

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2025.04.002

医学放射物理

## 螺旋断层放疗、静态调强放疗和容积旋转调强放疗技术在宫颈癌放疗的剂量学对比分析

苟亮倩, 吴书裕, 廖华英, 杨玉善, 张国前, 余辉, 王晓慧, 张书旭  
广州医科大学附属肿瘤医院放疗中心, 广东 广州 510095

**【摘要】目的:**量化评估静态调强放疗(IMRT)、容积旋转调强放疗(VMAT)和螺旋断层放疗(TOMO)3种技术在宫颈癌放疗中的剂量学差异,为临床医生的放疗决策提供数据支持,以优化放疗方案的选择。**方法:**选取2024年2月~5月在广州医科大学附属肿瘤医院收治的19例宫颈癌放疗患者的临床数据,对每个病例制定IMRT、VMAT、TOMO 3种计划,并进行剂量评估,评估指标包括靶区和危及器官(OARs)的剂量体积参数、均匀性指数(HI)、适形度指数(CI)及机器出束时间等。**结果:**所有治疗计划靶区均达到临床处方要求。在靶区剂量方面,TOMO组的 $D_{mean}$ 和 $D_{max}$ 均显著低于IMRT和VMAT组。对于OARs,TOMO组在降低膀胱 $D_{mean}$ 、直肠 $D_{mean}$ 、 $D_{max}$ 、 $V_{30}$ 、 $V_{40}$ ,以及左、右股骨头 $D_{mean}$ 、 $D_{max}$ 、 $V_{20}$ 、 $V_{30}$ 和骨盆 $D_{mean}$ 、 $V_{20}$ 、 $V_{50}$ 等方面表现出显著优势,与IMRT和VMAT组相比,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。此外,TOMO组靶区的CI显著高于IMRT和VMAT组,而PGTVnd HI显著低于IMRT组,差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。虽然3组在PCTV HI方面的差异无统计学意义,但TOMO组的表现略优于其他两组。值得注意的是,VMAT技术治疗时间最短。**结论:**在宫颈癌的不同治疗模式中,TOMO技术显示出在靶区剂量覆盖率、OARs的剂量分布、CI和HI方面优于IMRT和VMAT技术。VMAT治疗效率最高。

**【关键词】**宫颈癌;螺旋断层放疗;容积旋转调强放疗;静态调强放疗;剂量学

**【中图分类号】**R737.33;R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2025)04-0429-06

## Dosimetric comparison of tomotherapy, static IMRT and VMAT techniques in radiotherapy for cervical cancer

GOU Liangqian, WU Shuyu, LIAO Huaying, YANG Yushan, ZHANG Guoqian, YU Hui, WANG Xiaohui, ZHANG Shuxu  
Radiotherapy Center, Affiliated Cancer Hospital and Institute of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510095, China

**Abstract: Objective** To compare the dosimetric disparities among static intensity-modulated radiotherapy (IMRT), volumetric modulated arc therapy (VMAT), and tomotherapy (TOMO) techniques in cervical cancer radiotherapy for providing data support for clinical decision-making scheme of radiotherapy. **Methods** The clinical data of 19 cervical cancer patients, treated at the Affiliated Cancer Hospital and Institute of Guangzhou Medical University from February to May in 2024, were analyzed. Three plans were devised for each case using IMRT, VMAT, and TOMO techniques, followed by dosimetric evaluation in terms of various metrics such as dose volume parameters of the target areas as well as organs-at-risk (OAR), conformity index (CI), homogeneity index (HI), and delivery time. **Results** All 3 plans met the clinical prescription requirements for the target areas. Compared with static IMRT and VMAT, TOMO had significantly lower  $D_{mean}$  and  $D_{max}$  of PCTV and PGTVnd. For OAR, TOMO demonstrated significant advantages over IMRT and VMAT in the  $D_{mean}$  of the bladder, the  $D_{mean}$ ,  $D_{max}$ ,  $V_{30}$ ,  $V_{40}$  of the rectum, the  $D_{mean}$ ,  $D_{max}$ ,  $V_{20}$ ,  $V_{30}$  of left and right femoral heads, and the  $D_{mean}$ ,  $V_{20}$ ,  $V_{50}$  of the pelvis ( $P<0.05$ ). In addition, the TOMO group showed significantly higher CI for both PCTV and PGTVnd as compared with IMRT and VMAT groups, and lower PGTVnd HI than IMRT group (all  $P<0.05$ ). Although there was trivial difference among 3 groups in term of PCTV HI, TOMO group performed slightly better than the other two groups. Notably, VMAT technique had the shortest treatment time. **Conclusion** In various treatment modalities for cervical cancer, TOMO is superior

**【收稿日期】**2024-11-05

**【基金项目】**广州市科技计划项目(2023B03J1295);广东省普通高校特色创新类项目(2024KTSCX122)

**【作者简介】**苟亮倩,硕士研究生,研究方向:肿瘤的精准放疗,E-mail: gouliaqingqian0304@163.com

**【通信作者】**张书旭,博士,教授,主任技师,博士生导师,E-mail: gthzsx@163.com

to IMRT and VMAT in terms of target dose coverage, OAR dose distribution, CI, and HI. However, VMAT has the highest efficiency.

