

论著·临床研究

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2023.02.011

网络首发 [https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1097.R.20230112.1909.001.html\(2023-01-13\)](https://kns.cnki.net/kcms/detail//50.1097.R.20230112.1909.001.html(2023-01-13))

3 种调强技术在局部晚期直肠癌术前新辅助短程放疗的剂量学比较*

周小琴, 罗佳, 陈川, 耿明英, 周鹏[△]

(陆军军医大学大坪医院肿瘤科, 重庆 400042)

[摘要] **目的** 比较静态调强放疗(sIMRT)、动态调强放疗(dIMRT)和容积旋转调强放疗(VMAT)在局部晚期直肠癌术前新辅助短程放疗的剂量学差异。**方法** 共 16 例局部晚期直肠癌患者纳入研究。分别设计 3 种调强放疗计划(7F-sIMRT, 7F-dIMRT, VMAT), 采用三维计划验证系统进行剂量验证, 比较 3 种技术之间计划靶区和危及器官剂量学、机器跳数(MU)、伽马通过率差异。**结果** 3 组计划靶区 98%、2%、50%靶区体积剂量(D_{98} 、 D_2 、 D_{50})、最大剂量(D_{max})、最小剂量(D_{min})、均匀性指数(HI)、适形度指数(CI)差异有统计学意义($P < 0.05$), 平均剂量(D_{mean})、107%处方剂量覆盖的体积($V_{107\%}$)无明显差异($P > 0.05$)。3 组左、右侧股骨头 15 Gy 剂量曲线覆盖的体积(V_{15})、 D_{max} , 膀胱 25、20、10 Gy 剂量曲线覆盖的体积(V_{25} 、 V_{20} 、 V_{10})、 D_{min} 、 D_{mean} , 小肠 V_{25} 、 V_{20} 、 V_{15} 、 V_{10} 、 D_{min} 、 D_{mean} , 阴茎 V_{10} 、 D_{min} 、 D_{mean} , 会阴 D_{min} 、 D_{mean} 差异有统计学意义($P < 0.05$)。sIMRT 组 MU 明显低于 dIMRT 组和 VMAT 组($P < 0.05$)。在不同评判标准下, sIMRT 组伽马通过率均高于 dIMRT 组和 VMAT 组($P < 0.05$)。**结论** 3 种放疗技术各有优缺点, 应根据临床需求选择合适的直肠癌术前新辅助短程放疗技术。

[关键词] 短程放疗; 静态调强放疗; 动态调强放疗; 容积旋转调强放疗; 剂量学

[中图分类号] R735.3+7

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-8348(2023)02-0215-06

Comparison of dosimetry among 3 kinds of intensity-modulated technology in locally advanced rectal cancer preoperative neoadjuvant short-term radiotherapy*

ZHOU Xiaoqin, LUO Jia, CHEN Chuan, GENG Mingying, ZHOU Peng[△]

(Department of Oncology, Army Military Medical University, Chongqing 400042, China)

[Abstract] **Objective** To compare the differences of dosimetry in locally advanced rectal cancer preoperative neoadjuvant short-term radiotherapy among the static intensity-modulated radiotherapy (sIMRT), dynamic intensity-modulated radiotherapy (dIMRT) and volume-modulated arc therapy (VMAT). **Methods** Sixteen patients with locally advanced rectal cancer were enrolled in this study. The three kinds of intensity-modulated radiotherapy plans (7F-sIMRT, 7F-dIMRT, VMAT) were designed respectively. The dose verification was performed by the three-dimensional plan verification system. The differences in the plan targeted region, dosimetry of organs at risk, machine hop count (MU) and γ pass rates were compared among the three techniques. **Results** The doses in 98%, 2% and 50% target volume (D_{98} , D_2 , D_{50}) of the plan target region, maximal dose (D_{max}); minimal dose (D_{min}); homogeneity index (HI) and conformal index (CI) had statistical differences among the three groups ($P < 0.05$). There was no statistically significant difference in the mean dose (D_{mean}) and volume covered by 107% prescription dose ($V_{107\%}$) among the three groups ($P > 0.05$). The volume covered by 15 Gy dose curve of left and right femoral head (V_{15}), volume of bladder covered by 25, 20, 10 Gy dose curves (V_{25} , V_{20} , V_{10}), D_{min} , D_{mean} , small intestine V_{25} , V_{20} , V_{15} , V_{10} D_{min} and D_{mean} , penis V_{10} , D_{min} and D_{mean} and perineum D_{min} and D_{mean} had statistical differences among 3 groups ($P < 0.05$). MU in the sIMRT group was significantly lower than those in the dIMRT group and VMAT group ($P < 0.05$). In the different evaluation standards, the gamma passing rate in the sIMRT group was higher than that in the dIMRT group and VMAT group ($P < 0.05$). **Conclusion** Three radiotherapy techniques have their own advantages and disadvantages, and the suitable rectal cancer preoperative neoadjuvant short-term radiotherapeutic techniques should be

