

静态 IMRT 和 VMAT 计划在淋巴瘤纵隔放疗中的剂量学比较

张文珏¹ 丁真¹ 王越男¹ 郭智² 姜威¹ 彭苗¹ 梁军^{1,3} 陈志坚¹ 任骅^{1,3} 王绿化^{1,3}

¹国家癌症中心 国家肿瘤临床医学研究中心 中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院深圳医院放疗科,深圳 518116; ²国家癌症中心 国家肿瘤临床医学研究中心 中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院深圳医院肿瘤内科,深圳 518116; ³国家癌症中心 国家肿瘤临床医学研究中心 中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院放疗科,北京 100021

通信作者:任骅,Email: renhua2009@hotmail.com

【摘要】 目的 通过对比不同射野的静态调强放疗(IMRT)计划和容积旋转调强放疗(VMAT)计划靶区剂量分布与危及器官照射情况,探索行纵隔区域放疗的淋巴瘤患者最佳 IMRT 施行方式。方法 2017 年 3 月至 2019 年 1 月中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院深圳医院共 11 例化疗后行纵隔首程放疗的淋巴瘤患者纳入研究,其中男性 8 例、女性 3 例,Ann Arbor 分期 I ~ II 期 2 例、III ~ IV 期 9 例。霍奇金淋巴瘤(6 例)和非霍奇金淋巴瘤患者(5 例)分别给予处方剂量 36 Gy 和 50 Gy。每例患者均设计 3 种调强计划:5 野静态调强(5F-IMRT)计划、7 野静态调强(7F-IMRT)计划和 VMAT 计划,评估各计划靶区剂量分布、危及器官照射剂量和计划实施效率。**结果** 5F-IMRT、7F-IMRT、VMAT 计划靶区(PTV)平均适形指数(CI)和均匀指数(HI)分别为 0.64 ± 0.06 、 0.67 ± 0.05 、 0.76 ± 0.04 ($F = 17.045$, $P < 0.001$) 和 1.07 ± 0.01 、 1.07 ± 0.01 、 1.09 ± 0.01 ($F = 9.258$, $P = 0.001$), VMAT 计划 CI 显著优于静态 IMRT 计划(均 $P < 0.001$),但 HI 差于静态 IMRT 计划(均 $P < 0.001$)。5F-IMRT、7F-IMRT、VMAT 双肺低剂量受照体积(V_5)和高剂量受照体积(V_{30})分别为 $(43.98 \pm 7.77)\%$ 、 $(42.71 \pm 4.98)\%$ 、 $(55.92 \pm 8.16)\%$ ($F = 8.281$, $P = 0.001$) 和 $(8.19 \pm 2.97)\%$ 、 $(8.25 \pm 2.87)\%$ 、 $(7.53 \pm 3.16)\%$ ($F = 0.140$, $P = 0.870$), VMAT 计划双肺低剂量受照体积显著高于 5F-IMRT 和 7F-IMRT 计划(均 $P < 0.001$),高剂量受照体积差异无统计学意义。5F-IMRT、7F-IMRT、VMAT 左侧和右侧乳腺低剂量受照体积(V_4)分别为 $(24.29 \pm 8.14)\%$ 、 $(23.87 \pm 7.70)\%$ 、 $(80.17 \pm 22.92)\%$ ($F = 14.505$, $P = 0.005$) 和 $(22.12 \pm 13.28)\%$ 、 $(21.13 \pm 13.01)\%$ 、 $(81.77 \pm 20.76)\%$ ($F = 13.938$, $P = 0.006$), VMAT 计划乳腺的低剂量受照体积高于静态 IMRT 计划(均 $P < 0.05$)。5F-IMRT、7F-IMRT、VMAT 计划机器跳数和治疗时间分别为 $(1\ 622 \pm 281)$ MU、 $(1\ 729 \pm 286)$ MU、 (411 ± 75) MU ($F = 105.277$, $P < 0.001$) 和 (6.79 ± 0.93) min、 (7.42 ± 0.95) min、 (4.98 ± 0.00) min ($F = 29.545$, $P < 0.001$), VMAT 计划机器跳数显著少于静态 IMRT(均 $P < 0.001$),治疗时间显著短于静态 IMRT(均 $P < 0.001$)。**结论** 对于具有纵隔放疗适应证的淋巴瘤患者,VMAT 实施效率高但无明确剂量优势,采用 5F-IMRT 或 7F-IMRT 计划靶区适形性与均匀性好,部分危及器官受量更低。

