

## 论著·临床研究

doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2023.05.015

网络首发 [https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.r.20221122.1512.010.html\(2022-11-23\)](https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1097.r.20221122.1512.010.html(2022-11-23))

## Monaco 通量平滑度对直肠癌术后放疗的剂量学影响\*

刘攀<sup>1</sup>, 谢清兰<sup>2</sup>, 赵文龙<sup>1</sup>, 谭洪文<sup>1△</sup>, 朱彤<sup>1</sup>

(1. 江西省吉安市中心人民医院肿瘤科 343000; 2. 吉安职业技术学院医学技术与护理学院, 江西吉安 343000)

**[摘要]** **目的** 探讨 Monaco 计划系统不同通量平滑度(FS)对直肠癌术后俯卧位调强放疗(IMRT)计划的剂量学影响。**方法** 回顾性分析 2021 年 4 月至 2022 年 3 月吉安市中心人民医院治疗的 25 例直肠癌术后患者资料,均行俯卧位模拟定位,基于 Monaco 计划系统在相同优化条件下,FS 依次设置为 Off、Low、Medium 和 High,生成 100 个 IMRT 计划,比较 4 种 FS 等级下的 IMRT 计划剂量学差异。**结果** 4 种 FS 等级下计划靶区(PTV)、危及器官及正常组织的剂量学参数、机器参数、 $\gamma$  通过率均能满足临床要求。FS 选择 Medium 与 High 时,PTV 和危及器官的剂量学参数、机器参数及  $\gamma$  通过率表现较好;FS 由 Off 到 High,正常组织各体积剂量  $V_5$ 、 $V_{10}$ 、 $V_{15}$ 、 $V_{20}$ 、 $V_{25}$ 、 $V_{30}$ 、 $V_{35}$ 、 $V_{40}$ 、 $V_{45}$  呈递增趋势,除  $V_{15}$  外,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。与 Off 比较,High 的正常组织的各体积剂量平均增加 5.28%,且正常组织受照剂量最大。**结论** 使用 Monaco 计划设计直肠癌俯卧位 IMRT 计划时,建议选择 Medium。

**[关键词]** 通量平滑度;直肠癌;俯卧位;Monaco;放射治疗;剂量学**[中图分类号]** R730.55 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2023)05-0710-05

## Effect of Monaco fluence smoothing on dosimetry of postoperative radiotherapy for rectal cancer\*

LIU Pan<sup>1</sup>, XIE Qinglan<sup>2</sup>, ZHAO Wenlong<sup>1</sup>, TAN Hongwen<sup>1△</sup>, ZHU Tong<sup>1</sup>

(1. Department of Oncology, Ji'an Central Hospital, Ji'an, Jiangxi 343000, China; 2. School of Medical Technology and Nursing, Ji'an Vocational and Technical College, Ji'an, Jiangxi 343000, China)

**[Abstract]** **Objective** To investigate the dosimetric effect of different fluence-smoothing (FS) of the Monaco planning system on the postoperative prone position intensity modulated radiation therapy (IMRT) for rectal cancer. **Methods** A total of 25 patients who were treated in Ji'an Central Hospital from April 2021 to March 2022, with rectal cancer after surgery were selected. Each patient was positioned in the prone position for simulation, and 4 IMRT plans with were performed based on the Monaco planning system under the same optimized conditions, with the FS setting of Off, Low, Medium and High. Compared the dosimetric differences in IMRT plans at the four FS classes. **Results** The planned target area (PTV), dosimetric parameters endangered organs and normal tissues, machine parameters, and gamma pass rate under the four FS classes could meet the clinical requirements. When FS chose Medium and High, the PTV and dosimetric parameters endangered organs, machine parameters and gamma pass rate all performed better; FS from Off to High, there was an increasing trend of each volume dose  $V_5$ ,  $V_{10}$ ,  $V_{15}$ ,  $V_{20}$ ,  $V_{25}$ ,  $V_{30}$ ,  $V_{35}$ ,  $V_{40}$  and  $V_{45}$  in normal tissues, and except for  $V_{15}$ , the difference was statistically significant ( $P < 0.05$ ). The volume dose of normal tissue of High was 5.28% higher than that of Off, and normal tissue received the largest radiation dose. **Conclusion** Medium flux smoothness is recommended when designing a prone IMRT plan for rectal cancer using the Monaco plan.

