

不同剂量计算算法在晚期宫颈癌调强放疗计划中的比较

周云泷

(江油市第二人民医院放疗科,四川 江油 621702)

摘要:目的 比较 CMS XIO 4.8 计划系统中 3 种剂量计算算法在晚期宫颈癌调强放疗计划的剂量学差异。方法 选择江油市第二人民医院 2018 年 1 月-2020 年 12 月接受放射治疗的 25 例晚期宫颈癌患者的调强放疗计划,均为系统默认的 S 算法,在射野方向、权重等设置条件不改变前提下,改用 FS 算法、卷积 C 算法进行重新计算。比较 3 种不同剂量计算算法计划的靶区和危及器官的剂量学参数、 γ 通过率、计划时间、治疗时间、机器跳数。结果 3 种不同剂量计算算法靶区评估参数、危及器官评估参数比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。卷积 C 算法的计划计算时间短于 S 算法,差异有统计学意义($P<0.05$)。3 种不同剂量计算算法的单野和合成野 γ 通过率均在 95%以上,组间比较,差异无统计学意义($P>0.05$)。结论 3 种不同剂量计算算法的靶区和危及器官剂量学参数和剂量验证无差异,但卷积 C 算法运算速度较 S 算法更快。因此,推荐卷积 C 算法在剂量精度没有显著变化的前提下,能够节约计划计算时间。

关键词:调强放疗计划;叠加算法;快速叠加算法;卷积算法

中图分类号:R737.33

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1006-1959.2023.02.016

文章编号:1006-1959(2023)02-0080-05

Comparison of Different Dose Calculation Algorithms in Intensity-Modulated Radiotherapy Plans for Advanced Cervical Cancer

ZHOU Yun-long

(Department of Radiation Oncology, Jiangyou Second People's Hospital, Jiangyou 621702, Sichuan, China)

Abstract: **Objective** To compare the dosimetric differences of three dose calculation algorithms in CMS XIO 4.8 treatment planning system for advanced cervical cancer. **Methods** The intensity-modulated radiotherapy plan of 25 patients with advanced cervical cancer who received radiotherapy from January 2018 to December 2020 in Jiangyou Second People's Hospital was selected. All of them were the default S algorithm of the system. Under the premise that the setting conditions such as field direction and weight did not change, FS algorithm and convolution C algorithm were used for recalculation. The dosimetric parameters, γ pass rate, planning time, treatment time and machine hops of the target area and organs at risk planned by three different dose calculation algorithms were compared. **Results** There was no significant difference in target area evaluation parameters and organ at risk evaluation parameters among the three different dose calculation algorithms ($P>0.05$). The planning calculation time of the convolution C algorithm was shorter than that of the S algorithm, and the difference was statistically significant ($P<0.05$). The γ passing rates of single field and synthetic field of the three different dose calculation algorithms were all above 95%, and there was no significant difference among the three different dose calculation algorithms ($P>0.05$). **Conclusion** Because the dosimetry parameters and dose verification of all target areas and organs at risk of the three algorithms are not statistically different, the calculation speed of the convolution C algorithm is faster than that of the S algorithm. Therefore, the recommended convolution C algorithm can save the planning calculation time under the premise that the dose accuracy does not change significantly.

Key words: IMRT plan; Superpositional algorithm; Fast superposition algorithm; Convolution algorithm

宫颈癌(cervical cancer)是全世界范围内女性发病率和死亡率均排第4位的恶性肿瘤^[1],在我国,宫颈癌是第2大女性特有的恶性肿瘤^[2,3]。放射治疗是晚期宫颈癌治疗的重要方式之一,特别是调强放疗(intensity modulated radiation therapy, IMRT),其技术已经被广泛应用于各类型肿瘤的治疗。利用

放疗计划系统(treatment planning system, TPS)设计调强放疗计划是 IMRT 技术的重要环节。TPS 由于计算算法不同,计算原理也存在差异,而算法准确度也会直接影响患者的具体剂量、受量^[4,5]。在 CMS XIO 4.8 计划系统中有 3 种不同算法,分别为叠加 S 算法(superposition)、快速叠加 FS 算法(fast-superposition, FS)和卷积 C 算法(convolution)。其中, S 算法可以修改能量沉积内核以解决电子密度变化的问题,它不但考虑计算点所在平面内不均匀组织厚度因子,还考虑相邻层面均匀组织散射对该点的剂量