**Keywords:** cervical cancer; tomotherapy; volumetric modulated arc therapy; static intensity-modulated radiotherapy; dosimetry

## 前言

宫颈癌是威胁女性健康的常见恶性肿瘤,与高危型 HPV 感染密切相关<sup>[1-3]</sup>。放射治疗是宫颈癌治疗的重要手段,尤其在局部晚期宫颈癌的治疗中占有重要地位<sup>[4-5]</sup>。由于宫颈解剖位置复杂,且周围关键器官众多,放疗过程中常会对周围组织造成损伤<sup>[6]</sup>。目前,有多种放疗技术可用于宫颈癌精确治疗,如 IMRT、VMAT 和 TOMO 等。其中, TOMO 是一项高新放疗技术,基于 IMRT 和 VMAT 发展而来。它通过 360°环绕式旋转治疗架,结合治疗床的步进和射束的动态调整,实现靶区剂量的精准覆盖,并尽可能减少对周围正常组织的辐射<sup>[7]</sup>。本研究比较 IMRT、VMAT 和 TOMO 3 种技术在宫颈癌治疗中靶区和危及器官(OARs)的剂量分布,评估了它们在治疗计划优化中的适形度指数(Conformity Index, CI)、均匀性指数(Homogeneity Index, HI)和机器出束时间(Delivery Time, DT)等参数的差异,旨在为临床放疗决策提供依据。

## 1 资料和方法

### 1.1 一般资料

回顾性收集 2024 年 2 月~5 月于广州医科大学附属肿瘤医院放疗的 19 例宫颈癌患者的临床资料,年龄范围 33~84 岁,平均年龄 58 岁,FIGO 分期为 IB2 期及以上,KPS 评分>80 分,一般情况尚可,且符合放疗规范。其中 1 例患者行子宫切除手术,18 例未手术。

### 1.2 CT 图像采集

所有定位 CT 均采用平扫加增强方式进行扫描,使用 Philips Brilliance 大孔径 CT 模拟定位机。定位前,需进行膀胱和直肠的准备工作。患者仰卧,双臂自然环抱置于头顶,并用体模固定。扫描范围从上界第 3 腰椎到下界耻骨联合下 5 cm,扫描参数为层厚 2.5 mm,电压 120 kV,电流 300 mA,矩阵大小为 512×512,完成后将数据传输至放射治疗计划系统(TPS)。

### 1.3 放疗方案

根据 ICRU 83 报告和 RTOG 指南,由同一位放疗科医师进行临床靶区(CTV)的勾画,包括宫颈、宫体、宫旁组织、部分阴道和淋巴结引流区域,再将 CTV 在各个方向上均匀外扩 6 mm,确定了计划靶区(PCTV);对于阳性淋巴结(GTVnd),各向外扩 5 mm,

得到了淋巴结的计划靶区(PGTVnd);勾画还涉及多个 OARs,包括小肠、直肠、膀胱、股骨头、肾脏、骨盆和脊髓等。

靶区处方剂量如下:对 CTV 给予 45.0 Gy 剂量;GTVnd 推量至 60 Gy, 2.4 Gy/次,合计 25 分次。OARs 受照剂量限制:小肠  $V_{40}<30\%$ , 直肠  $V_{45}<50\%$ , 膀胱  $V_{45}<50\%$ , 股骨头  $V_{30}<15\%$ , 脊髓  $D_{\max}<45$  Gy, 骨盆  $V_{20}<90\%$ 、 $V_{30}<65\%$ 、 $V_{50}<10\%$ , 肾  $D_{\text{mean}}<10$  Gy、 $V_{18}<20\%$ 。其中,  $V_x$  代表接受至少  $x$  Gy 的体积百分比,  $D_{\max}$  表示最大剂量,  $D_{\text{mean}}$  表示平均剂量。

### 1.4 计划设计

物理师根据放疗医师设定的处方剂量和 OARs 限量要求,对每位患者制定 IMRT、VMAT、TOMO 3 种治疗计划,能量均为 6 MV X 射线,其中 IMRT 和 VMAT 计划均使用 Pinnacle<sup>3</sup> 9.10 TPS (Philips Healthcare, Best, The Netherlands),并采用相同的调强优化参数,而 TOMO 计划使用 Precision1.1.1 TPS (Accuray Incorporated, Sunnyvale, CA, USA)。计划设计的射野参数如下:IMRT 计划使用 Varian Clinac IX 加速器,采用 9 野均分布野( $0^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $160^\circ$ 、 $200^\circ$ 、 $240^\circ$ 、 $280^\circ$ 、 $320^\circ$ );VMAT 计划使用 Elekta Synergy 加速器,采用共面两弧设计,机架角度设为先顺时针  $179^\circ \rightarrow 181^\circ$ ,再逆时针  $181^\circ \rightarrow 179^\circ$ ,其他参数采用默认设置;TOMO 计划使用 Accuray Radixact X9,铅门为 2.5 mm/5 mm(射束宽度),螺距为 0.438/0.287,调制因子为 2.5~3.5。

