

独立验证软件Arc QA与Veri QA在调强放疗计划验证中的剂量学比较

潘淑豪

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 评估并比较基于蒙特卡罗算法的Arc QA和Veri QA 2款独立剂量验证软件在调强计划验证中的剂量学差异。方法 收集87例行调强放疗患者的放疗计划, 包括头颈部17例、胸部46例、腹部24例, 所有放疗计划均通过了临床剂量验证。分别使用Arc QA和Veri QA对调强计划进行独立剂量计算, 采用 γ 通过率(3%/3 mm)分析二者与治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)间的剂量分布, 并对比二者的靶区剂量-体积直方图参数(最小剂量、最大剂量、平均剂量和 $D_{95\%}$)剂量学差异和 γ 通过率。结果 Arc QA和Veri QA与TPS间关于靶区的剂量差异均在 $\pm 2.5\%$ 以内, 2款软件在头颈、胸及腹部中的平均 γ 通过率分别为 $98.90\% \pm 1.99\%$ 和 $99.21\% \pm 0.85\%$ 、 $95.74\% \pm 3.16\%$ 和 $99.37\% \pm 0.77\%$ 以及 $97.10\% \pm 2.41\%$ 和 $99.84\% \pm 0.17\%$, 二者在胸腹部差异均有统计学意义($t=-5.972$, $P<0.05$; $t=-5.133$, $P<0.05$)。结论 Arc QA和Veri QA与TPS均有良好的剂量学一致性, 能满足临床验证需要, 可作为调强计划的独立验证工具。

[关键词] 独立剂量验证; 调强放疗计划; 剂量差异; γ 通过率

Dosimetric Comparison of Independent Verification Software of Arc QA and Veri QA in IMRT Plans

PAN Shuhao

Department of Radiation Oncology, The First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui 230022, China

Abstract: **Objective** To evaluate and compare the dosimetric differences of two independent dose verification software in IMRT plans, which are Arc QA and Veri QA based on Monte Carlo algorithm. **Methods** A total of 87 patients were enrolled in IMRT plans, including 17 for the head and neck, 46 for the chest, and 24 for the abdomen. All radiotherapy plans had passed clinical dose verification. Arc QA and Veri QA were respectively adopted to conduct independent dose calculation for IMRT plans, used γ pass rate (3%/3 mm) to analyze the dose distribution between the two verification software and treatment planning system (TPS), and compared the dose differences in PTV dose-volume histogram parameters (including minimum dose, maximum dose, average dose, and $D_{95\%}$) and γ pass rate between Arc QA and Veri QA. **Results** The dose difference between Arc QA, Veri QA and TPS in PTV was within $\pm 2.5\%$. The γ pass rates of Arc QA and Veri QA on head and neck, chest and abdomen were $98.90\% \pm 1.99\%$ and $99.21\% \pm 0.85\%$, $95.74\% \pm 3.16\%$ and $99.37\% \pm 0.77\%$, as well as $97.10\% \pm 2.41\%$ and $99.84\% \pm 0.17\%$, respectively. There was a statistically significant difference between the two software in chest and abdomen ($t=-5.972$, $P<0.05$; $t=-5.133$, $P<0.05$). **Conclusion** Arc QA and Veri QA have good dosimetric consistency with TPS, which can meet clinical validation needs and serve as independent validation tools for intensity modulation plans.

Key words: independent dose verification; intensity modulated radiation therapy plan; dose differences; γ pass rate

[中图分类号] R197.39; R814.2

[文献标识码] A

doi: 10.3969/j.issn.1674-1633.2024.02.013

[文章编号] 1674-1633(2024)02-0075-05

[引用格式] 潘淑豪. 独立验证软件Arc QA与Veri QA在调强放疗计划验证中的剂量学比较[J]. 中国医疗设备, 2024, 39(2): 75-79.

Pan SH. Dosimetric comparison of independent verification software of Arc QA and Veri QA in IMRT plans[J]. *China Med Devices*, 2024, 39(2): 75-79.