作者简介:周云泷(1989.12-),男,重庆人,硕士,工程师,主要从事放射肿瘤物理学研究

影响,这使得其计算非均匀组织及交界面剂量时精度较 C 算法要高,但计算速度较慢^[6,7]。FS 算法能用比叠加 S 算法更少的追踪射线来提高计算速度,但由于出束射线减少,导致计算精度会有所降低^[8,9]。卷积 C 算法中剂量分布是从单位质量释放的总能量中卷积的,通过在频域中计算剂量同时假定内核随位置不变而提高了计算速度,在非均匀组织中只考虑沿射线方向上不均匀组织厚度因子,未考虑计算点周围散射线影响,这可能导致剂量计算不准确^[5,10]。目前关于这 3 种剂量计算算法在晚期宫颈癌 IMRT 计划设计中的剂量学差异研究相对较少。为此,本研究选择我院收治的晚期宫颈癌患者的 IMRT 计划,比较 3 种算法在靶区剂量分布、危及器官受量、治疗时间、计划计算时间、机器跳数的差异,并对 3 种剂量计算算法进行剂量验证,为宫颈癌 IMRT 计划设计提供理论参考,也为以后更加先进的计划系统进行剂量计算算法比较积累经验。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取江油市第二人民医院 2018 年 1 月–2020 年 12 月接受放射治疗的 25 例晚期宫颈癌患者,年龄 35~74 岁,中位年龄 50 岁。纳入标准:符合宫颈癌诊断标准;病理类型均为鳞癌。排除标准:合并肝、肾等严重疾病者;临床资料不完善。本研究中所有患者知情同意并签署知情同意书。

1.2 体位固定与 CT 定位 所有患者均采用仰卧位,双手臂交叉放于额前,热塑体膜固定体位,平静呼吸下行层厚 5 mm 螺旋 CT 增强扫描,将扫描后的 CT 图像传输至 CMS XIO 4.8 放射治疗计划系统中。

1.3 靶区勾画 根据国际辐射学单位委员会(International Commission Radiological Units)ICRU50 号和 63 号报告原则^[11],由临床医生在医生工作站(Focal)上勾画肿瘤靶区(PTV)和直肠、膀胱、小肠、左右股骨头等正常组织。所有患者靶区均由中级职称以上的放疗医师逐层勾画,再由正高职称的科室主任签字确认。

1.4 计划设计 在 CMS XIO 4.8 计划系统中设计 IMRT 计划,所有计划先设置剂量计算算法,然后直接用静态调强(Step-Shoot)方式进行优化生成调强放射治疗计划(S-IMRT),之后继续进行子野权重优化(segment weight optimization,SWO)生成新的治疗

计划(SWO-IMRT),然后用医科达 Precise 加速器 6 MV 的 X 射线进行治疗,MLC 叶片厚度为 1 cm。所有计划都采用 9 野均分技术,射野角度分别为 220°、260°、300°、340°、20°、60°、100°、140°、180°,靶区处方剂量为 45 Gy/25 F,5 F/周。同一患者制定 3 种剂量计算算法(S 算法、FS 算法、卷积 C 算法)不同的计划,其余所有优化步骤和约束条件完全相同。所有计划均为处方剂量围绕 95%的靶区体积,再比较危及器官的剂量受量。

1.5 计划验证 将每一例患者 S 算法、FS 算法和 C 算法的 IMRT 计划均移植到模体 CT 图像上,机架角度归零,生成相应的单野和合成野 QA 计划,通过 MatriXX 二维电离室矩阵对其做剂量验证,其中 γ 通过率的设定条件为 3 mm 的位移误差和 3%的剂量误差^[12,13]。