【关键词】 淋巴瘤;放射治疗计划,计算机辅助;放疗计划比较

基金项目:深圳市医疗卫生三名工程资助项目(SZSM201612063)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-422X.2019.07.003

Dosimetric comparison of static intensity-modulated radiation therapy and volumetric modulated arc therapy in lymphoma patients received mediastinal radiation

Zhang Wenjue¹, Ding Zhen¹, Wang Yuenan¹, Guo Zhi², Jiang Wei¹, Peng Miao¹, Liang Jun^{1,3}, Chen Zhijian¹, Ren Hua^{1,3}, Wang Lyuhua^{1,3}

¹Department of Radiation Oncology, National Cancer Center, National Clinical Research Center for Cancer, Cancer Hospital & Shenzhen Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Shenzhen 518116, China; ²Department of Medical Oncology, National Cancer Center, National Clinical Re-

search Center for Cancer, Cancer Hospital & Shenzhen Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Shenzhen 518116, China; ³Department of Radiation Oncology, National Cancer Center, National Clinical Research Center for Cancer, Cancer Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100021, China

Corresponding author: Ren Hua, Email: renhua2009@hotmail.com

[Abstract] Objective To compare target dosimetric distribution and normal tissue radiation between different static intensity-modulated radiation therapy (IMRT) plans and volumetric modulated arc therapy (VMAT), and to identify the best IMRT plan for lymphoma patients needed mediastinal radiation. **Methods** A total of 11 patients with lymphoma who received first course radiotherapy in the mediastinal region after chemotherapy in Cancer Hospital & Shenzhen Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College from March 2017 to January 2019 were included in the study. There were 8 males and 3 females, 2 patients were in Ann Arbor stage I-II, and 9 cases in III-IV stage. There were 6 patients with Hodgkin lymphoma (HL) and 5 patients with non-Hodgkin lymphoma (NHL). Patients with HL and NHL were given prescript doses of 36 Gy and 50 Gy, respectively. Three plans were designed for each patient: static 5F-IMRT, 7F-IMRT and VMAT plan. The target dosimetric distribution, normal tissue radiation dose, and efficiency of each plan were evaluated. **Results** The mean conformity index (CI) and homogeneity index (HI) values of plan target volume (PTV) in 5F-IMRT, 7F-IMRT, VMAT plan were 0.64 ± 0.06 , 0.67 ± 0.05 , 0.76 ± 0.04 ($F = 17.045$, $P < 0.001$) and 1.07 ± 0.01 , 1.07 ± 0.01 , 1.09 ± 0.01 ($F = 9.258$, $P = 0.001$), respectively. VMAT showed significantly better CI than two static IMRT plans (both $P < 0.001$), but worse HI (both $P < 0.001$). The lungs low dose irradiation volume (V_5) and high dose irradiation volume (V_{30}) in 5F-IMRT, 7F-IMRT, VMAT plan were $(43.98 \pm 7.77)\%$, $(42.71 \pm 4.98)\%$, $(55.92 \pm 8.16)\%$ ($F = 8.281$, $P = 0.001$) and $(8.19 \pm 2.97)\%$, $(8.25 \pm 2.87)\%$, $(7.53 \pm 3.16)\%$ ($F = 0.140$, $P = 0.870$), respectively. The volume of low dose irradiation in lungs of VMAT plan was significantly higher than 5F-IMRT and 7F-IMRT plans (both $P < 0.001$), while high dose volume was no significant difference. The left and right breast low dose irradiation volume (V_4) in 5F-IMRT, 7F-IMRT and VMAT plan were $(24.29 \pm 8.14)\%$, $(23.87 \pm 7.70)\%$, $(80.17 \pm 22.92)\%$ ($F = 14.505$, $P = 0.005$) and $(22.12 \pm 13.28)\%$, $(21.13 \pm 13.01)\%$, $(81.77 \pm 20.76)\%$ ($F = 13.938$, $P = 0.006$), respectively. VMAT showed significantly higher breast low dose irradiation volume than static IMRT plan (both $P < 0.05$). The number of monitor units and treatment time in 5F-IMRT, 7F-IMRT, VMAT plan were $(1\ 622 \pm 281)$ MU, $(1\ 729 \pm 286)$ MU, (411 ± 75) MU ($F = 105.277$, $P < 0.001$) and (6.79 ± 0.93) min, (7.42 ± 0.95) min, (4.98 ± 0.00) min ($F = 29.545$, $P < 0.001$), respectively. VMAT showed significantly less monitor units than static IMRT (both $P < 0.001$) and shorter treatment time (both $P < 0.001$). **Conclusion** For lymphoma patients who have the indication of mediastinal radiotherapy, VMAT is highly efficient and has no definite dose advantage, the static 5F-IMRT or 7F-IMRT plan has good conformal and uniform target area, and some organs at risk exposure is even lower.