* 基金项目: 重庆市科卫联合重点课题项目(2022ZDXM027)。 作者简介: 周小琴(1981-), 主管护师, 学士, 主要从事放疗研究。

[△] 通信作者, E-mail: 512638685@qq.com。

selected according to the clinical need.

[Key words] short-term chemoradiotherapy; static intensity-modulated radiotherapy; dynamic intensity-modulated radiotherapy; volume-modulated arc therapy; dosimetry

术前新辅助同步放化疗联合直肠全系膜切除术,是当前国际指南推荐的局部晚期直肠癌标准治疗方案,可以提高手术切除率和保肛率,明显改善患者的生存时间和生活质量^[1-5]。常用的新辅助放疗有长程放疗(50.4 Gy, 28 次)和短程放疗(25 Gy, 5 次),已有研究报道短程放疗较长程放疗在病理完全缓解率更优、疾病相关的治疗失败率更低,总生存、无疾病生存和晚期毒性方面结果相当,短程放疗还具有治疗时间短、患者耐受性和依从性好等优点^[6-8]。术前短程放疗联合化疗可作为长程放疗的替代方案^[9]。

调强放疗分为静态调强放疗(static intensity modulated radiotherapy, sIMRT)和动态调强放疗(dynamic intensity modulated radiotherapy, dIMRT)。sIMRT 是机架固定、多野光栅(multi-leave collimators, MLC)形成子野后,直线加速器出束,治疗时间较长。为了缩短治疗时间,机架固定,MLC 运动的同时直线加速器出束,这种治疗方法即为 dIMRT。容积旋转调强放疗(volumetric modulated arc therapy, VMAT)是在调强放疗的基础上,将 dIMRT 与弧形治疗相结合,可缩短治疗时间^[10-12]。从理论上 VMAT 是要优于 sIMRT 和 dIMRT。直肠癌放疗通常采用 sIMRT,但治疗时间太长^[13]。VMAT 因剂量率可变、机架旋转、MLC 动态改变,能明显提高治疗的精准性和计划的实施效率,具有剂量均匀、适形度好、治疗时间短等优点,近年来在直肠癌放疗中也有应用^[14-16]。已有研究报道在直肠癌常规分割放疗下,VMAT 在剂量分布、治疗时间方面均不劣于调强放疗^[17-19]。仅有少量研究探讨了在直肠癌术前新辅助短程放疗中 IMRT 和 VMAT 的差异,但未在计划验证方面进行比较^[20-21]。本研究在直肠癌术前短程放疗中比较 sIMRT、dIMRT 和 VMAT 的剂量学差异和计划验证结果差异。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2021 年 4 月至 2022 年 6 月于本院行直肠癌术前新辅助短程放疗患者 16 例,其中男 9 例,女 7 例,年龄 25~77 岁。患者均经病理诊断为直肠腺癌,临床分期为 II~III 期。所有患者均签署知情同意书,且本研究已获得本院伦理委员会批准。

1.2 方法

1.2.1 CT 定位和靶区勾画

患者采用仰卧位,头朝机架,热塑体膜固定,定位前充盈膀胱,在飞利浦公司 16 排 CT 模拟定位机上行 CT 增强扫描,扫描层厚为 5 mm,扫描范围从肝脏上缘到股骨头中段。CT 图像经网络传输至瑞典医科达

公司 Monaco TPS(版本号 5.11)。由医师勾画肿瘤靶区(GTV)、临床靶区(CTV),CTV 外扩 5 mm 生成计划靶区(PTV),危及器官勾画包括小肠、膀胱、股骨头、阴茎、会阴等。

