

· 物理 · 生物 · 技术 ·

胸段食管癌 VMAT 计划的剂量学验证研究

李军 张西志 花威 张先稳 汤晓斌 陈达

【摘要】 目的 探讨 VMAT 计划在胸段食管癌放疗中的适应性。方法 应用 0.6 cm³ 指形电离室和 COMPASS 三维剂量验证系统分别对 10 例胸上段、10 例胸中段食管癌的 VMAT 计划进行绝对剂量和相对剂量的验证。应用 DVH 比较靶区、肺、心脏和脊髓受照剂量和体积差异,并分析 GTV、CTV、PTV 和 OAR 的 γ 通过率。结果 胸上、中段食管癌的等中心处绝对剂量精确度均 $\geq 99\%$, GTV、PTV 和 OAR 的 γ 通过率均 $\geq 97\%$ 。胸上段食管癌 GTV、CTV、PTV 的 $D_{95\%}$ 、 D_{mean} 的验证差异均 $\leq 3\%$, 脊髓 $D_{1\%}$ 差异为 2.21%, 左肺和右肺的 $V_5 \sim V_{30}$ 、 D_{mean} 的差异 $\leq 2\%$ 。胸中段食管癌的 GTV、CTV、PTV 和 OAR 的 $D_{95\%}$ 、 D_{mean} 的验证差异 $\leq 2\%$, 脊髓 $D_{1\%}$ 差异为 2.04%。左肺和右肺的 $V_5 \sim V_{30}$ 以 V_{10} 为界差异呈逐渐增大的趋势, 处于 1.5% 以内。心脏 D_{mean} 的差异为 2.68%。结论 VMAT 技术在胸段食管癌放疗中是适用的。

【关键词】 胸段食管肿瘤/容积调强弧形治疗; 剂量体积直方图; 剂量学验证

Study on dosimetric verification of VMAT treatment planning for chest esophageal carcinoma Li Jun*, Zhang Xizhi, Hua Wei, Zhang Xianwen, Tang Xiaobin, Chen Da. * Department of Nuclear Science & Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China
Corresponding author: Chen Da, Email: dachen@nuaa.edu.cn

【Abstract】 **Objective** To study the dosimetry characteristics of VMAT plan in the esophageal carcinoma radiotherapy. **Methods** Application of 0.6 cm³ ionization chamber and COMPASS three-dimensional dose verification system, 20 cases of upper and middle chest esophageal carcinoma on the VMAT plans for absolute dose and relative dose verification. Dose volume histogram (DVH) comparison treatment target, lungs, heart, and differences in the spinal cord irradiation dose and volume, and analyses γ pass rate of GTV, CTV, PTV and organs at risks. **Results** The center dose of upper and middle chest esophageal carcinoma accurate rates were above 99%. Thoracic segment esophageal: GTV, PTV and organs at risks of γ pass rate above 97%. $D_{95\%}$ and D_{mean} of GTV, CTV and PTV were relatively undervalued within 3%. $D_{1\%}$ of spinal cord is 2.21% overvalued. Left and right pulmonary V_5 were slightly overvalued by about 0.5%, $V_{10} \sim D_{30}$, D_{mean} undervalued within 2%. In period of middle chest esophageal carcinoma: the gamma passed rate of GTV, CTV, PTV and organs at risks of above 97%, GTV, CTV, PTV $D_{95\%}$, D_{mean} were relatively undervalued within 2%. Spinal cord $D_{1\%}$ is 2.04% overvalued. Left and right pulmonary $V_5 \sim D_{30}$ to V_{10} as a trend of gradually to be underestimated, at 1.5%. Heart D_{mean} was undervalued by 2.68%. **Conclusion** VMAT technology is applicable in the chest esophageal carcinoma radiotherapy.

【Key words】 Chest esophageal neoplasms/volume modulated arc therapy; Dose volume histogram; Dosimetry verification

食管癌作为我国高发恶性肿瘤之一,放疗是其有效治疗手段,其中 IMRT 已被广泛用于食管癌临床放疗中。近年来发展的 VMAT 技术也逐渐被食管癌临床放疗所采用,笔者分别对胸上段、中段食管癌 VMAT 计划进行绝对剂量和相对剂量验证,并分

析 VMAT 在胸段食管癌放疗中应用的可行性。

材料与方 法

1. 仪器设备: UNIDOS E 型剂量仪和配套的有效测量体积为 0.6 cm³ 的 Farmer 指形电离室(德国 PTW 公司); 固体水模体(美国 MED-TEC 公司); 16 排大孔径模拟定位 CT(美国 GE 公司); COMPASS 三维剂量验证系统(包含 MatriXX 二维电离室矩阵及加速器机头挂架、COMPASS 分析软件部分,德国 IBA 公司); 瓦里安 IX 医用电子直线加速器(美国瓦里安公司); Eclipse8.6 TPS(美国瓦里安公司)。