[Key words] Lymphoma; Radiotherapy planning, computer-assisted; Radiotherapy plan comparison

Fund program: Sanming Project of Medicine in Shenzhen (SZSM201612063)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-422X.2019.07.003

纵隔淋巴结是恶性淋巴瘤常见的受累区域,且常常表现为大肿块。对于早期以及初诊时存在纵隔大肿块的 III ~ IV 期霍奇金淋巴瘤、部分侵袭性淋巴瘤,在全身治疗后行纵隔区域照射可改善患者的预后^[1]。目前全国广泛开展的静态调强放疗(intensity-modulated radiation therapy, IMRT)较常规放疗和三维适形放疗(3-dimension conform radiotherapy, 3D-CRT)可更好地保护靶区周围的危及器官(organ at risk, OAR),且靶区处方剂量覆盖更佳,已有多项剂量学

比较及预后分析研究支持 IMRT 可为纵隔照射患者带来剂量学获益和临床获益^[2]。容积旋转调强放疗(volumetric modulated arc therapy, VMAT)是一种新型的调强放疗方式,通过一个或多个弧以及多叶光栅系统(MLC)运动调节光子注量,进一步增加了放疗实施的自由度,并且可有效缩短治疗时间^[3]。淋巴瘤纵隔区照射通常靶区体积较大,且因淋巴瘤预后较好,需更多考虑放疗低剂量辐射致第二原发癌的风险。对纵隔区放疗进行静态 IMRT 和 VMAT 计划的

剂量学比较,可为今后临床实践提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 一般临床资料

检索 2017 年 3 月至 2019 年 1 月在中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院深圳医院接受治疗的淋巴瘤患者共 153 例,其中 11 例行纵隔区域放疗。所有患者均经病理科复阅切片确诊为淋巴瘤,6 例为霍奇金淋巴瘤,5 例为非霍奇金淋巴瘤。男性 8 例,女性 3 例;根据 Ann Arbor 分期标准,2 例为 I ~ II 期,9 例为 III ~ IV 期;美国东部肿瘤协作组 (ECOG) 评分 0 ~ 1 分 10 例,2 ~ 3 分 1 例;霍奇金淋巴瘤患者中,国际预后评分 (international prognostic score, IPS) 评分 0 ~ 1 分 2 例,2 ~ 3 分 3 例,≥3 分 1 例;非霍奇金淋巴瘤患者中,国际预后指数 (international prognostic index, IPI) 评分 0 ~ 1 分 0 例,2 ~ 3 分 3 例,≥3 分 2 例。计划靶区 (plan target volume, PTV) 356 ~ 841 cm³ (中位数 632 cm³),详细的疗前分期检查包括完整的病史回顾、详细的体格检查、血常规、肝肾功能、血沉、胸部 X 线检查、颈胸腹盆 CT 或 PET-CT 和 (或) MRI 及骨髓穿刺或活检。本研究经医院伦理委员会审批通过。

1.2 治疗方法与 IMRT 定位

霍奇金淋巴瘤患者接受化疗方案为 ABVD 方案 (多柔比星 + 博来霉素 + 长春新碱 + 氮烯咪胺) 及 BEACOPP 方案 (博来霉素 + 依托泊苷 + 多柔比星 + 环磷酰胺 + 长春新碱 + 甲基苄肼 + 泼尼松),非霍奇金淋巴瘤患者接受以 R-CHOP 方案 (利妥昔单抗 + 环磷酰胺 + 多柔比星 + 长春新碱 + 泼尼松) 为基础的化疗联合靶向治疗。所有患者均接受受累部位照射 (involved site radiotherapy, ISRT) 和受累淋巴结照射 (involved field radiotherapy, INRT),定位取仰卧位,头颈肩热塑体膜固定后行 CT 增强模拟定位,层间距 0.5 cm。向上至颅底,向下包全双肺。

