

输尿管支架在宫颈癌术后放疗中的辐射剂量学探讨

何亚男¹ 申正文¹ 柳先锋¹ 赵秀娟²

¹(重庆大学附属肿瘤医院肿瘤放射治疗中心 重庆 400030)

²(重庆大学附属肿瘤医院妇科肿瘤中心 重庆 400030)

摘要 高密度植入物会对放疗剂量分布造成影响,本研究探讨放疗时安置输尿管支架的辐射安全性。收集2016年11月~2018年4月在重庆大学附属肿瘤医院安置输尿管支架行术后放疗且宫颈癌患者15例。每位患者行CT定位、靶区勾画和放疗计划设计,实际治疗组为支架组;应用密度填充技术将CT图像上输尿管支架高密度HU值替换为尿液HU值,逐个复制支架组计划,以相同优化参数设计放疗计划,为无支架组。采用蒙特卡罗方法验算两组计划,得到计划靶区(Planning target volume, PTV)和危及器官(Organs-at-risk, OARs)的 γ 通过率。比较两组靶区适形度指数(Conformal index, CI)、均匀性指数(Heterogeneous index, HI)和OARs受量。结果表明:两组计划 γ 通过率均满足临床要求;支架组与无支架组靶区CI分别为 0.88 ± 0.03 和 0.90 ± 0.03 ($p<0.05$);两组HI差异无统计学意义($p>0.05$);支架组靶区 $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 、 D_{mean} 和OARs受量高于无支架组,仅小肠及输尿管受量差异有统计学意义($p<0.05$);输尿管支架对靶区及OARs剂量贡献率 $<5\%$ 。放疗时安置输尿管支架对宫颈癌术后靶区及OARs辐射剂量有一定影响,其贡献率 $<5\%$,临床影响较小,辐射相对安全。

关键词 宫颈癌术后,输尿管支架,密度填充技术,蒙特卡罗

中图分类号 R451

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0037

Radiation safety in patients with ureteral stent placement undergoing postoperative radiotherapy for cervical cancer

HE Yanan¹ SHEN Zhengwen¹ LIU Xianfeng¹ ZHAO Xiujuan²

¹(Department of Oncology Radiotherapy Center, Chongqing University Cancer Hospital, Chongqing 400030, China)

²(Department of Gynecological Oncology Center, Chongqing University Cancer Hospital, Chongqing 400030, China)

ABSTRACT This study aimed to investigate radiation safety in patients with ureteral stent implantation undergoing radiotherapy. We enrolled 15 patients with ureteral stents undergoing postoperative radiotherapy for cervical cancer at the Chongqing University Cancer Hospital from November 2016 to April 2018. Computed tomography localization, target delineation, and radiotherapy planning were performed. The treatment group was the stent group, and the control group was the stent-free group. The high radiodensity HU value of ureteral stents on computed tomography was replaced by liquid radiodensity using density-filling technology, and the stent-free group

基金资助: 重庆市科卫联合医学科研项目(2021MSXM172)和重庆市技术创新与应用示范(社会民生类)一般项目(cstc2018jscx-msybX0095)资助

第一作者: 何亚男,女,1986年7月出生,2017年6月于重庆大学获硕士学位

通信作者: 赵秀娟,在读博士研究生, E-mail: 275232962@qq.com

收稿日期: 初稿 2022-03-10; 修回 2022-05-16

Supported by the Joint Medical Scientific Research Project of Chongqing Municipal Science & Technology Commission and Chongqing Municipal Health Commission (2021MSXM172) and the Technology Innovation and Application Demonstration Project of Chongqing Municipal Science & Technology Commission (cstc2018jscx-msybX0095).