引言

调强放射治疗(Intensity Modulated Radiation Therapy, IMRT)是目前临床上最常用的放射治疗技术之一。IMRT在实现高度适形和不规则剂量分布的同时,

能最大限度地降低危及器官的受照射剂量。由于肿瘤靶区和危及器官的位置相邻, 因此靶区很小的剂量误差都有可能造成严重的组织损伤。为了保证放疗计划的安全实施, 在患者放疗前有必要对治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)输出的IMRT计划进行剂量分布验证, 确保剂量传递的精确性, 运用的主要方法是

收稿日期: 2023-08-08

基金项目: 安徽高校协同创新项目(GXXT-2022-011)。

作者邮箱: haoshu_123@163.com

基于测量的剂量验证^[1]和基于计算的剂量验证^[2-3]。目前多采用基于测量的剂量验证进行计划的质量保证 (Quality Assurance, QA), 该方法耗时耗力, 受限于测量设备的验证精度, 且无法发现 TPS 本身的计算错误。剂量计算错误的原因有: ① 算法在特定系统内的具体实现; ② 由特定参数下的架构缺陷导致的软件故障^[4]。基于不同算法的独立计算验证重复 TPS 出现计算错误的可能性很低。

基于计算的剂量验证简单且高效, 可以检查数据传输的准确性和计划执行的正确性, 目前国内外已陆续开展相关研究^[5-9]。蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 算法已用于独立计算验证^[10-13], 但目前基于 MC 算法的对比研究较少。本研究拟评估和对比基于 MC 算法的 2 款剂量验证软件 Arc QA 和 Veri QA 在 IMRT 计划验证中的临床结果。

1 资料与方法

1.1 临床资料

选取 2022 年 1—6 月在我院行头颈部、胸部、腹部 3 类肿瘤调强放疗患者的治疗计划为研究对象, 总计 87 例, 其中头颈部 17 例, 胸部 46 例, 腹部 24 例。头颈、胸及腹部放疗计划均采用固定野调强技术, 5~7 个野不等。所有放疗计划均通过测量的剂量验证。研究已经本院伦理委员会审批通过 (批准文号: 2019C049), 所有患者均知情同意。

1.2 仪器设备

放疗计划使用直线加速器 VitalBeam (瓦里安, 美国)。VitalBeam 光子线有 6 mV、6 mV-非均整过滤器 (Flattening Filter Free, FFF)、10 mV 及 10 mV-FFF 共 4 挡能量, 本研究使用 6 mV 光子线, 其中剂量率为 600 MU/min。TPS 使用 Eclipse 13.6 治疗计划系统 (瓦里安, 美国), 该系统主要有笔形束卷积算法、各向异性分析算法 (Anisotropic Analytical Algorithm, AAA) 及外照射光子剂量算法, 本研究中 TPS 采用 AAA 算法。

剂量验证软件 Arc QA 和 Veri QA 均基于 MC 算法。其中 Arc QA 是一款由安徽慧软科技公司开发的具有图形处理单元加速功能的验证软件; 德国 PTW 公司研发的 Veri QA 则最大限度地提高了效率并减少了非高斯噪声。剂量验算时, 放疗计划通过本地瓦里安网络传至验证软件。验算完成后, 验证软件给出剂量-体积直方图 (Dose-Volume Histogram, DVH) 验算结果、 γ 通过率及审查结论 (包括通过、警告和不通过)。本研究使用 3%/3 mm 默认标准的平均 γ 通过率对计划靶区 (Planning Target Volume, PTV) 展开验证分析。

1.3 剂量比较

通过选择 DVH 参数中 PTV 的最小剂量、最大剂量、平均剂量和 95% 体积剂量 ($D_{95\%}$) 以及危及器官的平均剂量来分析验证软件与 TPS 间关于靶区的剂量差异, 并评估二者的一致性。剂量学差异值根据公式 $\delta=(D_{\text{Val}}-D_{\text{TPS}})/D_{\text{TPS}} \times 100\%$ 计算, 其中, D_{Val} 为验算剂量, D_{TPS} 为 TPS 计算剂量。

1.4 统计学分析

使用 SPSS 20.0 进行数据分析, 各参数均采用 $\bar{x} \pm s$ 评估验证软件与 TPS 的剂量学一致性。采用配对 t 检验分析验证软件 Arc QA 与 Veri QA 间关于 PTV 的剂量验算差异, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 PTV参数及剂量差异分布