**[Key words]** fluence-smoothing; rectal cancer; prone position; Monaco; radiotherapy; dosimetry

放射治疗(放疗)是直肠癌治疗的主要手段之一,在术前和术后肿瘤辅助治疗中,能降低肿瘤局部复发风险,明显提高肿瘤控制率<sup>[1-2]</sup>。调强放疗(intensity

modulated radiation therapy, IMRT)基于多叶光栅走位运动<sup>[3]</sup>,实现靶区剂量分布与靶体积在三维空间上的形状一致,是目前主要放疗技术之一<sup>[4]</sup>。基于蒙特

\* 基金项目:江西省科学技术厅科技计划项目(20161BBG70036)。  
△ 通信作者, E-mail: 1020584674@qq.com。

作者简介:刘攀(1991—), 硕士, 技师, 主要从事医学物理剂量和质控

卡罗模拟算法的医科达 Monaco 计划系统是放疗领域成熟商用计划系统之一<sup>[5]</sup>,可出色完成 X 射线计划的剂量计算,其通量平滑功能在计划设计时包含 4 种选项(Off、Low、Medium、High),合适的通量平滑度(flucose-smoothing,FS)选择将直接影响计划设计的最终结果,如何选择 FS 值对于提高计划质量起着至关重要的作用。本文通过横向比较 4 种 FS 等级下直肠癌术后 IMRT 计划的质量,为直肠癌术后 IMRT 计划设计提供参考,现报道如下。

## 1 资料与方法

### 1.1 一般资料

回顾性分析 2021 年 4 月至 2022 年 3 月吉安市中心人民医院治疗的 25 例直肠癌术后患者资料,年龄 41~72 岁,中位年龄 53 岁,T3~T4 分期,病理结果为腺癌,且为首次接受放疗,无放疗禁忌症。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 定位方法

患者使用带空腹板的俯卧位专用体架,行俯卧位模拟定位。定位前 1 h 排空大小便,并饮水 500 mL 使膀胱充盈,以便后续治疗尿量恒定<sup>[6]</sup>。模拟定位使用飞利浦大孔径 CT,扫描层厚 5 mm<sup>[7]</sup>,范围为第 3 腰椎上缘至坐骨结节下 5 cm,螺旋扫描获取患者多层影像,将影像数据经内网上传至 Monaco 5.11.03 版本放疗计划系统。

#### 1.2.2 靶区勾画

所有患者均由同一位高年资临床医师按国际辐射单位和测量委员会 83 号报告完成临床靶区勾画,包括切缘阳性及可疑残留区、高危区、一般危险区,临床靶区沿不同方向统一外扩 5 mm 生成计划靶区(planning target volume,PTV),并勾画危及器官。

#### 1.2.3 物理计划设计

治疗使用的直线加速器型号为 Elekta Synergy,配备 40 对多叶光栅,叶片厚度 1 cm,X 射线能量选择 6 MV。计划设计过程中,保持靶区、危及器官和正常组织的约束函数及参数一致,每例患者依次设置 FS 等级为 Off、Low、Medium 和 High,得到 25 组 100 个物理计划。计划采用七野照射,固定角度为 150°、100°、50°、0°、310°、260°、210°,剂量计算网格 0.3 cm,最小子野宽度 0.6 cm。处方剂量:总剂量 50 Gy,单次 2 Gy,分 25 次照射。所有计划均需放疗医师批准且满足临床实际要求。

#### 1.2.4 计划评估

计划优化完成后,以 50 Gy 剂量覆盖 95% 的 PTV 体积进行剂量归一,所有计划经放疗医生审核批准满足临床要求。基于剂量体积直方图评估 PTV、危及器官及正常组织的剂量学参数<sup>[8]</sup>,PTV 评估参

