

Portal Dosimetry 在 VitalBeam 加速器 VMAT 计划束流验证中的应用

易良波¹ 张栋¹ 郑勇¹ 曾维芮¹ 王钦² 吴含¹

1. 什邡市人民医院肿瘤科放疗室 四川德阳 618400

2. 首都医科大学附属北京世纪坛医院放疗科 北京 100038

摘要: 目的 应用 Portal Dosimetry (PD) 分析新装加速器 VitalBeam 运行初期容积旋转调强 (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 计划束流的稳定性。方法 随机选择新装加速器 VitalBeam 前 5 个月 53 例放疗患者 VMAT 计划, 每月 10–12 例, 每个计划 2–3 个弧, 非重复性单射野 112 个, 非重复性合成野 53 个, 做 PD 与 MatriXX 剂量验证; 再选择 10 例放疗计划连续 5 个月每月重复做分次间 PD 验证与 MatriXX 验证各 1 次, 合成野 50 个; MatriXX 在所有验证中仅做合成野验证。采用 American Association of Project Management (AAPM) 218 号 (3%/2mm) 报告与 AAPM 119 号 (3%/3mm) 报告分析 Gamma 通过率。结果 采用 PD 系统验证时在两种评价标准下非重复验证的单射野与合成野的平均值均大于 95%; 在评价标准为 3%/2mm 时, 仅 1 个非重复性单射野 Gamma 通过率小于 95%, 2 个非重复性合成野 Gamma 通过率小于 95%, 而标准为 3%/3mm 时 Gamma 通过率都大于 95%。10 例 VMAT 计划每月重复 1 次 PD 验证时合成野在评价标准为 3%/2mm 时 Gamma 通过率平均值都大于 95%, 且 $P > 0.05$, 无统计学意义, 而采用 MatriXX 验证时当评价标准为 3%/2mm 时计划 H 出现 3 次 Gamma 通过率小于 95%, 其余都大于 95%; 当评价标准为 3%/3mm 时两种验证方式的 Gamma 通过率都大于 95%。结论 VMAT 放疗束流稳定性作为放疗疗效与放疗毒副反应的重要影响因素, 新加速器运行初期应做好复杂束流的质控, PD 验证系统可用于新加速器 VitalBeam VMAT 计划束流的质控。

关键词: 加速器 VitalBeam; VMAT; PD 验证系统; MatriXX; 剂量验证

引言

OttoK 首次提出 VMAT 放疗技术^[1] 具有更适宜临床应用的优点, 如高剂量梯度、高适型度和高效率等, 成为了现代放疗的主流技术^[2–3], 但放疗计划的复杂性也随之增加^[4–5], 而每例放疗计划的精准投递是把控放疗剂量准确性、有效性和毒副反应的关键环节^[6–8]。因此, 在放疗前进行放疗计划剂量验证已成为放疗全流程质量保证中不可或缺的一部分^[9–10]。近两年, 高端新放疗设备开始普及到基层医疗机构, 基层放疗计划验证设备量存在局限性; 然而新直线加速器运行初期可能会经历一个短暂的剂量飘逸期, 通常需要 2–3 年才能达到稳定状态^[11–12]。因此, 检测 VMAT 计划束流的稳定性对于确保治疗的精确性、安全性以及放疗毒副反应至关重要。Portal Dosimetry (PD) 验证系统由非晶硅电子射野影像装置 (Electronic Portal Imaging Device, EPID) 采集束流并通过 PD 软件对放疗计划进行剂量验证和结果分析^[13], 已被越来越多的放疗验证所采用^[14–15]; 时飞跃等人

采用 PD 验证系统对宫颈癌以及鼻咽癌的放疗计划进行验证, 证实 PD 验证系统在计划验证中具有较强的实用性^[14,16], 而且刘凌湘等人进一步证实 PD 系统具有较好的验证精度, 可用于立体定向放疗计划验证^[17]。MatriXX 作为第三方验证工具已常用于计划验证, 是临床放疗计划验证的重要手段, 具有重要参考价值。

本研究旨在采用 PD 验证系统对新直线加速器运行初期的 VMAT 放疗计划进行验证, 同时采用 MatriXX 验证系统作对比, 以评估 PD 验证系统的可靠性与稳定性, 为即将采用同类设备开展复杂放疗技术又无第三方放疗计划验证设备的机构提供放疗计划验证方法的参考, 以提高放疗疗效与降低放疗毒副反应。