1.2.2 治疗计划设计

PTV 处方剂量为 25 Gy/5 F,所有计划要求 100% 处方剂量覆盖 95% 的 PTV 体积。采用 Monaco TPS 为每位患者制订 3 组计划(7F-sIMRT, 7F-dIMRT, VMAT),选择 PTV 中心作为计划中心点,8 MV X 射线,sIMRT、dIMRT 采用 7 野共面照射,机架固定,射野角度分别为 180°、147°、114°、70°、290°、246°、213°,VMAT 采用等中心单野双弧进行照射,1 个照射野设置 2 个全弧。所有计划的优化限制条件均保持一致。

1.2.3 计划验证

计划验证设备选择美国 Sun Nuclear 公司的 ArcCHECK。将每位患者的计划移植到 ArcCHECK 模体中,ArcCHECK 模体重新计算剂量,记为该患者的 QA 计划,并将 RT Plan 与 RT DOSE 文件导出保存至对应的文件夹。ArcCHECK 模体摆放到位后,测量本底,校正矩阵和绝对剂量。将每位患者的计划传输至系统中排程后进行计划验证,通过模体获取实际测量的剂量。将 QA 计划的 RT Plan 与 RT DOSE 文件导入 SNC patient 软件,与实际测得的剂量进行对比分析,记录阈值设置为 10%,3 mm/3%、2 mm/2%、1 mm/1% 3 种评判标准下的伽马通过率。

1.2.4 计划评估

靶区剂量学包括 2%、98%、50% 靶区体积剂量(D_2 、 D_{98} 、 D_{50})、最大剂量(D_{max})、最小剂量(D_{min})、平均剂量(D_{mean})、107% 处方剂量覆盖的体积($V_{107\%}$)、均匀性指数(homogeneity index, HI)、适形度指数(conformal index, CI)。 $HI = (D_2 - D_{98}) / D_{50} \times 100\%$,HI 越小,剂量均匀性越好。 $CI = V_{ref}^2 / (V_t \times V_{ref})$, V_{ref} 表示处方剂量覆盖靶区体积, V_t 表示靶区体积, V_{ref} 表示处方剂量体积,CI 值越接近 1,适形度越好。危及器官(小肠、膀胱、股骨头、阴茎、会阴)剂量学参数主要评价 25、20、15、10 Gy 剂量曲线覆盖的体积(V_{25} 、 V_{20} 、 V_{15} 、 V_{10})、 D_{max} 、 D_{min} 、 D_{mean} 。比较 3 种计划的机器跳数(monitor unit, MU)。

1.3 统计学处理

采用 SPSS20.0 统计软件进行分析。计量资料以 $M(P_{25}, P_{75})$ 表示,多组间比较采用 Friedman 检验,两两比较采用 q 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量学比较

3 组 D_{98} 、 D_2 、 D_{50} 、 D_{max} 、 D_{min} 、HI、CI 比较差异均有统计学意义 ($P < 0.05$)， D_{mean} 、 $V_{107\%}$ 无明显差异 ($P > 0.05$)，见表 1。

2.2 危及器官剂量学比较

左、右侧股骨头：3 组 V_{20} 、 V_{10} 、 D_{min} 、 D_{mean} 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)， V_{15} 、 D_{max} 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。膀胱：3 组 V_{25} 、 V_{20} 、 V_{10} 、 D_{min} 、 D_{mean} 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)， V_{15} 、 D_{max} 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。小肠：3 组 V_{25} 、 V_{20} 、 V_{15} 、 V_{10} 、 D_{min} 、 D_{mean} 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)， D_{max} 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)。阴茎：3 组 V_{10} 、 D_{min} 、 D_{mean} 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)， V_{15} 、 D_{max} 差异无统计学意义

($P > 0.05$)。会阴：3 组 D_{min} 、 D_{mean} 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)， V_{15} 、 V_{10} 、 D_{max} 差异无统计学意义 ($P > 0.05$)，见表 2。

2.3 MU 比较

3 组 MU 比较差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。sIMRT 组低于 dIMRT 组和 VMAT 组 ($P < 0.05$)，dIMRT 组和 VMAT 组无明显差异 ($P > 0.05$)，见表 1。

2.4 伽马通过率比较

3 种评判标准下，sIMRT 组的伽马通过率均高于 dIMRT 组和 VMAT 组 ($P < 0.05$)，dIMRT 组和 VMAT 组无明显差异 ($P > 0.05$)，见表 3。

表 1 各靶区剂量学比较 [$n = 16, M(P_{25}, P_{75})$]