1.3 靶区与 OAR 勾画

模拟 CT 定位图像与患者化疗前影像融合 (可为 CT 或 PET-CT),在定位图像上勾画所有靶区。大体肿瘤靶区 (gross target volume, GTV) 为根据疗前影像勾画的纵隔阳性淋巴结;临床靶区 (clinic target volume, CTV) 覆盖全部的 GTV 并外扩 2 cm,可根据解剖屏障调整。PTV 为 CTV 前后左右外扩 0.5 cm、上下外扩 0.5 ~ 1 cm 形成。OAR 包括脊髓、心脏、双肺、女性患者乳腺、食管和气管等。同时将脊髓外放 0.5 cm 形成脊髓计划敏感器官体积 (planning organ at risk volume, PRV) 以减少摆位误差可能带来的影响。

1.4 靶区与 OAR 限制剂量

静态 IMRT 和 VMAT 靶区处方剂量与 OAR 剂量限制相同。霍奇金淋巴瘤患者处方剂量为 95% PTV 36 Gy/18 f,非霍奇金淋巴瘤患者处方剂量为 95% PTV 50 Gy/25 f。OAR 限量中脊髓 PRV ≤ 40 Gy,双肺 V₂₀ ≤ 30%,心脏 V₃₀ ≤ 40%、V₄₀ ≤ 30%,余 OAR 不做剂量限制,仅评价受照剂量。

1.5 IMRT 计划实施

每例患者均涉及 3 种治疗计划,分别为 2 种静态 IMRT 计划即 5 野静态调强计划 (5F-IMRT) 和 7 野静态调强计划 (7F-IMRT) 以及 VMAT 计划。静态 IMRT 治疗计划由美国 Varian 公司的逆向调强计划系统 (Eclipse 13.6) 分别采用 5 个、7 个大野完成,放疗采用 6 MV-X 线静态调强,5F-IMRT 机架角度数分别为 260°、310°、0°、50°、100°,7F-IMRT 机架角度数分别为 240°、280°、320°、0°、40°、80°、120°;VMAT 治疗计划由逆向调强计划系统 (Eclipse 13.6) 采用 6 MV-X 线 2 个全弧完成,顺时针方向 180.1 ~ 180°,逆时针方向 180 ~ 180.1°,所有计划均在美国 Varian 公司 VitalBeam 直线加速器上施行。

1.6 靶区评价指标

靶区评价指标包括最低剂量 (D_{min})、最高剂量 (D_{max})、平均剂量 (D_{mean})、PTV D₉₅、V_{95%}、V_{105%}、适形指数 (conformity index, CI) 和均匀指数 (homogeneity index, HI)。采用 CI 值评价计划适形度,CI = PTV_{PTV}²/PTV × PIV,其中 PIV 定义为处方剂量 (或 95% 处方剂量) 等剂量线所包绕的体积,PTV_{PTV} 定义为分布于处方剂量 (或 95% 处方剂量) 等剂量线以内的体积;CI 值范围为 0 ~ 1,越接近于 1 代表计划适形度越好。HI = D₅/D₉₅,其中 D₅ 定义为 5% 靶体积受到的剂量,D₉₅ 定义为 95% 靶体积受到的剂量。HI 值范围为 ≥ 1,越接近于 1 代表靶区剂量均匀性越好。V_{95%} 定义为靶区内超过 95% 处方剂量的相对体积,V_{105%} 定义为靶区内超过 105% 处方剂量的相对体积。

1.7 OAR 评价指标

采用剂量体积直方图评价,串联 OAR 如脊髓分别记录 D_{max}、D₅₀、D₈₀,D₅₀ 定义为 50% 靶体积受到的剂量,D₈₀ 定义为 80% 靶体积受到的剂量。并联 OAR 如食管、气管、心脏分别记录 D_{max}、D_{mean}、D₅₀、D₈₀,心脏同时评价 V₃₀。双肺评价 D_{mean}、V₅、V₂₀、V₃₀,乳腺评价 D_{max}、D_{mean}、V₄、V₂₀。V₄、V₅、V₂₀、V₃₀、V₄₀ 分别定义为靶区内超过 4 Gy、5 Gy、20 Gy、30 Gy、40 Gy 的相对体积。