1 资料与方法

1.1 患者资料

随机选取 2023 年 11 月 7 日至 2024 年 3 月 31 日 VMAT 放疗计划共计 53 例进行放疗前计划验证, 男性 30 例, 女性

23 例, 年龄 36–84 岁, 中位年龄 63 岁, 其中包括头部 13 例、头颈 5 例、胸部 19 例、腹部 4 例、盆腔 12 例, 所有患者均了解并签署放疗相关知情同意书, 本研究经什邡市人民医院伦理委员会审批通过 (批准文号: 202449)。

1.2 方法

每位患者均为仰卧位, 采用热塑膜 (中国上海 Gray 公司) 固定人体于 Orfit 体位固定板 (美国 Orfit 公司), 采用德国西门子 CT 机做 CT 定位。使用放疗计划系统 Eclipse16.1 (美国瓦里安公司) 设计 VMAT 计划, 每个部位使用 2–3 个射野; 头部选择 6MV, 剂量率 600MU/min, 头颈选择 6MV–FFF, 剂量率 1400MU/min; 食管、直肠、宫颈以及骨转移选择 10MV, 剂量率 600MU/min; 所有部位均采用 AXB 算法计算, 优化网格 1.25mm。使用美国瓦里安直线加速器 VitalBeam (美国瓦里安公司), 120 片多叶光栅 (Multi-Leave Collimators, MLC, 40 对 0.5cm, 20 对 1cm)。连续 5 个月每月随机选择 10–12 个新放疗计划 (非重复性射野 112 个, 非重复性合成野 53 个。) 在治疗前做 PD 与 MatriXX (德国 IBA 公司) 剂量验证; 其次在 11 月选择 10 个不同放疗计划, 分别命名为 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J, 重复性合成野 50 个, 每月重复做分次间 PD 与 MatriXX 验证各 1 次。因 MatriXX 功能有限, 仅做合成野剂量验证。

1.3 PD 验证

VitalBeam 自带电子射野影像装置 (Electronic Portal Imaging Device, EPID), 照射面积 $43 \times 43\text{cm}^2$, $1280 \times 1280\text{pixel}$, 加速器调试期间已对 PD 剂量验证系统做剂量标定, 每日做 MPC 与晨检仪 (德国 IBA 公司) 质控, 每月分次间验证前做绝对剂量校准 (TRS 398 报告), 确保加速器输出绝对剂量与 EPID 板符合临床使用要求。在 TPS 系统中建立 VMAT 验证计划, 在直线加速器操作系统里选择 Patient QA Mode 模式执行放疗计划 QA, 把 EPID 采集到的剂量分布信息通过射野剂量图像预测算法 (Portal Dose Image Prediction, PDIP) 重建二维剂量, 用 PD 系统对重建二维剂量与 Eclipse16.1 TPS 计划系统对剂量计算结果做 Gamma 分析。

1.4 MatriXX 验证

采用 MatriXX 验证系统联合 Miniphotom 配合角度传感器做 VMAT 放疗计划剂量验证, 照射野面积 $24.4 \times 24.4\text{cm}^2$, 圆柱型空气电离室, 4.5 (直径) $\times 5$ (高)

mm2, 体积 0.07cm^3 , 1020 个, $0.1\text{--}20\text{Gy/min}$, 采用放疗计划剂量验证 MyQA 分析软件 (德国 IBA 公司)。在放疗计划剂量验证前对 MatriXX 做绝对剂量校准, 对角度传感器做 0° 与 90° 校准, 确保每次验证流程符合要求。

1.5 数据评价方法

AAPM TG–119 号报告推荐^[18], 在评价标准为 3% (剂量误差)/3mm (距离误差), 最小剂量阈值为 10% 的条件下, 计划验证的 Gamma 通过率 $\geq 90\%$ 即符合临床要求。AAPM TG–218 号报告建议使用 3% (剂量误差)/2mm (距离误差) 评价标准, 最小剂量阈值为 10% 的条件下, Gamma 通过率容差限值 $\geq 95\%$, 干预限值 $\geq 90\%$ 判定计划验证是否通过。在绝对剂量模式下采用该 2 种评价标准分析每个单射野与合成野 Gamma 通过率。

1.6 统计学分析

采用 SPSS 27.0 软件分析非重复性单射野与合成野平均值与标准差, 置信区间为 95%, 再采用折线图分析非重复性单射野与合成野以及用表格表示每月重复验证的分次间合成野的 Gamma 通过率。连续 5 个月每月随机选择不同放疗计划验证的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 每组数据都不符合正太分布时采用 ANOVA 检验分析, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 非重复性验证数据分析