参数	sIMRT 组	dIMRT 组	VMAT 组	P	P_1	P_2	P_3
D_{98} (cGy)	2 507.05(2 496.03, 2 533.56)	2 530.30(1 519.83, 2 542.83)	2 546.55(2 541.85, 2 556.73)	<0.001	0.102	<0.001	0.004
D_2 (cGy)	2 681.85(2 668.60, 2 689.85)	2 678.45(2 665.70, 2 682.88)	2 661.40(2 660.18, 2 674.50)	0.028	0.867	0.024	0.335
D_{50} (cGy)	2 602.55(2 598.30, 2 609.18)	2 593.50(2 590.65, 2 597.30)	2 604.25(2 596.33, 2 615.95)	0.006	0.081	0.006	1.000
D_{max} (cGy)	2 761.25(2 750.65, 2 777.38)	2 763.30(2 757.43, 2 766.38)	2 755.75(2 742.25, 2 768.00)	0.047	1.000	0.155	0.065
D_{mean} (cGy)	2 600.10(2 592.96, 2 605.50)	2 596.50(2 591.85, 2 599.23)	2 601.60(2 592.70, 2 613.75)	0.087			
D_{min} (cGy)	2 286.05(2 217.93, 2 383.33)	2 342.05(2 186.05, 2 418.85)	2 330.65(2 283.55, 2 418.85)	0.022	1.000	0.065	0.040
$V_{107\%}$	3.05(1.52, 4.58)	2.48(1.05, 3.29)	0.92(0.76, 1.96)	0.144			
HI	1.05(1.05, 1.06)	1.05(1.04, 1.05)	1.04(1.03, 1.04)	<0.001	0.126	<0.001	0.065
CI	0.82(0.80, 0.83)	0.82(0.81, 0.83)	0.80(0.80, 0.82)	0.013	1.000	0.065	0.081
MU	1 238.36(1 084.20, 1 377.69)	1 330.06(1 262.32, 1 535.46)	1 543.46(1 449.02, 1 638.46)	<0.001	0.024	<0.001	0.102

P_1 : sIMRT 组 vs. dIMRT 组; P_2 : sIMRT 组 vs. VMAT 组; P_3 : dIMRT 组 vs. VMAT 组。

表 2 危及器官剂量学比较 [$n = 16, M(P_{25}, P_{75})$]

项目	sIMRT 组	dIMRT 组	VMAT 组	P	P_1	P_2	P_3
右侧股骨头							
V_{20} (%)	2.05(1.77, 3.70)	1.86(1.22, 3.40)	1.56(1.25, 2.72)	0.167			
V_{15} (%)	12.96(10.96, 17.39)	14.73(9.71, 17.34)	18.18(13.67, 23.41)	<0.001	1.000	0.004	0.001
V_{10} (%)	48.96(36.83, 67.76)	50.04(37.32, 56.17)	40.87(35.01, 47.26)	0.646			
D_{max} (cGy)	2 490.55(2 426.70, 2 521.08)	2 475.85(2 421.00, 2 467.13)	2 418.50(2 357.88, 2 467.13)	0.001	1.000	0.014	0.001
D_{mean} (cGy)	1 052.70(860.25, 1 166.35)	1 050.80(895.15, 1 135.03)	990.50(890.95, 1 101.70)	0.939			
D_{min} (cGy)	148.60(67.83, 232.20)	135.80(65.80, 277.55)	112.40(66.33, 265.85)	0.133			
左侧股骨头							
V_{20} (%)	2.25(1.69, 3.65)	1.91(1.34, 3.38)	2.08(1.07, 2.42)	0.269			
V_{15} (%)	15.32(11.35, 17.63)	14.73(10.33, 17.36)	22.32(16.48, 28.54)	<0.001	0.867	0.001	<0.001
V_{10} (%)	50.56(37.48, 69.47)	47.05(34.71, 59.42)	41.16(37.05, 50.06)	0.269			
D_{max} (cGy)	2 444.30(2 404.25, 2 502.15)	2 487.70(2 400.38, 2 521.73)	2 432.50(2 387.58, 2 473.43)	0.018	0.472	0.472	0.014
D_{mean} (cGy)	1 072.65(869.48, 1 173.25)	1 056.50(831.30, 1 117.23)	1 000.15(897.18, 1 127.40)	0.185			
D_{min} (cGy)	150.75(71.93, 241.05)	138.25(68.78, 256.38)	145.75(66.15, 228.18)	0.068			
膀胱							
V_{25} (%)	21.95(13.25, 24.84)	24.18(14.33, 26.56)	26.34(16.47, 30.55)	<0.001	0.102	<0.001	0.024
V_{20} (%)	48.46(40.39, 53.59)	47.53(36.82, 52.03)	45.58(34.68, 49.97)	<0.001	0.008	<0.001	0.040

