中同样采用一个标称射野,输出 100 MU,分别在不同外轮廓中计算剂量分布。

1.3 对临床鼻咽癌计划的剂量学影响

随机选取并入组了 8 例准备接受放射治疗的鼻咽癌患者,T₄、T₃分期分别 4 例。所有患者在模具制作、模拟定位和治疗期间采用仰卧姿势。个体化患者头颈部发泡胶垫的制作方法在上述模体的制作基本一致,但此时是将患者头颈肩放置在透气防水袋上,并调整防水袋使发泡胶充分接触包裹人体。然后进行 CT 扫描,扫描层厚 3 mm,重建厚度 3 mm,扫

描电压 120 kV,曝光 325 mAs。扫描范围包括患者头部至锁骨下 1 cm,以及发泡胶。

CT 图像传输到 TPS 后,由高年资的放疗医生(根据鼻咽癌放射治疗临床参考指南^[18])勾画靶区和危及器官,PTVnd+nx、PTV1、PTV2 的处方剂量分别为 7 040、6 080、5 440 cGy,分 32 次治疗。对于所有计算,采用临床应用的 CT 值转换电子密度(CT-to-ED)曲线,各向异性分析(AAA)算法,剂量计算网格尺寸为 2.5 mm。

采用设置 HU 值方法对同一例鼻咽癌患者图像勾画出两种不同的外轮廓分别含发泡胶与不含发泡胶。不含发泡胶的外轮廓设为-350 HU,含发泡胶的外轮廓设为-970 HU。以不含发泡胶的外轮廓制作起始角度 200°、终止角度 160°的 9 野均分鼻咽癌放疗计划,然后改变为包含发泡胶的外轮廓重新计算。即同一例放疗计划分别在这两种外轮廓下计算剂量分布。

用平均剂量(D_{mean})、100% 处方剂量靶区覆盖率(CR)、均匀性指数(Homogeneity Index, HI)、适形度指数(Conformity Index, CI)4 个参数表示靶区的剂量特性变化,其中 TV_{piv} 为被 100% 处方剂量所覆盖的靶区体积,V_t 为靶区体积,CR 计算公式如下:

$$CR = \frac{TV_{piv}}{V_t} \times 100\%$$

(2)

D_{x%} 表示靶区 X% 体积所接收到的剂量,HI 值越接近 0 表示靶区剂量均匀性越好,HI 计算公式如下:

$$HI = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}}$$

(3)

PIV 表示 100% 处方剂量所覆盖的体积,CI 值越接近 1 表示靶区剂量适形度越好,CI 计算公式如下:

$$CI = \frac{(TV_{piv})^2}{V_t \times PIV}$$

(4)

另外,为了比较发泡胶对各射野的剂量影响,以 TPS 计算所得各射野下不含发泡胶外轮廓的三维剂量为参考分布,以 TPS 计算所得各射野下含发泡胶外轮廓的三维剂量为待评估分布,使用 3DVH 软件(Sun Nuclear)进行 γ 分析。

1.4 剂量分布比较方法和标准

剂量阈值(TH)设置为 10%,分别采用了百分剂量差分析法(Percent Dose Difference, %DD)和 γ 分析法(剂量差/距离一致性),对应标准分别为 1%、2%、3% 和 1%/1 mm、2%/1 mm、3%/1 mm。

1.5 统计学方法

采用 STATA 15.1 软件进行统计分析,符合正态分布的计量资料用均数±标准差表示,采用配对 t 检验,P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 TPS 计算与实际测量中发泡胶的线性衰减系数

将TPS计算所得不同厚度发泡胶中心点剂量衰减结果作图,如图1所示,通过线性拟合得到发泡胶线性衰减系数为 $0.16\times 10^{-2}\text{ cm}^{-1}$ 。TPS计算和实际测量了每块发泡胶的衰减系数,然后取其平均值,结果如图2所示,TPS的平均线性衰减系数为 $(0.15\pm 0.09)\times 10^{-2}\text{ cm}^{-1}$,实际测量中平均线性衰减系数为 $(0.12\pm 0.04)\times 10^{-2}\text{ cm}^{-1}$ 。