1.8 机器跳数与治疗时间

所有计划机器跳数由 Eclipse 系统直接读出。静态 IMRT 计划治疗时间根据公式 T_{IMRT} = MU/DR +

$(N_{BS} - N_{OB} - N_{AB}) \times 2.98 + GA/5.78 + (N_{OB} - 1) \times 17.58 + N_{AB} \times 26.95$ 估算,其中 N_{BS} 为子野数, N_{OB} 为射野数, N_{AB} 为分野数;VMAT 计划治疗时间由 Eclipse 系统估算。

1.9 统计方法

采用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 描述,采用方差分析比较不同计划的剂量学差异,采用 LSD-*t* 检验进一步两两比较静态 IMRT 计划与 VMAT 计划剂量学差异,偏态分布的计量资料以 $M(Q_R)$ 描述,采用 Kruskal-Wallis *H* 检验比较不同计划间的差异,检验水准 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 靶区结果

PTV 为 356 ~ 841 cm³ (平均体积 642.85 cm³, 中位体积 632 cm³), 3 种计划的 CI、HI 以及 $V_{105\%}$ 差异具有统计学意义。进一步两两比较显示,VMAT 计划 CI 显著优于静态 IMRT 计划(均 $P < 0.001$),但 HI 差

于静态 IMRT 计划(均 $P < 0.001$),详见表 1。

2.2 OAR 受量

3 种计划在双肺、乳腺等 OAR 低剂量控制差异存在统计学意义,详见表 2。进一步两两分析显示 VMAT 计划在双肺、乳腺等 OAR 低剂量控制明显差于静态 IMRT,但在心脏、乳腺高剂量控制有改善趋势。

2.3 机器跳数与治疗时间

5F-IMRT、7F-IMRT 和 VMAT 3 种计划的跳数分别为(1 622 ± 281) MU、(1 729 ± 286) MU 和(411 ± 75) MU,三者差异有统计学意义($F = 105.277, P < 0.001$),VMAT 计划的跳数显著低于 5F-IMRT 和 7F-IMRT(均 $P < 0.001$)。根据公式计算及 Eclipse 系统预估,5F-IMRT、7F-IMRT 和 VMAT 计划治疗时间分别为(6.79 ± 0.93) min、(7.42 ± 0.95) min 和(4.98 ± 0.00) min,三者差异有统计学意义($F = 29.545, P < 0.001$),VMAT 计划治疗时间显著短于 5F-IMRT 和 7F-IMRT(均 $P < 0.001$)。

表 1 11 例淋巴瘤患者 PTV 靶区覆盖度与均匀性各参数比较结果($\bar{x} \pm s$)

项目	5F-IMRT	7F-IMRT	VMAT	F 值	P 值
D _{min} (Gy)	9.51 ± 2.79	8.96 ± 2.37	15.37 ± 2.71	1.823	0.179
D _{max} (Gy)	47.61 ± 8.64	47.47 ± 8.59	47.65 ± 8.84	0.001	0.999
D _{mean} (Gy)	43.72 ± 7.59	43.63 ± 7.51	44.47 ± 7.68	0.041	0.960
V _{95%} (%)	2.15 ± 0.68	2.22 ± 0.68	1.96 ± 0.49	0.505	0.609
V _{105%} (%)	29.82 ± 11.03 ^a	29.09 ± 12.37 ^a	60.34 ± 19.07	15.807	<0.001
CI	0.64 ± 0.06 ^a	0.67 ± 0.05 ^a	0.76 ± 0.04	17.045	<0.001
HI	1.07 ± 0.01 ^a	1.07 ± 0.01 ^a	1.09 ± 0.01	9.258	0.001

注:PTV 为计划靶区;IMRT 为调强放疗;VMAT 为容积旋转调强放疗;CI 为适形指数;HI 为均匀指数;^a 为与 VMAT 比较, $P < 0.001$

表 2 11 例淋巴瘤患者肺、食管、心脏等 OAR 各参数比较结果($\bar{x} \pm s/M(Q_R)$)