采用 PD 验证系统时结果如表 1 所示, 在两种评价标准下非重复性单射野与合成野的 Gamma 通过率平均值均大于 95%, 标准差偏小; 如图 1、2 所示, 在评价标准为 3%/2mm 时, 仅 1 个非重复性单射野 Gamma 通过率小于 95%, 2 个非重复性合成野 Gamma 通过率小于 95%, 而在标准为 3%/3mm 时 PD 验证 Gamma 通过率都大于 95%; 说明新加速器 VitalBeam 运行前 5 个月, PD 验证 VMAT 计划束流具有较高精准性。

MatriXX 与 PD 验证 VMAT 放疗计划非重复性合成野结果如表 2 所示, Gamma 通过率平均值都大于 95%, $P > 0.05$, 差异无统计学意义, 证明新加速器 VitalBeam 运行前 5 个月 PD 验证的稳定性都满足临床质控需求。

2.2 重复性验证数据分析

连续 5 个月每月 1 次合成野重复验证, 结果如表 3–6 所示, 当评价标准为 3%/2mm 时仅计划 H 在采用 Matrixx 验证时出现 3 次 Gamma 通过率小于 95% 但大于 90%, 而 PD

验证合成野时 Gamma 通过率都大于 95%；当评价标准为 3%/3mm 时两种验证方式的 Gamma 通过率都大于 95%，都符合临床质控要求，从而证实 PD 验证系统适合用于 VMAT 束流验证。

表 1 PD 验证非重复性合成野与单射野的平均值与标准差($\bar{x} \pm s, \%$)

评价标准	非重复性合成野	非重复性单射野
3%/2mm	99.31 $\pm$ 2.12	99.64 $\pm$ 1.19
3%/3mm	99.76 $\pm$ 0.68	99.89 $\pm$ 0.39

表 2 PD 与 MatriXX 分别验证每月不同 VMAT 放疗计划合成野的通过率($\bar{x} \pm s, \%$)

时间	PD 验证		MatriXX 验证	
	3%/2mm	3%/3mm	3%/2mm	3%/3mm
11 月	99.18 $\pm$ 1.57	99.84 $\pm$ 0.32	99.20 $\pm$ 0.71	99.81 $\pm$ 0.24
12 月	99.83 $\pm$ 0.27	99.98 $\pm$ 0.04	99.20 $\pm$ 1.18	99.77 $\pm$ 0.57
1 月	99.92 $\pm$ 0.09	100.00 $\pm$ 0.00	99.31 $\pm$ 0.72	99.91 $\pm$ 0.16
2 月	98.87 $\pm$ 2.19	99.71 $\pm$ 0.62	98.84 $\pm$ 1.74	99.25 $\pm$ 1.26
3 月	98.78 $\pm$ 2.38	99.54 $\pm$ 0.99	98.97 $\pm$ 1.80	99.53 $\pm$ 1.10
F	0.807	1.250	0.212	0.966
P	0.527	0.303	0.930	0.435

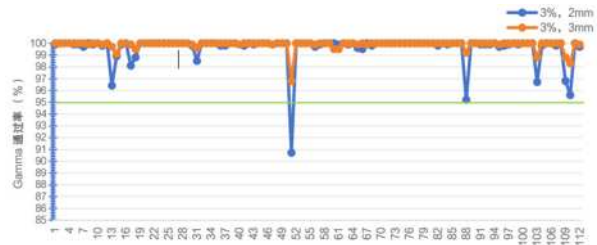


图 1 PD 验证连续 5 个月非重复性单射野 Gamma 通过率



图 2 PD 验证连续 5 个月非重复性合成野 Gamma 通过率

表 3 10 例 VMAT 放疗计划每月分次间合成野重复 PD 验证 Gamma 通过率($\bar{x} \pm s, \%$) (3%/2mm)

时间	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
11 月	99.9	100	100	99.9	100	99.9	96.6	99.7	95.8	100
12 月	100	100	100	99.9	100	99.9	99.9	100	99.4	100
1 月	100	100	100	99.9	100	99.7	99.9	100	99.5	100
2 月	100	98.5	100	100	100	100	100	100	99.7	100
3 月	100	98.2	100	100	100	100	100	100	99.8	100

表 4 10 例放疗计划每月分次间合成野重复 Matrixx 验证 Gamma 通过率($\bar{x} \pm s, \%$) (3%/2mm)

