

基于蒙特卡洛方法模拟不同膀胱充盈度对宫颈癌近距离放疗的影响

侯灵通¹, 汪志², 陈志¹, 徐榭¹

1. 中国科学技术大学核科学技术学院, 安徽 合肥 230025; 2. 安徽医科大学第一附属医院肿瘤放疗科, 安徽 合肥 230022

【摘要】目的:使用蒙特卡洛方法模拟宫颈癌的近距离放射治疗,探讨不同膀胱充盈度对宫颈癌近距离放射治疗剂量分布的影响。**方法:**使用MCNP5蒙特卡洛粒子输运软件包建立Nucletron-mHDR-V1¹⁹²Ir放射源模型,并放入由患者在不同膀胱充盈度时拍摄的CT图像转换得到的三维体素模型,模拟不同膀胱充盈度对宫颈癌近距离放疗的影响。其中处方剂量为60 Gy,按ICRU 38号报告推荐方法选取各参考点,采用单管施源器,放射源位置共分为18个步长,每个步长距离为5 mm。**结果:**参考点A点吸收剂量为60 Gy,膀胱充盈度为54 mL时:膀胱参考点的吸收剂量为30.21 Gy,直肠参考点的吸收剂量为49.05 Gy,股骨头参考点的吸收剂量为6.33 Gy(左)、6.39 Gy(右);膀胱充盈度为328 mL时:膀胱参考点的吸收剂量为33.59 Gy,直肠参考点的吸收剂量为50.19 Gy,股骨头参考点的吸收剂量为6.15 Gy(左)、6.12 Gy(右)。分析膀胱壁上各体素的吸收剂量,得到膀胱的剂量体积直方图,膀胱充盈度为54 mL时: $V_{10}=100\%$, $V_{20}=39.69\%$, $V_{30}=26.20\%$, $V_{40}=17.89\%$, $V_{50}=14.48\%$, $V_{60}=11.69\%$;膀胱充盈度为328 mL时: $V_{10}=86.07\%$, $V_{20}=26.53\%$, $V_{30}=15.58\%$, $V_{40}=9.44\%$, $V_{50}=6.01\%$, $V_{60}=3.72\%$ 。**结论:**膀胱充盈度为328 mL相对于膀胱充盈度为54 mL时,直肠、股骨头参考点的吸收剂量没有显著变化,虽然膀胱参考点的吸收剂量有所增加(3.38 Gy),但在剂量体积直方图中所有剂量点处,膀胱的受照体积均有比较明显的减少(剂量为20 Gy时受照体积减少13.16%,剂量为40 Gy时受照体积减少8.45%,剂量为60 Gy时受照体积减少7.97%),模拟结果对临床宫颈癌的放射治疗有一定指导意义。

【关键词】宫颈癌;近距离放疗;膀胱充盈度;蒙特卡洛方法;体素模型

【中图分类号】R730.55;R815

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)11-1096-06

Effects of different degrees of bladder filling on brachytherapy for cervical cancer based on Monte Carlo simulation

HOU Lingtong¹, WANG Zhi², CHEN Zhi¹, XU Xie¹

1. College of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230025, China; 2. Department of Radiation Oncology, the First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230022, China

Abstract: Objective To investigate the effects of different degrees of bladder filling on the dose distribution in brachytherapy for cervical cancer based on Monte Carlo simulation. **Methods** A Nucletron-mHDR-V1 ¹⁹²Ir radioactive source model was established with MCNP5 Monte Carlo particle transport software package, and then placed into a three-dimensional voxel model obtained from the conversion of CT images taken from a patient when he had different degrees of bladder filling. The prescription dose of brachytherapy was 60 Gy, and the reference points were selected according to ICRU 38 report. The single tube source device was used. The location of the radioactive source was divided into 18 steps and the distance of each step was 5 mm. **Results** The absorbed dose to reference point A was 60 Gy when the bladder filling was 54 mL or 328 mL. The absorbed doses to the reference points of the bladder and rectal were 30.21 Gy and 49.05 Gy at the bladder filling of 54 mL, and 33.59 Gy and 50.19 Gy at 328 mL; the absorbed doses to femoral head were found to be 6.33 Gy (left) and 6.39 Gy (right) at 54 mL, and 6.15 Gy (left) and 6.12 Gy (right) at 328 mL. The dose volume histogram of the bladder was obtained based on the absorbed doses in the voxels of bladder wall. When the bladder filling was 54 mL, V_{10} , V_{20} , V_{30} , V_{40} , V_{50} , V_{60} were 100%, 39.69%, 26.20%, 17.89%, 14.48%, 11.69%, respectively; when the bladder filling was 328 mL, V_{10} , V_{20} , V_{30} , V_{40} , V_{50} , V_{60} were 86.07%, 26.53%, 15.58%, 9.44%, 6.01%, 3.72%, respectively. **Conclusion** No significant differences were found in the absorbed dose to the reference points