头颈部、胸部、腹部调强计划中 PTV 的靶区体积、适形度指数 (Conformal Index, CI)、均匀性指数 (Heterogeneous Index, HI) 及机器跳数 (Monitor Unit, MU) 如表 1 所示。其中, 胸部肿瘤的靶区体积最小、适形度及均匀性最差, 同时胸部肿瘤放疗过程中加速器的 MU 最小。

表1 患者不同部位PTV参数 ($\bar{x} \pm s$)

部位	病例数/例	体积/ cm^3	CI	HI	MU
头颈部	17	988 ± 584	0.86 ± 0.04	0.11 ± 0.06	1038 ± 385
胸部	46	504 ± 252	0.73 ± 0.10	0.17 ± 0.09	851 ± 272
腹部	24	748 ± 215	0.86 ± 0.04	0.11 ± 0.04	1307 ± 157

注: CI: 适形度指数; HI: 均匀性指数; MU: 机器跳数。

验证软件与 TPS 间关于 PTV 的 DVH 参数剂量差异中位值均在 $\pm 1\%$ 以内, 显示验证软件 Arc QA 和 Veri QA 均与 TPS 具有良好的一致性, 其中 PTV 的最小剂量、最大剂量、平均剂量和 $D_{95\%}$ 剂量验算差异箱线图如图 1 所示。

2 款验证软件关于不同瘤种间 PTV 的剂量验算差异分布略有不同, 但 DVH 参数剂量差异中位值均在 $\pm 2.5\%$ 以内, 再次说明验证软件 Arc QA 和 Veri QA 均与 TPS 具有良好的一致性。Arc QA 和 Veri QA 在头颈部、胸部及腹部瘤种间 PTV 剂量差异箱线图分别如图 2a、2b 所示。

2.2 PTV剂量差异比较

在头颈部肿瘤放疗计划中, PTV 的最小剂量、最大剂量、平均剂量及 $D_{95\%}$ 剂量验算差异均在 $\pm 1\%$ 以内, Arc QA 在数值上表现出与 TPS 更好的一致性, 但 Arc QA 和 Veri QA 所得出的各组数据差异均无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 2。