First author: HE Yanan (female) was born in July 1986 and obtained her master's degree from Chongqing University in June 2017

Corresponding author: ZHAO Xiujuan, graduate student, E-mail: 275232962@qq.com

Received 10 March 2022; accepted 16 May 2022

was optimized with the same parameters. The Monte Carlo method was used to calculate the γ passing rate of the planning target volume and organs at risk (OARs). The conformal index, homogeneity index, and OAR receiver were compared between the two groups. The results showed that the γ passing rate of both groups met the clinical requirements. The target conformal index results were 0.88 ± 0.03 and 0.90 ± 0.03 in the stent and stent-free groups, respectively ($p < 0.05$). The homogeneity index result did not differ significantly between the two groups ($p > 0.05$). $D_{2\%}$, $D_{98\%}$, D_{mean} and OARs in the stenting group were significantly higher than those in the stent-free group, and only the small intestine and ureter showed significant differences ($p < 0.05$). The contribution rate of ureteral stents to target sites and OAR dose were $< 5\%$. In conclusion, ureter stent implantation during radiotherapy affects the postoperative target area and OAR radiation dose in patients with cervical cancer, but the contribution rate is $< 5\%$, which has little influence on clinical treatment outcome, and radiotherapy is relatively safe.

KEYWORDS Cervical cancer postoperative, Ureteral stent, Density filling technology, Monte Carlo
CLC R451

宫颈癌是最常见妇科恶性肿瘤,手术是早期宫颈癌治疗最重要方法之一,术后存在高、中危因素,需8周内完成放射治疗^[1]。在宫颈癌手术过程中损伤输尿管或术后输尿管坏死情况极易出现,有半数以上医源性输尿管损伤发生在妇科手术中^[2]。孙华宾^[3]和魏振杰^[4]等均证实术前预置输尿管支架是预防输尿管损伤有效方法。输尿管支架一般需保留3个月,必要时保留6个月,部分宫颈癌患者在未拔除输尿管支架前已开始放射治疗。输尿管支架HU值远高于输尿管内部尿液HU值,有研究报道,靶区内及靶区周围高密度HU值材料会导致剂量计算结果出现误差^[5]。放射治疗剂量计算误差需小于3%,通常采用患者特异性剂量重计算来验证剂量准确性^[6]。目前在金属植入物、高低密度转换区域最精确算法是蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)算法^[7]。输尿管支架大部分处于放疗靶区内, HU值高于周围正常组织,是否会对放疗计划产生影响尚未见报道。为此,本研究拟通过密度填充技术改变输尿管支架HU值(无支架组)与支架组进行计划对比。利用MC算法验证两组计划剂量计算准确性,同时探讨本研

究HU值的输尿管支架对靶区及OARs剂量影响,为临床安置输尿管支架行放疗的患者安全性提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 病例资料

收集2016年11月~2018年4月重庆大学附属肿瘤医院宫颈癌术后补充放疗^[1]且安置输尿管支架患者15例,其中13例补充放疗同步化疗,2例仅补充放疗,中位年龄48岁(40~56岁)。按照FIGO(2009版)进行临床分期,Ib1期12例,Ib2期3例。本研究所有患者均按支架组计划完成术后放疗且在放疗结束后1个月内取出输尿管支架,放疗前后肾功能均在正常范围内。

1.2 输尿管支架HU值替换依据

输尿管支架一般是两端呈弯曲环状的管状结构,对输尿管进行支撑和引流,一端放入肾盂内,另一端留置在膀胱内,见图1。

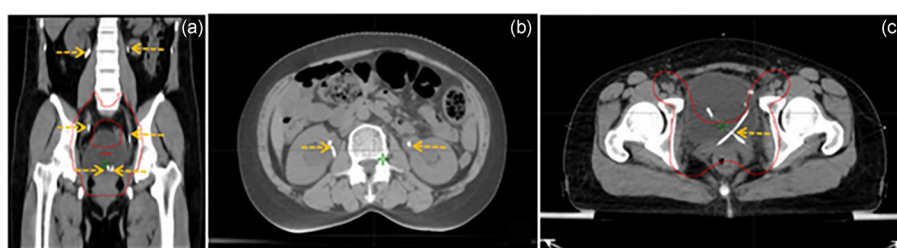


图1 患者体内输尿管支架示例:(a)冠状位;(b)横断位-腹腔;(c)横断位-盆腔
Fig.1 Example of ureteral stent in patient position: (a) coronal; (b) transverse-abdomen; (c) trans-verse-pelvic