### 1.5 计划评估

通过剂量体积直方图(Dose Volume histogram, DVH)比较不同放射治疗计划下的剂量学参数,主要评估指标包括  $D_{\max}$ 、 $D_{\text{mean}}$ 、CI、HI 和机器出束时间。

采用 CI 评估适形度,CI 取值范围为 0~1,越接近 1 代表靶区适形度越好。

$$CI = (TVRI)^2 / (TV \times VRI) \quad (1)$$

其中,TVRI 为处方剂量线覆盖的靶体积,TV 为靶区体积,VRI 为处方剂量线覆盖的体积。

采用 HI 评估靶区剂量的均匀性,数值越小代表靶区剂量越均匀<sup>[8-9]</sup>。

$$HI = (D_2 - D_{98}) / D_{50} \quad (2)$$

其中, $D_2$ 、 $D_{98}$ 与  $D_{50}$  分别为靶区体积覆盖 2%、98% 及 50% 的照射剂量。

1.6 统计学方法

应用 SPSS 25.0 软件对所有数据进行统计学分析, 计量资料以均数±标准差表示, 符合正态分布的资料采用 *t* 检验, 非正态分布时采用 Mann-Whitney U 检验, *P*<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量学差异对比

靶区剂量对比见表1。所有计划均满足≥95%的靶区体积覆盖处方剂量的要求。在 PCTV 和 PGTVnd 的 *D*<sub>mean</sub> 及 *D*<sub>max</sub> 方面, TOMO 组低于 IMRT 和 VMAT 组, 差异有统计学意义 (*P*<0.05)。尽管 VMAT 和 IMRT 组之间差异不显著, 但 VMAT 组剂量较低。

表 1 3 种治疗方式的患者靶区剂量比较( $\bar{x}\pm s$ )  
Table 1 Dosimetric comparison for planning target volume among IMRT, VMAT and TOMO (*Mean*±*SD*)

参数	IMRT	VMAT	TOMO
PCTV			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	50.16±1.96	49.65±1.72	48.37±1.49 <sup>ab</sup>
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	66.76±2.92	65.18±1.26	63.88±1.41 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>45</sub> %	97.56±0.95	97.56±1.5	97.71±1.23
PGTVnd			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	62.81±0.74	62.48±0.4 0	62.00±0.57 <sup>ab</sup>
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	66.12±1.73	65.12±1.16	63.88±1.41 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>60</sub> %	98.87±1.03	98.69±2.33	98.36±1.55

<sup>a</sup>:IMRT 与 TOMO 组比较, *P*<0.05; <sup>b</sup>: VMAT 与 TOMO 组比较, *P*<0.05; <sup>c</sup>: IMRT 与 VMAT 组比较, *P*<0.05

2.2 OARs 受照剂量差异对比

如表2所示, TOMO 技术在降低膀胱 *D*<sub>mean</sub> 方面表现出显著优势, 明显低于 IMRT 和 VMAT 组 (*P*<0.05); 膀胱 *V*<sub>45</sub> 在 TOMO 组显著低于 IMRT 组 (*P*<0.05), 而与 VMAT 相比, TOMO 组剂量仍较低, 差异无统计学意义 (*P*>0.05)。尽管 *D*<sub>max</sub> 和 *V*<sub>40</sub> 在 3 种放疗技术之间无显著差异, TOMO 组的受照剂量仍普遍较低。在直肠 *D*<sub>mean</sub>、*D*<sub>max</sub>、*V*<sub>30</sub> 和 *V*<sub>40</sub> 方面, TOMO 组低于 IMRT 和 VMAT 组, *V*<sub>45</sub> 则低于 IMRT 组, 差异有统计学意义 (*P*<0.05)。左右股骨头的 *D*<sub>mean</sub>、*D*<sub>max</sub>、*V*<sub>20</sub> 和 *V*<sub>30</sub> 在 TOMO 组均低于 IMRT 和 VMAT 组, 差异有统计学意义 (*P*<0.05)。在骨盆 *D*<sub>mean</sub>、*V*<sub>20</sub> 和 *V*<sub>50</sub> 方面, TOMO 组明显低于 IMRT 和 VMAT 组; 而在 IMRT 与 VMAT 的比较中, VMAT 组的 *D*<sub>mean</sub> 和 *V*<sub>30</sub> 更低, 差异有统计学意义 (*P*<0.05)。对于小肠的 *D*<sub>mean</sub>、*D*<sub>max</sub>、*V*<sub>10</sub>、*V*<sub>20</sub>、*V*<sub>30</sub>、*V*<sub>40</sub>, 脊髓的 *D*<sub>mean</sub>、*D*<sub>max</sub>、*V*<sub>10</sub>、*V*<sub>20</sub>, 以及左右肾的 *D*<sub>mean</sub>、*D*<sub>max</sub> 和右肾 *V*<sub>18</sub> 等指标, 在 3 组间未见统计学差异, 但 TOMO 组受照剂量普遍较低。左肾 *V*<sub>18</sub> 在 VAMT 与 IMRT 组间差异存在统计学差异 (*P*<0.05)。