时间	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
11 月	98.7	98.9	98.8	100	99.9	99.3	98.3	100	98.2	99.9
12 月	98.6	100	98.9	100	99.9	97.8	97.6	91.3	99.5	99.8
1 月	99.1	96	99	100	99.9	98.3	98.3	92.9	99.5	99.8
2 月	98	99.3	98.2	100	99.7	97.4	97.3	98.8	99.5	99.8
3 月	99.8	100	99.3	100	99.9	99.4	96.3	93.7	99.7	99.5

表 5 10 例放疗计划每月分次间合成野重复 PD 验证 Gamma 通过率($\bar{x} \pm s, \%$) (3%/3mm)

时间	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
11 月	100	100	100	100	100	100	99.4	100	99.1	100
12 月	100	100	100	100	100	100	100	100	99.9	100
1 月	100	100	100	100	100	100	100	100	99.9	100
2 月	100	99.7	100	100	100	100	100	100	99.9	100
3 月	100	99.6	100	100	100	100	100	100	100	100

表 6 10 例放疗计划每月分次间合成野重复 Matrixx 验证 Gamma 通过率($\bar{x} \pm s, \%$) (3%/3mm)

时间	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
11 月	99.4	100	99.6	100	100	99.9	99.7	100	99.5	100
12 月	99.5	100	99.4	100	99.9	99.9	99.3	95.7	100	100
1 月	99.7	98.2	99.4	100	99.9	99.9	99.7	96.1	100	100
2 月	99.2	100	99.2	100	99.9	99.4	100	100	100	100
3 月	100	100	99.7	100	99.9	99.9	98.7	95.7	100	100

注：表 3-6 表示选择 11 月 10 例 VMAT 计划分别命名为 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J，每月重复验证 1 次。

VMAT 计划进行束流精准验证，结果证实 PD 验证 VMAT 放疗计划的通过率均满足临床要求；本研究同时采用常用于临床 VMAT 计划验证的 MatriXX 再次验证，Gamma 通过率均满足临床质控要求，该研究结果与 Abu Kausar 等^[19]研究结果一致，进一步说明 PD 作为新加速器 VMAT 放疗工具，具有可行性，可有效保障放疗计划精准执行。

本研究中 PD 验证非重复单射野与合成野 Gamma 通过率平均值均大于 95%，标准差偏小；在评价标准为 3%/2mm 时，仅 1 个非重复性单射野通过率小于 95%，而在标准为 3%/3mm 时所有通过率都大于 95%；在评价标准为 3%/2mm 时，仅 2 个非重复性合成野通过率小于 95%，而在标准为 3%/3mm 时所有通过率都大于 95%，证明 PD 验证具有好的精准性与稳定性，符合临床放疗质控要求。同组 10 例放疗计划每月分次间重复验证时合成野 Gamma 通过率都大于

95%; MatriXX 做合成野验证的结果与合成野 PD 验证通过率一致, 均大于 95%, 说明在新加速器 VitalBeam 运行前半年, 在没有第三方的验证工具的状况下, PD 系统可用于验证 VMAT 计划剂量束流验证。

本次研究仅限于前 5 个月随机抽取的 VMAT 放疗计划, 其对新直线加速器 Vitalbeam 执行 VMAT 放疗计划的长期精准性与稳定性的监控存在不足, 可延长 1-2 年进行验证与分析, 然而加速器束流的精准性与稳定性受诸多因素影响, 因此还需要加强其他因素的质控与管理。高端放疗设备已逐步普及到基层医院, 但是放疗设备与功能配置因多因素存在差异, 导致放疗全流程的质控方法存在差异, 而同款同功能配置的放疗设备, 其出厂设置基本一致。放疗质控设备采购流程复杂且价格昂贵, 本研究可为暂时没有第三方放疗计划验证设备的机构提供 VMAT 放疗计划束流质控参考, 从而保障放疗流程质控需求。

综上所述, 为了有效提高放疗疗效与降低放疗毒副反应, 需严格把控复杂放疗计划束流的稳定性, 新加速器 VitalBeam 运行前 5 个月, PD 系统适用于 VMAT 计划束流验证, 可为同款新放疗设备在临床放疗全流程质控方面提供参考, 有效保障放疗的安全性与可靠性。

利益相关声明: 本文所有作者一致声明不存在利益冲突。作者贡献说明: 易良波: 实验设计与实施, 论文撰写与修改; 岳海振: 提出研究思路; 张栋、郑勇: 执行实验, 数据采集; 王钦: 论文修改。吴含: 提供患者病例与放疗方案审核。

参考文献:

[1] Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310 - 317.