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2014.03.021

基金项目: 江苏省博士后科研资助计划(1002012C)

作者单位: 210016 南京航空航天大学核科学与工程系(李军、汤晓斌、陈达); 江苏省苏北人民医院放疗科(李军、张西志、花威、张先稳)

通信作者: 陈达, Email: dachen@nuaa.edu.cn

2. 一般临床资料:2011 年 3 月至今对 10 例胸上段食管癌和 10 例胸中段食管癌患者在 GE16 排大孔径 CT 下进行自由平静呼吸螺旋扫描,层厚 5 mm。临床放疗医师应用瓦里安 Eclipse8.6 TPS 在 CT 影像上勾画 GTV、CTV 和 PTV,并勾画脊髓、肺、心脏等。

3. 计划设计:20 例患者均采用 6 MV X 线,共面双弧布野方式(逆时针 179°~181°共 358°旋转范围,顺时针 181°~179°共 358°旋转范围,准直器机头角度为 5°,治疗床角为 0°),剂量率范围为 0~600 MU/min,剂量计算算法为各向异性分析算法(anisotropic analytical algorithm, AAA),计算网格均为 2.5 mm。处方剂量 GTV 为 6000 cGy,CTV 为 5600 cGy,PTV 为 5040 cGy,分次量分别为 GTV 为 214.3 cGy/次,CTV 为 200 cGy/次,PTV 为 180 cGy/次,5 次/周,共 28 次。计划优化目标为 95%靶体积受照剂量不低于处方剂量,双肺 $V_{20} < 28\%$,双肺 $D_{mean} < 1500$ cGy,脊髓 $D_{1\%} < 4500$ cGy,心脏 $V_{40} < 50\%$ 。

4. 计划验证:利用 PTW 剂量仪及其 Farmer 指形电离室进行绝对剂量验证,将做好的胸上段食管癌和胸中段食管癌治疗计划移植到固体水模体上,通过直接剂量计算得到等中心处绝对剂量,然后实际在加速器相同条件下用 PTW 公司的 UNIDOS E 剂量仪、0.6 cm³ 指型电离室和固体水模体来测量射野等中心处的绝对剂量,通过比较治疗计划和实际测量值的结果得出绝对剂量的精确度。对治疗计划的三维剂量验证首先将治疗计划生成 QA 计划,应用 COMPASS 三维剂量验证系统进行相对剂量验证,其次利用 COMPASS 通过加速器的光子和电子的能谱、离轴比因子、百分深度剂量、输出因子、离轴比曲线等参数模拟出加速器机头的剂量学参数。其剂量计算方式是非直接测量结果比较方法,它是利用一种算法把 MatriXX 电离室矩阵测量得到的在等中心距离分辨率为 1 cm 的注量图,通过精确的数学算法插值成分辨率为 2 mm 的注量图,然后在根据高精度注量图,利用卷积或超分割算法计算出剂量分布,从而与计划系统结果进行比较。 γ 通过率分析中条件设置为相对剂量偏差 $< 3\%$ 、距离偏差 < 3 mm 的约束限制,以 $\gamma < 1\%$ 为通过。COMPASS 验证结果与瓦里安 Eclipse8.6 TPS 结果进行比较。二者差异的计算公式^[5]为 $PD = (D_{cal} - D_n) / D_n \times 100\%$,式中 D_{cal} 为 TPS 计算值, D_n 为 COMPASS 系统的测量值。

5. 评价指标:GTV、CTV-GTV、PTV-CTV 的 $D_{95\%}$ 、 D_{mean} 和 γ 通过率。脊髓 $D_{1\%}$,肺 V_5 、 V_{10} 、 V_{15} 、 V_{20} 、 V_{30} 、 D_{mean} ,心脏 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 、 D_{mean} 及各自 γ 通过率。

6. 统计方法:采用 SPSS 15.0 软件进行数据计算和分析。

结 果

1. 射野等中心处绝对剂量:通过比较治疗计划等中心处的绝对剂量和在相同实际验证条件下的测量值的结果,通过比较后显示胸上段食管癌计划等中心的绝对剂量精确度均达 $\geq 99\%$,胸中段食管癌等中心处绝对剂量精确度均 $\geq 99.3\%$ 。