【收稿日期】2017-07-14

【基金项目】国家重点研发计划(2017YFC0107500)

【作者简介】侯灵通, 硕士研究生, 主要从事医学物理研究, E-mail: houl@ustc.edu.cn

【通信作者】徐榭, 教授(千人计划), 主要从事蒙特卡洛计算方法在核科学技术(包括医学物理)的应用研究, E-mail: xgxu@ustc.edu.cn

of the rectal and the femoral head between the bladder filling of 328 mL and that of 54 mL. Although the absorbed dose to the reference point of the bladder increased (3.38 Gy) at the bladder filling of 328 mL as comparison with 54 mL, the irradiated volume of the bladder was significantly reduced (the irradiated volume reduced by 13.16% when the dose was 20 Gy, 8.45% when the dose was 40 Gy, 7.97% when the dose was 60 Gy). The simulated results in this study provide some guidance for the brachytherapy of cervical cancer.

Keywords: cervical cancer; brachytherapy; degree of bladder filling; Monte Carlo method; voxel model

前言

宫颈癌是女性生殖系统最常见的恶性肿瘤之一^[1],全世界每年新增患者530 000例,死亡275 000例,其中85%发生在发展中国家^[2]。近距离放射治疗是宫颈癌治疗的重要方法^[3-4],但女性的盆腔解剖结构复杂,在保证局部肿瘤剂量的情况下,子宫周围重要组织器官也会受到部分剂量,由此引起的放射性膀胱炎、放射性直肠炎等并发症严重影响着患者的生活质量。杨乐伟等^[5]总结了在中山大学附属第五医院进行放射治疗的1 496例宫颈癌患者,放射性直肠炎发病率为10.50%,放射性膀胱炎发病率为6.48%;Lee等^[6]总结了多中心资料得出宫颈癌患者放疗后较严重的放射性直肠及膀胱并发症发生率为5%~30%。目前国内关于宫颈癌近距离放射治疗的研究主要是基于医院的放射治疗计划系统,尚无开展基于蒙特卡洛方法的工作,而众所周知蒙特卡洛方法是一种以概率统计理论为指导的非常重要的数值计算方法,被认为是放疗剂量计算的黄金标准^[7]。本文使用蒙特卡洛方法和由患者在不同膀胱充盈度时拍摄的CT图像转换得到的三维体素模型模拟不同膀胱充盈度下宫颈癌的近距离放射治疗,比较两种状况下各参考点的吸收剂量和危及器官膀胱的剂量体积直方图(Dose Volume Histogram, DVH),以期为宫颈癌患者的近距离放射治疗提供依据。

1 材料与方法

1.1 Nucletron-mHDR-V1 ¹⁹²Ir放射源

高剂量率(High Dose Rate, HDR)近距离放射治疗是近年来发展起来的新技术,与传统的后装技术比,其最大优点是放射源的微型化,管状或针状的施源器都很细,造成的损伤小,布源更加简便,又因放射源活性高,可大大缩短放射治疗时间。通过微机设计放射治疗计划,可提供优化的放射治疗方案供医师选择,减少了医务人员带源操作所带来的不必要照射,而病人可得到部位准确、剂量可靠的放射治疗^[8]。