本研究输尿管支架型号335526-000060 (Teleflex Medical公司),材料主要成份为硅胶,其内

部含有金属网状结构,直径2 mm,长度26 cm,实测值804.65~174.61 HU。因此,带支架输尿管在CT图

像显示高HU值密度影。为了研究的准确性,首先通过人工智能系统,基于UNet图像分割网络勾画出输尿管轮廓,然后再由高年资医生逐层修改。输尿管被支架撑开后其内部为支架及尿液,若不考虑支架材料影响,输尿管内应为尿液,本研究拟将输尿管支架HU值还原成尿液值。因尿液成份差异导致HU值不恒定,我们把每位患者膀胱分为四个象限,每个象限内随机测5点共20点HU值,实测患者尿液HU值呈正态分布,其平均值和标准差见图2。

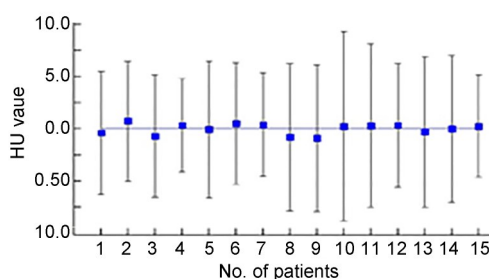


图2 患者尿液HU值
Fig.2 Patient's urine HU values

所有患者平均HU值的均值为0.00,均方根为1.669,可见尿液HU值接近0,故将无支架组输尿管

支架密度值替换为0 HU。无支架组计划仅供本研究分析,并未进行治疗。实际治疗组为支架组,将支架组优化参数复制到无支架组为对照组。

1.3 放射治疗

1.3.1 放疗定位

患者定位和每次治疗前需排空直肠,提前20 min 饮水200 mL,膀胱半充盈状态。采用A枕腹板热塑体膜固定,头先进、仰卧位进行CT扫描定位,层厚5 mm。扫描范围L2椎体下缘至坐骨结节下5 cm。将CT模拟定位扫描图像传输至瓦里安Eclips计划系统。

1.3.2 靶区勾画

根据靶区勾画指南及专家共识进行靶区及OARs勾画,如图3所示。临床靶区(Clinical target volume, CTV)包括阴道上段1/2、阴道残端、盆腔淋巴引流区域(包括髂总、髂外、髂内、闭孔及骶前淋巴引流区),上界为腹主动脉分叉,下界至阴道残端下3 cm,计划靶区(Planning target volume, PTV)为CTV三维方向外扩7 mm;OARs包括小肠、直肠、膀胱、骨髓、双侧股骨头;勾画输尿管支架。

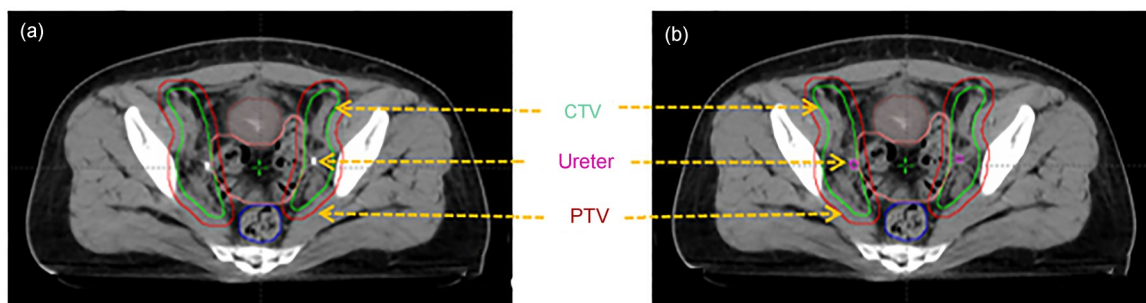


图3 支架组(a)和无支架组(b)计划靶区示例
Fig.3 Examples of planned targets of stenting group (a) and stent-free group (b)

1.3.3 计划设计

根据既往研究选择宫颈癌比较成熟的9野均分调强放疗(IMRT)技术^[8]。两组计划按同一处方及OARs限量计算,其中PTV处方剂量为45 Gy/25F。靶区要求 $V_{45} \geq 95\%$ (处方剂量45 Gy至少占靶体积的95%),靶区内最大和最小值不超过处方剂量 $\pm 10\%$ 。OARs限量:小肠、直肠及膀胱40 Gy剂量所占体积小于50%($V_{40} < 50\%$)、双侧股骨头30 Gy剂量所占体积小于30%($V_{30} < 30\%$)、脊髓最大剂量小于40 Gy($D_{\max} < 40$ Gy)。所有放疗需5周内完成(每日1次,每周5次)。输尿管支架剂量贡献率(R)相当于靶区和OARs受量分别在有支架组剂量(S)与无支架组(F)