表 2 3 种治疗方式的患者危及器官受照剂量比较( $\bar{x}\pm s$ )

Table 2 Dosimetric comparison for OAR among IMRT, VMAT and TOMO (*Mean*±*SD*)

参数	IMRT	VMAT	TOMO
膀胱			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	44.51±1.69	44.21±1.91	42.9±2.3 <sup>ab</sup>
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	58.48±5.00	56.95±6.09	55.01±6.51
<i>V</i> <sub>20</sub> %	100.00±0.00	99.83±0.76	99.78±0.97
<i>V</i> <sub>30</sub> %	98.75±2.34	98.17±5.55	95.05±7.2
<i>V</i> <sub>40</sub> %	83.98±10.53	86.21±12.14	79.74±15.29
<i>V</i> <sub>45</sub> %	57.49±14.2	54.07±12.52	48.4±13.27 <sup>a</sup>
直肠			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	45.84±1.67	44.87±1.46	43.56±1.42 <sup>ab</sup>
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	54.74±5.60	52.91±5.68	50.55±5.39 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>30</sub> %	100.00±0.00	99.62±1.16	98.25±3.06 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>40</sub> %	83.98±10.53	93.14±9.15	83.35±11.98 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>45</sub> %	64.66±19.36	53.28±13.03 <sup>c</sup>	49.3±9.47 <sup>a</sup>
小肠			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	29.02±6.96	27.87±7.26	25.49±6.35
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	62.22±5.10	61.70±4.59	61.19±5.08
<i>V</i> <sub>10</sub> %	84.70±16.96	83.51±18.89	83.30±19.12
<i>V</i> <sub>20</sub> %	71.86±18.94	70.93±20.16	61.52±16.74
<i>V</i> <sub>30</sub> %	49.93±17.29	45.60±17.77	39.84±14.69
<i>V</i> <sub>40</sub> %	29.71±12.20	26.69±12.08	23.06±10.83
左股骨头			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	27.94±2.17	26.29±2.12	22.98±4.51 <sup>ab</sup>
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	48.49±3.85	46.77±3.53	42.40±3.47 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>10</sub> %	99.99±0.05	99.99±0.02	99.97±0.08
<i>V</i> <sub>20</sub> %	89.53±9.67	82.02±13.87	62.95±24.80 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>30</sub> %	32.51±11.87	24.65±6.41 <sup>c</sup>	14.61±21.18 <sup>ab</sup>
右股骨头			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	27.60±1.93	26.16±2.28	23.37±5.03 <sup>ab</sup>
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	47.81±3.17	47.04±3.57	42.47±3.83 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>10</sub> %	99.96±0.16	99.53±1.85	100.00±0.00
<i>V</i> <sub>20</sub> %	87.11±11.23	83.09±15.05	65.47±25.03 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>30</sub> %	31.35±10.10	24.02±6.30 <sup>c</sup>	16.16 ± 21.67 <sup>ab</sup>
脊髓			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	19.99±6.63	18.88±5.93	16.14±5.05
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	38.68±3.09	38.99±2.48	38.10±3.37
<i>V</i> <sub>10</sub> %	64.84±20.32	65.24±20.35	53.95±14.64
<i>V</i> <sub>20</sub> %	58.96±19.22	56.3±18.14	48.21±16.19
左肾			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	9.39±5.21	8.30±4.84	8.47±5.17
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	34.64±15.58	32.87±16.61	29.86±15.29
<i>V</i> <sub>18</sub> %	10.55±6.93	7.41±6.15 <sup>c</sup>	9.06±9.19
右肾			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	9.62±5.69	8.58±5.07	8.96±5.60
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	33.11±16.06	32.00± 16.72	28.85±15.42
<i>V</i> <sub>18</sub> %	9.89±7.03	7.93±5.83	8.94±8.97
骨盆			
<i>D</i> <sub>mean</sub> /Gy	35.19±1.92	33.95±2.04 <sup>c</sup>	31.63±1.62 <sup>ab</sup>
<i>D</i> <sub>max</sub> /Gy	64.68±2.40	63.66±1.35	62.82±1.74 <sup>a</sup>
<i>V</i> <sub>20</sub> %	90.2±5.27	89.24±6.57	82.53±6.80 <sup>ab</sup>
<i>V</i> <sub>30</sub> %	64.48±5.81	58.46±5.97 <sup>c</sup>	54.42±9.39 <sup>a</sup>
<i>V</i> <sub>50</sub> %	6.75±4.47	5.18±3.83	2.07±1.58 <sup>ab</sup>