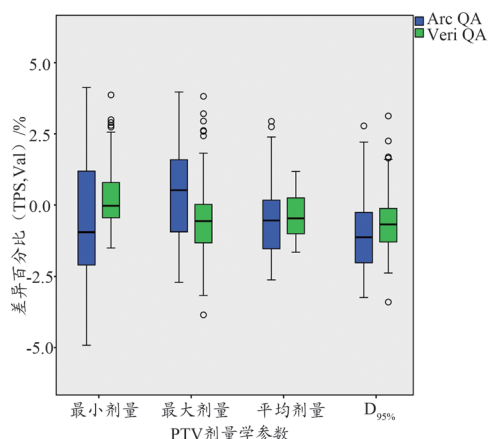


图1 验证软件Arc QA/Veri QA与TPS间PTV剂量差异箱线图

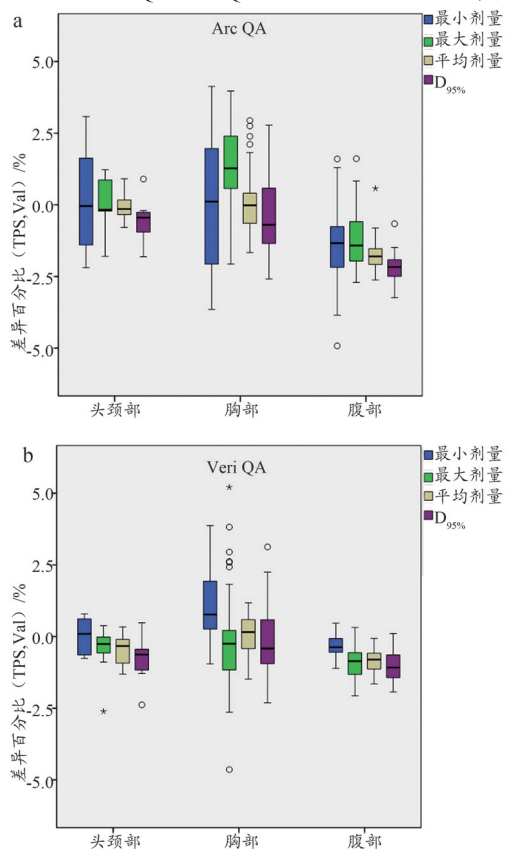


图2 验证软件Arc QA (a) 和Veri QA (b) 在不同瘤种间 PTV剂量差异箱线图

在胸部肿瘤放疗计划中, Arc QA 和 Veri QA 在与 TPS 的一致性上表现相当, 其中 Arc QA 和 Veri QA 的最小剂量差异分别为 $-0.09\% \pm 2.31\%$ 和 $1.08\% \pm 1.11\%$, 最大剂量差异分别为 $1.43\% \pm 1.46\%$ 和 $-0.13\% \pm 2.59\%$,

表5 2款验证软件危及器官平均剂量差异值比较 ($\%, \bar{x} \pm s$)

软件	脑干	视交叉	脊髓	双肺	膀胱	直肠
Arc QA	-0.03 ± 0.51	0.25 ± 0.45	0.47 ± 0.67	0.31 ± 1.01	-0.71 ± 0.35	-0.97 ± 0.56
Veri QA	-0.14 ± 0.63	-0.03 ± 0.70	-0.12 ± 0.75	0.25 ± 0.83	-1.01 ± 0.44	-0.86 ± 0.43
t值	1.936	1.645	2.128	-1.003	-1.744	-1.455
P值	0.098	0.176	0.075	0.423	0.096	0.160

差异均有统计学意义 ($P < 0.05$), 平均剂量及 $D_{95\%}$ 计算结果差异均无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 3。

表2 2款验证软件头颈部剂量参数差异值比较 ($\%, \bar{x} \pm s$)

软件	最小剂量	最大剂量	平均剂量	$D_{95\%}$
Arc QA	0.16 ± 1.80	0.04 ± 0.87	-0.04 ± 0.51	-0.58 ± 0.78
Veri QA	0.05 ± 0.61	-0.45 ± 0.85	-0.42 ± 0.52	-0.76 ± 0.76
t值	0.191	2.197	2.006	0.486
P值	0.853	0.056	0.076	0.638

表3 2款验证软件胸部剂量参数差异值比较 ($\%, \bar{x} \pm s$)

软件	最小剂量	最大剂量	平均剂量	$D_{95\%}$
Arc QA	-0.09 ± 2.31	1.43 ± 1.46	0.03 ± 1.13	-0.35 ± 1.28
Veri QA	1.08 ± 1.11	-0.13 ± 2.59	0.01 ± 0.70	-0.18 ± 1.19
t值	-2.967	3.354	0.077	-0.647
P值	0.005	0.002	0.939	0.521

在腹部肿瘤放疗计划中, Veri QA 表现出与 TPS 更好的一致性, 其中, Arc QA 和 Veri QA 的最小剂量差异分别为 $-1.48\% \pm 1.56\%$ 和 $-0.36\% \pm 0.35\%$, 平均剂量差异分别为 $-1.76\% \pm 0.66\%$ 和 $0.84\% \pm 0.37\%$, $D_{95\%}$ 剂量差异分别为 $-2.18\% \pm 0.51\%$ 和 $-1.01\% \pm 0.47\%$, 差异均有统计学意义 ($P < 0.05$), 最大剂量计算结果差异无统计学意义 ($P > 0.05$), 见表 4。

表4 2款验证软件腹部剂量参数差异值比较 ($\%, \bar{x} \pm s$)

软件	最小剂量	最大剂量	平均剂量	$D_{95\%}$
Arc QA	-1.48 ± 1.56	-1.20 ± 1.03	-1.76 ± 0.66	-2.18 ± 0.51
Veri QA	-0.36 ± 0.35	-0.94 ± 0.53	0.84 ± 0.37	-1.01 ± 0.47
t值	-3.459	-1.206	-5.163	-6.993
P值	0.002	0.240	<0.001	<0.001