的差除以无支架组剂量^[9],其贡献率见式(1)。

$$R = \frac{S - F}{F} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.4 计划质控

采用IBA公司SciMoCa软件中MC算法进行计划QA。用于线性加速器MC算法在文献[10]中有详细描述。加速器治疗头是影响射线品质的主要因素,在MC算法中采用EGSnrc软件^[11]对直线加速器进行建模和计算,用BEAMnrc来建立加速器模型,模拟的是瓦里安IX直线加速器。本研究将支架组与无支架组放疗计划分别导入SciMoCa进行MC计算,设定其参数:计算阈值10%;评估标准($\gamma(\%)$)

3%/2 mm; 计算网格 $2.5\times 2.5\times 2.5$; 不确定度0.5%。两组放疗计划的TPS剂量计算结果分别和各自对应的MC验算后的剂量计算结果进行 γ 分析, 得到两组计划靶区和OARs的 γ 通过率。美国医学物理学家协会(AAPM)TG-218号报告推荐 γ 通过率大于等于95%视为通过^[12]。

1.3.5 计划实施

所有患者均按治疗组计划实施治疗, 放疗方式均为IMRT技术, 剂量为45 Gy/25F, 化疗方案采用每周单药顺铂, 40 mg/m², 共5~6次。

1.3.6 统计学分析

使用SPSS 25.0软件进行数据分析, 结果用均值 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm s$)表示。两组计划MC验算的靶区及OARs的 γ 通过率、靶区CI= $(V_{T,ref}\times V_{T,ref})/(V_1\times V_{ref})$ ^[13]、靶区HI= $(D_{2\%}-D_{98\%})/D_{50\%}$ ^[13]、靶区及OARs参数应用配对 t 检验, 以 $p<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果与讨论

2.1 输尿管支架对靶区及OARs剂量影响

在人体内各种组织不均匀, 对剂量分布会造成不同程度的影响。高密度植入物因增加表面放射剂

量会对放疗剂量分布造成影响, 导致靶区内及邻近OARs剂量增加, 同时会降低靶区适形度和均匀性^[14-15], 故高密度植入物的HU值不同对放疗剂量分布影响不同。在本研究中, 输尿管支架密度实测值为804.65~174.61 HU; 输尿管若去除支架其内部为尿液, 尿液实测HU值的平均值为0.00, 均方根为1.669。输尿管支架HU值远高于其内部尿液HU值, 二者之间的差是本研究的关键基础。故文中使用密度填充技术将输尿管支架密度替换为尿液0 HU值, 基于两类CT序列进行计划设计并比较相关参数。研究结果(见图4和表1)提示: 支架组较无支架组提高靶区参数, 其中 $D_{98\%}$ 和 D_{mean} 差异有统计学意义; 支架组与无支架组靶区的CI分别为 0.88 ± 0.03 和 0.90 ± 0.03 , $t=3.24$, 差异有统计学意义, CI值越接近1靶区适形度越好, 故支架组CI更优; 而HI越接近0靶区均匀性越好, 两组HI分别为 0.05 ± 0.08 和 0.05 ± 0.01 , $t=2.00$, 差异无统计学意义, 这可能与样本量偏少有关, 也可能与本研究使用输尿管支架HU值偏低有关。支架组OARs受量较无支架组提高, 主要体现在高剂量区域, 其中小肠和输尿管差异具有统计学意义。说明高密度输尿管支架会对靶区及OARs产生剂量影响。