[2] Teoh M, Clark CH, Wood K, et al. Volumetric modulated arc therapy: a review of current literature and clinical use in practice[J]. Br J Radiol, 2011, 84(1007): 967 - 996.

[3] Hunte SO, Clark CH, Zyuzikov N, et al. Volumetric modulated arc therapy (VMAT): a review of clinical outcomes—what is the clinical evidence for the most effective implementation?[J]. Br J Radiol, 2022, 95(1136): 1 - 22.

[4] PARK J M, KIM J, PARK S Y. Modulation indices and plan delivery accuracy of volumetric modulated arc therapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(6): 12 - 22.

[5] 李光俊, 李衍龙, 钟仁明, 等. VMAT 计划复杂性的定量评估方法探讨[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2015, 24(6): 684 - 687.

[6] Mike Oliver, Isabelle Gagne, Karl Bush, et al. Clinical significance of multi-leaf collimator positional errors for volumetric modulated arc therapy[J]. Radiotherapy and Oncology, 2010, 97(3): 554 - 560.

[7] SB Crowe, T Kairn, N Middlebrook, et al. Examination of the properties of IMRT and VMAT beams and evaluation against pretreatment quality assurance results[J]. Physics in Medicine & Biology, 2015, 60(6): 2587 - 2601.

[8] Fogliata A, Clivio A, Fenoglietto P, et al. Quality assurance of Rapid Arc in clinical practice using portal dosimetry[J]. Br J Radiol, 2011, 84(1002): 534 - 545.

[9] H Lin, S Huang, X Deng, et al. Comparison of 3D anatomical dose verification and 2D phantom dose verification of IMRT/VMAT treatments for nasopharyngeal carcinoma[J]. Radiation Oncology, 2014(9): 71.

[10] Benjamin E. Nelms, Jeff A. Simon. A survey on planar IMRT QA analysis[J]. Radiation Oncology Physics, 2007, 8(3): 76 - 90.

[11] Md Tofiz Uddin. Quality control of modern linear accelerator: Dose stability long and short-term[J]. Proceedings of IPAC, 2012, WEPPD061.

[12] Mika Kapanen, Mikko Tenhunen, Tuomo Hämäläinen, et al. Analysis of quality control data of eight modern radiotherapy linear accelerators: the short- and long-term behaviours of the outputs and the reproducibility of quality control measurements[J]. Physics in Medicine & Biology, 2006, 51(14): 3581 - 3592.

[13] Dogan N, Mijneer BJ, Padgett K, et al. AAPM Task Group Report 307: Use of EPIDs for Patient-Specific IMRT and VMAT QA[J]. Med Phys, 2023, 50(8): e865 - 903.

[14] 时飞跃, 王敏, 赵紫婷, 等. 鼻咽癌调强计划分野和大野 Portal Dosimetry 剂量验证的分析比较[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(4): 9 - 12.

[15] Rowshanfarzad P, Sabet M, Barnes MP, et al. EPID-based verification of the MLC performance for dynamic IMRT and VMAT[J]. Med Phys, 2012, 39(10): 6192 - 207.

[16] 时飞跃, 吕懂霞, 付林, 等. 宫颈癌调强计划 Portal

Dosimetry 剂量验证中拼接野的应用分析[J]. 中国医疗设备, 2024, 39(10): 73-78.

[17] 刘凌湘, 黄贤海, 张庆钊, 等. SRS MapCHECK、ArcCHECK 及 Portal Dosimetry 在立体定向治疗计划剂量验证对比[J]. 中国医疗设备. 2022, 37(11): 67-70.

[18] Zhang J, Jiang D, Liu H, et al. Analyzation of the local confidence limits for IMRT and VMAT based on AAPMT G119 report[J]. Med Dosim, 2020, 45(1): 66-72.

[19] Abu Kausar, Karthick R. Mani, Hasin A. Azhari, et

al. Patient-specific quality control for intensity modulated radiation therapy and volumetric modulated arc therapy using electronic portal imaging device and two-dimensional ion chamber array[J]. Journal of Radiotherapy in Practice, 2018, 18(1): 1-6.

作者简介: 易良波 (1987—), 女, 汉族, 四川省德阳市什邡市, 硕士研究生, 什邡市人民医院, 放疗室主任, 放疗物理技术方向。

基金项目: 德阳市科技计划项目 (2023SZZ094)、(2023SZZ095)。