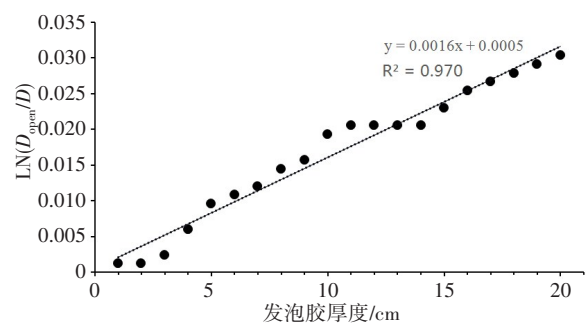


图1 TPS计算不同厚度发泡胶的中心点剂量衰减
Fig.1 Central point dose attenuation of different thicknesses of styrofoam in TPS calculation

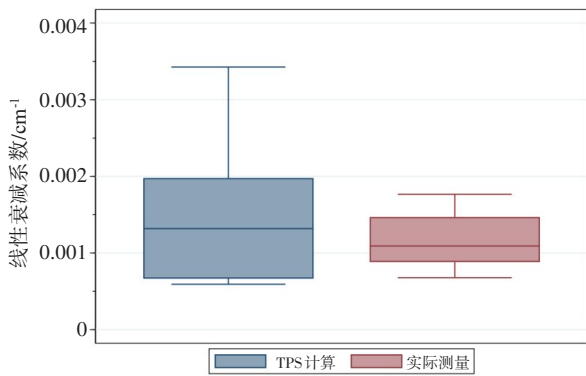


图2 TPS计算和实际测量中发泡胶的平均线性衰减系数
Fig.2 Average linear attenuation coefficient of styrofoam in TPS calculation and actual measurement

2.2 TPS 计算与实际测量射束穿过不同厚度发泡胶模体时对剂量分布的影响

比较不同厚度发泡胶在TPS计算与实际测量间的剂量通过率,如表1所示,不同厚度的发泡胶 γ 通过率($1\%/1\text{ mm}$)均 $>90\%$ 。以不含发泡胶的等中心冠状面剂量为基准,比较不同厚度发泡胶通过率,实际测量结果见表2,TPS计算结果见表3。如表2和表3所示,随着发泡胶厚度的增加,通过率越来越低。表2中,当发泡胶厚度 $>4\text{ cm}$ 时, $\%DD(1\%)$ 通过率显著降低。为了更清楚地划分发泡胶厚度对剂量影响的界限,在TPS中另外勾画包含4.5、5.0、5.5 cm发泡胶外

轮廓并计算剂量,如表3所示,发泡胶厚度 $>4\text{ cm}$ 时, γ 通过率($1\%/1\text{ mm}$) $<90\%$ 。

表1 实际测量与TPS计算中不同厚度发泡胶等中心冠状面剂量分布 γ 通过率(%)

Tab.1 Gamma passing rates of isocenter coronal dose distribution of different thicknesses of styrofoam between actual measurement and TPS calculation (%)

发泡胶厚度 (实际测量 vs TPS 计算)	γ 分析标准		
	1%/1 mm	2%/ 1 mm	3%/1 mm
0 cm vs 0 cm	95.9	98.4	98.4
2 cm vs 2 cm	95.9	98.4	98.4
4 cm vs 4 cm	95.9	98.4	98.4
6 cm vs 6 cm	95.5	98.4	98.4
8 cm vs 8 cm	94.0	97.6	97.6
10 cm vs 10 cm	94.0	97.6	97.6

表2 实际测量中包含不同厚度发泡胶时等中心冠状面剂量分布 $\%DD$ 通过率(%)

Tab.2 $\%DD$ passing rate of isocenter coronal dose distribution of different thicknesses of styrofoam in actual measurement (%)

发泡胶厚度 (实际测量 vs 实际测量)	$\%DD$ 分析标准		
	1%	2%	3%
2 cm vs 0 cm	100.0	100.0	100.0
4 cm vs 0 cm	95.9	100.0	100.0
6 cm vs 0 cm	45.9	99.6	100.0
8 cm vs 0 cm	16.9	96.3	100.0
10 cm vs 0 cm	16.4	36.5	100.0