续表 2 危及器官剂量学比较 $[n=16, M(P_{25}, P_{75})]$

项目	sIMRT 组	dIMRT 组	VMAT 组	P	P_1	P_2	P_3
$V_{15}(\%)$	72.92(63.36,77.50)	68.92(63.12,76.79)	68.86(65.91,76.01)	0.099			
$V_{10}(\%)$	97.04(95.59,99.93)	95.03(90.91,98.93)	99.99(98.58,100.00)	<0.001	0.102	0.335	0.001
$D_{max}(\text{cGy})$	2 695.70(2 679.30,2 733.25)	2 731.25(2 688.40,2 756.20)	2 728.75(2 708.15,2 751.40)	0.444			
$D_{mean}(\text{cGy})$	1 918.55(1 781.98,1 987.78)	1 908.05(1 755.30,1 987.83)	1 915.75(1 818.70,1 955.45)	0.039	0.231	1.000	0.040
$D_{min}(\text{cGy})$	850.85(762.25,1 008.73)	778.65(720.85,889.68)	1 008.35(872.75,1 117.15)	0.001	0.335	0.102	0.001
小肠							
$V_{25}(\%)$	2.48(1.08,3.67)	2.51(1.24,3.88)	2.79(1.52,4.88)	<0.001	1.000	<0.001	0.002
$V_{20}(\%)$	7.74(4.16,11.62)	7.24(3.88,10.92)	7.09(4.05,10.68)	<0.001	1.000	<0.001	0.002
$V_{15}(\%)$	14.76(9.81,23.43)	14.22(9.38,22.20)	14.15(9.70,23.67)	0.001	0.001	0.031	0.993
$V_{10}(\%)$	26.12(20.60,41.06)	24.72(18.94,39.89)	26.26(21.17,39.60)	0.003	0.004	1.000	0.024
$D_{max}(\text{cGy})$	2 698.90(2 678.65,2 723.53)	2 699.95(2 666.13,2 721.95)	2 691.40(2 684.30,2 726.20)	0.779			
$D_{mean}(\text{cGy})$	537.60(422.75,793.48)	521.60(410.70,771.70)	518.10(421.35,767.33)	<0.001	<0.001	0.004	1.000
$D_{min}(\text{cGy})$	5.05(2.20,22.05)	4.95(2.15,19.78)	4.80(1.95,18.88)	<0.001	0.065	<0.001	0.031
阴茎							
$V_{15}(\%)$	0.00(0.00,0.01)	0.00(0.00,0.00)	0.00(0.00,0.35)	0.232			
$V_{10}(\%)$	1.19(0.73,3.98)	0.54(0.09,2.51)	7.19(0.46,14.48)	0.028	0.401	0.782	0.026
$D_{max}(\text{cGy})$	1 323.85(1 103.28,1 541.83)	1 307.65(1 032.35,1 525.10)	1 396.95(1 257.83,1 638.95)	0.223			
$D_{mean}(\text{cGy})$	386.10(335.03,406.48)	344.95(293.93,375.63)	384.55(294.73,430.85)	0.008	0.008	1.000	0.073
$D_{min}(\text{cGy})$	33.45(20.83,42.90)	29.10(18.25,35.40)	25.15(16.05,31.93)	<0.001	0.137	<0.001	0.137
会阴							
$V_{15}(\%)$	0.35(0.00,1.74)	0.00(0.00,1.11)	0.00(0.00,0.69)	0.057			
$V_{10}(\%)$	5.41(0.00,19.08)	3.30(0.00,8.11)	6.27(0.18,14.61)	0.094			
$D_{max}(\text{cGy})$	1 308.90(885.38,2 148.18)	1 211.30(867.03,2 107.38)	1 249.90(984.88,2 038.25)	0.417			
$D_{mean}(\text{cGy})$	486.30(325.20,835.33)	445.65(317.25,732.58)	449.30(268.18,771.03)	0.030	0.037	0.137	1.000
$D_{min}(\text{cGy})$	44.00(25.00,231.63)	40.30(23.00,193.83)	38.75(20.05,173.10)	0.008	0.073	0.008	1.000