2.3 危及器官剂量差异比较

在危及器官平均剂量差异值比较中, Arc QA 和 Veri QA 的验算差异均小于 $\pm 1.5\%$, 进一步说明 2 款验证软件与 TPS 间具有良好的剂量学一致性。Arc QA 和 Veri QA 在头颈部、胸部及腹部危及器官中的验算结果有区别, 但无统计学意义 ($P > 0.05$); 对于腹部危及器官, 2 款验证软件的平均剂量验算差异偏高于头颈部和胸部, 见表 5。

2.4 γ 通过率比较

在头颈部、胸部和腹部 3 个部位中, Arc QA 和 Veri QA 关于 PTV 的计划剂量验证 γ 平均通过率均 $> 95\%$, 显示验证软件的剂量验算结果与 TPS 的初始剂量计算结果具有良好的一致性。Arc QA/Veri QA 与 TPS 的平均 γ 通

过率在头颈部、胸部和腹部肿瘤靶区中分布不同,在胸部分别为 $95.74\% \pm 3.16\%$ 和 $99.37\% \pm 0.77\%$,在腹部分别为 $97.10\% \pm 2.41\%$ 和 $99.84\% \pm 0.17\%$,结果显示,Veri QA 优于 Arc QA,且差异均有统计学意义 ($P < 0.05$);对于头颈部肿瘤靶区,Veri QA 的 γ 通过率略优于 Arc QA,但差异无统计学意义 ($P > 0.05$),见表 6。

表6 2款验证软件 γ 通过率比较(%, $\bar{x} \pm s$)

软件	头颈部	胸部	腹部
Arc QA	98.90 ± 1.99	95.74 ± 3.16	97.10 ± 2.41
Veri QA	99.21 ± 0.85	99.37 ± 0.77	99.84 ± 0.17
t值	-0.529	-5.972	-5.133
P值	0.610	<0.001	<0.001

3 讨论

放疗计划的 QA 是现代肿瘤放射治疗过程中不可或缺的一步。通常在治疗前使用电离室矩阵对患者放疗计划进行剂量验证,在 3%/3 mm 的默认标准下,通过其 γ 通过率评估调强计划是否满足临床要求:当 γ 通过率 $\geq 95\%$ 时,调强计划符合临床要求,可用于患者放疗;当 γ 通过率 $< 95\%$ 时,需分析原因,重新验证或优化调强计划。然而基于测量的计划验证在患者的解剖结构方面信息不足且需要额外的人力付出,因此,强化的放疗计划验证工具可能对提升放疗计划 QA 的质量和效率更有明显意义。Arc QA 与 Veri QA 均是基于计算的独立剂量验算软件,可在后台数分钟内自动完成放射治疗计划的验证,验算过程多样且可重复。验证软件基于机器安装时的基准参数进行剂量验算,与 TPS 处理环境一致,可发现计算中源于 TPS 模型、算法或配置的剂量学误差,这些有临床意义的误差测量验证很难被发现^[14],同时验证软件还可检验数据传输的准确性。测量验证基于实时机器参数,引入了剂量精度、机械精度及摆位误差等因素,可测出实际的剂量沉积。相较于测量验证单一结果即 γ 通过率,验证软件还能算出 DVH 参数剂量验算差异值,有助于放疗计划的综合评估。这 2 种验证方法各有利弊,若能互相补充、有效结合,则可节约人力成本,提高日常 QA 的整体效率。由于机型、验证方法的不同^[15-17],不同机构间验算结果存在差异^[18],且基于 MC 算法的剂量验证尚未有统一的误差标准。本研究基于 2 款验证软件分析 MC 算法在剂量验算中的验证误差,分析了不同瘤种间的验算差异,有助于建立独立验证的行动阈值。本研究对头颈部、胸部和腹部调强计划进行了三维剂量验证,分析了靶区的最小剂量、最大剂量、平均剂量及 $D_{95\%}$ 剂量差异以及 γ 通过率,有助于更加全面地了解患者的靶区剂量信息,同时还进一步分析了危及器官的剂量验算差异,有助于放疗计划的优化。