表3 TPS 计算中包含不同厚度发泡胶时等中心冠状面剂量分布 γ 通过率(%)

Tab.3 Gamma passing rate of isocenter coronal dose distribution of different thicknesses of styrofoam in TPS calculation (%)

发泡胶厚度 (TPS 计算 vs TPS 计算)	γ 分析标准		
	1%/1 mm	2%/ 1 mm	3%/1 mm
2 cm vs 0 cm	100.0	100.0	100.0
4 cm vs 0 cm	93.8	100.0	100.0
4.5 cm vs 0 cm	85.9	100.0	100.0
5 cm vs 0 cm	85.3	100.0	100.0
5.5 cm vs 0 cm	61.1	100.0	100.0
6 cm vs 0 cm	42.8	100.0	100.0
8 cm vs 0 cm	33.3	96.3	100.0
10 cm vs 0 cm	32.7	74.7	100.0

将包含不同厚度发泡胶的外轮廓中固体水中心轴深度剂量曲线作图(图3)发现,与剂量跌落区相

比,发泡胶对剂量建成区的影响最大。不同厚度发泡胶对表面剂量影响如表4所示,初始加入的2 cm发泡胶,使相对表面剂量增加幅度最大,由16.2%增加到63.7%,继续增加厚度增幅逐渐变小。且加入发泡胶使得剂量深度曲线的最大剂量深度略有前移,只加入4 cm发泡胶时前移了0.25 cm。

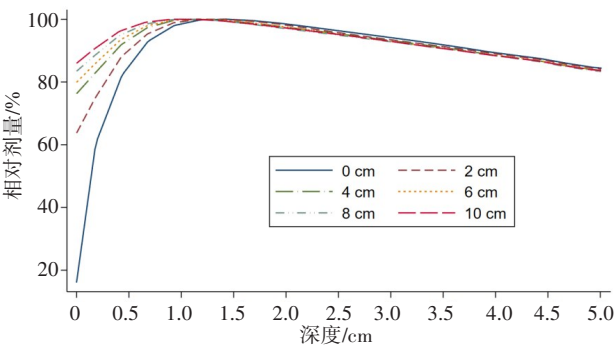


图3 TPS 计算中包含不同厚度的发泡胶时固体等效水中心轴剂量随深度的变化

Fig.3 Solid equivalent water central axis depth dose of different thicknesses of styrofoam in TPS calculation

表4 TPS 计算中包含不同厚度发泡胶时对固体等效水表面剂量和最大剂量深度影响

发泡胶厚度/cm	相对表面剂量/%	最大剂量深度前移/cm
0	16.22	0.00
2	63.73	0.23
4	76.27	0.25
6	79.91	0.25
8	83.43	0.28
10	85.97	0.50

相对表面剂量=(表面剂量/中心轴最大剂量)×100%

2.3 Eclipse TPS 计算临床鼻咽癌治疗计划中有无包含发泡胶时对剂量分布的影响

由表5可知在外轮廓中加入发泡胶后,靶区PTVnd+nx、PTV1、PTV2的 D_{mean} 分别从(72.61±0.98) Gy减少到(72.12±1.00) Gy、(69.11±0.79) Gy减少到(68.72±0.77) Gy、(62.61±1.04) Gy减少到(62.22±1.03) Gy,CR分别从0.97%±0.01%降低到0.95%±0.03%、0.98%±0.01%降低到0.97%±0.01%、0.94%±0.04%降低到0.92%±0.05%,PTV2的CI从0.88±0.02降低到0.85±0.03,以上结果具有统计学意义。

以各射野下不含发泡胶外轮廓三维剂量分布为基准,通过对8例放疗计划 γ 分析,得到发泡胶对各射野的剂量分布影响,如表6所示,有发泡胶时所有射

表5 TPS 计算鼻咽癌计划有无包含发泡胶垫时的靶区剂量学参数(%, $\bar{x} \pm s$)

