



ArcherQA系统在磁共振引导在线自适应放疗计划独立验算中的应用研究

陈美宁, 丁寿亮, 李永宝, 王彬, 程博, 裴曦, 黄晓延, 刘红冬

引用本文:

陈美宁, 丁寿亮, 李永宝, 王彬, 程博, 裴曦, 黄晓延, 刘红冬. ArcherQA系统在磁共振引导在线自适应放疗计划独立验算中的应用研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2024, 44(5): 379–385.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112271-20230724-00018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于盆腔迭代锥形束CT图像的剂量学可行性分析

Dosimetric feasibility of iterative kV CBCT for radiation therapy planning for pelvis

中华放射医学与防护杂志. 2021, 41(11): 851–855 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.11.010>

立体定向调强放射治疗剂量验证结果分析

Analysis of dosimetric verification results of stereotactic body radiotherapy

中华放射医学与防护杂志. 2019, 39(9): 680–685 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2019.09.008>

磁共振引导放疗中射野外电子流效应的初步研究

A preliminary study on the out-of-field in-air electron streaming effect in MRI guided radiotherapy

中华放射医学与防护杂志. 2021, 41(9): 647–652 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.09.002>

基于磁共振加速器系统头颈部肿瘤自适应放射治疗的剂量学评估

Dose evaluation of adaptive radiotherapy using high-field MR-Linac systems for head and neck cancers

中华放射医学与防护杂志. 2021, 41(7): 499–503 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2021.07.004>

江苏省8台加速器调强放疗靶体积和危及器官剂量及二维剂量分布验证方法研究

Verification of doses to PTV and OAR and 2D dose distribution in IMRT for 8 accelerators in Jiangsu province

中华放射医学与防护杂志. 2020, 40(2): 129–133 <https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2020.02.010>

ArcherQA 系统在磁共振引导在线自适应放疗计划独立验算中的应用研究

陈美宁¹ 丁寿亮¹ 李永宝¹ 王彬¹ 程博² 裴曦² 黄晓延¹ 刘红冬¹

¹中山大学肿瘤防治中心放疗科 华南肿瘤学国家重点实验室 肿瘤医学协同创新中心 广东省恶性肿瘤临床医学中心, 广州 510060; ²中国科学技术大学核医学物理研究所, 合肥 210027

通信作者: 刘红冬, Email: liuhd@sysucc.org.cn

【摘要】 目的 探究将 ArcherQA 系统用于 Elekta Unity 1.5T 磁共振加速器上开展的磁共振引导自适应放疗计划独立验算的可行性。**方法** 利用均匀水模体验证了 ArcherQA 在磁场下的剂量计算精度, 然后利用抽签法随机选取 32 例在 Unity 上接受磁共振引导在线自适应放疗的患者, 包含脑、纵隔、肝、肾、椎体等 5 个治疗部位、32 个离线计划, 177 个在线计划。分别比较 ArcherQA 独立验算结果与 ArcCheck 测量结果、Monaco 计划系统计算结果的 γ 通过率 (3 mm/3%、2 mm/2%, 阈值 10%), 定量评估 ArcherQA 系统对 Unity 在线计划独立验算的准确性和效率。**结果** ArcherQA 系统可以较为准确地计算出磁场下光子线的剂量分布, 在 3 mm/3% 标准下, 水模体中方野验证结果 γ 通过率均高于 99%。在更严格的 2 mm/2% 标准下, 除 20 cm \times 20 cm 射野外, 其他方野的 γ 通过率也都超过 95%。对于治疗计划验证, ArcherQA 计算的结果与 ArcCheck 测量数据, 以及 Monaco 计划系统的计算数据都表现出较好的一致性, 在 3 mm/3% 标准下平均 γ 通过率可达到 99% 以上, 2 mm/2% 标准下平均 γ 通过率也超过 97%。ArcherQA 的在线计划独立验算效率较高, 177 个在线计划独立验算所需的时长范围为 50~150 s, 平均时长约为 108 s。**结论** ArcherQA 可以准确并高效地计算出磁场下光子线的剂量分布, 能够用于磁共振引导自适应放疗中离线和在线治疗计划的独立验算, 是一种有效的补充验证手段, 为患者治疗计划安全提供保障。

【关键词】 磁共振引导放疗; 在线自适应放疗; 独立验算; ArcherQA

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2404604); 广州市基础与应用基础研究项目 (202201011090); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2021A1515110642); 国家自然科学基金项目 (12275372); 广东省自然科学基金 (2023A1515011153); 中华国际医学交流基金会肿瘤精准放疗星火计划 (2019-N-11-34)

Application of ArcherQA for independent dose verification of MR-guided online adaptive radiotherapy plans

Chen Meining¹, Ding Shouliang¹, Li Yongbao¹, Wang Bin¹, Cheng Bo², Pei Xi², Huang Xiaoyan¹, Liu Hongdong¹

¹State Key Laboratory of Oncology in South China, Collaborative Innovation Center for Cancer Medicine, Sun Yat-sen University Cancer Center, Guangdong Provincial Clinical Research Center for Cancer, Guangzhou 510060, China; ²Institute of Nuclear Medical Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 210027, China

Corresponding author: Liu Hongdong, Email: liuhd@sysucc.org.cn

DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20230724-00018

收稿日期 2023-07-24 本文编辑 董晓霞

引用本文: 陈美宁, 丁寿亮, 李永宝, 等. ArcherQA 系统在磁共振引导在线自适应放疗计划独立验算中的应用研究 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2024, 44 (5): 379-385. DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20230724-00018.