目前,¹⁹²Ir是临床HDR近距离放射治疗最常用的

放射源^[9-10]。HDR ¹⁹²Ir放射源的生产厂家和类型有很多,使用普遍的有new Varian、Nucletron、Flexisource等¹⁹²Ir放射源。本研究使用的是由核通公司研发的一款经典Nucletron-mHDR-V1¹⁹²Ir放射源^[11],其材料组成和详细尺寸如图1所示,放射源活性区域为一个长度为3.5 mm、直径为0.6 mm的圆柱体,纯¹⁹²Ir(密度为22.42 g·cm⁻³)材料在其内部均匀分布。放射源外部封装材料为AISI 316L型不锈钢,封装壳直径为1.1 mm,前端是一个曲率为0.55 mm的半球,末端是AISI 316L不锈钢焊接材料焊接到不锈钢缆线上^[12]。

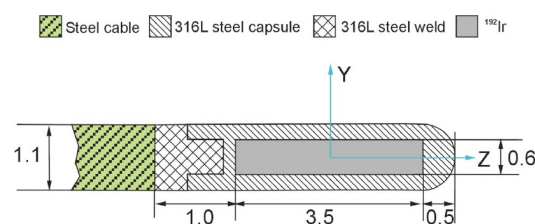


图1 Nucletron-mHDR-V1 ¹⁹²Ir放射源的材料和尺寸(mm)
Fig.1 Materials and dimensions (mm) of Nucletron-mHDR-V1 ¹⁹²Ir radioactive source model

1.2 CT图像转换三维体素模型

为了使蒙特卡洛模拟过程更加逼近于一个真实的宫颈癌患者接受近距离放射治疗的情形,本文使用由患者在不同膀胱充盈度时拍摄的CT图像转换得到的三维体素模型^[13]代替成年女性宫颈癌患者,见图2。

蒙特卡洛计算时需要知道物质的密度和材料信息以确定反应截面等物理参数。在一份存储CT图像的DICOM文件中,唯一能获得信息的只有CT值(HU)。本文使用由Schneider等^[14]提出的“Schneider方法”将CT值转换成对应的物质密度。在这种方法中,首先计算了71种人体组织的CT值,并把全部的CT值划分为4个部分进行分析。在每个部分中,用所选的组织的密度和材料成分进行插值计算。为此,使用的每种材料只由两种元素组成,进而推导出CT值与组织参数的函数关系。与传统的数据拟合相比,使用这种插值函数的方法不会有精度损失。其

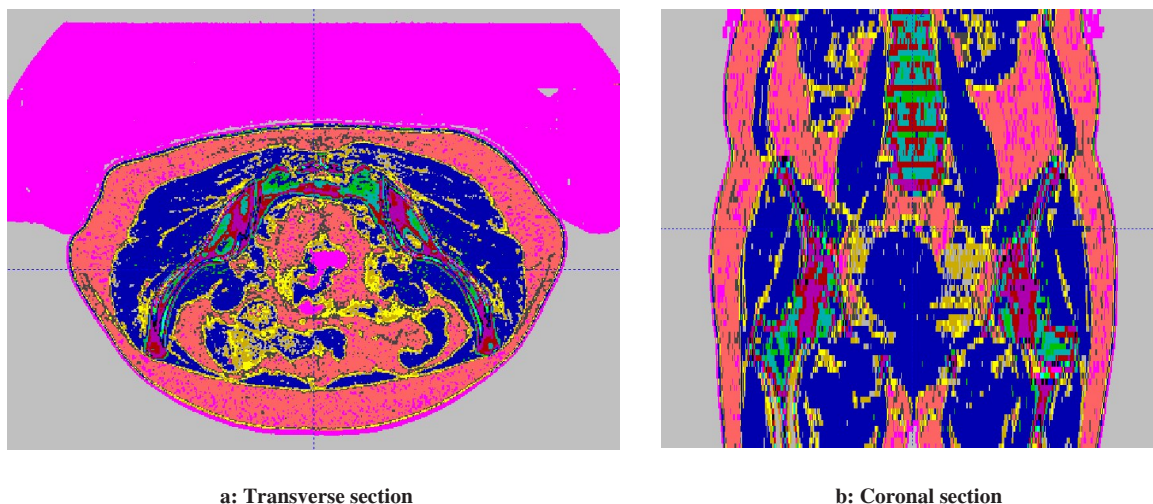


图2 三维体素模型剖面图

Fig.2 Profiles of three-dimensional voxel model

物质密度的计算方法如下:

$$\rho = \begin{cases} (1.017 + 0.592 \times 10^{-3}H) \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}, & -22 \leq \text{HU} \leq 1524 \\ (1.018 + 0.893 \times 10^{-3}H) \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}, & -98 \leq \text{HU} \leq 14 \\ (1.003 + 1.169 \times 10^{-3}H) \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}, & 23 \leq \text{HU} \leq 100 \end{cases}$$

根据此方法划分,当CT值低于-950时,认为材料是空气;CT值在-950至-120之间的为肺;CT值在-120至120之间的为软组织;CT值在120以上的则被视为骨头。所有区间段的CT值所对应的物质材料信息如表1所示^[14]。其中空气和肺只划分了1组,软组织和骨头分别划分了7组和15组。

1.3 蒙特卡洛模拟

MCNP5 (Monte Carlo N Particle Transport Code) 是由美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (Los Alamos National Laboratory) 开发的基于蒙特卡洛方法的用于计算三维复杂几何结构中的中子、光子、电子或者耦合中子/光子/电子输运问题的通用软件包^[15]。本文使用 MCNP5 (1.60 版) 软件包建立了 Nucletron-mHDR-V1¹⁹²Ir 放射源模型,在此模型中所有的不锈钢材料部分均使用密度为 $8.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 AISI 304 不锈钢(质量分数为 2%Mn, 1%Si, 19%Cr, 10%Ni 和 68%Fe)代替,缆线部分长度取 3 mm,之前的研究表明这样的近似是合理的^[16]。¹⁹²Ir 核素可以发射出 β 粒子和 γ 射线,而此放射源模型有不锈钢材料包壳可以屏蔽绝大部分的 β 粒子,故在模拟中只考虑 γ 射线,本文使用 Glasgow 等^[17]发表的 ¹⁹²Ir 核素能谱,如表 2 所示。模拟过程采用单管施源,放射源位置共分为 18 个步长,每个步长距离为 5 mm,每次模拟使用 8×10^7 个粒子,以使得到的所有吸收剂量值误差均在 3% 以内。

2 结果

2.1 放射源的验证

为验证所使用的 Nucletron-mHDR-V1¹⁹²Ir 放射源模型的真实有效性,使用 MCNP5 软件对其进行了验证。具体方法为:将放射源沿 y 轴方向水平放置于一个直径为 30 cm 的水球中,水球中心与放射源中心重合于原点。在 xz 面上设置不同的径向长度,每个径向长度上分别取位于坐标轴上的 4 个点为剂量模拟计算点,取这 4 个点的吸收剂量的平均值作为此径向长度的吸收剂量值。根据 APPM TG43U1^[18]推荐的线源计算公式,将 $r=1 \text{ cm}$ 作为参考点 r_0 ,得到各个距离的径向剂量函数 $g_L(r)$,并与 Karaikos 等^[19]之前得到的数据进行了对比,对比结果详见图 3。当径向距离 $r < 4.5 \text{ cm}$ 时,它们之间的偏差均在 2% 以内,最大偏差出现在 $r=14 \text{ cm}$ 处,也仅为 4.4%,其他距离的偏差均在 3% 以内。

2.2 不同膀胱充盈度时治疗数据对比

表 3 详细列出了膀胱充盈度分别为 54 和 328 mL 时宫颈癌近距离治疗各参考点的吸收剂量。通过对比可以看出,参考点 A 的吸收剂量为 60 Gy,膀胱充盈状态为 54 mL 相较于膀胱充盈状态为 328 mL,膀胱参考点的吸收剂量有所减少(膀胱充盈状态 54 mL 时,膀胱参考点吸收剂量占 A 点吸收剂量为 50.35%;膀胱充盈状态 328 mL 时,膀胱参考点吸收剂量占 A 点吸收剂量为 55.98%),而直肠参考点、股骨头参考点的吸收剂量没有显著变化。