数:最大剂量( $D_2$ )、最小剂量( $D_{\min}$ )、平均剂量( $D_{\text{mean}}$ )、适形指数(conformity index,CI)、均匀性指数(homogeneity index,HI)<sup>[9]</sup>。危及器官评估参数:膀胱、小肠、股骨头的  $D_2$ 、 $D_{\text{mean}}$ 、体积剂量。正常组织评估参数:体积剂量。同时统计每个计划的子野数、机器跳数、剂量计算时间、 $\gamma$  通过率随 FS 的变化规律。CI 反映 PTV 剂量适形性,值越趋近 1,表明靶区适形越好;HI 反映 PTV 剂量均匀性,值越趋近 0,表明靶区均匀性越好;CI 计算采用公式(1),HI 计算采用公式(2)<sup>[10]</sup>,计算公式如下:

$$CI = \frac{V_{50}}{V_{PTV}} \times \frac{V_{50}}{V_R} \quad (1)$$

式中, $V_{50}$  为处方剂量 50 Gy 包绕 PTV 体积,单位为  $\text{cm}^3$ ;  $V_R$  为处方剂量 50 Gy 剂量线覆盖体积,单位为  $\text{cm}^3$ ;  $V_{PTV}$  为 PTV 体积,单位为  $\text{cm}^3$ 。

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

式中, $D_x$  为 PTV X% 体积所受最小剂量,单位为 cGy。

#### 1.2.5 计划验证

验证设备为德国 IBA 公司 MatriXX Evolution 平板电离室,验证分析软件为德国 IBA 公司 My QA myQA patients 软件。校准标定电离室后,剂量验证过程采用电影测量模式,得到角度归零方法的剂量验证结果<sup>[11-12]</sup>,以 2%/2 mm(剂量差异设置为 2%,距离符合度设置为 2 mm)标准计算  $\gamma$  通过率, $\gamma$  通过率 > 95% 时认为计划通过<sup>[13]</sup>。

### 1.3 统计学处理

采用 SPSS20.0 软件进行数据分析,计量资料以  $\bar{x} \pm s$  表示,比较采用方差分析,以  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 PTV 和危及器官剂量参数

PTV 剂量参数中,FS 从 Off 到 High 横向比较, $D_{\min}$ 、 $D_{\text{mean}}$  均呈增大趋势,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。FS 从 Off 到 Medium,HI 呈递增趋势,High 的数值最大,较 Low 增加 8.45% ( $P < 0.05$ )。危及器官剂量参数中,膀胱  $D_{\text{mean}}$ 、 $V_{40}$ 、 $V_{50}$ ,小肠  $V_{20}$ ,左股骨头  $V_{40}$  比较,差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),见表 1、图 1。

### 2.2 正常组织剂量参数

FS 从 Off 到 Medium,正常组织  $V_5 \sim V_{45}$  呈递增趋势,High 的正常组织受照剂量最高,除  $V_{15}$  外,差异有统计学意义( $P < 0.05$ )。与 Off 比较,High 的  $V_5 \sim V_{45}$  分别增加 1.04%、1.36%、0.87%、2.30%、3.47%、4.38%、7.10%、9.15%、17.81%,平均 5.28%,见表 2。

表1 不同FS下PTV和危及器官剂量参数( $n=25, \bar{x} \pm s$ )