<sup>a</sup>:IMRT 与 TOMO 比较, *P*<0.05; <sup>b</sup>: VMAT 与 TOMO 比较, *P*<0.05; <sup>c</sup>: IMRT 与 VMAT 比较, *P*<0.05

2.3 靶区剂量分布和 DVH 图比较

图1为1例宫颈癌患者同一CT层面的靶区剂量分布图, 可见 IMRT 计划导致靶区周围正常组织受到



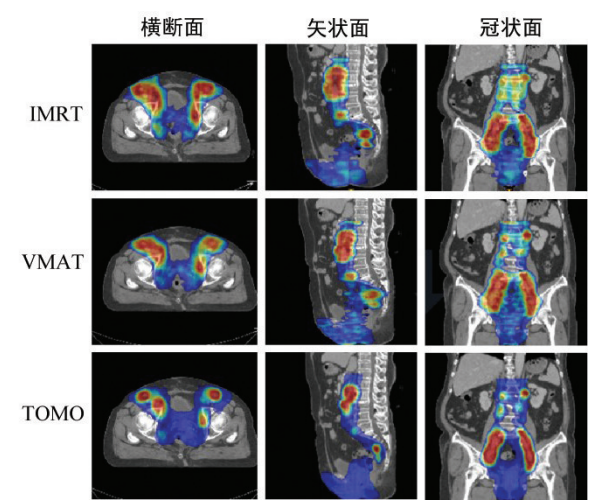


图1 1例宫颈癌患者3种不同放疗计划的剂量分布示意图  
Figure 1 Dose distributions of IMRT, VMAT, and TOMO plans for a cervical cancer case

高剂量照射体积较大,而TOMO计划则显著减少了这一区域的剂量,VMAT计划则介于两者之间。TOMO计划的低剂量区域范围广,既提升了安全性,又确保了剂量的均匀性。DVH图直观地展示了TOMO计划靶区的PTV剂量梯度更陡峭,见图2。

2.4 3种放疗技术的CI、HI差异对比

TOMO组PCTV和PGTVnd的CI均高于IMRT和VMAT组,差异有统计学意义( $P<0.05$ );TOMO组PGTVnd HI则低于IMRT组,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),如表3所示。尽管3种技术在PCTV HI上的差异无统计学意义,但TOMO的HI值仍为最低。TOMO技术的CI值更趋近于理想值1,HI值更接近于0,表明其剂量分布的均匀性和适形度较其他技术更为优越。

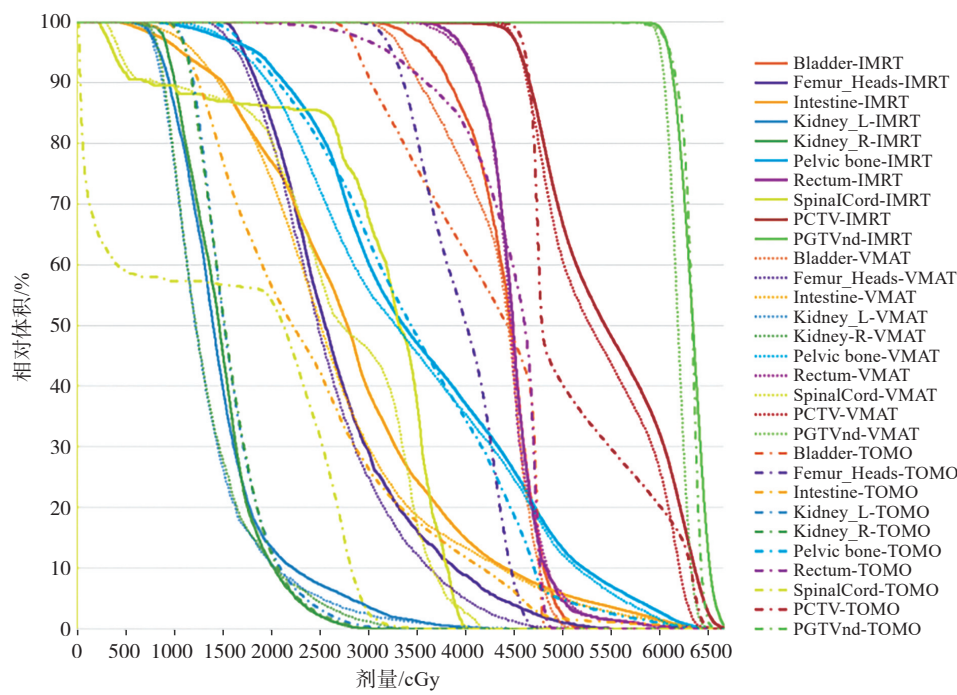


图2 同例患者3种放疗计划的PTV和OARs的DVH图  
Figure 2 Dose–volume histograms of PTV and OAR in 3 radiation plans for a case

表3 3种放疗计划CI、HI对比( $\bar{x}\pm s$ )