Chen MN, Ding SL, Li YB, et al. Application of ArcherQA for independent dose verification of MR-guided online adaptive radiotherapy plans [J]. Chin J Radiol Med Prot, 2024, 44 (5): 379-385. DOI: 10.3760/cma.j.cn112271-20230724-00018.

【Abstract】 Objective To explore the feasibility of applying ArcherQA to independent dose verification of MR-guided online adaptive radiotherapy (ART) plans performed on Elekta Unity 1.5 Tesla (T) magnetic resonance-linear accelerator (MR-Linac). **Methods** The dose calculation accuracy of ArcherQA under a specific magnetic field was validated using a homogeneous water phantom. A total of 32 patients who received MR-guided online ART on Elekta Unity were randomly selected by lottery, with 32 offline plans and 177 online plans for five treatment sites (brain, mediastinum, liver, kidney, and vertebral body) enrolled. Finally, the γ pass rates (threshold: 10%; criteria: 3 mm/3% and 2 mm/2%) were compared among the result upon independent dose verification of ArcherQA, measurements of ArcCheck, and calculations using the Monaco treatment planning system (TPS) to quantitatively evaluate the accuracy and efficiency of ArcherQA in independent dose verification of online plans on Elekta Unity.

Results ArcherQA was proven accurate in calculating the dose distribution of therapeutic photon beams under the specific magnetic field. With the 3 mm/3% criterion, the γ pass rates of verification result exceeded 99% in all square fields of a water phantom. Under the stricter 2 mm/2% criterion, the γ pass rates also surpassed 95% in all square fields except 20 cm \times 20 cm field. Regarding the verification of treatment plans, the ArcherQA result were found to be highly consistent with those measured or calculated using ArcCheck and Monaco TPS, with the average γ pass rates exceeding 99% under the 3 mm/3% criterion and above 97% under the 2 mm/2% criterion. ArcherQA was acceptably efficient for independent dose verification of online plans, with 50 to 150 s, (108 s on average) required to complete the independent dose verification of 177 online plans. **Conclusions** ArcherQA allows for accurately and efficiently calculating the dose distribution of therapeutic photon beams under a specific magnetic field, establishing it as an effective supplementary tool for independent dose calculation of MR-guided offline and online ART plans, thereby ensuring the safety of patient treatment plans.

【Key words】 Magnetic resonance guided radiotherapy; Online adaptive radiotherapy; Independent dose verification; ArcherQA

Fund programs: National Key R&D Program of China (2022YFC2404604); Guangzhou Basic and Applied Basic Research Foundation (202201011090); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021A1515110642); National Natural Science Foundation of China (12275372); Natural and Science Foundation of Guangdong Province (2023A1515011153); Cancer Precision Radiation Spark Program of China International Medical Exchange Foundation (2019-N-11-34)

自适应放疗 (adaptive radiation therapy, ART) 通过影像监测肿瘤和周围危及器官 (organs at risk, OAR) 解剖轮廓的变化以及治疗的早期反应, 及时优化放疗计划, 能够最大限度地杀灭肿瘤组织, 尽可能地保护正常组织^[1-2]。磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 不仅能够提供出色的软组织分辨, 还能对肿瘤进行实时的追踪和监控, 同时不会增加额外的电离辐射, 近些年被广泛应用于放射治疗^[3-5]。以医科达 Unity 为代表的 MR 加速器将 1.5T 高场强磁共振扫描系统和电子线直线加速器一体整合, 能够实现每日 MRI 引导的在线自适应放疗和实时的肿瘤运动监测, 极大地减少了放疗过程中患者的几何不确定性, 提高治疗的精准性和增益比^[5-6]。

目前 Unity 在线自适应治疗流程中, 在线计划通常以离线设计的参考计划为基础, 根据患者每日 MRI 情况对计划进行调整和优化, 以补偿患者的摆位误差和解剖结构变化^[7-8]。然而, 在线计划的质量保证 (quality assurance, QA) 一直是个难题。与治疗前参考计划不同, 在线计划从设计到执行, 患者始终躺在病床上, 无法开展基于模体