Tab.5 Target dosimetric parameters with or without nasopharyngeal carcinoma styrofoam in TPS calculation (%, *Mean±SD*)

靶区	剂量参数	无发泡胶放疗计划	含发泡胶放疗计划	P值
PTVnd+nx	D_{mean}/Gy	72.61±0.98	72.12±1.00	<0.001
	CR/%	0.97±0.01	0.95±0.03	<0.001
	CI	0.82±0.07	0.83±0.06	0.812
	HI	0.05±0.01	0.05±0.01	-
PTV1	D_{mean}/Gy	69.11±0.79	68.72±0.77	<0.001
	CR/%	0.98±0.01	0.97±0.01	<0.001
	CI	0.49±0.08	0.49±0.08	-
PTV2	D_{mean}/Gy	62.61±1.04	62.22±1.03	<0.001
	CR/%	0.94±0.04	0.92±0.05	<0.001
	CI	0.88±0.02	0.85±0.03	<0.001

野下总剂量的 γ 通过率(1%/1 mm)为94.06%±0.86%,且发现穿过发泡胶的200°、240°、120°、160°射野较未穿过发泡胶的320°、0°、40°射野 γ 通过率低,其中240°和120°通过率最低。

表6 TPS 计算中含发泡胶的各射野剂量分布间 γ 通过率(%, $\bar{x} \pm s$)

Tab.6 Gamma passing rate of each field dose distributions with styrofoam in body structure contour in TPS calculation (%, *Mean±SD*)

射野角度	γ 分析标准		
	1%/1 mm	2%/1 mm	3%/1 mm
200°	92.43±1.35	95.65±0.40	96.64±0.27
240°	91.44±1.89	96.11±0.98	97.22±0.47
280°	96.70±0.85	97.94±0.31	98.33±0.25
320°	97.17±0.63	97.78±0.46	98.20±0.36
0°	97.03±0.55	97.69±0.41	98.15±0.31
40°	97.22±0.54	97.81±0.37	98.22±0.26
80°	96.85±0.72	98.00±0.37	98.42±0.30
120°	91.49±2.30	95.93±0.91	97.15±0.49
160°	92.48±1.21	95.67±0.48	96.64±0.41
total	94.06±0.86	96.02±0.52	96.84±0.42

3 讨论

剂量传输的准确性是放射治疗的主要问题之一,特别是对于当前临床已广泛采用的IMRT和立体定向放射治疗(Stereotactic Body Radiotherapy, SBRT),通常需要将剂量传输精确度控制在2%内^[19-20]。目前的TPS已大大改善了剂量计算的准确性,另一方面我们还应注意射束传输过程中穿过的

敷贴以及固定装置对剂量产生的影响。Liu等^[21]研究了在IMRT和VMAT鼻腔NK/T淋巴瘤放疗计划中敷贴的剂量学影响,发现敷贴对靶区和危及器官的剂量影响较小。Puyssseleyr等^[11]测量了俯卧位乳房固定装置对剂量学的影响,发现穿过整个固定装置的6 MV光子束衰减了12.3%,其装置中的支撑泡沫垫,每厘米厚度对光束衰减为0.11%。Chiu-Tsao等^[10]研究表明2.8 cm厚度的Orfit碳纤维板、0.9 cm轻木板、7.6 cm泡沫塑料或4.5 cm alpha垫,分别使表面剂量由20%增加到71%、69%、55%、57%。为了研究发泡胶固定装置对剂量学的影响,确保剂量传输的准确性和安全性,本研究分别评估了发泡胶的线性衰减系数(点剂量),不同厚度发泡胶的剂量学影响(二维剂量),以及发泡胶对临床鼻咽癌计划的剂量学影响(三维剂量)。全文忽略了其他固定装置(例如治疗床等)对剂量的影响。