图 4 是通过分析蒙特卡洛模拟结果中膀胱各体素的吸收剂量,计算得到的在膀胱不同充盈度时膀胱的 DVH 图。通过图 4 可以明显地看到,膀胱充盈度为 328 mL 时的 DVH 曲线均在膀胱充盈度为 54 mL 时 DVH 曲线的底部(膀胱充盈度为 328 mL 时的

表1 CT值与物质材料对应表

Tab.1 Conversion of CT value to elemental weights

HU	No. of materials	Elemental weights in percentage points/%											
		H	C	N	O	Na	Mg	P	S	Cl	Ar	K	Ca
(-∞,-950)	1	-	-	75.5	23.2	-	-	-	-	-	1.3	-	-
[-950,-120)	2	10.3	10.5	3.1	74.9	0.2	-	0.2	0.3	0.3	-	0.2	-
[-120,-83)	3	11.6	68.1	0.2	19.8	0.1	-	-	0.1	0.1	-	-	-
[-83,-53)	4	11.3	56.7	0.9	30.8	0.1	-	-	0.1	0.1	-	-	-
[-53,-23)	5	11.0	45.8	1.5	41.1	0.1	-	0.1	0.2	0.2	-	-	-
[-23,7)	6	10.8	35.6	2.2	50.9	-	-	0.1	0.2	0.2	-	-	-
[7,18)	7	10.6	28.4	2.6	57.8	-	-	0.1	0.2	0.2	-	0.1	-
[18,80)	8	10.3	13.4	3.0	72.3	0.2	-	0.2	0.2	0.2	-	0.2	-
[80,120)	9	9.4	20.7	6.2	62.2	0.6	-	-	0.6	0.3	-	-	-
[120,200)	10	9.5	45.5	2.5	35.5	0.1	-	2.1	0.1	0.1	-	0.1	4.5
[200,300)	11	8.9	42.3	2.7	36.3	0.1	-	3.0	0.1	0.1	-	0.1	6.4
[300,400)	12	8.2	39.1	2.9	37.2	0.1	-	3.9	0.1	0.1	-	0.1	8.3
[400,500)	13	7.6	36.1	3.0	38.0	0.1	0.1	4.7	0.2	0.1	-	-	10.1
[500,600)	14	7.1	33.5	3.2	38.7	0.1	0.1	5.4	0.2	-	-	-	11.7
[600,700)	15	6.6	31.0	3.3	39.4	0.1	0.1	6.1	0.2	-	-	-	13.2
[700,800)	16	6.1	28.7	3.5	40.0	0.1	0.1	6.7	0.2	-	-	-	14.6
[800,900)	17	5.6	26.5	3.6	40.5	0.1	0.2	7.3	0.3	-	-	-	15.9
[900,1 000)	18	5.2	24.6	3.7	41.1	0.1	0.2	7.8	0.3	-	-	-	17.0
[1 000,1 100)	19	4.9	22.7	3.8	41.6	0.1	0.2	8.3	0.3	-	-	-	18.1
[1 100,1 200)	20	4.5	21.0	3.9	42.0	0.1	0.2	8.8	0.3	-	-	-	19.2
[1 200,1 300)	21	4.2	19.4	4.0	42.5	0.1	0.2	9.2	0.3	-	-	-	20.1
[1 300,1 400)	22	3.9	17.9	4.1	42.9	0.1	0.2	9.6	0.3	-	-	-	21.0
[1 400,1 500)	23	3.6	16.5	4.2	43.2	0.1	0.2	10.0	0.3	-	-	-	21.9
[1 500,+∞)	24	3.4	15.5	4.2	43.5	0.1	0.2	10.3	0.3	-	-	-	22.5