和测量设备的验证, 利用第三方软件进行独立验算是一种较为理想的解决方案。但由于 Unity 中 1.5T 高强度磁场对光子线剂量分布会产生很大的影响, 而常规的第三方独立验算系统 (如 SciMoCa, RadCalc, MUCheck, IMSure, Mobius 3D 等) 没有考虑磁场的效应, 因此不能直接应用于 Unity 在线自适应计划的独立验算^[9-10]。ArcherQA 是一种新型的基于蒙特卡罗算法的第三方独立剂量验证系统, 支持磁场模拟, 能准确计算带电粒子在磁场中的运动和剂量沉积, 同时还借助了 GPU 高性能计算平台, 具有计算精度高和计算时间短等特点。本研究旨在探究将 ArcherQA 用于 Unity 上开展的磁共振引导自适应计划独立验算的可行性。

资料与方法

1. ArcherQA 系统及 Unity 建模: ArcherQA 是一款第三方独立验算软件系统, 该系统构建了外照射光子线虚拟源模型, 采用了基于 GPU 的蒙特卡罗算法, 支持粒子在机头附件 (如铅门和多叶准直器) 以及患者计算机体层摄影 (CT) 或磁共

振 (MR) 影像结构中的输运模拟, 并最终给出患者体内的三维剂量分布。该软件此前已应用在瓦里安和医科达的多款常规加速器 (如 VitalBeam 和 Infinity 等) 上^[11], 针对 Unity 的的磁场效应, ArcherQA 新增了对磁场环境下电子与介质相互作用的输运模拟。在构建模型过程中, 参考了机器验收和调试阶段在水箱中采集的百分深度剂量曲线、离轴比以及射野输出因子等数据。由于 Unity 机型的特殊性, ArcherQA 在建模时还考虑了其特制的 MR 兼容型治疗床、低温恒温器、制冷剂液氮、MR 扫描线圈 (包括前部线圈和后部线圈) 等部件对射线的衰减, 另外, 本研究在建模时采取了与 Monaco TPS 中相同的几何结构和密度参数。

2. 均匀水模体中的方野验算: 本研究首先验证了在虚拟均匀水模体 ($50\text{ cm} \times 50\text{ cm} \times 20\text{ cm}$) 中的几组方形射野 ($3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$, $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$, $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$), 每组方野设计处方均为 100 MU, 源皮距 (SSD) 为 133.5 cm, 等中心点设在水下 10 cm 处。验算完成后, ArcherQA 计算的三维剂量分布与 Elekta Unity 磁共振加速器 (瑞典 Elekta 公司) 专用计划系统 Monaco (v5.40.04) 计算结果进行对比, 分别计算在 3 mm/3% 和 2 mm/2% 标准下, 剂量阈值 10% 条件下的 γ 通过率。所有 γ 分析均采用绝对剂量模式进行比对和计算通过率。

3. 患者治疗计划的独立验算

(1) 病例资料: 利用抽签法随机选取 2022 年 3 月至 11 月在中山大学肿瘤防治中心 Unity 机器上接受磁共振引导在线自适应放疗的 32 例患者, 包括 10 例肝癌、9 例脑转移瘤、9 例肾癌、3 例纵隔肿瘤以及 1 例椎体转移瘤。

(2) 治疗前离线计划的验证及独立验算: 所有患者的离线治疗计划均基于定位 CT 影像, 由经验丰富的物理师在 Unity 磁共振加速器专用的计划系统 Monaco (v5.40.04) 完成计划设计, 剂量均满足处方剂量覆盖要求, OAR 限量主要参考国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 83 号报告^[12]。离线计划治疗前患者特异的质量保证 (patient specific quality assurance, PSQA) 均通过评估 ArcCheck 设备 (磁场兼容版本) 的测量结果与 Monaco 计算剂量分布的 γ 分析结果来得到。在本研究中, 为了进一步验证 ArcherQA 中 Unity 模型的准确性, 将基于 ArcCheck 的离线 PSQA 计划传

输到 ArcherQA 中进行独立验算, 得到的验算结果与 ArcCheck 测量数据、Monaco 计算结果进行比较。同样, 分别列出了在 3 mm/3% 和 2 mm/2% 标准, 剂量阈值 10% 条件下的 γ 通过率。

(3) 在线治疗计划的独立验算: 患者在线计划主要根据治疗前采集的每日 MR 影像, 并基于治疗前参考计划进行调整。Unity 提供两种在线自适应计划模式, 一种是适位 (adapt to position, ATP), 通过优化来修正治疗过程中的摆位误差。另一种是适形 (adapt to shape, ATS), 除位置修正外, 还将考虑靶区和 OAR 轮廓的变化, 重新进行计划优化。本研究所选取的 32 例患者共包含 177 个在线治疗分次计划, 其中有 6 例接受过共计 12 个分次的 ATS 治疗, 其余 165 个分次均采用 ATP 模式。所有在线计划均使用 Unity 专用的在线计划系统 (on-line Monaco) 进行设计, 采用 “Optimize Shapes” 方式重新优化计划, 并由物理师和临床医生评估计划是否满足要求。