1.6 评估方法 根据剂量曲线和剂量体积直方图对靶区和正常器官的剂量分布情况进行分析,根据 ICRU 83 号^[14]报道计算靶区的 D_2 、 D_{98} 、 D_{50} 分别为靶区 2%、98%和 50%体积所接受的剂量、均匀性指数(homogeneity index, HI)、适形度指数(conformity index, CI)等相关参数,其中 $HI = (D_2 - D_{98}) / D_{50}$, $CI = (V_{T,ref} \times V_{T,ref}) / (V_T \times V_{ref})$, V_T 是靶区体积, V_{ref} 是参考等剂量线所包绕的所有区域体积, $V_{T,ref}$ 是参考等剂量线所包绕的靶区体积。HI 的值越接近 0,代表剂量分布越均匀;CI 越接近 1,代表处方剂量 95%剂量线和靶区的一致性越高。危机器官评估参数:小肠、膀胱 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 、 D_{mean} 、 D_{max} , 直肠 V_{30} 、 V_{40} 、 D_{mean} 、 D_{max} , 左右股骨头 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} , 其中 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 分别为照射剂量为 10、20、30、40 Gy 的体积百分比。另比较计划治疗时间、计划计算时间、MLC 片段数和机器跳数 MU。

1.7 统计学方法 采用 SPSS 19.0 统计学软件进行数据分析,计数资料以(n)表示,计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示,多重比较采用 LSD- t 检验,以 $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 不同剂量计算算法对靶区剂量的影响 S 算法、FS 算法、卷积 C 算法的剂量分布均能很好的适应靶区,但 3 种不同剂量计算算法间各评估参数比较,差异无统计学意义($P > 0.05$),见表 1。

表 1 不同剂量计算算法的靶区评估参数比较 ($\bar{x} \pm s$)

参数	S 算法	FS 算法	卷积 C 算法	t^*	P^*	t^*	P^*	$t^{\#}$	$P^{\#}$
D_{\max} (cGy)	5076.272±57.515	5085.545±70.547	5085.818±71.307	-0.326	0.747	-0.335	0.740	-0.010	0.992
D_{mean} (cGy)	4711.273±29.499	4710.137±31.203	4708.363±29.652	0.099	0.922	0.226	0.822	0.127	0.891
D_2 (cGy)	4927.272±39.159	4928.181±56.889	4940.909±51.856	-0.043	0.966	0.299	0.767	0.341	0.735
D_{98} (cGy)	4427.273±20.045	4424.545±21.616	4422.727±30.689	0.260	0.796	0.434	0.667	0.174	0.863
D_{50} (cGy)	4715.455±24.233	4718.181±35.161	4718.333±33.111	-0.205	0.839	-0.205	0.841	0	1.000
CI	0.636±0.059	0.639±0.0566	0.641±0.053	-0.145	0.886	-0.233	0.818	-0.088	0.931
HI	0.106±0.011	0.107±0.015	0.106±0.014	-0.107	0.915	0.083	0.935	0.190	0.851

注: * 为 FS 算法与 S 算法比较; ^ 为卷积 C 算法与 S 算法比较; # 为 FS 算法与卷积 C 算法比较

2.2 不同剂量计算算法对危及器官剂量的影响 S 算法、FS 算法、卷积 C 算法对危及器官都有很好的保护作用,但 3 种不同剂量计算间膀胱、小肠、直肠、左右股骨头各评估参数比较,差异无统计学意义 ($P>0.05$),见表 2。

2.3 不同剂量计算算法对验证计划的 γ 通过率差异比较 3 种不同剂量计算算法的单野和合成野 γ 通

过率均在 95%以上,满足临床质控>90%的要求;但 3 种算法间 γ 通过率比较,差异无统计学意义 ($P>0.05$),见表 3。

2.4 不同剂量计算算法对其他参数的影响 卷积 C 算法的计划计算时间短于 S 算法,差异有统计学意义 ($P<0.05$);3 种不同剂量计算算法间其余参数比较,差异无统计学意义 ($P>0.05$),见表 4。

表 2 不同剂量计算对危及器官评估参数比较 ($\bar{x} \pm s$)