项目	Off	Low	Medium	High	P
PTV					
D <sub>2</sub> (cGy)	5 267.62±16.29	5 284.34±23.87	5 265.82±6.34	5 276.76±26.95	0.087
D <sub>min</sub> (cGy)	4 034.26±400.45	4 078.60±360.17	4 177.04±364.99	4 207.38±353.79	0.003
D <sub>mean</sub> (cGy)	5 127.00±21.28	5 135.64±19.65	5 138.96±23.09	5 149.76±22.94	0.018
膀胱					
D <sub>2</sub> (cGy)	5 209.20±20.93	5 236.42±44.54	5 204.96±28.03	5 201.88±25.11	0.516
D <sub>mean</sub> (cGy)	3 876.06±218.23	3 821.96±208.94	3 838.06±204.74	3 801.58±203.62	0.021
V <sub>40</sub> (%)	55.10±5.95	52.91±5.80	52.90±5.11	52.09±4.98	0.008
V <sub>50</sub> (%)	22.95±5.18	21.83±3.97	21.90±4.58	20.24±4.45	0.029
小肠					
D <sub>2</sub> (cGy)	4 629.67±109.09	4 514.18±168.98	4 529.58±195.02	4 512.16±172.92	0.087
D <sub>mean</sub> (cGy)	2 266.36±258.47	2 292.46±256.74	2 304.82±229.62	2 336.98±209.13	0.207
V <sub>20</sub> (%)	54.51±11.40	54.73±10.60	56.03±11.28	56.35±11.14	0.036
V <sub>30</sub> (%)	27.73±8.10	26.61±6.51	27.71±7.58	27.05±5.77	0.456
V <sub>40</sub> (%)	10.26±3.13	8.74±3.48	9.21±4.66	8.58±3.31	0.169
V <sub>50</sub> (%)	0.10±0.07	0.05±0.04	0.06±0.05	0.07±0.05	0.153
左股骨头					
D <sub>2</sub> (cGy)	4 227.10±119.22	4 211.35±121.51	4 198.37±217.19	4 207.73±251.34	0.237
D <sub>mean</sub> (cGy)	2 452.90±225.10	2 416.06±232.86	2 374.82±209.54	2 370.42±224.84	0.218
V <sub>20</sub> (%)	67.12±16.18	66.99±16.16	65.22±16.03	65.86±14.13	0.782
V <sub>30</sub> (%)	25.79±6.49	23.77±5.73	23.10±5.50	22.37±6.63	0.063
V <sub>40</sub> (%)	5.11±2.75	4.46±2.17	3.74±2.74	3.66±2.70	0.045
右股骨头					
D <sub>2</sub> (cGy)	4 194.95±176.12	4 118.82±137.02	4 140.58±204.41	4 133.96±183.14	0.109
D <sub>mean</sub> (cGy)	2 372.14±296.77	2 247.00±263.33	2 176.80±220.96	2 228.08±233.02	0.212
V <sub>20</sub> (%)	66.02±18.72	65.52±20.58	59.96±17.25	62.60±19.93	0.067
V <sub>30</sub> (%)	24.95±5.93	23.55±6.80	21.54±3.80	20.77±2.95	0.095
V <sub>40</sub> (%)	4.12±2.02	2.92±1.74	3.10±1.86	2.67±2.20	0.051

V<sub>x</sub>: 器官结构标称剂量占全体积的百分比。

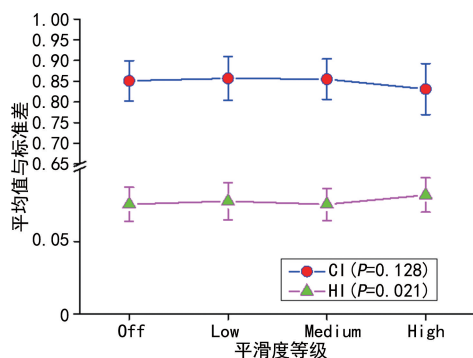


图1 不同FS下CI及HI变化趋势

表2 不同FS下正常组织剂量参数( $n=25, \bar{x} \pm s$ )

项目	Off	Low	Medium	High	P
V <sub>5</sub>	50.91±8.05	50.98±7.86	51.26±8.03	51.44±7.98	0.001
V <sub>10</sub>	42.65±7.37	42.78±7.23	42.95±7.34	43.23±7.23	0.008

续表2 不同FS下正常组织剂量参数( $n=25, \bar{x} \pm s$ )

项目	Off	Low	Medium	High	P
V <sub>15</sub>	36.43±6.85	36.67±6.77	36.84±6.78	36.75±6.76	0.162
V <sub>20</sub>	26.98±5.72	27.16±5.62	27.43±5.77	27.60±5.66	0.002
V <sub>25</sub>	18.72±4.47	18.84±4.39	19.06±4.36	19.37±4.39	0.012
V <sub>30</sub>	12.33±3.37	12.43±3.32	12.60±3.44	12.87±3.53	0.001
V <sub>35</sub>	7.60±2.64	7.67±2.67	7.84±2.76	8.14±2.72	<0.001
V <sub>40</sub>	4.70±2.14	4.75±2.08	4.85±2.06	5.13±2.22	0.009
V <sub>45</sub>	2.19±1.53	2.25±1.49	2.33±1.59	2.58±1.63	0.003