在线计划生成后, 将 On-line Monaco 计划系统中患者的计划影像、在线治疗计划以及剂量学数据以 DICOM 文件形式传输至 ArcherQA 软件服务器进行独立验算。独立验算结果将给出三维剂量分布、DVH 曲线、计划参数比较、 γ 通过率等。其中 ATP 病例的独立验算是基于患者的定位 CT, 使用了离线计划中的勾画信息, 以及当天修正位置后的新治疗计划进行计算。而 ATS 病例的独立验算则是基于当天新采集的 MR 影像, 使用了重新修改后的解剖结构以及重新优化后的新计划进行计算。

4. 统计学处理: 使用 SPSS 22.0 软件对 Monaco 的计算结果、ArcCheck 的测量数据以及 ArcherQA 的独立验算数据的结果先行正态性检验, 若符合正态分布使用配对 t 检验, 不符合正态分布则使用 Wilcoxon 秩检验。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

结 果

1. 水模体中方野验算结果: 首先计算了 4 组方野 ($3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$, $5 \times 5\text{ cm}$, $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$, $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$) 下 ArcherQA 结果与 Monaco 剂量计算结果的三维 γ 分析结果, 并分别按照 3 mm/3% 和 2 mm/2% 标准, 剂量阈值为 10% 的条件进行统计。在 3 mm/3% 标准下, 上述各方野的 γ 通过率

结果分别为 99.96%、99.89%、99.80% 和 99.45%，均高于 99%。在更严格的 2 mm/2% 标准下，各方野的 γ 通过率结果分别为 98.17%、97.26%、96.70% 和 94.86%，除最大射野外，其他结果的 γ 通过率也都超过了 95%。

图 1 展示了具有代表性的 10 cm × 10 cm 射野中心轴平面的二维剂量分布结果。图中白色线框代表均匀水模体的范围，水模体外为空气。从差异图中可以看出，射野内剂量偏差较小，在±5 cGy 以内。剂量偏差较大的区域主要出现在射野的半影区和入口建成区域，最大剂量偏差约 10 cGy。

2. 治疗前离线计划的验证及独立验算：图 2 展示了所有 32 例患者离线计划使用 ArcCheck 模体测量、Monaco TPS 的计算以及用 ArcherQA 系统对离线 QA 计划开展的独立验算结果之间的 γ 通过率。Monaco 和 ArcCheck 之间 3 mm/3% 的平均 γ 通过率为 (99.44±0.61)%，AcherQA 和 ArcCheck 之间 3 mm/3% 的平均 γ 通过率为 (99.70±0.34)%，而 AcherQA 和 Monaco 之间的平均 γ 通过率为 (99.65±0.05)%。此外，在 2 mm/2% 的标准下，Monaco 和 ArcCheck 之间的平均 γ 通过率和 Monaco 和 AcherQA 的平均 γ 通过率分别为 (97.46±2.00)% 和 (99.48±0.30)%。表明 AcherQA 独立验算结果与 Monaco 计算结果、以及 ArcCheck 测量

结果都具有较好的一致性。

3. 基于患者影像的在线计划独立验算结果：图 3 列出了所有 32 例患者在线治疗计划的独立验算 γ 分析结果。需要指出的是，由于每个患者都涉及到多个分次的治疗，且不同部位的患者处方剂量和治疗分次也都不同，因此在图 3 中给出的 γ 通过率是每位患者所有分次的平均值，同时也提供了标准差。本研究所有计划在 ArcherQA 中的计算时长约 50~150 s，依计划复杂度而定，基本能满足临床上应用的要求。

图 4 展示出了一个接收 ATS 在线自适应治疗的代表性病例，使用 ArcherQA 开展独立验算的结果，根据 Unity 的 ATS 在线自适应治疗流程，其在线计划是基于患者当日的 MR 影像来计算的。当使用 MR 影像用于剂量计算时，影像中的电子密度信

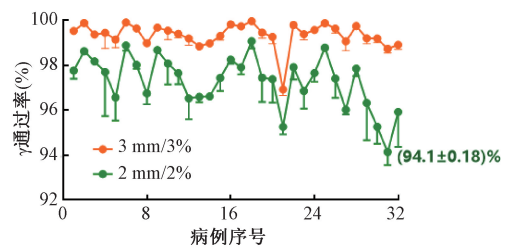


图 3 在线治疗计划使用 ArcherQA 独立验算的 γ 分析结果
Figure 3 γ analysis results for independent dose verification of ArcherQA for online plans