图1将厚度均为2 cm的10块发泡胶叠放成20 cm厚,在TPS中切分成为1 cm厚发泡胶,此过程未改变发泡胶的性质,并增加了数据量,从而增大结果的准确性。通过TPS计算不同厚度发泡胶以及每块发泡胶点剂量,两种方法得到的线性衰减系数分别为 $0.16 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ 和 $(0.15 \pm 0.09) \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$,两者误差较小,验证了结果的正确性。然而,实际测量中平均线性衰减系数为 $(0.12 \pm 0.04) \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$,由于每块发泡胶模体存在较小的密度差异,较小的摆位误差就会引起点剂量测量结果的变化,而实际摆位不可能与TPS中的位置完全一致,所以TPS计算与实际测量存在差异。

TG218号报告建议临床IMRT质量保证时以 γ 分析标准3%/2 mm通过率90%为操作限值^[22],因为总体来说发泡胶的衰减效果较小,因此本文以更严格的标准1%/1 mm通过率90%为限值。由表1可知,在引入了加速器传输误差的情况下,TPS计算与实际测量不同厚度发泡胶二维剂量间的 γ 通过率(1%/1 mm)均>90%,可以认为TPS能准确计算发泡胶剂量。在表3中发泡胶厚度>4 cm时, γ 通过率(1%/1 mm)<90%,此时认为发泡胶对剂量影响显著,临床应用时建议不要超过4 cm。

ICRU建议在0.07 mm的深度处测量皮肤剂量,该深度与辐射敏感性最强的基底细胞层位置大致对应^[23]。因此想要准确测量表面剂量十分困难,Chiu-Tsao等^[10]在模体内0.015 3 cm深度处插入胶片测得6 MV光束在 $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ 射野下的表面剂量为20%,AAPM 176号报告中提供了由Attix平板电离室测得的表面剂量为16%[6 MV光子, $(10 \times 10) \text{ cm}^2$]^[15]。本文虽未测量表面剂量,但是参考了加速器配置时

的PDD数据,以最大剂量深度为依据,找到图3中PDD曲线中最大剂量点位置,反推出表面位置,得到表面剂量为16.22%,与Chiu-Tsao等^[10]和AAPM 176号报告研究结果接近,因此可以认为该表面剂量合理且具有临床意义。

在表4中,随着发泡胶由0增厚到10 cm,表面剂量由16.22%增加到85.97%,呈现非线性增加,初始加入的2 cm发泡胶使相对表面剂量增加幅度最大,且加入发泡胶使得剂量深度曲线的最大剂量深度略有前移。因此,相较于衰减作用,发泡胶对表面剂量的增加更为显著。尽管Gerig等^[14]和Chiu-Tsao等^[10]研究中使用的固定装置与发泡胶的成分和密度不同,但他们的研究结果也佐证了这一规律:对患者来说,使用固定装置将会大幅度增加皮肤剂量。通过增加MU来补偿发泡胶的衰减作用将进一步增加皮肤剂量。值得注意的是,在相同总剂量下使用SBRT会加剧皮肤反应,Hoppe等^[24]研究指出针对早期非小细胞肺癌SBRT中52%的患者经历了不同程度的皮肤毒性反应,其主要原因是忽视了固定装置引起的皮肤剂量增加。

对于表5,剂量师在制作计划时为了控制PTV1的剂量散点,降低了PTV2的CR值,另外PTVnd+nx、PTV1不属于完全包含关系,导致两个靶区的CI值不具有参考意义。Chen等^[16]研究表明固定装置(包含发泡胶、热塑膜和碳纤维板)使PTV1、PTV2的 D_{mean} 减少1.1%、1.5%,CR降低1.5%、3.6%。而本文(只包含发泡胶)中PTV1、PTV2的 D_{mean} 减少0.57%、0.63%,CR降低1.02%、2.82%,符合实验预期,另外,本文还发现发泡胶使PTV2的适形度降低了。

表6中 γ 分析结果显示穿过发泡胶的射野较未穿过的射野 γ 通过率低,特别是角度为240°和120°射野通过率最低,因为斜入射的射野穿过发泡胶路径更长,对剂量分布扰动更明显。然而,我们发现未穿过发泡胶的射野通过率并非100%,通过手动勾画含发泡胶外轮廓,验证通过率变化后发现,剂量偏差出现的主要原因是通过改变HU值方法勾画含发泡胶外轮廓时,患者上表面轮廓略有外扩。有研究显示当Varian Eclipse TPS外轮廓从患者皮肤开始时,系统将低估处方剂量14%的皮肤剂量,外轮廓从患者皮肤外扩,将提高计算精度^[25-26]。