项目	5F-IMRT	7F-IMRT	VMAT	F 值	P 值
双肺					
D _{mean} (Gy)	8.64 ± 1.28 ^a	8.60 ± 1.27 ^a	10.59 ± 1.26	9.462	0.001
V ₅ (%)	43.98 ± 7.77 ^a	42.71 ± 4.98 ^a	55.92 ± 8.16	8.281	0.001
V ₂₀ (%)	14.31 ± 2.77	14.24 ± 2.89	17.38 ± 3.76	4.285	0.023
V ₃₀ (%)	8.19 ± 2.97	8.25 ± 2.87	7.53 ± 3.16	0.140	0.870
食管					
D _{max} (Gy)	45.22 ± 8.24	47.10 ± 8.16	46.29 ± 8.20	0.049	0.952
D _{mean} (Gy)	25.59 ± 4.60	26.49 ± 4.84	25.60 ± 4.53	0.000	0.990
D ₅₀ (Gy)	29.39(9.82)	28.84(9.28)	32.48(10.04)	-	0.839
D ₈₀ (Gy)	2.74(9.89)	3.22(9.84)	5.42(5.98)	-	0.288
心脏					
D _{max} (Gy)	46.58 ± 8.31	47.76 ± 8.37	47.04 ± 8.58	0.025	0.975
D _{mean} (Gy)	12.69 ± 4.57	12.69 ± 5.00	11.05 ± 4.48	0.575	0.569
V ₃₀ (%)	15.33 ± 5.97 ^a	16.10 ± 6.48 ^a	10.30 ± 5.16	2.951	0.068
D ₅₀ (Gy)	7.44(12.75)	4.92(10.77)	6.40(8.19)	-	0.635
D ₈₀ (Gy)	1.18(2.12)	1.12(2.02)	1.21(2.03)	-	0.837

续表 2

项目	5F-IMRT	7F-IMRT	VMAT	F 值	P 值
脊髓					
D _{max} (Gy)	37.60 ± 1.57	37.49 ± 1.49	37.28 ± 3.96	0.092	0.912
D ₅₀ (Gy)	4.42(5.87)	3.87(6.47)	1.57(3.50)	-	0.611
D ₈₀ (Gy)	0.14(0.21)	0.14(0.18)	0.11(0.19)	-	0.259
脊髓 PRV					
D _{max} (Gy)	41.08 ± 4.53	41.5 ± 4.38	39.64 ± 5.04	0.260	0.773
D ₅₀ (Gy)	5.07(7.35)	4.13(7.25)	4.24(4.59)	-	0.869
D ₈₀ (Gy)	0.15(0.23)	0.17(0.22)	0.16(0.21)	-	0.866
气管					
D _{max} (Gy)	46.14 ± 8.76	44.87 ± 9.95	46.49 ± 8.32	0.322	0.727
D _{mean} (Gy)	38.47 ± 11.85	42.49 ± 7.35	43.62 ± 7.07	0.859	0.434
D ₅₀ (Gy)	42.30 ± 7.23	44.35 ± 7.49	44.49 ± 7.55	0.266	0.768
D ₈₀ (Gy)	38.78 ± 6.75	41.13 ± 7.05	43.11 ± 6.92	1.302	0.287
女性乳腺(左侧)					
D _{max} (Gy)	35.58 ± 2.01	36.00 ± 1.20	26.00 ± 5.06	9.216	0.015
D _{mean} (Gy)	5.61 ± 1.63	5.13 ± 1.57	9.86 ± 2.58	5.175	0.049
V ₄ (%)	24.29 ± 8.14 ^a	23.87 ± 7.70 ^a	80.17 ± 22.92	14.505	0.005
V ₂₀ (%)	11.31(8.28)	7.99(5.90)	0.34(1.44)	-	0.050
女性乳腺(右侧)					
D _{max} (Gy)	32.92 ± 4.52	32.01 ± 3.91	22.43 ± 2.01	7.637	0.220
D _{mean} (Gy)	4.82 ± 3.02	4.39 ± 2.83	8.67 ± 1.90	2.418	0.170
V ₄ (%)	22.12 ± 13.28 ^a	21.13 ± 13.01 ^a	81.77 ± 20.76	13.938	0.006
V ₂₀ (%)	2.62(8.67)	4.59(0.40)	0.00(0.15)	-	0.099

注: OAR 为危及器官; IMRT 为调强放疗; VMAT 为容积旋转调强放疗; PRV 为计划敏感器官体积; ^a 为与 VMAT 比较, $P < 0.05$