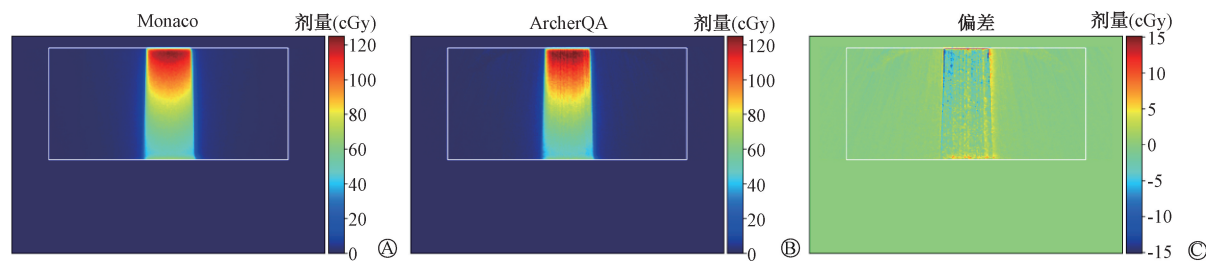


图 1 10 cm × 10 cm 射野下 ArcherQA 与 Monaco 计算的剖面剂量分布对比 A. Monaco; B. Archer QA; C. 偏差
Figure 1 Comparison of profile dose distributions calculated using ArcherQA and Monaco in a 10 cm × 10 cm field A. Monaco; B. Archer QA; C. Difference

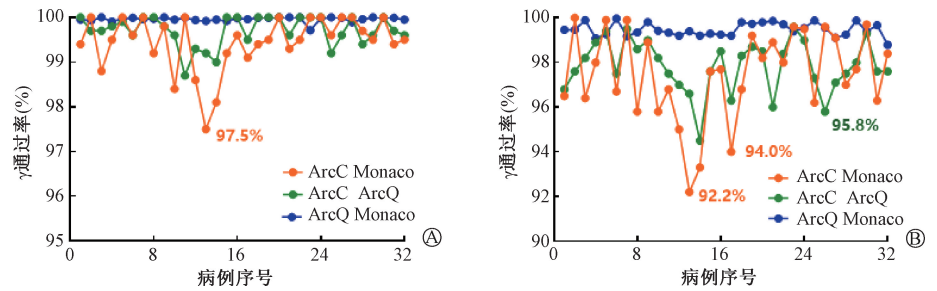


图 2 基于 ArcCheck 设备的离线计划治疗前剂量验证 γ 分析结果 A. 3 mm/3% 的 γ 通过率; B. 2 mm/2% 的 γ 通过率
Figure 2 ArcCheck-based γ analysis results for pre-treatment dose verification of offline plans A. γ -pass rates under the 3 mm/3% criterion; B. γ -pass rates under the 2mm/2% criterion

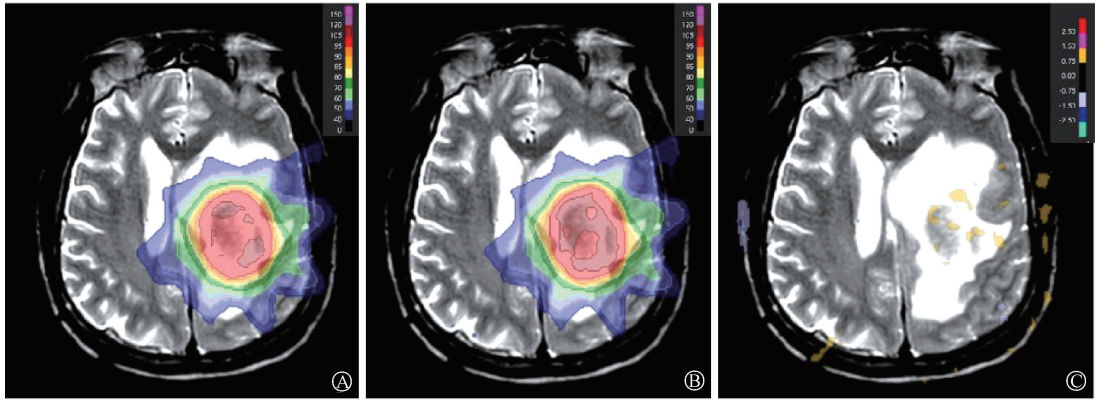


图 4 脑转移瘤代表性病例在 ArcherQA 中的独立验算结果展示 A. Monaco 计算结果; B. ArcherQA 计算结果; C. γ 分析结果

Figure 4 Results of independent dose verification on ArcherQA for representative cases of brain metastases

A. Monaco calculations; B. AcherQA calculations; C. γ analysis results

息来源于原始 CT 影像中相应勾画结构的平均值, 这一点 ArcherQA 与 Monaco 计划系统保持一致性。

讨 论

有效准确的二次剂量验算可以保证磁共振引导在线自适应放疗每个治疗分次剂量的精确性, 避免潜在的失误以及降低可能对患者造成严重伤害的风险^[13]。基于蒙特卡罗算法的 ArcherQA 系统可以较为准确地计算出磁场下光子线的剂量分布, 与均匀水模体中的方野结果, 以及 ArcCheck 测量剂量的对比结果都表现出了较好的一致性。这主要得益于蒙特卡罗算法本身的高精准性, 以及 ArcherQA 在算法中考虑了磁场对次级电子的偏转作用。