综上所述,发泡胶对放疗的剂量学影响是一个复杂的组合。发泡胶厚度越厚,对剂量扰动就越大,并会导致建成区和表面剂量的显著增加。发泡胶的衰减系数为 $0.16 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$,其衰减作用降低了鼻咽癌靶区的平均剂量和处方剂量覆盖率,以及部分靶区的适形度,放疗计划中角度240°和120°的射野对剂

量扰动最大。因此,本文建议在临床应用中,发泡胶垫厚度应尽可能薄,最好不要超过4 cm,在制作放疗计划时,特别是对于先进的精准放疗技术,尽量不要使用穿过发泡胶的后射野,否则应将发泡胶勾画在TPS外部轮廓内以评估皮肤剂量增加,确保皮肤剂量在安全范围内。本文研究也存在一定的缺陷。由于实验条件限制,本研究未实际测量患者皮肤剂量,在未来进一步研究中计划将胶片放置在患者皮肤和发泡胶之间以监测皮肤剂量。

【参考文献】

- [1] BENTEL G C, MARKS L B, KRISHNAMURTHY R, et al. Impact of cradle immobilization on setup reproducibility during external beam radiation therapy for lung cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1997, 38(3): 527-531.
- [2] JEON S H, KIM J H. Positional uncertainties of cervical and upper thoracic spine in stereotactic body radiotherapy with thermoplastic mask immobilization[J]. *Radiat Oncol J*, 2018, 36(2): 122-128.
- [3] ASFIA A, NOVAK J I, MOHAMMED M I, et al. A review of 3D printed patient specific immobilisation devices in radiotherapy[J]. *Phys Imag Radiat Oncol*, 2020, 13: 30-35.
- [4] 房建南, 马玉家, 石俊田, 等. 发泡胶与乳腺托架在乳腺癌保乳术后IMRT中国定精度比较[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2019, 28(5): 369-372.
FANG J N, MA Y J, SHI J T, et al. Comparison of imbolization accuracy between styrofoam and breast carrier in intensity-modulated radiotherapy after breast conservative surgery for breast cancer patients [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2019, 28(5): 369-372.
- [5] LIN C G, XU S K, YAO W Y, et al. Comparison of set up accuracy among three common immobilisation systems for intensity modulated radiotherapy of nasopharyngeal carcinoma patients[J]. *J Med Radiat Sci*, 2017, 64(2): 106-113.
- [6] 张英婷, 刘炳忠, 陈文芬, 等. 聚氨酯发泡胶结合翼板个体化塑形与负压真空袋固定肺癌放疗摆位精度比较[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2018, 27(3): 299-302.
ZHANG Y T, LIU B Z, CHEN W F, et al. Comparison of positioning accuracy between personalized polyurethane foam with wing boards and negative pressure vacuum bag in radiotherapy for lung cancer[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2018, 27(3): 299-302.
- [7] 招什武, 戴振晖, 朱远湖, 等. 鼻咽癌调强放疗两种体位固定方式的摆位误差分析[J]. *临床医学工程*, 2018, 25(5): 575-577.
ZHAO S W, DAI Z H, ZHU Y H, et al. Analysis on set-up errors of two immobilization methods of intensity modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. *Clinical Medical & Engineering*, 2018, 25(5): 575-577.
- [8] 许森奎, 姚文燕, 胡江, 等. 鼻咽癌发泡胶个体化塑形与标准化头枕放疗体位固定精确度比较[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2015, 24(2): 196-199.
XU S K, YAO W Y, HU J, et al. The research of accuracy immobilized using individualized polyurethane scaling agent compared to positioning foam with standard plastics pillow in the radiotherapy of nasopharyngeal carcinoma [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2015, 24(2): 196-199.
- [9] VANETTI E, NICOLINI G, CLIVIO A, et al. The impact of treatment couch modelling on RapidArc[J]. *Phys Med Biol*, 2009, 54(9): N157-N166.
- [10] CHIU-TSAO S T, CHAN M F. Evaluation of two-dimensional bolus effect of immobilization/support devices on skin doses: a radiochromic EBT film dosimetry study in phantom[J]. *Med Phys*, 2010, 37(7): 3611-3620.