本研究收集了头颈部、胸部及腹部 3 个部位共计

87 例肿瘤调强放疗计划,定量评估了 Arc QA 与 Veri QA 间的剂量验算差异。研究结果显示,对于加速器 VitalBeam,验证软件 Arc QA 和 Veri QA 的剂量分布与 TPS 输出计划有着良好的一致性,且 γ 通过率分析均在 95% 以上,符合调强计划验证要求。

验证软件与 TPS 间关于 PTV 的 DVH 参数剂量差异中位值均在 $\pm 1\%$ 以内,整体一致性较好。Arc QA 和 Veri QA 与 TPS 的靶区 DVH 剂量差异均在 $\pm 2.5\%$ 以内。根据不同瘤种间剂量验算差异的不同可以看出,对于头颈部靶区,Arc QA 和 Veri QA 与 TPS 的一致性相当;对于胸、腹部靶区,整体来看,Arc QA 较于 Veri QA 剂量验算差异稍大,Veri QA 与 TPS 具有更好的一致性。相较于头颈部、胸部危及器官,腹部危及器官的验算差异偏大。

头颈部计划中,Arc QA 和 Veri QA 与 TPS 关于肿瘤靶区的平均 γ 通过率均 $> 98\%$,二者剂量验证表现较好且相当;在胸、腹部肿瘤靶区的平均 γ 通过率中,Veri QA 与 TPS 显示更好的一致性,Arc QA 与 TPS 的一致性有所降低,特别是胸部肿瘤计划。胸部肿瘤计划涉及空腔(肺)的剂量计算,而不同算法对空气中剂量沉积的计算精度不同^[19-20]。与 AAA、简串卷积算法^[21]相比,MC 算法在二次电子输运模型上获得了更大改进,可以在生物组织中计算剂量沉积,故在异构区域的剂量测量性能方面较 AAA 算法更精确。结合 2 款软件的独立验证,基于 MC 算法的剂量验算误差在 $\pm 2.5\%$ 以内,平均 γ 通过率在 95% 以上。未来计划在其他 TPS 和加速器中进一步比较 2 款剂量验证软件。

4 结论

利用 Arc QA 和 Veri QA 2 款验证软件对 IMRT 计划进行验证简单、高效且可行,均表现出了与 TPS 具有很好的一致性,可作为第三方软件用于放射治疗临床剂量验证工作。2 款验证软件具有增强现有治疗计划验证范式和提高临床治疗计划及审查过程安全性的潜力。

[参考文献]

- [1] 阳露,张国前,罗松桂,等. SNC Patient和3DVH软件在乳腺癌和宫颈癌调强放疗计划剂量验证中的应用[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(8): 58-62.
Yang L, Zhang GQ, Luo SG, et al. The application of SNC patient and 3DVH software in dose verification of intensity modulated radiotherapy plans for breast and cervix cancer[J]. China Med Devices, 2021, 36(8): 58-62.
- [2] Stieler F, Wolff D, Bauer L, et al. Reirradiation of spinal column metastases: comparison of several treatment techniques