3 讨论

随着诊疗评估手段如 PET-CT 和其他治疗手段如靶向治疗、干细胞移植等治疗手段的进步^[4], 放疗在淋巴瘤治疗中的地位较前下降, 但对于早期霍奇金淋巴瘤及部分侵袭性非霍奇金淋巴瘤, 放疗仍然是提高无瘤生存率和局部控制的重要手段^[5-6]; 对于晚期淋巴瘤, 全身治疗有效时对初诊大肿块部位行 ISRT, 亦是目前国内外指南推荐的标准治疗之一。静态 IMRT 技术已在全国范围广泛开展, 纵隔受累的淋巴瘤患者采用静态 IMRT 行纵隔区域照射已经取得了较好的靶区覆盖和 OAR 保护。纵隔区域照射具有器官活动明显、涉及正常器官种类较多等特点, 对于预期生存较长的淋巴瘤患者, 减少早晚期损伤和第二原发癌发生尤为重要^[7], 因此进一步优化正常组织保护十分必要。VMAT 是在静态 IMRT 技术基础上进一步完善优化的新型放疗技术, 通过持续改变机架旋转速度、多叶准直器位置和剂量率, 来调整各个角度强度, 在机架旋转时不间断照射, 从而缩短了治疗

时间, 减少了治疗区运动对放疗的影响^[3,8-9], 目前已广泛应用于多种恶性肿瘤的放疗。

本研究旨在对比静态 IMRT 与 VMAT 计划的剂量学参数与实施效率, 探索哪种放疗方式能更好地平衡靶区受量与周围 OAR 的受量。研究靶区受量结果提示 3 种计划靶区覆盖无明显差异, VMAT 计划适形度更佳, 但靶区剂量均匀度劣于 5F-IMRT 和 7F-IMRT 计划, 靶区内热区体积更大。既往纵隔放疗的剂量学研究多数认为 VMAT 计划靶区剂量均匀性劣于 IMRT 计划。部分研究中射野数较少的静态 IMRT 靶区覆盖存在劣势。Lin 等^[10]报道在胸上段食管癌中单弧 VMAT 和双弧 VMAT 计划 HI 差于 7F-IMRT 和 9F-IMRT ($P < 0.05$), 双弧 VMAT 计划 CI 差于 5F-IMRT、7F-IMRT、9F-IMRT 和单弧 VMAT ($P < 0.05$)。在胸中段食管癌患者中, VMAT 计划 PTV 靶区覆盖度优于 5F-IMRT ($P = 0.034$), HI 差于 5F-IMRT ($P = 0.017$)。Xu 等^[11]的研究入组了 16 例原发纵隔弥漫大 B 细胞淋巴瘤, 行 5F-IMRT、7F-IMRT、9F-IMRT

与双弧VMAT计划比较,结果显示5F-IMRT的靶区覆盖度较其他计划稍差。由于本研究采用ISRT或INRT,而上述研究患者靶区勾画时依照累及野照射(involved field radiotherapy, IFRT)原则,因此靶区体积更大,子野数较少的静态IMRT计划靶区覆盖较差。VMAT计划施行时间明显短于静态IMRT,而纵隔区部分OAR受呼吸运动影响较大,缩短治疗时间有利于开展呼吸门控技术,可能提高治疗精度。

本研究OAR受量结果提示VMAT计划在心脏以及脊髓整体受照剂量低,但双肺、气管、食管和乳腺的平均受量高于5F-IMRT和7F-IMRT,主要表现为低剂量区受照体积显著高于5F-IMRT和7F-IMRT,高剂量区差异不明显,甚至低于静态IMRT,与部分既往研究结果相符^[2,11]。Xu等^[11]的研究显示静态IMRT心脏、甲状腺、喉的平均受量显著低于VMAT,双肺及乳腺的低剂量区增加;Fiandra等^[2]比较了10例女性早期霍奇金淋巴瘤患者3D-CRT、单弧VMAT和双弧VMAT计划,VMAT计划靶区覆盖度好并且正常组织保护好,但同样观察到肺与乳腺受到了更多的低剂量照射。VMAT的此种剂量特点在目前的靶区勾画原则下可能更为明显,既往有研究对比10例霍奇金淋巴瘤患者根据INRT和IFRT勾画靶区,行静态IMRT和VMAT计划剂量比较,结果显示IFRT时,静态IMRT和VMAT计划OAR受量差异无统计学意义,但采用INRT时,两种计划的OAR受量差异具有统计学意义,特别是乳腺和肺的受照剂量^[12]。部分弧VMAT可能改善这一剂量分布缺点,刘建平^[13]在中央型肺癌患者中对比了部分弧VMAT与全弧VMAT计划,提示部分弧VMAT的肺低剂量区明显降低,适形度较全弧VMAT稍差,可在保留VMAT优势的前提下缩短治疗时间。