剂量体积参数: $V_{10}=86.07\%$, $V_{20}=26.53\%$, $V_{30}=15.58\%$, $V_{40}=9.44\%$, $V_{50}=6.01\%$, $V_{60}=3.72\%$;膀胱充盈度为 54 mL 时的剂量体积参数: $V_{10}=100\%$, $V_{20}=39.69\%$, $V_{30}=26.20\%$, $V_{40}=17.89\%$, $V_{50}=14.48\%$, $V_{60}=11.69\%$,即在所有剂量处,膀胱在其充盈度为 328 mL 时相较于充盈度为 54 mL,受照体积有明显的减少(剂量为 20 Gy 时受照体积减少 13.16%,剂量为 40 Gy 时受照体积减少 8.45%,剂量为 60 Gy 时受照体积减少 7.97%)。

3 结论

本文使用蒙特卡洛方法和三维体素模型,研究

不同膀胱充盈度对宫颈癌近距离放射治疗剂量分布的影响。文中使用蒙特卡洛软件包 MCNP5 建立 Nucletron-mHDR-V1¹⁹²Ir 放射源模型,并放入由患者在不同膀胱充盈度时拍摄的 CT 图像转换得到的三维体素模型,分别模拟了膀胱充盈度为 54 mL 和 328 mL 时宫颈癌患者的近距离放射治疗。本文得出的结果显示,膀胱充盈度为 54 mL 相较于膀胱充盈度为 328 mL 时,膀胱参考点的吸收剂量有所减少,直肠参考点、股骨头参考点的吸收剂量没有显著变化。这是由于膀胱在较大充盈状态时受到的重力会增大,从而有向下移动的趋势,膀胱参考点也随之向下移动,与放射源的距离变小,其吸收剂量便会随之增

表2 ¹⁹²Ir放射源γ能谱
Tab.2 Specific gamma-ray constant for the ¹⁹²Ir radioactive source

Percent per decay	Energy/MeV	Percent per decay	Energy/MeV
1.15E-01	1.10E-01	2.90E+01	2.96E-01
4.66E-01	2.01E-01	2.97E+01	3.08E-01
3.29E+00	2.06E-01	8.28E+01	3.17E-01
4.14E-02	2.15E-01	6.62E-01	4.16E-01
2.61E-01	2.83E-01	4.78E+01	4.68E-01
7.46E-02	3.15E-01	2.90E-03	4.77E-01
1.57E-02	3.29E-01	4.52E+00	5.89E-01
7.29E-01	3.74E-01	3.73E-02	5.93E-01
1.46E-01	4.15E-01	8.18E+00	6.04E-01
5.80E-02	4.21E-01	5.33E+00	6.12E-01
3.16E+00	4.85E-01	3.02E-01	8.85E-01
3.97E-01	4.89E-01	5.55E-02	1.06E+00
5.80E-03	7.04E-01	1.66E-03	1.09E+00
1.81E-01	1.36E-01	1.24E-03	1.38E+00

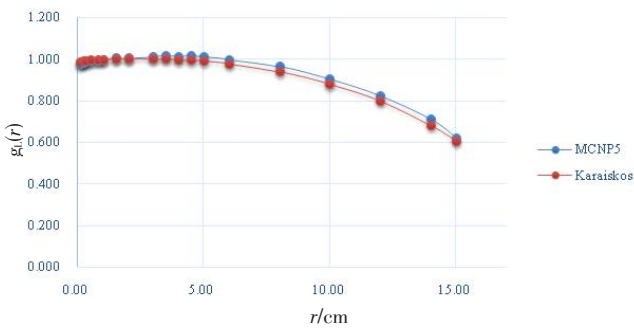


图3 径向剂量函数 $g_r(r)$
Fig.3 Radial dose function $g_r(r)$

表3 不同膀胱充盈度时各参考点吸收剂量(Gy)
Tab.3 Absorbed doses to the reference points at different degrees of bladder filling (Gy)

Reference points	Degrees of bladder filling	
	54 mL	328 mL
Bladder	30.21	33.59
Rectum	49.05	50.19
Femoral head-left	6.33	6.15
Femoral head-right	6.39	6.12
Point A	60.00	60.00