- and dosimetric validation for the use of VMAT[J]. *Strahlenther Onkol*, 2011, 187(7): 406-15.
- [3] Mehrens H, Taylor P, Followill DS, *et al*. Survey results of 3D-CRT and IMRT quality assurance practice[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(7): 70-76.
- [4] Fraass B, Doppke K, Hunt M, *et al*. American association of physicists in medicine radiation therapy committee task group 53: quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning[J]. *Med Phys*, 1998, 25(10): 1773-1829.
- [5] Tuazon B, Narayanasamy G, Papanikolaou N, *et al*. Evaluation and comparison of second-check monitor unit calculation software with Pinnacle3 treatment planning system[J]. *Phys Med*, 2018, 45: 186-191.
- [6] Takahashi R, Kamima T, Itano M, *et al*. A multi-institutional study of secondary check of treatment planning using Clarkson-based dose calculation for three-dimensional radiotherapy[J]. *Phys Med*, 2018, 49: 19-27.
- [7] 刘致滨, 石锦平, 李盈辉, 等. 独立三维剂量验证在鼻咽癌容积调强放射治疗计划中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(11): 1359-1364.
- Liu ZB, Shi JP, Li YH, *et al*. Application of independent three-dimensional dose verification for volumetric modulated Arc therapy of nasopharyngeal carcinoma[J]. *Chin J Med Phys*, 2021, 38(11): 1359-1364.
- [8] 刘力闽, 陈馨薇, 罗静, 等. 计算网格大小对脑肿瘤立体定向放射治疗剂量学的影响[J]. 中国医疗设备, 2022, 37(4): 47-50.
- Liu LM, Chen XW, Luo J, *et al*. Dosimetric comparison among volumetric modulated Arc therapy plans with different dose calculation grid size during stereotactic radiotherapy for brain tumors[J]. *China Med Devices*, 2022, 37(4): 47-50.
- [9] 王天赋, 李星月, 马明旭, 等. Eclipse计划系统计算网格大小对脑胶质瘤VMAT计划影响分析[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(10): 67-72.
- Wang TF, Li XY, Ma MX, *et al*. Analysis of the impact of eclipse planning system computational grid size on VMAT planning for glioma[J]. *China Med Devices*, 2023, 38(10): 67-72.
- [10] Mackeprang PH, Vuong D, Volken W, *et al*. Independent monte-carlo dose calculation for MLC based CyberKnife radiotherapy[J]. *Phys Med Biol*, 2017, 63: 015015.
- [11] Reynaert N, Demol B, Charoy M, *et al*. Clinical implementation of a monte carlo based treatment plan QA platform for validation of Cyberknife and tomotherapy treatments[J]. *Phys Med*, 2016, 32(10): 1225-1237.
- [12] Kosaka T, Takatsu J, Inoue T, *et al*. Effective clinical applications of monte carlo-based independent secondary dose verification software for helical tomotherapy[J]. *Phys Med*, 2022, 104: 112-122.
- [13] Li Y, Ding S, Wang B, *et al*. Extension and validation of a GPU-monte carlo dose engine gDPM for 1.5T MR-LINAC online independent dose verification[J]. *Med Phys*, 2021, 48(10): 6174-6183.
- [14] Nelms BE, Chan MF, Jarry G, *et al*. Evaluating IMRT and VMAT dose accuracy: practical examples of failure to detect systematic errors when applying a commonly used metric and action levels[J]. *Med Phys*, 2013, 40(11): 1111722.
- [15] Baeza JA, Zegers CML, de Groot NA, *et al*. Automatic dose verification system for breast radiotherapy: method validation, contour propagation and DVH parameters evaluation[J]. *Phys Med*, 2022, 97: 44-49.
- [16] Chendi A, Botti A, Orlandi M, *et al*. EPID-based 3D dosimetry for pre-treatment FFF VMAT stereotactic body radiotherapy plan verification using dosimetry CheckTM[J]. *Phys Med*, 2021, 81: 227-236.
- [17] Calvo-Ortega JF, Moragues-Femenía S, Laosa-Bello C, *et al*. Monte carlo-based independent dose verification of radiosurgery HyperArc plans[J]. *Phys Med*, 2022, 102: 19-26.
- [18] Tachibana H, Uchida Y, Miyakawa R, *et al*. Multi-institutional comparison of secondary check of treatment planning using computer-based independent dose calculation for non-C-arm linear accelerators[J]. *Phys Med*, 2018, 56: 58-65.
- [19] 申正文, 谭霞, 李师, 等. 不同算法下鼻咽癌调强放射治疗计划中空腔和骨性结构对剂量评估的影响[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 2(41): 252-256.
- Shen ZW, Tan X, Li S, *et al*. The influence of cavity and bony structure on dosimetry evaluation in nasopharyngeal carcinoma IMRT plans using different algorithms[J]. *Chin J Biomed Eng*, 2022, 2(41): 252-256.
- [20] 陈华, 徐义果, 庄志邈, 等. 放疗计划系统中空腔边缘剂量计算准确性研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(1): 69-73.
- Chen H, Xu YG, Zhuang ZM, *et al*. Dose accuracy research on air cavity interface in treatment planning system[J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2017, 26(1): 69-73.
- [21] Knöös T, Wieslander E, Cozzi L, *et al*. Comparison of dose calculation algorithms for treatment planning in external photon beamtherapy for clinical situations[J]. *Phys Med Biol*, 2006, 51(22): 5785-5807.

本文编辑 刘莹