器官	参数	S 算法	FS 算法	卷积 C 算法	t^*	P^*	t^*	P^*	$t^{\#}$	$P^{\#}$
膀胱	V_{20} (%)	99.779±0.485	99.579±0.832	99.578±0.832	0.654	0.518	0.642	0.526	-0.654	0.997
	V_{30} (%)	82.606±11.197	83.188±10.370	82.685±9.950	-0.130	0.898	-0.017	0.986	0.109	0.914
	V_{40} (%)	29.711±8.439	31.899±7.168	30.037±7.701	-0.659	0.515	-0.096	0.924	0.547	0.588
	D_{mean} (cGy)	3620.455±176.270	3644.273±172.730	3624.700±167.400	-0.324	0.748	-0.056	0.955	0.260	0.797
	D_{\max} (cGy)	4772.909±99.057	4806.818±117.697	4818.000±109.878	-0.729	0.472	-0.946	0.352	-0.235	0.816
小肠	V_{10} (%)	96.116±2.082	96.257±1.946	95.921±3.057	-0.139	0.890	0.186	0.853	0.322	0.749
	V_{20} (%)	72.295±9.173	71.948±8.506	71.690±8.921	0.092	0.928	0.156	0.877	0.067	0.947
	V_{30} (%)	33.134±4.072	32.629±3.901	33.231±3.778	0.302	0.765	-0.057	0.955	-0.351	0.728
	V_{40} (%)	11.459±2.787	11.535±2.958	11.789±2.902	-0.061	0.951	-0.262	0.795	-0.202	0.841
	D_{mean} (cGy)	2625.818±138.050	2626.546±128.267	2635.800±144.621	-0.012	0.990	-0.167	0.869	-0.155	0.878
直肠	D_{\max} (cGy)	4873.727±61.167	4919.091±81.818	4891.200±43.721	-1.651	0.109	-0.621	0.540	0.991	0.330
	V_{30} (%)	97.536±2.727	98.443±1.951	98.885±1.757	-0.781	0.484	-1.068	0.302	-0.305	0.731
	V_{40} (%)	42.750±7.977	38.823±7.729	38.036±7.785	0.861	0.403	1.035	0.317	0.174	0.864
	D_{mean} (cGy)	3913.333±134.964	3881.833±125.859	3878.667±105.390	0.445	0.663	0.489	0.632	0.045	0.965
	D_{\max} (cGy)	4873.500±98.009	4859.500±105.037	4884.167±136.484	0.212	0.835	-0.161	0.874	-0.373	0.724
左股骨头	V_{10} (%)	92.213±5.040	91.050±9.627	91.092±7.717	0.354	0.726	0.351	0.728	0.005	0.996
	V_{20} (%)	14.412±6.697	13.257±4.468	14.837±5.094	0.491	0.627	-0.176	0.861	-0.656	0.517
	V_{30} (%)	1.388±1.353	1.100±1.035	1.299±1.148	0.569	0.574	0.307	0.761	-0.249	0.805
右股骨头	V_{10} (%)	94.474±7.931	92.256±12.267	93.847±9.806	0.512	0.613	0.141	0.889	-0.358	0.723
	V_{20} (%)	20.352±7.655	19.542±8.068	21.466±9.263	0.228	0.821	-0.306	0.762	-0.529	0.601
	V_{30} (%)	1.472±1.156	1.287±1.343	0.929±1.065	0.361	0.720	1.037	0.308	0.685	0.499

注: * 为 FS 算法与 S 算法比较; ^ 为卷积 C 算法与 S 算法比较; # 为 FS 算法与卷积 C 算法比较

表 3 不同剂量计算算法对验证计划的 γ 通过率差异比较 ($\bar{x}\pm s, \%$)

参数	S 算法	FS 算法	卷积 C 算法	t^*	P^*	t^*	P^*	$t^\#$	$P^\#$
220°	96.637±1.546	95.681±3.723	94.992±5.005	0.482	0.636	0.930	0.365	0.448	0.660
260°	96.861±2.515	97.088±1.452	96.792±2.263	-0.200	0.844	0.060	0.953	0.260	0.798
300°	97.835±1.758	99.000±0.631	97.935±1.823	-1.445	0.166	1.117	0.279	0.994	0.115
340°	97.847±2.017	97.237±1.779	96.751±1.171	0.620	0.543	1.113	0.280	0.493	0.628
20°	95.668±2.088	95.605±4.232	95.632±2.605	0.038	0.970	0.021	0.983	-0.016	0.987
60°	98.151±0.916	97.521±1.304	97.375±1.363	0.973	0.343	1.198	0.246	0.225	0.824
100°	96.487±1.957	95.647±3.544	96.717±2.920	0.544	0.593	-0.150	0.882	-0.695	0.496
140°	95.230±3.832	96.340±3.422	96.123±2.111	-0.686	0.501	-0.555	0.585	0.131	0.897
180°	96.564±2.012	95.440±4.570	97.104±2.994	0.686	0.501	-0.329	0.746	-1.015	0.323
ALL	99.201±0.606	99.280±0.533	99.336±0.781	-0.258	0.799	-0.443	0.661	-0.185	0.854