此外, 与其他独立验算软件不同的是, ArcherQA 采用了多个相空间源, 而不是简单的 3 个点源的模型, 可调试的参数更多^[14]。并且, ArcherQA 在构建 Unity 模型时, 还充分考虑了整套系统中可能会对射线衰减产生影响的因素, 比如对治疗床、低温恒温器、液氮冷却剂和 MR 扫描线圈等, 尽可能降低可能出现的偏差, 保证了模型的准确性, 提高了计算结果的精度。因此, 在均匀水模体的方野验证中, 3 mm/3% 和 2 mm/2% 标准下得到的 γ 通过率均比较高。10 cm × 10 cm 方野的剂量对比中, 偏差主要出现在半影区和水箱入口处, 分析其原因, 可能是 ArcherQA 和 Monaco 在处理铅门以及多叶准直器时算法不同, ArcherQA 中对铅门和多叶准直器都有相应的建模和输运模拟, 而 Monaco 计划系统做了简化处理, 并未对其

进行完整的模拟。

在实际临床应用中, Unity 上治疗的患者离线治疗计划的剂量验证通常基于 ArcCheck 系统测量来完成, 这与常规加速器上治疗计划的治疗前验证几乎一致。与 Raystation CC 算法相比, AcherQA 充分考虑到了 1.5T 磁场的影响, 降低了在皮肤表面和跨平面射束半影区域的剂量差异, 提高了 AcherQA 与 ArcCheck 测量数据、Monaco 计算数据之间的 γ 通过率^[15]。本研究发现, 当把治疗前基于 ArcCheck 模体的离线 PSQA 计划导入到 ArcherQA 中进行独立验算时, ArcherQA 计算的结果与 ArcCheck 测量数据, 以及 Monaco 计算数据都具有较好的一致性。在 3 mm/3% 标准下平均 γ 通过率可达到 99% 以上, 即使是 2 mm/2% 标准, 通过率也超过 97%。在 32 例临床病例中, AcherQA 和 ArcCheck 之间在 3 mm/3% 的平均 γ 通过率高于 Monaco 与 ArcCheck 之间以及 Monaco 与 AcherQA 之间的 γ 通过率, 体现了 AcherQA 在检验 TPS 剂量分布的高准确性和稳定性。这主要归功于 ArcherQA 在建模中采用了多组相空间源, 而不是简单的点源, 因此其模型可调试度更高, 与测量数据吻合度也更好^[16]。另外, ArcherQA 在处理机头中铅门和多叶准直器时也分别进行了建模和输运计算, 更贴近真实情况, 因此其剂量计算精度也更高。相比于基于模体的测量验证, ArcherQA 主要优势在于计算速度快, 效率高, 无需测量设备, 不占用机器时间。

对于磁共振引导在线治疗计划的独立验算, 以往的研究已经探索了基于机器跳数 (MU) 核查的独立验证, 基于 RayStation 治疗计划系统的独立

验算, 以及基于自主研发蒙特卡罗算法的独立验算等^[17-21]。RadCalc QA 软件是一种基于 MU 的独立验算工具, Graves 等^[17] 在 RadCalc QA 软件中创建了 Unity 的机器模型, 并实现了对在线治疗计划的验证, RadCalc 软件虽采用 ClarkSon 积分算法进行点剂量验算, 但是其未考虑到磁场对剂量的影响, 研究发现 186 个野内平均点剂量偏差为 $(170 \pm 12.4)\%$, 但是其平面剂量在 5 mm/5% 标准下仅有 67.3% 的 γ 通过率。Chen 等^[18] 考虑到磁场的影响, 改良了 ClarkSon 积分算法, 开发了名为 ArtQA 的独立验算软件, 研究发现平均 MU 差异 < 3%, 但是最大的 MU 差异高达 14%。国内外学者还探索了基于 RayStation CC 算法的 Unity 在线计划验证, 但是由于其未考虑到扫描线圈以及磁场效应的影响, 剂量计算精度相对有限^[19]。此外, Wang 等^[20] 探索了基于自主研发的蒙特卡罗算法的 Unity 在线计划的独立验算, ShooBrige 和 Baines^[21] 利用 MU2net 软件进行参考点剂量的二次计算。相比较而言, ArcherQA 在算法和建模方面精度更高, 比如采用了相空间源, 对治疗头内的铅门和多叶准直器进行建模和模拟计算, 支持磁场下的剂量计算, 以及对床板、扫描线圈、低温恒温器的精准建模等, 有效地提高了 ArcherQA 独立验算结果的准确性。