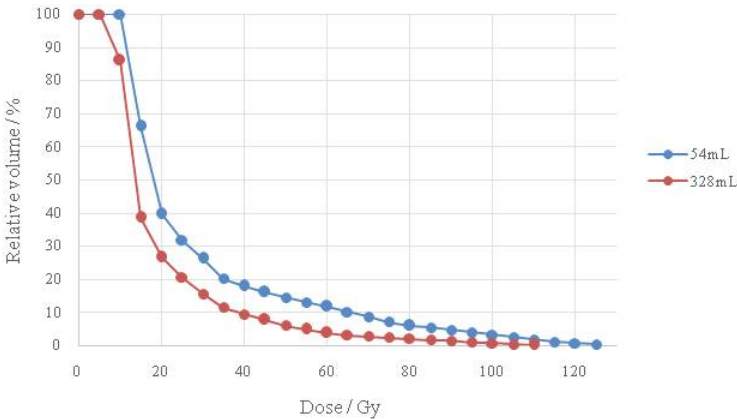


图4 不同膀胱充盈度时膀胱的剂量体积直方图
Fig.4 Dose-volume histogram of bladder at different degrees of bladder filling

加;直肠、股骨头几乎不会受到膀胱充盈变化带来的影响,所以其所受剂量自然未有显著变化。同时本

文还发现,在所有剂量处,膀胱充盈度为 328 mL 的 DVH 曲线均在膀胱充盈度为 54 mL 的 DVH 曲线底

部,这个结果与之前的研究发现是一致的^[20-21],说明当膀胱充盈度较高时,由于受内部尿液的挤压,膀胱壁有向外移动的趋势,从而使其与放射源的距离增大,这使得膀胱受到高剂量照射的体积和风险大大降低。

本研究表明在宫颈癌的近距离放射治疗中,解剖位置靠近子宫的器官或组织如膀胱和直肠等需要特别注意,必要的时候可以采取适当的方法以减少这些器官或组织受到的辐射损伤。同时,在宫颈癌的近距离放射治疗中,放射性直肠炎和放射性膀胱炎等并发症的发生率随着这些器官吸收剂量的增加而升高,从本文的研究结果可以发现,在实际治疗过程中可以让病人在放射治疗前0.5 h饮用250~500 mL水,使其在治疗过程中膀胱有较大的充盈度,从而可以尽量减少膀胱受照体积,降低病人放射性膀胱炎的发病率,提高病人的生活质量。