P_1 :sIMRT 组 vs. dIMRT 组; P_2 :sIMRT 组 vs. VMAT 组; P_3 :dIMRT 组 vs. VMAT 组。

表 3 伽马通过率比较 $[n=16, M(P_{25}, P_{75})]$

参数	sIMRT 组	dIMRT 组	VMAT 组	P	P_1	P_2	P_3
3 mm/3%	99.60(99.35,99.70)	99.00(97.75,99.37)	99.10(97.75,99.57)	<0.001	<0.001	0.024	0.555
2 mm/2%	96.10(94.12,96.82)	92.40(90.75,94.50)	94.00(88.15,96.02)	<0.001	<0.001	0.001	1.000
1 mm/1%	71.40(67.45,72.75)	65.75(61.20,69.17)	65.70(60.50,70.50)	<0.001	0.002	0.002	1.000

P_1 :sIMRT 组 vs. dIMRT 组; P_2 :sIMRT 组 vs. VMAT 组; P_3 :dIMRT 组 vs. VMAT 组。

3 讨论

直肠癌术前新辅助短程放疗与长程放疗相比,治疗时间缩短,可以增加患者依从性,减少放疗费用,也大大节约了放疗资源。目前已有报道,短程放疗疗效和不良反应均不劣于长程放疗,因此,短程放疗在国内医院逐渐开展^[16,22-23]。短程放疗属于大分割放疗,放疗医生关心大分割放疗的肿瘤生物等效剂量和周围正常组织的耐受性^[24],但是放疗物理师更关心大分割放疗下不同放疗技术对剂量学参数、计划验证。目前,关于不同放疗技术对直肠癌术前新辅助短程放疗剂量学影响的研究鲜有报道。本研究着力于 sIM-

RT、dIMRT 和 VMAT 3 种放疗方式在直肠癌术前新辅助短程放疗中的应用,比较 3 种方法的剂量学参数和伽马通过率。

本研究显示,对于靶区剂量,VMAT 组低剂量点 D_{98} 高于 sIMRT 组和 dIMRT 组,VMAT 组高剂量点 D_2 低于 sIMRT 组,VMAT 组 HI 优于 sIMRT 组,表明 VMAT 能更好地控制靶区剂量,拥有更好的剂量均匀性,与其他研究报道基本一致^[20]。VMAT 对右侧股骨头 D_{max} 的控制优于 sIMRT 和 dIMRT,对左侧股骨头 D_{max} 的控制优于 dIMRT,但对右侧和左侧股骨头 V_{15} 的控制能力均低于 sIMRT 和 dIMRT,

VMAT 在股骨头高剂量区控制上具有优势,但对低剂量区的保护最弱。VMAT 组膀胱 V_{25} 最高,由于膀胱与 PTV 有重叠部位,对于这一部分靶区,VMAT 能够更好地控制与危及器官交集的靶区剂量,防止因过度保护危及器官而导致靶区欠量。VMAT 组膀胱 V_{20} 低于 sIMRT 组和 dIMRT 组, V_{10} 、 D_{mean} 和 D_{min} 高于 dIMRT 组,表明 VMAT 在高剂量区控制上优于其余两者,在低剂量区控制上弱于 dIMRT,且与 sIMRT 相当。VMAT 组小肠 V_{25} 高于其余两组,因小肠和 PTV 也有重叠部分。VMAT 对 V_{20} 控制更优, dIMRT 对 V_{10} 控制更优,表明在小肠保护方面 VMAT 较 dIMRT 优势略多, sIMRT 最差。VMAT 对阴茎的保护能力较弱, sIMRT 和 dIMRT 相当。以上结果均提示, VMAT 对高剂量的控制更有优势,在低剂量控制方面 sIMRT 和 dIMRT 更强。VMAT 是机架旋转运动时加速器连续出束,导致患者接受低剂量(特别是低于 10 Gy)照射体积较调强放疗大^[25-26],短程放疗总剂量较低,这就是 VMAT 对低剂量的控制并无优势的主要原因。股骨头、膀胱和小肠耐受剂量都较高,较低的剂量对其功能没有太大影响,阴茎和会阴对射线比较敏感,需注意保护。从危及器官方面考虑, VMAT 较为合适。sIMRT 组的 MU 低于 dIMRT 组和 VMAT 组。但是 VMAT 与 sIMRT、dIMRT 比较,最大的优势就是缩短治疗时间^[27-28]。所以综合治疗时间和 MU 考虑, VMAT 更优。