### 2.3 机器参数及计划通过率

FS从Off到Medium,子野数、机器跳数、剂量计算时间呈现递减趋势,差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),与Off比较,High的子野数减少9.80%、机器跳数减

少 9.20%、剂量计算时间减少 7.89%。FS 从 Off 到 Medium,  $\gamma$  通过率均符合计划要求且呈递增趋势,

High 的  $\gamma$  通过率最高, 较 Off 增加 1.78%, 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 见表 3、图 2。

表 3 不同 FS 下机器参数及  $\gamma$  通过率 ( $n=25, \bar{x} \pm s$ )

项目	Off	Low	Medium	High	P
子野数(个)	178.73±23.76	170.12±18.21	167.60±13.50	161.23±10.32	<0.001
机器跳数(MU)	895.56±77.13	879.65±65.32	843.69±62.35	813.18±23.76	<0.001
剂量计算时间(s)	365.22±37.60	361.31±29.14	347.43±30.76	336.42±32.50	0.030
$\gamma$ 通过率(%)	96.12±1.31	96.70±0.77	97.38±0.92	97.83±0.67	0.010

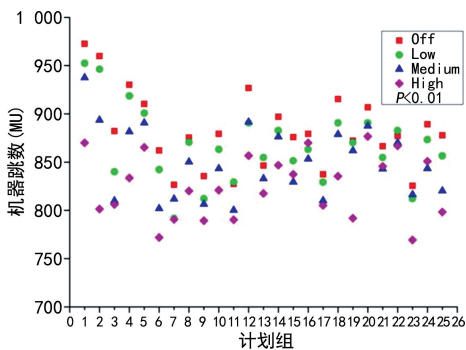


图 2 不同 FS 下 25 组计划机器跳数分布

### 3 讨论

医科达 Monaco 计划系统是目前广泛使用的放疗计划系统<sup>[14-15]</sup>, 使用蒙特卡罗标准粒子模拟计算<sup>[16-17]</sup>, FS 是其重要优化计算参数之一, 合理的 FS 设置可以更好地优化射野适形复杂程度及照射面积, 快速提升放疗计划计算效率与质量。潘香等<sup>[18]</sup>关于 FS 对左乳腺癌保乳术后放疗的剂量学研究结果表明, FS 可以降低子野数、机器跳数及剂量计算时间数, 高通量平滑计划质量更有优势, 更能提高治疗效率。邱刚等<sup>[19]</sup>研究了 FS 对宫颈癌放疗的剂量学影响, 结果表明 FS 通过改变各控制点下射野适形及照射面积, 对靶区剂量准确度有较大影响。直肠癌靶区体积较大, 为凹形靶, 且紧邻膀胱、小肠、股骨头等危及器官, 治疗中俯卧体位对膀胱、小肠保护优于仰卧位<sup>[20]</sup>, 而关于 FS 对直肠癌术后俯卧位治疗的剂量学影响报道较少, 同时增加正常组织剂量分析及计划剂量验证, 从多方面反映 FS 对直肠癌术后放疗剂量学影响, 为选择最优的 FS 提供参考。

本研究中, FS 从 Off 到 High 的横向比较,  $D_{min}$ 、 $D_{mean}$  均呈增大趋势, 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 主要原因是直肠癌靶区较大, 且术后形状不规整, 靶区与小肠、膀胱的空间体积存在较多重叠, 随着 FS 由 Off 至 High 等级增加, 各个控制点下射野构成精准度降低, 照射面积增大, 低 FS 子野数多, 适形精细, 对靶区剂量雕刻力高, 能减少射野的照射范围, 提高射野执行精度, 与之相反, 高 FS 子野精准度降低, 照射范围增大, 使靶区平均剂量与最小剂量升高。FS 从 Off 到 Medium, CI 相近, High 的数值最小, 差异无统