注: * 为 FS 算法与 S 算法比较; ^ 为卷积 C 算法与 S 算法比较; # 为 FS 算法与卷积 C 算法比较

表 4 不同剂量计算算法对其他评估参数的比较 ($\bar{x}\pm s, \text{min}$)

参数	S 算法	FS 算法	卷积 C 算法	t^*	P^*	t^*	P^*	$t^\#$	$P^\#$
计划计算时间	75.937±6.348	69.781±7.23	64.751±9.948	1.099	0.352	0.917	0.010	1.844	0.092
计划治疗时间	10.965±1.333	11.241±1.572	10.272±1.646	-0.517	0.987	0.644	0.681	1.161	0.742
MLC 片段数	86.454±17.552	87.727±19.375	88.300±20.396	-0.156	0.877	-0.221	0.827	-0.069	0.946
MU	675.073±135.821	680.810±143.486	681.794±147.510	-0.095	0.925	-0.108	0.915	-0.016	0.987

注: * 为 FS 算法与 S 算法比较; ^ 为卷积 C 算法与 S 算法比较; # 为 FS 算法与卷积 C 算法比较

3 结论

CMS Xio (4.80)TPS 中有 3 种类型的剂量计算算法,用于计算将给定剂量传递到加速器上所需光子束中的 MU。研究发现^[15],在鼻咽癌患者的调强放疗计划设计中,卷积 C 算法高估了靶区剂量,低估了危及器官的剂量,推荐 FS 算法处理不均匀组织。Muralidhar KR 等^[8]研究发现,在所有情况下,S 算法对于所有技术都适用,而卷积 C 算法对于下咽情况则适用,如果是肺癌、食道癌等,FS 算法和 S 算法更优。在组织不均匀的情况下,S 算法的精确度较卷积 C 算法更高。Bragg CM 等^[16]研究发现,在前列腺癌的应用中,AAA 算法和 PBC 算法差异较小,而在肺癌中却产生了巨大差异。García-Vicente F 等^[9]研究发现,在纵膈肺的建模几何形状中,卷积 C 算法导致绝对剂量的平均偏差超过 10%,而 S 算法绝对剂量的平均偏差约为 1%,S 算法可以合理地评估非均匀区域(如肺区域)中的剂量分布和绝对剂量。上述研究中肿瘤位置大多处在不均匀组织区域,本研究选取了组织相对均匀的腹部宫颈癌作为研究对象,可

减少卷积 C 算法在处理不均匀组织中的劣势,因此可更好地分析 3 种算法在宫颈癌剂量学上的差异。

本研究结果显示,不同剂量算法靶区评估参数、危及器官评估参数比较,差异无统计学意义 ($P>0.05$),但卷积 C 算法的放疗计划计算时间短于 S 算法,差异有统计学意义 ($P<0.05$),这说明在组织密度相对均匀的区域,能够修改组织密度的算法(S、FS 算法)并不会比不能修改组织密度算法(卷积 C 算法)更有剂量学优势,但卷积 C 算法较 S 算法却有着更快的运算速度。探测器阵列方向依赖性不能忽略,且不能修正时,应分析单野剂量分布^[17]。从本研究剂量验证结果来看,3 种剂量算法的验证计划无论是单野还是合成野比较,差异均无统计学意义 ($P>0.05$)。利用 MatriXX 在进行 IMRT 剂量验证时,将射野角度归零,同时忽略掉准直器、激光灯、治疗床的运动,以及重力对 MLC 叶片到位精度的影响,这与实际治疗情况存在较大差异^[18-20]。因此,即便 3 种剂量算法的剂量验证高达 95%以上,也只能说明其可达到临床质控要求,并不能说明 3 种算法的优劣。

综上所述,3种剂量计算算法在晚期宫颈癌IMRT计划中靶区和危及器官的剂量学参数无差异,这可能与宫颈癌靶区组织密度相对均匀,剂量计算算法并不需要很强烈的修改组织密度有关,且所有计划的剂量验证也均能达到临床质控要求,但卷积C算法运算速度较S算法更快。因此,推荐卷积C算法在剂量精度没有显著改变的前提下,能够节约计划运算时间。