Table 3 Comparisons of CI and HI among IMRT, VMAT, and TOMO (*Mean±SD*)

靶区	参数	IMRT	VMAT	TOMO
PCTV	CI	0.691±0.092	0.741±0.091	0.843±0.034 <sup>ab</sup>
	HI	0.353±0.467	0.335±0.666	0.314±0.086
PGTVnd	CI	0.518±0.175	0.565±0.164	0.715±0.118 <sup>ab</sup>
	HI	0.070±0.018	0.074±0.077	0.065±0.078 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>:IMRT与TOMO比较, $P<0.05$ ; <sup>b</sup>:VMAT与TOMO比较, $P<0.05$

2.5 机器出束时间对比

IMRT、VMAT和TOMO组的机器出束时间分别为(99.39±25.99) s、(88.27±18.98) s和(601.82±241.71) s。数据分析提示,相较于IMRT和VMAT计划,TOMO计划的治疗时间显著延长( $P<0.05$ )。尽管IMRT与VMAT之间的差异不明显,但VMAT治疗时间最短,放疗的效率最高。

### 3 讨论

目前,同期放化疗是局部晚期宫颈癌的标准治疗方式<sup>[10]</sup>。放疗在提高肿瘤的局部控制率、杀灭术后残余肿瘤细胞、减轻肿瘤并发症、延长生存期及提高生活质量等方面发挥着重要作用。先进的放疗技术可精准照射肿瘤,同时最大限度地保护周围健康组织,减少放疗副作用,从而提高肿瘤治疗效果<sup>[11]</sup>。

本研究对 TOMO 与 IMRT 技术的剂量学优势进行了比较,证实了 TOMO 技术在 CI、HI 及对周围正常组织保护上显著优于 IMRT 技术。这与既往相关研究结果类似<sup>[12-14]</sup>。常娟娟等<sup>[15]</sup>与 Thakur 等<sup>[16]</sup>研究证实,VMAT 技术治疗效率、剂量学参数和安全性方面超越 IMRT 技术。本研究中,尽管 IMRT 与 VMAT 组在靶区剂量学上差异不显著,但在 OARs 方面,VMAT 组表现出明显优势。具体而言,VMAT 在直肠  $V_{45}$ 、左右股骨头  $V_{30}$ 、左肾  $V_{18}$ 、骨盆  $D_{mean}$  和  $V_{30}$  剂量等指标上显著低于 IMRT 组。尽管靶区的 CI 和机器出束时间两组间差异不显著,但 VMAT 组表现更好,研究结果显示 VMAT 在剂量分布、对 OARs 保护及治疗效率优于 IMRT 组,这与先前研究报告的结果相符合。杨波等<sup>[17]</sup>的研究显示,TOMO 在术后宫颈癌放疗中,无论靶区 CI、HI,或是对正常组织的保护,均优于 IMRT 技术;其后续研究进一步对比了 IMRT、VMAT、TOMO 技术在宫颈癌术后放疗的剂量学差异,结果提示 TOMO 虽治疗时间最长,但靶区剂量 CI 和 HI 最佳,同时对 OARs 高剂量区的控制最优<sup>[18]</sup>。本研究中有 18 例患者未行手术切除治疗,但研究结果与之相似,突显了 TOMO 技术在宫颈癌术前、术后放疗中的剂量学优势。潘林飞等<sup>[19]</sup>和曹露等<sup>[20]</sup>研究证明 TOMO 比 VMAT 计划的靶区 CI、HI 更优,对 OARs 的保护更好,但是实施 TOMO 技术的治疗时间更长。Renard-Oldrini 等<sup>[21]</sup>研究证明与 IMRT 技术相比,VMAT 和 TOMO 技术在宫颈癌盆腔及腹主动脉旁淋巴结的放疗中更有优势。Tsai 等<sup>[22]</sup>则在研究前列腺癌放疗治疗中,证实了 TOMO 在 PTV 中的适形度优于 IMRT 和 VMAT 技术。以上研究表明:TOMO 在多种肿瘤治疗中展现了剂量学优势,既能确保靶区得到足够剂量照射,又能减少靶区的平均剂量及对 OARs 的不良影响。本研究对 3 种技术对靶区 CI、HI 和 OARs 剂量学优势进行了全面比较,结果表明,TOMO 优于 IMRT 和 VMAT 技术,同时对直肠、膀胱、骨盆、股骨头等器官的保护均最优,符合既往研究的结论。利用 TOMO 技术在复杂及超长靶区治疗中的剂量调控优势,实现对 OARs 的有效保护,已被多项研究所证实。如刘楠等<sup>[23]</sup>的研究证实了 TOMO 在治疗同发双侧乳腺癌(SBBC)中,靶区的 CI 优于 VMAT