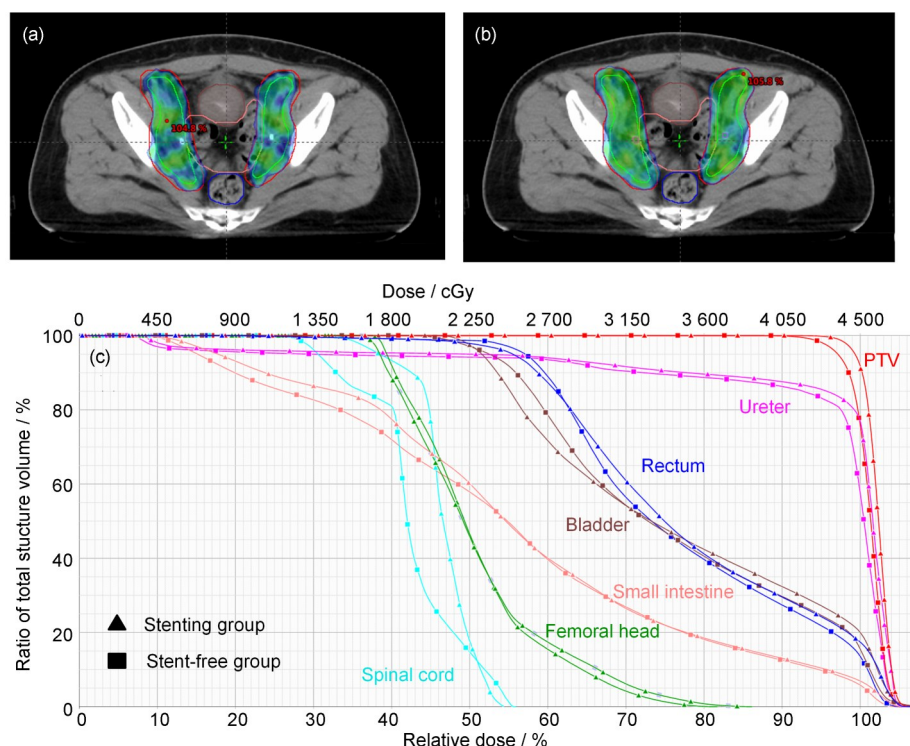


图4 两组计划剂量分布及DVH图: (a) 支架组计划; (b) 无支架组计划; (c) 两组计划DVH对比
Fig.4 Planned dose distribution and DVH diagram of the two groups: (a) stent-group plan; (b) stent-free group plan; (c) comparison of planned DVH between the two groups

表1 两组计划靶区和OARs参数
Table 1 Planned target areas and OARs parameters of the two groups

	评价参数 Parameters	支架组 Stenting group	无支架组 Stent-free group	贡献率 $R / \%$ Contribution ratio	t	p
靶区 Target	$D_{2\%} / \text{cGy}$	4 704.30±35.32	4 690.83±36.86	0.29±0.70	1.57	0.14
	$D_{98\%} / \text{cGy}$	4 427.71±44.89	4 397.27±42.02	0.70±0.90	2.99	0.01
	$D_{\text{mean}} / \text{cGy}$	4 607.87±38.68	4 580.59±27.68	0.60±0.69	3.35	0.01
小肠 Small intestine	$D_{\text{max}} / \text{cGy}$	4 746.10±64.70	4 725.69±59.57	0.43±0.73	2.28	0.04
	$V_{40\%} / \text{mL}$	98.36±53.41	96.13±52.65	3.67±5.80	2.75	0.02
	$D_{\text{mean}} / \text{cGy}$	2 147.03±446.82	2 131.72±448.72	0.79±1.10	2.49	0.03
直肠 Rectum	$V_{40\%} / \text{mL}$	29.35±11.06	29.18±11.17	0.79±3.65	0.57	0.58
膀胱 Bladder	$V_{40\%} / \text{mL}$	74.73±43.62	73.35±41.63	1.65±2.60	2.01	0.06
左股骨头 Left femoral head	$V_{30\%} / \text{mL}$	4.31±1.98	4.30±2.00	0.95±6.30	0.03	0.98
右股骨头 Right femoral head	$V_{30\%} / \text{mL}$	4.17±1.83	4.16±1.86	2.46±14.34	0.03	0.98
输尿管 Ureter	$D_{2\text{CC}} / \text{cGy}$	4 653.99±41.89	4 615.37±37.61	0.84±0.65	4.96	0.00
	$D_{1\text{CC}} / \text{cGy}$	4 676.60±39.36	4 641.54±36.76	0.76±0.61	4.78	0.00
	$D_{0.1\text{CC}} / \text{cGy}$	4 719.89±39.09	4 685.13±38.62	0.74±0.61	4.72	0.00
脊髓 Spinal cord	$D_{\text{max}} / \text{cGy}$	2 481.75±170.71	2 473.06±170.65	0.36±1.12	1.18	0.26