2. COMPASS 验证结果:(1)胸上段食管癌:GTV、PTV 和 OAR 的 γ 通过率均 $\geq 97\%$,符合临床剂量学要求,CTV 相对偏低为 $(93.09 \pm 0.98)\%$,可能与胸上段食管癌患者体表表面不规则和 CTV-GTV 环体积较小有关,余详见表 1。从 PD 值来看,GTV、CTV、PTV 的 $D_{95\%}$ 、 D_{mean} 测量结果和 TPS 结果平均差异在 3% 以内;脊髓 $D_{1\%}$ 的平均差异为 2.21%;左肺和右肺 V_5 平均差异为 0.5% 左右, $V_{10} \sim V_{30}$ 、 D_{mean} 平均差异 $\leq 2\%$;余详见表 1。图 1 示例的 DVH 图也显示这种趋势。(2)胸中段食管癌:GTV、CTV、PTV 和 OAR 的 γ 通过率均达 $\geq 97\%$,符合临床剂量学要求,余详见表 1。从 PD 值来看,GTV、CTV、PTV 的 $D_{95\%}$ 、 D_{mean} 平均差异 $\leq 2\%$;脊髓 $D_{1\%}$ 平均差异 2.04%;左肺和右肺 $V_5 \sim V_{30}$ 以 V_{10} 为界差异呈逐渐增大趋势,但 $\leq 1.5\%$;心脏 $V_{20} \sim V_{40}$ 差异也呈逐渐增大趋势,平均值差异为 2.68%;余详见表 1。图 2 示例的 DVH 图也显示这种趋势。

讨 论

国内外食管癌 VMAT 的应用研究多有报道,其结论均认为无论是双弧还是单弧均能达到或优于普通固定野 IMRT 的剂量学分布,并具有显著缩短治疗时间的优点^[1-4]。但单纯通过 TPS 计划来比较剂量学差异,未通过放疗计划验证不足以充分说明 VMAT 在食管癌放疗中的适应性。与固定野调强相比,VMAT 优化设计时可调节因素较多,如治疗弧度数、准直器角度、多叶光栅、剂量率、机架旋转速度等,但多种因素组合优化、计划设计和执行度均较复杂。如要看到执行度如何剂量验证环节是不可或缺的。本研究通过对 20 例胸段食管癌的 VMAT 计划进行绝对剂量和相对剂量验证,分析其在食管癌临床放疗中的适应性。

表 1 20 例食管癌患者 VMAT 计划的靶区和各危及器官评价指标的偏差和通过率 (% , $\bar{x} \pm s$)

| 项目 | 胸上段食管癌(10 例) | | 胸中段食管癌(10 例) | |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | PD 值 | γ 通过率 | PD 值 | γ 通过率 |
| GTV | | 98.73 \pm 0.98 | | 98.87 \pm 0.75 |
| D _{95%} | -2.63 \pm 0.47 | | -1.46 \pm 0.75 | |
| D _{mean} | -2.41 \pm 0.46 | | -1.84 \pm 1.09 | |
| CTV-GTV | | 93.09 \pm 0.98 | | 97.16 \pm 1.96 |
| D _{95%} | -2.81 \pm 1.28 | | -1.69 \pm 1.40 | |
| D _{mean} | -2.67 \pm 0.28 | | -1.98 \pm 1.23 | |
| PTV-CTV | | 97.68 \pm 0.47 | | 97.92 \pm 1.38 |
| D _{95%} | -1.38 \pm 0.99 | | -0.64 \pm 1.81 | |
| D _{mean} | -2.38 \pm 0.16 | | -1.39 \pm 1.31 | |
| 脊髓 | | 99.92 \pm 0.12 | | 99.77 \pm 0.34 |
| D _{1%} | 2.21 \pm 0.85 | | 2.04 \pm 2.47 | |
| 左肺 | | 99.79 \pm 0.19 | | 98.80 \pm 1.42 |
| D ₅ | 0.32 \pm 0.15 | | 1.39 \pm 0.88 | |
| D ₁₀ | -0.93 \pm 0.43 | | 0.11 \pm 0.66 | |
| D ₁₅ | -0.70 \pm 0.19 | | -0.50 \pm 0.44 | |
| D ₂₀ | -0.67 \pm 0.20 | | -1.02 \pm 0.31 | |
| D ₃₀ | -0.58 \pm 0.25 | | -1.38 \pm 0.80 | |
| D _{mean} | -1.38 \pm 0.48 | | -0.87 \pm 0.46 | |
| 右肺 | | 99.66 \pm 0.39 | | 99.91 \pm 0.08 |
| D ₅ | 0.58 \pm 0.35 | | 1.11 \pm 0.60 | |
| D ₁₀ | -0.43 \pm 0.38 | | 0.33 \pm 0.48 | |
| D ₁₅ | -0.77 \pm 0.36 | | -0.11 \pm 0.31 | |
| D ₂₀ | -1.16 \pm 0.68 | | -0.30 \pm 0.37 | |
| D ₃₀ | -0.78 \pm 0.35 | | -0.26 \pm 0.23 | |
| D _{mean} | -1.69 \pm 1.62 | | -1.25 \pm 1.71 | |
| 心脏 | | | | 99.17 \pm 0.56 |
| D ₂₀ | | -0.80 \pm 0.41 | | |
| D ₃₀ | | -1.22 \pm 0.22 | | |
| D ₄₀ | | -1.21 \pm 0.56 | | |
| D _{mean} | | -2.68 \pm 1.13 | | |