技术。王赫隆等<sup>[24]</sup>研究结果显示,在全脑全脊髓放射治疗髓母细胞瘤时,TOMO 技术在处理复杂靶区方面明显优于 IMRT 和 VMAT 技术。本研究中的典型复杂靶区的剂量分布图显示,TOMO 技术在靶区 CI 和 HI 方面具有明显优势。但受限于样本量,尚未深入探讨不同放射技术在复杂靶区亚组中的差异。虽然,TOMO 技术在靶区和 OARs 的剂量分布方面,优于 IMRT 和 VMAT 技术,但其治疗时间最长<sup>[25]</sup>。治疗时长过长,可能会导致治疗时间内出现体位、器官移动,造成治疗误差,降低放疗效果。

本研究中肾脏  $D_{mean}$ 、 $V_{18}$  在 VMAT 组最低,TOMO 组次之,IMRT 组最高,这可能与本研究的病例较少、肿瘤体积较大、OARs 与靶区解剖位置接近、治疗计划优化不足等有关。相较于其他两种放疗技术,TOMO 技术能够显著降低靶区的  $D_{max}$  和  $D_{mean}$ ,并能减少膀胱  $V_{45}$ 、直肠  $V_{30}$ 、 $V_{40}$ 、 $V_{45}$ 、左右股骨头  $V_{20}$ 、 $V_{30}$  及骨盆  $V_{50}$ ,从而有望降低放射性膀胱炎、直肠炎的发生概率和股骨头损伤。另一方面,宫颈癌的放射治疗不可避免地涉及盆腔和骨髓保护的问题,如何保护具有造血功能的活性骨髓,是宫颈癌放疗研究的一个重要方向。单纯基于 CT 图像,难以准确识别活性骨髓,因此,本研究中,未对活性骨髓进行剂量限制。此外,本研究病例量较少且仅进行了剂量学分布的对比分析,可能限制结果的普适性。后续研究中,拟扩大样本容量,降低患者数据的异质性,并进行靶区不同体积和长度等的亚组分析,并增加活性骨髓保护等方面的内容,以获得更加准确可靠的结论。

### 【参考文献】

- [1] 郑荣寿,陈茹,韩冰峰,等. 2022 年中国恶性肿瘤流行情况分析[J]. 中华肿瘤杂志, 2024, 46(3): 221-231.  
Zheng RS, Chen R, Han BF, et al. Cancer incidence and mortality in China, 2022[J]. Chinese Journal of Oncology, 2024, 46(3): 221-231.
- [2] Otter S, Whitaker S, Chatterjee J, et al. The human papillomavirus as a common pathogen in oropharyngeal, anal and cervical cancers[J]. Clin Oncol (R Coll Radiol), 2019, 31(2): 81-90.
- [3] Cohen PA, Jhingran A, Oaknin A, et al. Cervical cancer[J]. Lancet, 2019, 393(10167): 169-182.
- [4] Sagae S, Toita T, Matsuura M, et al. Improvement in radiation techniques for locally advanced cervical cancer during the last two decades[J]. Int J Gynecol Cancer, 2023, 33(8): 1295-1303.
- [5] Mayadev JS, Ke GH, Mahantshetty U, et al. Global challenges of radiotherapy for the treatment of locally advanced cervical cancer[J]. Int J Gynecol Cancer, 2022, 32(3): 436-445.
- [6] Li FP, Guo H, Qiu HP, et al. Urological complications after radical hysterectomy with postoperative radiotherapy and radiotherapy alone for cervical cancer[J]. Medicine (Baltimore), 2018, 97(13): e0173.
- [7] 徐晨阳,刘桂云,江蓉,等.螺旋断层放射治疗技术在恶性肿瘤中的治疗进展[J]. 肿瘤学杂志, 2018, 24(10): 1002-1007.  
Xu CY, Liu GY, Jiang R, et al. Progress of helical tomotherapy for cancer treatment[J]. Journal of Chinese Oncology, 2018, 24(10): 1002-1007.
- [8] Patel G, Mandal A, Choudhary S, et al. Plan evaluation indices: a journey of evolution[J]. Rep Pract Oncol Radiother, 2020, 25(3):