2.2 SciMoCa 验算剂量计算准确性

放射治疗关键是治疗计划系统计算剂量分布与实际剂量之间偏差达到最小。MC 算法是治疗计划剂量计算精确性的金标准,也能确定 X-射线射野的剂量分布特性^[16]。已有学者利用 MC 算法研究头颈部肿瘤,发现空腔和骨结构会影响 γ 通过率,表明低密度和高密度结构都会影响剂量计算准确

性^[17-18]。本文探讨输尿管支架的辐射安全性,需在剂量计算精确的基础上进行,故将支架组与无支架组 TPS 剂量计算分别导入 SciMoCa 进行验算。两组计划靶区、OARs 的 γ 通过率均高于 TG-218 号报告 95% 的推荐值^[12],满足临床要求(见表 2)。说明使用密度填充技术取代输尿管支架 HU 值这种方式能满足剂量计算准确性。

表2 SciMoCa 计算 Gamma 通过率
Table 2 SciMoCa calculated gamma pass rate

评价参数 Parameters	支架组 Stenting group	无支架组 Stent-free group
PTV	99.34±0.31	99.39±0.30
小肠 Small intestine	100.00±0.00	100.00±0.00
直肠 Rectum	99.71±0.42	99.75±0.35
膀胱 Bladder	99.88±0.36	99.96±0.15
左股骨头 Left femoral head	99.40±2.31	99.64±1.41
右股骨头 Right femoral head	99.40±2.33	99.64±1.38
输尿管 Ureter	96.82±3.80	99.97±0.09
脊髓 Spinal cord	99.92±0.19	99.98±0.07

2.3 输尿管支架剂量贡献率

根据 QUANTEC (2010 版) 文件协议,当 1/3 体积小肠受照时,TD5/5 预计值为 40 Gy,在制定临床常规分割放疗计划时,为控制 3 级以上急性消化道反应低于 10%,通常采纳小肠 $V_{45} \leq 195 \text{ mL}$ 。本研究中,支架组小肠 V_{40} 为 (98.36±53.41) mL,较无支架组仅提高 2 mL,危及器官受量越高体积越小,故小

肠 V_{45} 远小于 195 mL,且在随访过程中未发现 3 级以上小肠反应。输尿管狭窄是宫颈癌放疗后输尿管最常见的并发症^[19],既往研究输尿管 $D_{0.1 \text{ mL}}$ 受量 $\geq 77 \text{ Gy}$ 和 $< 77 \text{ Gy}$ 发生 3 级以上并发症概率分别为 28.6% 和 7.5%^[20]。本研究两组输尿管支架受量远小于 77 Gy 且相差小于 1 Gy,在随访过程中未发现 3 级以上泌尿系并发症。另一项研究包含 1 860 例表明初始治

疗状态肾盂积水是发生3~4级输尿管狭窄的独立预后因素^[21]。本研究所有患者在放疗前、后肾功能均在正常范围内同时无肾盂积水,可能与手术患者分期较早、初始状态无肾盂积水、放射剂量相对较低等因素有关。在我们研究中输尿管支架对靶区及OARs剂量贡献率<5%(表2),临床研究表明,±5%剂量变化才会引起无并发症肿瘤控制概率的显著改变。由此可见,输尿管支架对危及器官剂量贡献率较小,不足以引起临床疗效及并发症的改变^[22]。

3 结论

本文主要研究了放疗时安置输尿管支架的辐射安全性:(1)输尿管支架会对剂量计算产生一定干扰,导致整体 γ 通过率降低,但仍能满足临床计划要求;(2)输尿管支架会降低宫颈癌术后患者放疗靶区适形度,提高小肠、输尿管受量,但对靶区及OARs贡献率较低,不足以引起肿瘤控制率及并发症的改变,说明安置输尿管支架的宫颈癌患者行术后放疗相对安全。

作者贡献说明 何亚男提出研究思路,设计研究方案,进行数据分析和起草论文;申正文参与论文起草及参考文献分析;柳先锋、赵秀娟负责进行计划设计,数据采集和绘制图表;赵秀娟对论文进行最后审阅及定稿。所有作者均已阅读并同意最终文稿。