综上所述,VMAT在本研究中无明显剂量优势,对于有纵隔放疗适应证的淋巴瘤患者,采用5F-IMRT或7F-IMRT计划靶区适形性与均匀性好,且OAR受量更低。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参 考 文 献

- [1] Koeck J, Abo-Madyan Y, Lohr F, et al. Radiotherapy for early mediastinal hodgkin lymphoma according to the German Hodgkin Study Group (GHSG): the roles of intensity-modulated radiotherapy and involved-node radiotherapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 83(1): 268-276. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2011.05.054.
- [2] Fiandra C, Filippi AR, Catuzzo P, et al. Different IMRT solutions vs. 3D-conformal radiotherapy in early stage Hodgkin's lymphoma: dosimetric comparison and clinical considerations[J]. *Radiat Oncol*, 2012, 7: 186. DOI: 10.1186/1748-717X-7-186.
- [3] Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. *Med Phys*, 2008, 35(1): 310-317. DOI: 10.1118/1.2818738.
- [4] 李思源, 徐文贵, 童冠圣, 等. ¹⁸F-FDG PET/CT对淋巴瘤化疗后疗效评估及无进展生存期预测的价值[J]. *国际肿瘤学杂志*, 2017, 44(5): 361-365. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-422X.2017.05.009.
- [5] 谷俊娇, 刘艳艳. 侵袭性非霍奇金淋巴瘤治疗进展[J]. *国际肿瘤学杂志*, 2013, 40(9): 705-707. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-422X.2013.09.021.
- [6] Lamy T, Damaj G, Soubeyran P, et al. R-CHOP 14 with or without radiotherapy in non-bulky limited-stage diffuse large B-cell lymphoma (DLBCL)[J]. *Blood*, 2018, 131(2): 174-181. DOI: 10.1182/blood-2017-07-793984.
- [7] van Nimwegen FA, Schaapveld M, Cutter DJ, et al. Radiation dose-response relationship for risk of coronary heart disease insurvivors of Hodgkin lymphoma [J]. *J Clin Oncol*, 2015, 34(3): 235-243. DOI: 10.1200/JCO.2015.63.4444.
- [8] Ye J, Rao M, Chen F, et al. Evaluation of the dosimetric impact of intrafraction motion and MLC leaf interplay in hypofractionated prostate IMRT and VMAT treatment[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 78(3): S378. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2010.07.891.
- [9] Jeong Y, Lee S, Kwak J, et al. A dosimetric comparison of volumetric modulated arc therapy (VMAT) and non-coplanar intensity modulated radiation therapy (IMRT) for nasal cavity and paranasal sinus cancer[J]. *Radiat Oncol*, 2014, 9: 193. DOI: 10.1186/1748-717X-9-193.
- [10] Lin CY, Huang WY, Jen YM, et al. Dosimetric and efficiency comparison of high-dose radiotherapy for esophageal cancer: volumetric modulated arc therapy versus fixed-field intensity-modulated radiotherapy[J]. *Dis Esophagus*, 2014, 27(6): 585-590. DOI: 10.1111/dote.12144.
- [11] Xu LM, Kang ML, Jiang B, et al. A study of the dosimetric characteristics between different fixed-field IMRT and VMAT in early-stage primary mediastinal B-cell lymphoma [J]. *Med Dosim*, 2018, 43(1): 91-99. DOI: 10.1016/j.meddos.2017.08.010.
- [12] Weber DC, Peguret N, Dipasquale G, et al. Involved-node and involved-field volumetric modulated arc vs. fixed beam intensity-modulated radiotherapy for female patients with early-stage supra-diaphragmatic Hodgkin lymphoma: a comparative planning study[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2009, 75(5): 1578-1586. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2009.05.012.
- [13] 刘建平, 杨海芳, 王志武, 等. 部分弧容积旋转调强计划在中央型肺癌的应用[J]. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(11): 1091-1095. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2017.11.003.

(收稿日期:2019-02-22 修回日期:2019-05-30)

(本文编辑:孙娜)