【参考文献】

- [1] 黄曼妮, 安菊生, 杜霄勤. 宫颈癌放射治疗的研究进展[J]. 中华妇幼临床医学杂志(电子版), 2016(1): 7-15.
HUANG M N, AN J S, DU X M. Research progress of radiotherapy for cervical cancer[J]. Chinese Journal of Obstetrics & Gynecology and Pediatrics (Electronic Edition), 2016(1): 7-15.
- [2] JEMAL A, BRAY F, CENTER M M, et al. Global cancer statistics[J]. CA: Cancer J Clin, 2011, 61(2): 69-90.
- [3] 李敏, 李工, 孔仪琳, 等. 宫颈癌三维后装中膀胱体积对剂量分布影响的研究[J]. 临床军医杂志, 2015(6): 571-573.
LI M, LI G, KONG Y L, et al. The influence of bladder volume for dose distribution in 3D afterloading therapy of cervical carcinoma[J]. Clinical Journal of Medical Officer, 2015(6): 571-573.
- [4] 汤继英, 陈萍. 宫颈癌三维后装治疗的研究进展[J]. 现代中西医结合杂志, 2015, 24(23): 2617-2620.
TANG J Y, CHEN P. Research progress in 3D brachytherapy of cervical carcinoma[J]. Modern Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, 2015, 24(23): 2617-2620.
- [5] 杨乐伟, 陈上求, 陈嘉洛. 1 496例宫颈癌放疗患者放射性直肠炎及膀胱炎发生率的分析[J]. 实用临床医学, 2014, 15(5): 73-74.
YANG L W, CHEN S Q, CHEN J L. Analysis of incidence of radiation proctitis and cystitis in 1 496 patients with cervical cancer[J]. Practical Clinical Medicine, 2014, 15(5): 73-74.
- [6] LEE K C, KIM T H, CHOI J H, et al. Use of the rectal retractor to reduce the rectal dose in high dose rate intracavitary brachytherapy for a carcinoma of the uterine cervix[J]. Yonsei Med J, 2004, 45(1): 113-122.
- [7] 霍万里, 吴爱东, 陈志, 等. APBI治疗过程中身体主要器官吸收剂量的蒙特卡洛模拟[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(2): 183-186.
HUO W L, WU A D, CHEN Z, et al. Absorbed dose research of main organs in APBI therapy by Monte Carlo simulation[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2015, 32(2): 183-186.
- [8] 张梦龙, 刘晓华, 张良安. 高剂量率近距离放射治疗剂量学研究进展[J]. 医学影像学杂志, 2008, 18(8): 955-958.
ZHANG M L, LIU X H, ZHANG L A. Advances of dosimetry research in high-dose-rate brachytherapy[J]. Journal of Medical Imaging, 2008, 18(8): 955-958.
- [9] LESSARD E, POULIOT J. Inverse planning anatomy-based dose optimization for HDR-brachytherapy of the prostate using fast simulated annealing algorithm and dedicated objective function[J]. Med Phys, 2001, 28(5): 773-779.
- [10] GRANERO D, PÉREZCALATAYUD J, CASAL E, et al. A dosimetric study on the ¹⁹²Ir high dose rate flexisource[J]. Med Phys, 2006, 33(12): 4578-4582.
- [11] PEREZCALATAYUD J, BALLESTER F, DAS R K, et al. Dose calculation for photon-emitting brachytherapy sources with average energy higher than 50 keV: report of the AAPM and ESTRO[J]. Med Phys, 2012, 39(5): 2904-2929.
- [12] WILLIAMSON J F. Comparison of measured and calculated dose rates in water near ¹²⁵I and ¹⁹²Ir seeds[J]. Med Phys, 1991, 18(4): 776-786.
- [13] ZHANG J, YONG H N, CARACAPPA P F, et al. RPI-AM and RPI-AF, a pair of mesh-based, size-adjustable adult male and female computational phantoms using ICRP-89 parameters and their calculations for organ doses from monoenergetic photon beams[J]. Phys Med Biol, 2009, 54(19): 5885-5908.
- [14] SCHNEIDER W, BORTFELD T, SCHLEGEL W. Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions[J]. Phys Med Biol, 2000, 45(2): 459.
- [15] BRIESMEISTER J F. MCNP - A general Monte Carlo N-particle transport code[M]. Los Alamos National Laboratory, 1993.
- [16] WILLIAMSON J F, LI Z. Monte Carlo aided dosimetry of the microselectron pulsed and high dose-rate ¹⁹²Ir sources[J]. Med Phys, 1995, 22(6): 809-819.
- [17] GLASGOW G P, DILLMAN L T. Specific γ -ray constant and exposure rate constant of ¹⁹²Ir[J]. Med Phys, 1979, 6(1): 49-52.
- [18] RIVARD M J, COURSEY B M, DEWERD L A, et al. Update of AAPM Task Group No. 43 report: a revised AAPM protocol for brachytherapy dose calculations[J]. Med Phys, 2004, 31(3): 633-674.
- [19] KARAIKOS P, ANGELOPOULOS A, SAKELLIU L, et al. Monte Carlo and TLD dosimetry of an ¹⁹²Ir high dose-rate brachytherapy source[J]. Med Phys, 1998, 25(10): 1975-1984.
- [20] 鲁文力, 李英, 姜庆丰, 等. 宫颈癌三维后装放射治疗计划中剂量归一基于参考点和参考体积的剂量学参数比较[J]. 肿瘤, 2016, 36(3): 340-344.
LU W L, LI Y, JIANG Q F, et al. Comparison of dosimetry parameters for dose normalized based on reference point and reference volume in three-dimensional intracavitary brachytherapy of cervical cancer[J]. Tumor, 2016, 36(3): 340-344.
- [21] JU S G, HUH S J, SHIN J S, et al. Different effects of bladder distention on point A-based and 3D-conformal intracavitary brachytherapy planning for cervical cancer[J]. J Radiat Res, 2013, 54(2): 349-356.

(编辑:薛泽玲)