参考文献

- 1 中国抗癌协会妇科肿瘤专业委员会. 子宫颈癌诊断与治疗指南(2021年版)[J]. 中国癌症杂志, 2021, **31**(6): 474-489. DOI: 10.19401/j.cnki.1007-3639.2021.06.06. Professional Committee of Gynecologic Tumor of Chinese Anti-Cancer Association. Guidelines for diagnosis and treatment of cervical cancer (2021) [J]. China Oncology, 2021, **31**(6): 474-489. DOI: 10.19401/j.cnki.1007-3639.2021.06.06.
- 2 Hurd W W, Chee S S, Gallagher K L, *et al.* Location of the ureters in relation to the uterine cervix by computed tomography[J]. American Journal of Obstetrics and Gynecology, 2001, **184**(3): 336-339. DOI: 10.1067/mob.2001.110296.
- 3 孙华宾, 刘燕, 杨光伟, 等. 预置双J管对宫颈癌手术及放疗中输尿管的保护作用[J]. 中华腔镜泌尿外科杂志(电子版), 2011, **5**(4): 298-300. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-3253.2011.04.012.
- 4 SUN Huabin, LIU Yan, YANG Guangwei, *et al.* Prevention of ureteral injury in cervical cancer operation and radiotherapy by pre-setting double J stent[J]. Chinese Journal of Endourology (Electronic Edition), 2011, **5**(4): 298-300. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-3253.2011.04.012.
- 5 魏振杰, 郭丰桐, 高媛媛, 等. 输尿管导管在妇科腹腔镜手术中预防输尿管损伤的应用[J]. 中国卫生标准管理, 2015, **6**(33): 26-27. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9316.2015.33.014.
- 6 WEI Zhenjie, GUO Fengtong, GAO Yuanyuan, *et al.* Application of ureteral catheter in the prevention of ureteral injury under gynecologic laparoscopic surgery[J]. China Health Standard Management, 2015, **6**(33): 26-27. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9316.2015.33.014.
- 7 王勇, 孙彦泽, 赵培峰, 等. 调强放疗中金属植入物及伪影的消减技术[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, **38**(4): 040301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rrj.38.040301.
- 8 WANG Yong, SUN Yanze, ZHAO Peifeng, *et al.* Reduction in metal implants and artifacts in intensity modulated radiotherapy[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2020, **38**(4): 040301. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rrj.38.040301.
- 9 Chetty I J, Curran B, Cygler J E, *et al.* Report of the AAPM Task Group No. 105: issues associated with clinical implementation of Monte Carlo-based photon and electron external beam treatment planning[J]. Medical Physics, 2007, **34**(12): 4818-4853. DOI: 10.1118/1.2795842.
- 10 Ni X Y, Tang X B, Geng C R, *et al.* The prospect of carbon fiber implants in radiotherapy[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2012, **13**(4): 152-159. DOI: 10.1120/jacmp.v13i4.3821.
- 11 曾华驱, 温尊北, 陈宗友, 等. 不同射野方向和数目对宫颈癌术后静态调强放射治疗计划的剂量学比较研究[J]. 生物医学工程与临床, 2018, **22**(4): 439-443. DOI: 10.13339/j.cnki.sgcl.20180712.014.
- 12 ZENG Huaqu, WEN Zunbei, CHEN Zongyou, *et al.* Comparative study on static IMRT plan with different incident direction and beam number in postoperative patient with cervical carcinomas[J]. Biomedical Engineering and Clinical Medicine, 2018, **22**(4): 439-443. DOI: 10.13339/j.cnki.sgcl.20180712.014.
- 13 张健文, 杨金平, 何娅, 等. 金属节育环对局部进展期宫颈癌调强放疗影响的探讨[J]. 中华肿瘤防治杂志,