计学意义 ( $P > 0.05$ ); 而 FS 从 Off 到 High, HI 呈递增趋势, 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 且 High 的数值最大, 较 Low 增加 8.45%。主要原因是随着 FS 从 Off 到 High 增加, 各控制点下射野构成精准度降低, 靶区适形性变差, 即 High 的 CI 值最小, 高 FS 子野精准度降低, 系统为满足靶区剂量, 增加照射范围以满足预设条件, 导致靶区剂量均匀性变差, High 的 HI 值最大。基于以上分析, FS 选择 Low 与 Medium 时更优。

在危及器官与正常组织剂量评估结果中, 膀胱  $D_{mean}$ 、 $V_{40}$ 、 $V_{50}$ , 小肠  $V_{20}$  和左股骨头  $V_{40}$  比较, 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 且各等级 FS 下的危及器官剂量参数均符合放疗剂量学要求, FS 等级改变对危及器官剂量参数影响较小。正常组织剂量参数中, 各体积剂量除  $V_{15}$  外均有差异, 且 FS 从 Off 到 High, 各体积剂量呈现递增趋势, 随着 FS 增加, 子野适形变差, 照射面积增大, 导致正常组织受照剂量增加。High 时, 正常组织受照剂量最大, 与 Off 比较, High 的正常组织各体积剂量平均增加 5.28%。

在机器参数及计划通过率方面, FS 从 Off 到 High, 子野数、机器跳数及剂量计算时间数值呈现递减趋势, 差异有统计学意义 ( $P < 0.05$ ), 与 Off 比较, High 的子野数减少 9.80%、机器跳数减少 9.20%、剂量计算时间减少 7.89%, 这是由于高平滑度计划适形简单, 所需子野数较少, 计划复杂度降低, 机器跳数相应减少, 计划计算时间也随之缩短, 计划执行效率更高<sup>[21]</sup>。FS 从 Off 到 High,  $\gamma$  通过率呈现递增趋势, 与 Off 比较, High 的  $\gamma$  通过率增加 1.78%, High 的  $\gamma$  通过率最大, 计划通过率最高。可以看出在机器参数及计划通过率方面, High 等级数据最优, Medium 次之。

4 种 FS 下, 靶区、危机器官及正常组织的剂量学参数均符合临床治疗要求。分开来看各项参数, 靶区剂量适形度及均匀性方面, FS 选择 Low 与 Medium 时, CI 和 HI 数值更优; 机器参数和计划通过率方面, FS 为 High 最优, Medium 次之; 正常组织体积剂量方面, High 的正常组织受照剂量最大, 这将增加二次致癌风险<sup>[22]</sup>。由于不同计划系统, 不同限量方法与参

数设置均有相应规律,本研究得到的结果只针对 Monaco 计划系统对直肠癌术后俯卧位患者,所得结论仅供其他计划系统与病种参考。

综上所述,FS 选择 Medium 时可以更好兼顾计划各方面性能,保障计划实施的质量及效率,因此,在直肠癌俯卧位 IMRT 计划设计时,推荐选择 Medium 进行计划优化。