由于 Unity 在线计划流程复杂 (比如 ATS 涉及到结构重新勾画和计划重新优化等步骤), 加之 MR 扫描耗时较长, 相比于常规放疗, 使用 Unity 治疗的患者在治疗床上等待的时间明显增加。因此, 为了尽可能缩短患者等待时间, 降低出现差错的风险, 必须提高独立验算的效率。在本研究中所有独立验算都是基于 Nvidia Titan V 显卡平台完成的, 因为 ArcherQA 中使用了基于 GPU 的高性能蒙特卡罗算法, 可以在保证剂量精度的前提下, 尽可能提高计算的速度。根据统计结果, 所有 177 个在线计划在 ArcherQA 中的完成独立验算所需的时长范围为 50~150 s, 平均时长约为 108 s。另外, ArcherQA 软件还设计了数据自动导入和自动执行计算等功能, 以简化流程, 降低人为差错的概率, 进一步提高效率, 能够满足临床上对计算速度的高要求。

本项研究也存在一些不足之处, 比如仅使用了 ArcherQA 系统的治疗前独立验算功能, 但其实该软件还支持基于机器日志文件的独立验算, 可

以利用患者治疗后的日志文件, 并结合患者当天的治疗计划和影像数据进行治疗后独立验算, 这是另一种有效的补充验证手段。这些内容将会后续的研究工作中做进一步补充。另外, ArcherQA 在处理 ATS 计划时采用了与 Monaco 系统相同的合成伪 CT 的方法, 即根据原始计划 CT 中所勾画结构的平均电子密度来对 MR 影像进行相应的区域赋值, 进而基于赋值后的伪 CT 再进行剂量计算。这样的方法得到的伪 CT 精度较低, 很大程度上依赖于原始 CT 上勾画结构的准确性, 并且对于那些结构经常发生变化, 或者密度差异较大的区域会非常敏感, 比如肺部、胃肠道中的空腔、膀胱以及眼球等。这些都需要更为精准的伪 CT 来进行独立验算, 才可以作为准确的评估手段。目前比较热门的一个研究方向是利用深度学习技术将患者当天的 MR 图像转换成高精度的伪 CT 图像, 再结合每日 MR 图像上的勾画结构, 实现对当日在线治疗计划的精准验证和评估。但目前该方法还未在实际临床中得到应用, 期望在将来能结合到临床治疗流程中, 实现更为精准的剂量验证, 为患者提供更高质量的安全保障。

本研究探究了 ArcherQA 系统在 Unity 磁共振加速器治疗计划独立验算中的应用, 内容涉及到基于均匀水模体中的方野结果验证、基于 ArcCheck 模体的治疗前离线 QA 计划独立验算以及基于患者影像数据的在线计划独立验算。结果显示, ArcherQA 支持精准构建出 Unity 设备模型, 利用基于 GPU 加速的蒙特卡罗算法, 能够准确计算出 1.5T 高磁场下光子线的剂量分布, 可以用于磁共振引导自适应放疗中离线和在线治疗计划的独立验算, 是一种有效的补充验证手段, 能为 Unity 的患者治疗计划安全提供保障。

利益冲突 所有作者没有任何利益冲突, 未接受任何不当的职务或财务利益

作者贡献声明 陈美宁负责研究设计和撰写论文; 丁寿亮负责采集数据和统计分析; 李永宝、王彬、黄晓延对文章进行审阅; 程博、裴曦提供软件技术支持; 刘红冬负责研究设计和论文修改

参 考 文 献

- [1] Veresezan O, Troussier I, Lacout A, et al. Adaptive radiation therapy in head and neck cancer for clinical practice: state of the art and practical challenges [J]. Jpn J Radiol, 2017, 35 (2): 43-52. DOI: 10.1007/s11604-016-0604-9.