COMPASS 不同于传统的二维电离室矩阵,它解决了角度依赖性问题,是很有效的三维剂量验证工具。可以直接验证靶区和 OAR 受量,通过 DVH 图直观显示验证值和计划值的差异。本研究结果显示胸上段、中段食管癌等中心处绝对剂量能很好地与 TPS 达到一致,靶区和 OAR 的 γ 通过率均满足临床剂量学要求。本研究中双肺受量在 TPS 计算结果和测量计算结果的差异呈负值,分析与 VMAT 计划采用的 AAA 算法有关。AAA 算法是三维的笔型束卷积叠加算法,该模型建立考虑了原射线、电子线污染及准直器散射影响,对不均匀介质中的剂量计算能进行更准确修正。Bragg 等^[5] 和 Arup 等^[6] 的研究表明 AAA 算法相对于以往光子笔形束卷积算法更接近于实际测量值,是一种更精确的算法,但仍会低估肺受量。Rønde 等^[7] 通过测量验证得出在不均匀组织中 AAA 算法优于光子笔形束卷积算法,对 6 MV X 线脊髓受量 AAA 算法比测量计算值高了近 7%。而本研究中胸上段、中段食管癌的脊髓受量 TPS 计算值比 COMPASS 测量计算值分别高了 2.21% 和 2.04%。

总之,VMAT 技术在食管癌放疗中是适用的。为防止脊髓受量超标在设计 VMAT 计划时应对脊髓限量引起重视。

参 考 文 献

- [1] 陈进琥,尹勇,刘同海,等. 颈段食管癌固定野调强与旋转调强放疗计划比较研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志,2010,19:429-435.
- [2] Van Benthuyzen L, Hales L, Podgorsak M. Volumetric modulated arc therapy vs IMRT for the treatment of distal esophageal cancer [J]. Med Dosim,2011,36:404-409.
- [3] Vivekanandan N, Sriram P, Kumar SA, et al. Volumetric modulated arc radiotherapy for esophageal cancer [J]. Med Dosim,2012,37:108-113.
- [4] Nicolini G, Ghosh-Laskar S, Shrivastava SK, et al. Volumetric modulation arc radiotherapy with flattening filter-free beams compared with static gantry IMRT and 3D conformal radiotherapy for advanced esophageal cancer: a feasibility study [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys,2012,84:553-560.
- [5] Bragg CM, Wingate K, Conway J. Clinical implications of the anisotropic analytical algorithm for IMRT treatment planning and verification [J]. Radiother Oncol,2008,86:276-284.
- [6] Arup LR, Nahum AE, Zacharatos C, et al. The effect of different lung densities on the accuracy of various dose calculation methods: implications for tumour coverage [J]. Radiother Oncol,2009,91:405-414.
- [7] Rønde HS, Hoffmann L. Validation of Varian's AAA algorithm with focus on lung treatments [J]. Acta Oncol,2009,48:209-215.

(收稿日期:2013-06-17)

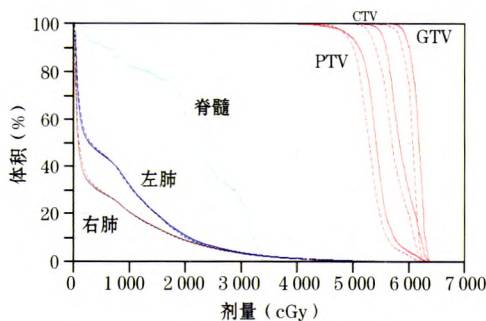


图 1 胸上段食管癌 VMAT 的靶区和危及器官 TPS (实线) 和 COMPASS (虚线) 验证结果的 DVH 图示例

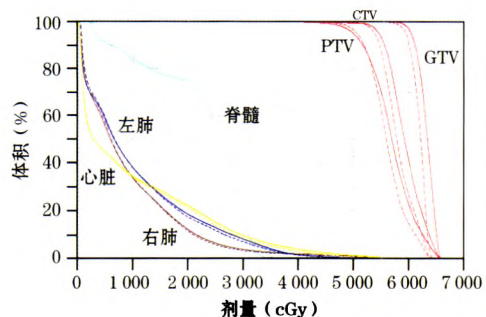


图 2 胸中段食管癌 VMAT 的靶区和危及器官 TPS (实线) 和 COMPASS (虚线) 验证结果的 DVH 图示例