参考文献:

- [1] Bray F, Ferlay J, Soerjomataram I, et al. Global cancer statistics 2018: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries [J]. CA Cancer J Clin, 2018, 68(6): 394-424.
- [2] 刘佳琪, 李朋飞, 纪妹, 等. 基于中国子宫颈癌临床诊疗大数据的子宫颈癌诊疗规范化调查分析[J]. 中国实用妇科与产科杂志, 2021, 37(1): 82-86.
- [3] 孟令昊, 胥秋艳, 李科, 等. 1990~2019年中国女性宫颈癌疾病负担变化的分析[J]. 中国循证医学杂志, 2021, 21(6): 648-653.
- [4] Holt JG, Laughlin JS, Moroney JP. The extension of the concept of tissue-air ratios (TAR) to high-energy x-ray beams[J]. Radiology, 1970, 96(2): 437-46.
- [5] Xing Y, Nguyen D, Lu W, et al. Technical Note: A feasibility study on deep learning-based radiotherapy dose calculation[J]. Med Phys, 2020, 47(2): 753-758.
- [6] Akpochafor MO, Madu CB, Habeebu MY, et al. Development of pelvis phantom for verification of treatment planning system using convolution, fast superposition, and superposition algorithms [J]. Journal of Clinical Sciences, 2017, 14(2): 74.
- [7] Miften M, Wiesmeyer M, Monthofer S, et al. Implementation of FFT convolution and multigrid superposition models in the FOCUS RTP system[J]. Physics in Medicine & Biology, 2000, 45(4): 817-833.
- [8] Muralidhar KR, Murthy NP, Raju AK, et al. Comparative study of convolution, superposition, and fast superposition algorithms in conventional radiotherapy, three-dimensional conformal radiotherapy, and intensity modulated radiotherapy techniques for various sites, done on CMS XIO planning system[J]. J Med Phys, 2009, 34(1): 12-22.
- [9] García-Vicente F, Miñambres AJ, Jerez I, et al. Experimental validation tests of fast Fourier transform convolution and multigrid superposition algorithms for dose calculation in low-density media[J]. Radiother Oncol, 2003, 67(2): 239-249.
- [10] Kohno R, Kitou S, Hirano E, et al. Dosimetric verification in inhomogeneous phantom geometries for the XiO radiotherapy treatment planning system with 6-MV photon beams[J]. Radiol Phys Technol, 2009, 2: 87-96.
- [11] Chavaudra J, Bridier A. Definition of volumes in external radiotherapy: ICRU reports 50 and 62 [J]. Cancer Radiother, 2001, 5(5): 472-478.
- [12] 王琦, 龚恋, 严文广, 等. 旋转误差对直肠癌容积旋转调强放射治疗验证计划 γ 通过率的影响[J]. 中南大学学报(医学版), 2020, 45(9): 1104-1108.
- [13] 胡兴刚, 熊盾, 杨波, 等. 射野区域的剂量验证研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(1): 44-48.
- [14] Figueira A, Monteiro A, Meireles P, et al. IMRT Plan Evaluation according to ICRU Report 83 [J]. Fuel & Energy Abstracts, 2011, 81(2): S849.
- [15] 王磊, 王晓梅, 陈维平, 等. 调强放疗计划中两种不同剂量算法的比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(3): 401-403.
- [16] Bragg CM, Wingate K, Conway J. Clinical implications of the anisotropic analytical algorithm for IMRT treatment planning and verification[J]. Radiother Oncol, 2008, 86(2): 276-284.
- [17] 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.
- [18] 郭妍妍, 蒋胜鹏, 戴越, 等. 治疗床及体位固定装置对放疗剂量精确性的影响及解决方法 [J]. 国际生物医学工程杂志, 2015, 38(4): 214-217.
- [19] 郭跃信, 裴运通, 马阳光, 等. IMRT不同剂量验证技术差异性分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(6): 657-660.
- [20] 孔旭东, 孔栋. MatriXX调强验证在精确放疗质量控制中的作用[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(12): 54-57, 65.

收稿日期: 2022-03-09; 修回日期: 2022-03-29

编辑/杜帆