- [2] Gensheimer MF, Le QT. Adaptive radiotherapy for head and neck cancer: Are we ready to put it into routine clinical practice? [J]. Oral Oncol, 2018, 86: 19-24. DOI: 10.1016/j.oraloncology. 2018.08.010.
- [3] 黄伟, Li X. Allen, 李宝生. MRI 引导的自适应放疗技术进展 [J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26 (7): 819-822. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1004-4221. 2017.07.021.
Huang W, Li X. Allen, Li BS. Advances in magnetic resonance imaging-guided adaptive radiotherapy [J]. Chin J Radiat Oncol, 2017, 26 (7): 819-822. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1004-4221. 2017.07.021.
- [4] Lagendijk JJ, Raaymakers BW, van Vulpen M. The magnetic resonance imaging-linac system [J]. Semin Radiat Oncol, 2014, 24 (3): 207-209. DOI: 10.1016/j.semradonc. 2014.02.009.
- [5] Lagendijk JJ, Raaymakers BW, Raaijmakers AJ, et al. MRI/linac integration [J]. Radiother Oncol, 2008, 86 (1): 25-29. DOI: 10.1016/j.radonc. 2007.10.034.
- [6] Ding S, Liu H, Li Y, et al. Dosimetric accuracy of MR-guided online adaptive planning for nasopharyngeal carcinoma radiotherapy on 1.5T MR-linac [J]. Front Oncol, 2022, 12: 858076. DOI: 10.3389/fonc. 2022.858076.
- [7] Winkel D, Bol GH, Kroon PS, et al. Adaptive radiotherapy: the Elekta Unity MR-linac concept [J]. Clin Transl Radiat Oncol, 2019, 18: 54-59. DOI: 10.1016/j.ctro. 2019.04.001.
- [8] 丁寿亮, 刘红冬, 王彬, 等. 基于磁共振加速器系统头颈部肿瘤自适应放射治疗的剂量学评估 [J]. 中华放射医学与防护杂志, 2021, 41 (7): 499-503. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098. 2021.07.004.
Ding SL, Liu HD, Wang B, et al. Dose evaluation of adaptive radiotherapy using high-field MR-Linac systems for head and neck cancers [J]. Chin J Radiol Med Prot, 2021, 41 (7): 499-503. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 0254-5098. 2021.07.004.
- [9] Roberts DA, Sandin C, Vesanen PT, et al. Machine QA for the Elekta unity system: A report from the Elekta MR-linac consortium [J]. Med Phys, 2021, 48 (5): e67-e85. DOI: 10.1002/mp. 14764.
- [10] Kubota T, Araki F, Ohno T. Impact of the cavity on sinus wall dose in magnetic resonance image-guided radiation therapy [J]. Phys Med, 2020, 74: 100-109. DOI: 10.1016/j.ejmp. 2020.05.009.
- [11] 梁永广, 杨波, 汪之群, 等. 基于 TrueBeam 加速器的 Mobius3D 与 ArcherQA 放射治疗计划验证的临床应用与评估 [J]. 中国医学装备, 2022, 19 (10): 18-22. DOI: 10.3969/J. ISSN. 1672-8270. 2022.10.005.
Liang YG, Yang B, Wang ZQ, et al. Clinical application and assessment of the validation of Mobius3D and ArcherQA radiotherapy plans based on TrueBeam accelerator [J]. Chin Med Equip, 2022, 19 (10): 18-22. DOI: 10.3969/J. ISSN. 1672-8270. 2022.10.005.
- [12] Rohrer Bley C, Meier VS, Besserer J, et al. Intensity-modulated radiation therapy dose prescription and reporting: Sum and substance of the International Commission on Radiation Units and Measurements Report 83 for veterinary medicine [J]. Vet Radiol Ultrasound, 2019, 60 (3): 255-264. DOI: 10.1111/vru. 12722.
- [13] Kutcher GJ, Coia L, Gillin M, et al. Comprehensive QA for radiation oncology: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40 [J]. Med Phys, 1994, 21 (4): 581-618. DOI: 10.1118/1.597316.
- [14] Hissoiny S, Raaijmakers AJ, Ozell B, et al. Fast dose calculation in magnetic fields with GPUMCD [J]. Phys Med Biol, 2011, 56 (16): 5119-5129. DOI: 10.1088/0031-9155/56/16/003.
- [15] Li Y, Wang B, Ding S, et al. Feasibility of using a commercial collapsed cone dose engine for 1.5T MR-LINAC online independent dose verification [J]. Phys Med, 2020, 80: 288-296. DOI: 10.1016/j.ejmp. 2020.11.014.
- [16] Cheng B, Xu Y, Li S, et al. Development and clinical application of a GPU-based Monte Carlo dose verification module and software for 1.5T MR-LINAC [J]. Med Phys, 2023, 50 (5): 3172-3183. DOI: 10.1002/mp. 16337.
- [17] Graves SA, Snyder JE, Boczkowski A, et al. Commissioning and performance evaluation of RadCalc for the Elekta unity MRI-linac [J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20 (12): 54-62. DOI: 10.1002/acm2. 12760.
- [18] Chen GP, Ahunbay E, Li XA. Technical note: development and performance of a software tool for quality assurance of online replanning with a conventional Linac or MR-Linac [J]. Med Phys, 2016, 43 (4): 1713. DOI: 10.1118/1.4943795.
- [19] Li Y, Ding S, Wang B, et al. Extension and validation of a GPU-Monte Carlo dose engine for 1.5T MR-LINAC online independent dose verification [J]. Med Phys, 2021, 48 (10): 6174-6183. DOI: 10.1002/mp. 15165.
- [20] Wang Y, Mazur TR, Green O, et al. A GPU-accelerated Monte Carlo dose calculation platform and its application toward validating an MRI-guided radiation therapy beam model [J]. Med Phys, 2016, 43 (7): 4040. DOI: 10.1118/1.4953198.
- [21] Shoobridge AS, Baines JA. Evaluation of MU2net as an online secondary dose check for MR guided radiation therapy with the Elekta unity MR linac [J]. Phys Eng Sci Med, 2022, 45 (2): 429-441. DOI: 10.1007/s13246-021-01085-0.