随着放疗技术的快速发展,放疗技术越来越复杂,对治疗精度的要求越来越高,所以质量控制与质量保证也是调强放疗和 VMAT 需要重点关注的方面^[29]。目前关于不同放疗技术在直肠癌术前短程放疗中应用的相关研究都没有提及在计划验证结果方面的差异。本研究结果显示,所有计划伽马通过率均符合临床要求(3 mm/3%标准下,伽马通过率大于 95%)。在不同评判标准下 sIMRT 组的伽马通过率均明显高于其余两组,表明 sIMRT 计划质量最高,可能是 dIMRT 和 VMAT 的 MLC 是连续变动的,计算过程中容易产生更多、更小的子野,小的子野会导致计划验证时伽马通过率降低。

综上所述,采用 VMAT 技术能够更好地控制靶区剂量,减少股骨头、膀胱、小肠受高剂量照射范围,缩短治疗时间,提高放疗设备的使用率。如果追求更低的危及器官受照射量, sIMRT 是最佳的选择。需综合考虑不同放疗技术的优缺点,根据临床需求选择合适的直肠癌术前新辅助短程放疗技术。

参考文献

[1] BENSON A B, VENOOK A P, AL-HAWARY M M, et al. NCCN guidelines insights: rectal

cancer, version 6. 2020[J]. J Natl Compr Canc Netw, 2020, 18(7):806-815.

- [2] BENSON A B, VENOOK A P, AL-HAWARY M M, et al. Rectal cancer, version 2. 2018, NCCN clinical practice guidelines in oncology[J]. J Natl Compr Canc Netw, 2018, 16(7):874-901.
- [3] SAUER R, BECKER H, HOHENBERGER W, et al. Preoperative versus postoperative chemoradiotherapy for rectal cancer[J]. N Engl J Med, 2004, 351(17):1731-1740.
- [4] SAUER R, LIERSCH T, MERKEL S, et al. Preoperative versus postoperative chemoradiotherapy for locally advanced rectal cancer: results of the German CAO/ARO/AIO-94 randomized phase III trial after a median follow-up of 11 years[J]. J Clin Oncol, 2012, 30(16):1926-1933.
- [5] 薛珂, 宗丹, 詹梦娜, 等. 局部晚期直肠癌新辅助放化疗研究进展[J]. 中国肿瘤外科杂志, 2022, 14(2):190-194.
- [6] BUJKO K, NOWACKI M P, NASIEROWSKA-GUTTMEJER A, et al. Long-term results of a randomized trial comparing preoperative short-course radiotherapy with preoperative conventionally fractionated chemoradiation for rectal cancer[J]. Br J Surg, 2006, 93(10):1215-1223.
- [7] BAHADOER R R, DIJKSTRA E A, VAN ET TEN B, et al. Short-course radiotherapy followed by chemotherapy before total mesorectal excision (TME) versus preoperative chemoradiotherapy, TME, and optional adjuvant chemotherapy in locally advanced rectal cancer (RAPIDO): a randomised, open-label, phase 3 trial[J]. Lancet Oncol, 2021, 22(1):29-42.
- [8] WU H, FAN C, FANG C, HUANG L, et al. Preoperative short-course radiotherapy followed by consolidation chemotherapy for treatment with locally advanced rectal cancer: a meta-analysis[J]. Radiat Oncol, 2022, 17(1):14.
- [9] JIN J, TANG Y, HU C, et al. Multicenter, randomized, phase III trial of short-term radiotherapy plus chemotherapy versus long-term chemoradiotherapy in locally advanced rectal cancer (STELLAR)[J]. J Clin Oncol, 2022, 40(15):1681-1692.
- [10] 王锐濠, 张书旭, 田允鸿, 等. 胸段食管癌不同调强放疗技术的剂量学差异分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(8):766-769.
- [11] SUN H, WANG N, HUANG G, et al. Dosimetric comparison of fixed field dynamic IMRT