- 2016, **23**(1): 45-48. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-5269. 2016.01.010.
- ZHANG Jianwen, YANG Jinping, HE Ya, *et al.* Influence of intensity modulation radiated therapy from metal contraceptive ring for locally advanced cervix cancer[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2016, **23**(1): 45-48. DOI: 10.3969/j. issn. 1673-5269. 2016.01.010.
- 10 Hoffmann L, Alber M, Söhn M, *et al.* Validation of the Acuros XB dose calculation algorithm versus Monte Carlo for clinical treatment plans[J]. Medical Physics, 2018; **45**(8): 3909-3915. DOI: 10.1002/mp.13053.
- 11 Kawrakow I, Fippel M. Investigation of variance reduction techniques for Monte Carlo photon dose calculation using XVMC[J]. Physics in Medicine and Biology, 2000, **45**(8): 2163-2183. DOI: 10.1088/0031-9155/45/8/308.
- 12 Miften M, Olch A, Mihailidis D, *et al.* Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM Task Group No. 218[J]. Medical Physics, 2018, **45**(4): e53-e83. DOI: 10.1002/mp.12810.
- 13 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. DOI: 10.3969/j. issn. 1005-202X. 2019.01.005.
- LIU Juan, LI Shuangshuang, GAO Shanbao, *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. DOI: 10.3969/j. issn. 1005-202X. 2019.01.005.
- 14 蔡国鑫, 王学涛, 杨耕, 等. 医用加速器X-射线射野剂量分布的蒙特卡罗模拟与实验测量[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2015, **33**(2): 020202. DOI: 10.11889/j. 1000-3436. 2015. rrj. 33. 020202.
- CAI Guoxin, WANG Xuetao, YANG Geng, *et al.* Monte Carlo simulation and experimental measurement of X-ray fields' dose distribution for medical accelerator[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2015, **33**(2): 020202. DOI: 10.11889/j. 1000-3436. 2015. rrj. 33. 020202.
- 15 孔栋, 惠琳, 孔旭东, 等. 基于蒙特卡罗算法研究补偿膜下空腔的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2021, **39**(4): 040303. DOI: 10.11889/j. 1000-3436. 2021. rrj. 39. 040303.
- KONG Dong, HUI Lin, KONG Xudong, *et al.* Evaluation of the effects of cavity under bolus using the Monte Carlo algorithm[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2021, **39**(4): 040303. DOI: 10.11889/j. 1000-3436. 2021. rrj. 39. 040303.
- 16 Shen Z W, Tan X, Li S, *et al.* Correlation between the γ passing rates of IMRT plans and the volumes of air cavities and bony structures in head and neck cancer[J]. Radiation Oncology (London, England), 2021, **16**(1): 134. DOI: 10.1186/s13014-021-01861-y.
- 17 倪昕晔, 汤晓斌, 张志明, 等. 用蒙特卡罗方法模拟实验体内金属植入物对放疗剂量分布影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2011, **20**(5): 432-434. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1004-4221. 2011. 05. 020.
- NI Xinye, TANG Xiaobin, ZHANG Zhiming, *et al.* Impact of implanted metal plates on radiation dose distribution *in vivo* by Monte Carlo code[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2011, **20**(5): 432-434. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1004-4221. 2011. 05. 020.
- 18 刘明, 李兴德, 牛庆国, 等. 体内金属植入物对放疗剂量分布影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2010, **19**(5): 459-462. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1004-4221. 2010. 05. 024.
- LIU Ming, LI Xingde, NIU Qingguo, *et al.* Impact of implanted metal plates on radiation dose distribution *in vivo*[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2010, **19**(5): 459-462. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1004-4221. 2010. 05. 024.
- 19 Abboudi H, Ahmed K, Royle J, *et al.* Ureteric injury: a challenging condition to diagnose and manage[J]. Nature Reviews Urology, 2013, **10**(2): 108-115. DOI: 10.1038/nrurol.2012.254.
- 20 Rodríguez-López J L, Ling D C, Keller A, *et al.* Ureteral stenosis after 3D MRI-based brachytherapy for cervical cancer — Have we identified all the risk factors? [J]. Radiotherapy and Oncology, 2021, **155**: 86-92. DOI: 10.1016/j. radonc. 2020. 10. 010.
- 21 Fokdal L, Tanderup K, Pötter R, *et al.* Risk factors for ureteral stricture after radiochemotherapy including image guided adaptive brachytherapy in cervical cancer: results from the EMBRACE studies[J]. International Journal of Radiation Oncology*Biophysics*Physics, 2019, **103**(4): 887-894. DOI: 10.1016/j. ijrobp. 2018. 11. 006.
- 22 Shalek R J. Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or gamma rays in radiotherapy procedures[J]. Medical Physics, 1977, **4**(5): 461. DOI: 10.1118/1.594356.