- [11] PUYSELEYR A D, NEVE W D, WAGTER C D. A patient immobilization device for prone breast radiotherapy: dosimetric effects and inclusion in the treatment planning system[J]. *Med Phys*, 2016, 32(6): 758-766.
- [12] JENG S C, WU J K, LEE K W, et al. Skin dose impact from vacuum immobilization device and carbon fiber couch in intensity modulated radiation therapy for prostate cancer[J]. *Med Dosim*, 2009, 34(3): 228-232.
- [13] 付庆国, 邓烨. 直线加速器碳纤维治疗床板对后斜入射野的影响与修正[J]. *世界最新医学信息文摘*, 2019, 19(47): 336.
FU Q G, DENG Y. The effect and correction of linear accelerator carbon fiber couch on the back oblique incidence field[J]. *World Latest Medicine Information*, 2019, 19(47): 336.
- [14] GERIG L H, NIEBALA M, NYIRI B J. Dose perturbations by two carbon fiber treatment couches and the ability of a commercial treatment planning system to predict these effects[J]. *Med Phys*, 2010, 37(1): 322-328.
- [15] OLCH A J, GERIG L, LI H, et al. Dosimetric effects caused by couch tops and immobilization devices: report of AAPM Task Group 176[J]. *Med Phys*, 2014, 41(6): 061501.
- [16] CHEN L, PENG Y L, GU S Y, et al. Dosimetric effects of head and neck immobilization devices on multi-field intensity modulated radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. *J Cancer*, 2018, 9(14): 2443-2450.
- [17] 覃仕瑞, 王宏, 李秀粉, 等. 发泡胶在鼻咽癌放疗中对剂量分布的影响[J]. *肿瘤预防与治疗*, 2020, 33(1): 46-50.
QIN S R, WANG H, LI X F, et al. Effect of polyurethane foam on dose distribution in radiotherapy for na-sopharyngeal carcinoma[J]. *Journal of Cancer Control and Treatment*, 2020, 33(1): 46-50.
- [18] 夏云飞. 鼻咽癌放射治疗临床参考指南[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2016.
XIA Y F. Clinical reference manual of radiation treatment for nasopharyngeal carcinoma[M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2016.
- [19] BENTZEN S M. High-tech in radiation oncology: should there be a ceiling?[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2004, 58(2): 320-330.
- [20] ALMOND P R, BIGGS P J, COURSEY B M, et al. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams[J]. *Med Phys*, 1999, 26(9): 1847-1870.
- [21] LIU X F, WANG Y, GUO Q S, et al. Clinical impact of the bolus in intensity-modulated radiotherapy and volumetric-modulated arc therapy for stage I-II nasal natural killer/T-Cell lymphoma[J]. *Oncol Res Treat*, 2020, 43(4): 140-145.
- [22] 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.
- [23] BIDMEAD M. Dose and volume specification for reporting intracavitary therapy in gynecology, ICRU Report 38[J]. *J ICRU*, 1985, 38: 1-20.
- [24] HOPPE B S, LASER B, KOWALSKI A V, et al. Acute skin toxicity following stereotactic body radiation therapy for stage I non-small-cell lung cancer: who's at risk?[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2008, 72(5): 1283-1286.
- [25] WANG L, CMELAK A J, DING G X. A simple technique to improve calculated skin dose accuracy in a commercial treatment planning system[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(2): 191-197.
- [26] TANAKA Y, MONZEN H, MATSUMOTO K, et al. Dose distribution comparison in volumetric-modulated arc therapy plans for head and neck cancers with and without an external body contour extended technique[J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2019, 24(6): 576-584.

(编辑:陈丽霞)