- and VMAT techniques in simultaneous integrated boost radiotherapy of prostate cancer [J]. *Medicine (Baltimore)*, 2022, 101 (50): e32063.
- [12] NAGARAJAN M, BANU R, SATHYA B, et al. Dosimetric evaluation and comparison between volumetric modulated arc therapy (VMAT) and intensity modulated radiation therapy (IMRT) plan in head and neck cancers[J]. *Gulf J Oncol*, 2020, 1(33):45-50.
- [13] ARBEA L, RAMOS L I, MARTÍNEZ-MONGER R, et al. Intensity-modulated radiation therapy (IMRT) vs. 3D conformal radiotherapy (3DCRT) in locally advanced rectal cancer (LARC): dosimetric comparison and clinical implications[J]. *Radiat Oncol*, 2010, 5:17.
- [14] LIU M, LIU B, WANG H, et al. Dosimetric comparative study of 3 different postoperative radiotherapy techniques (3D-CRT, IMRT, and RapidArc) for II - III stage rectal cancer[J]. *Medicine (Baltimore)*, 2015, 94(1):e372.
- [15] CILLA S, CARAVATTA L, PICARDI V, et al. Volumetric modulated arc therapy with simultaneous integrated boost for locally advanced rectal cancer[J]. *Clin Oncol*, 2012, 24 (4):261-268.
- [16] ZHAO J, HU W, CAI G, et al. Dosimetric comparisons of VMAT, IMRT and 3DCRT for locally advanced rectal cancer with simultaneous integrated boost[J]. *Oncotarget*, 2016, 7 (5): 6345-6351.
- [17] 迟锋, 温戈, 陈利, 等. 直肠癌术前三维适形和五野及容积弧形调强放疗剂量学比较[J]. *中华肿瘤防治杂志*, 2014, 21(18):1455-1460.
- [18] 蒋璠, 吴昊, 弓健, 等. 快速旋转调强与固定射野动态调强在直肠癌术前放疗中的剂量学比较[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2011, 31(3): 322-325.
- [19] 李浦, 单国平, 狄小云, 等. 直肠癌术后容积旋转调强和静态调强放疗的剂量学研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2013, 30(3):4115-4117.
- [20] 戴梦婷. 直肠癌术前短程放疗中 VMAT 及 sIMRT 的剂量学分析[D]. 福州: 福建医科大学, 2015.
- [21] 刘建庭, 景娜, 孟慧敏, 等. 直肠癌术前大分割短程放疗中容积旋转调强和固定野调强的剂量学比较[J]. *现代肿瘤医学*, 2017, 25 (23): 3858-3861.
- [22] KAPITEIJN E, MARIJNEN C A, NAGTEG AAL I D, et al. Preoperative radiotherapy combined with total mesorectal excision for resectable rectal cancer [J]. *N Engl J Med*, 2001, 345(9):638-646.
- [23] PETERSSON D, LÖRINC E, HOLM T, et al. Tumour regression in the randomized Stockholm III Trial of radiotherapy regimens for rectal cancer [J]. *Br J Surg*, 2015, 102 (8): 972-978.
- [24] 王丽, 冯炎. 关于常规分割及大分割放疗的关系问题[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2006, 15 (5): 429-430.
- [25] RACKA I, MAJEWSKA K, WINIECKI J. Three-dimensional conformal radiotherapy (3D-CRT) vs. volumetric modulated arc therapy (VMAT) in deep inspiration breath-hold (DIBH) technique in left-sided breast cancer patients-comparative analysis of dose distribution and estimation of projected secondary cancer risk[EB/OL]. [2022-07-15]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35943553/>.
- [26] HUANG J H, WU X X, LIN X, et al. Evaluation of fixed-jaw IMRT and tangential partial-VMAT radiotherapy plans for synchronous bilateral breast cancer irradiation based on a dosimetric study[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(9):31-41.
- [27] BUCIUMAN N, MARCU L G. Dosimetric justification for the use of volumetric modulated arc therapy in head and neck cancer: a systematic review of the literature [J]. *Laryngoscope Investig Otolaryngol*, 2021, 6(5):999-1007.
- [28] ANDREVSKA A, KNIGHT K A, SALE C A. The feasibility and benefits of using volumetric arc therapy in patients with brain metastases: a systematic review[J]. *J Med Radiat Sci*, 2014, 61(4):267-276.
- [29] 沈浩, 夏兵. 基于 ArcCHECK 模体的 VMAT 计划验证及摆位误差对剂量验证的影响[J]. *中国医学物理学杂志*, 2020, 37(4):431-438.