- 336-344.
- [9] 邵琰, 王昊, 陈华, 等. 适形指数和均匀性指数的临床应用[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(9): 717-721.  
Shao Y, Wang H, Chen H, et al. Clinical applications of conformity index and homogeneity index[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2017, 37(9): 717-721.
- [10] Musunuru HB, Pifer PM, Mohindra P, et al. Advances in management of locally advanced cervical cancer[J]. Indian J Med Res, 2021, 154(2): 248-261.
- [11] Yeung R, McConnell Y, Warkentin H, et al. Intensity-modulated radiotherapy (IMRT) vs helical tomotherapy (HT) in concurrent chemoradiotherapy (CRT) for patients with anal canal carcinoma (ACC): an analysis of dose distribution and toxicities[J]. Radiat Oncol, 2015, 10: 92.
- [12] 刘娟, 李双双, 高山宝, 等. 宫颈癌螺旋断层放疗与静态调强技术的剂量学比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(1): 23-28.  
Liu J, Li SS, Gao SB, et al. Dosimetric comparison of helical tomotherapy versus fixed-field intensity-modulated radiotherapy for cervical cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(1): 23-28.
- [13] Li DP, Wang DD, Feng S, et al. Comparing dosimetric and cancer control outcomes after intensity-modulated radiation therapy and tomotherapy for advanced cervical cancer[J]. Oncol Lett, 2022, 24(1): 239.
- [14] Zhang X, Penagaricano J, Moros EG, et al. Dosimetric comparison of helical tomotherapy and linac-IMRT treatment plans for head and neck cancer patients[J]. Med Dosim, 2010, 35(4): 264-268.
- [15] 常娟娟, 李太平, 康婉英, 等. 容积旋转调强与调强放疗在宫颈癌放疗中的应用及剂量学、安全性研究[J]. 陕西医学杂志, 2024, 53(2): 194-198.  
Chang JJ, Li TP, Kang WY, et al. Application, dosimetric and safety analysis of volumetric modulated arc therapy and intensity modulated radiation therapy in radiotherapy of cervical cancer[J]. Shaanxi Medical Journal, 2024, 53(2): 194-198.
- [16] Thakur N, Kaur H, Kaur S, et al. Comparative analysis of VMAT and IMRT techniques: evaluation of dose constraints and bone marrow sparing in cervical cancer patients undergoing chemoradiotherapy[J]. Asian Pac J Cancer Prev, 2024, 25(1): 139-144.
- [17] 杨波, 庞廷田, 刘峡, 等. 宫颈癌术后盆腔螺旋断层调强和固定野调强技术的剂量学比较[J]. 协和医学杂志, 2013, 4(4): 392-396.  
Yang B, Pang TT, Liu X, et al. Comparison of the radiation doses used in helical tomotherapy and fixed-field intensity-modulated radiotherapy for cervical cancer[J]. Medical Journal of Peking Union Medical College Hospital, 2013, 4(4): 392-396.
- [18] 杨波, 庞廷田, 刘峡, 等. HT在宫颈癌术后盆腔放疗的优势探讨[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2014, 23(6): 523-526.  
Yang B, Pang TT, Liu X, et al. Treatment and dosimetry advantage between FF-IMRT, VMAT, and HT in cervix uteri radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2014, 23(6): 523-526.
- [19] 潘林飞, 王彬冰, 单国平, 等. 宫颈癌螺旋断层和容积旋转调强治疗剂量学研究[J]. 中国医药导报, 2017, 14(11): 95-98.  
Pan LF, Wang BB, Shan GP, et al. Study on the dosimetry of helical tomotherapy and volumetric modulated arc therapy in cervical cancer[J]. China Medical Herald, 2017, 14(11): 95-98.
- [20] 曹露, 方美芳, 葛文洁, 等. 宫颈癌螺旋断层放疗与容积旋转调强放疗的剂量学比较[J]. 深圳中西医结合杂志, 2022, 32(13): 12-15.  
Cao L, Fang MF, Ge WJ, et al. Dosimetric comparison between helical tomotherapy and volumetric rotary intensity-modulated radiotherapy for cervical cancer[J]. Shenzhen Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, 2022, 32(13): 12-15.
- [21] Renard-Oldrini S, Guinement L, Salleron J, et al. [Dosimetric comparison between VMAT and tomotherapy with para-aortic irradiation for cervix carcinoma] [J]. Cancer Radiother, 2015, 19(8): 733-738.
- [22] Tsai CL, Wu JK, Chao HL, et al. Treatment and dosimetric advantages between VMAT, IMRT, and helical tomotherapy in prostate cancer[J]. Med Dosim, 2011, 36(3): 264-271.
- [23] 刘楠, 董婷婷, 杨波, 等. 同发双侧乳腺癌保乳术后患者螺旋断层调强放疗与容积弧形调强放疗的剂量学对比分析[J]. 肿瘤学杂志, 2024, 30(6): 498-503.  
Liu N, Dong TT, Yang B, et al. Dosimetric comparison between helical tomotherapy and volumetric modulated arc therapy for patients with synchronous bilateral breast cancer after breast-conserving surgery[J]. Journal of Chinese Oncology, 2024, 30(6): 498-503.
- [24] 王赫隆, 云惟康, 王业伟, 等. 三种照射技术在髓母细胞瘤放射治疗中的剂量学分析[J]. 实用肿瘤学杂志, 2017, 31(5): 436-440.  
Wang HL, Yun WK, Wang YW, et al. Dosimetric analysis of three kinds of irradiation technique in radiotherapy of medulloblastoma [J]. Practical Oncology Journal, 2017, 31(5): 436-440.
- [25] Yang RJ, Wang JJ, Xu SP, et al. SmartArc-based volumetric modulated arc therapy for endometrial cancer: a dosimetric comparison with helical tomotherapy and intensity-modulated radiation therapy[J]. BMC Cancer, 2013, 13: 515.

(编辑: 薛泽玲)