## 参考文献

- [1] SHI J, YANG F, JU X, et al. Comparative study on dosimetry of VMAT and IMRT in assisted radiotherapy after radical resection of rectal cancer[J]. *Oncol Lett*, 2017, 13(5):2971-2974.
- [2] 国家卫生健康委员会. 中国结直肠癌诊疗规范(2020 年版)[J]. *中华胃肠外科杂志*, 2020, 23(6):521-540.
- [3] 李超, 罗焕丽, 靳富, 等. 直肠癌术前放疗剂量及其分割模式的研究进展[J]. *重庆医学*, 2020, 49(19):3288-3292.
- [4] 潘香, 杨毅, 侯宇, 等. 基于 Monaco 的不同布野方式在左乳腺癌保乳术后调强放疗中的剂量学差异[J]. *实用临床医药杂志*, 2021, 25(1):1-5.
- [5] SRIVASTAVA A K, BHARATI A, RASTOGI M, et al. Evaluation of dosimetric implications of Pareto and constrained mode of optimization for Monaco TPS generated VMAT plans in post operated carcinoma of the left breast[J]. *Pol J Med Phys Eng*, 2021, 27(1):11-18.
- [6] 曾小华, 李华峰, 阮善明, 等. 直肠癌同步调强放疗不同射野角度对小肠和膀胱受照剂量的影响研究[J]. *医疗卫生装备*, 2020, 41(4):61-63.
- [7] 林锋, 曾自力, 覃树付, 等. 直肠癌术后调强放疗不同照射野数的剂量学研究[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28(2):201-205.
- [8] 许新明, 刘琦, 刘颖, 等. 宫颈癌术后七野固定调强放疗与容积旋转调强放疗计划剂量学对比研究[J]. *重庆医学*, 2022, 51(17):2970-2975.
- [9] 桂记龙, 邹小艳. Rapidplan 优化模块在左侧乳腺癌术后调强放疗中的应用研究[J]. *重庆医学*, 2022, 51(9):1516-1519.
- [10] 陈颖, 刘茹佳, 钟志鹏, 等. 基于外轮廓的虚拟限量环在宫颈癌固定野调强放疗中的应用[J]. *医疗卫生装备*, 2021, 42(9):36-40.
- [11] WIDODO P, PAWIRO S A, SUSILA I P. Dosimetry for intensity modulated radiotherapy (IMRT) technique using ion chamber matrix (MatriXX-FFF) with back projection method (usual 6MV and 10MV)[J]. *J Phys:Conf Ser*, 2020, 1505:012015.
- [12] 国家癌症中心/国家肿瘤质控中心. 调强放疗剂量验证实践指南[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2020, 29(12):1021-1024.
- [13] 李亮, 解昕, 范雪梅, 等. 胸中段食管癌容积调强放疗计划的验证方法[J]. *中国医学物理学杂志*, 2019, 36(1):33-36.
- [14] ADAM D P, LIU T Y, CARACAPPA P F, et al. New capabilities of the monte carlo dose engine ARCHER-RT: Clinical validation of the Varian TrueBeam machine for VMAT external beam radiotherapy[J]. *Medical Physics*, 2020, 47(6):2537-2549.
- [15] BAJWA S, GUL A, AHMED S, et al. Monte Carlo commissioning of radiotherapy LINAC-Introducing an improved methodology[J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2020, 25(5):720-724.
- [16] BARBIERO S, RINK A, MATTEUCCIF, et al. Single-fraction flattening filter-free volumetric modulated arc therapy for lung cancer: dosimetric results and comparison with flattened beams technique[J]. *Med Dosim*, 2016, 41(4):334-338.
- [17] 姚凯宁, 岳海振, 王若曦, 等. 基于蒙特卡罗模拟的直肠癌术前容积调强放射治疗计划剂量验证[J]. *中国医学物理学杂志*, 2020, 37(5):529-534.
- [18] 潘香, 侯宇, 杨毅, 等. 通量平滑度对左乳癌保乳术后容积旋转调强放疗剂量学的影响[J]. *现代肿瘤医学*, 2021, 29(15):2691-2695.
- [19] 邱刚, 房保栓, 魏强, 等. 通量平滑度对宫颈癌放疗治疗的剂量学影响[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30(3):288-294.
- [20] 黄婷婷, 王文玲, 董洪敏, 等. 直肠癌辅助放疗中患者腹围在不同体位下与肠道剂量体积的相关性分析[J]. *现代肿瘤医学*, 2022, 30(8):1463-1467.
- [21] CHANG K H, KIM D W, CHOI J H, et al. Dosimetric comparison of four commercial patient-specific quality assurance devices for helical tomotherapy[J]. *J Korean Phys Soc*, 2020, 76(3):257-263.
- [22] 陈颖, 刘茹佳, 钟志鹏, 等. 基于外轮廓的虚拟限量环在宫颈癌固定野调强放疗中的应用[J]. *医疗卫生装备*, 2021, 42(9):36-40.