



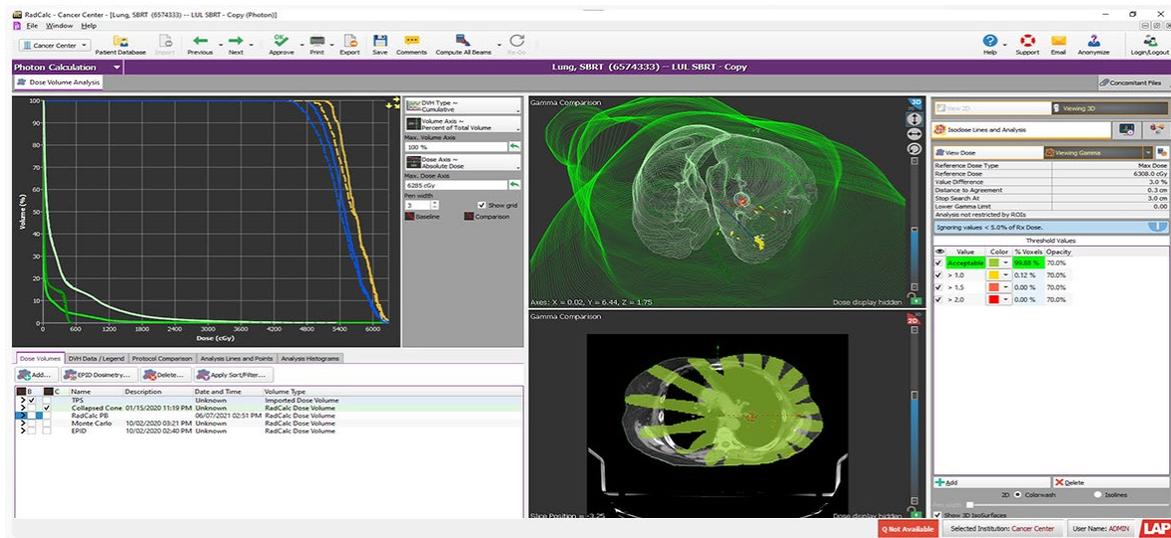
RadCalc 3D 蒙特卡罗算法和 3D 筒串卷积算法

RADCALC

本白皮书旨在探讨 RadCalc 3D 剂量算法。RadCalc 7.0 版首次采用 3D 筒串卷积模块，测试版于 2019 年 8 月发布，临床版于 11 月发布。RadCalc 7.1 版采用 3D 蒙特卡罗模块，测试版于 2019 年 9 月发布，临床版于 2020 年 1 月发布。

为了验证 RadCalc 新 3D 模块是否提高了准确性和可靠性，研究人员进行了广泛的临床评估。

RadCalc 3D 模块采用兼具筒串卷积叠加算法和 BEAMnrc 蒙特卡罗程序的单一模型，无论射野大小为何，都能确保可信度和可靠性。





目录

1.1 引言	3
1.2 RadCalc 主要的 3D 功能	3
1.3 临床评估证据	4
1.3.1 3D 筒串卷积模块	5
1.3.2 3D 蒙特卡罗模块	6
1.4 其他 3DCC 和 3DMC 科研文章	7



1.1 引言

近 25 年来，筒串卷积叠加算法已成为治疗计划系统 (TPS) 最常用的算法，也是最值得信赖的基于模型的剂量计算算法。

筒串卷积剂量计算过程以 1 mm 精度计算入射通量。通过对单能 PDD 曲线加权拟合，并使用一组射束硬化因子来考虑光谱随深度的变化，在 10 cm 深度使用多能剂量核进行优化，提升计算速度。然后，使用与入射通量相同的 1 mm 精度计算 TERMA。剂量计算过程中还会使用电子污染参数。剂量网格中每个位置上的沉积能量通过 256 个或 160 个筒串卷积核计算得出，然后将能量相加，得出体积内每个体素的最终剂量。

蒙特卡罗是剂量计算准确性方面公认的黄金标准，我们的目标是让最不确定的计划剂量计算变得可信。

现在的蒙特卡罗算法得益于更经济的计算能力和强大的方差缩减技术。这些技术可以缩减计算时间。其中定向韧致辐射分裂就是这样一种技术，它只传输有助于产生有用辐射场的光子。RadCalc 采用的方差缩减技术在不牺牲准确性的情况下，极大程度缩短了剂量计算时间。对于小型异质病例以及大剂量梯度的高度调制计划（更注重保留正常健康组织）的剂量体积计算，RadCalc 蒙特卡罗算法更有优势。

1.2 RadCalc 主要的 3D 功能

RadCalc 提供用于精确高效验证的高级工具，优化临床实践。它可以与 TPS 无缝集成，提升工作流程效率，让临床医生能够专注于患者护理。

DVH 协议

您可以通过 RadCalc 中的分析屏幕定义任意数量的 DVH 协议。再使用 RadCalc 中的规则，即可自动选择不同的 DVH 协议应用于特定计划。RadCalc 会自动检查 TPS 和 RadCalc 3D 剂量是否达到关键结构的 DVH 目标。分析报告会自动附加至您的验证方案，并通过电子邮件发送至您的工作站，或是发送至服务器上您选择的路径。

3D 剂量分析

RadCalc 提供百分剂量偏差分析工具、DVH 工具、吻合距离分析 (DTA) 工具、伽马分析工具，可评估 3D 计算结果。功能包括 RadCalcAIR（自动化导入和报告），提供全自动化的计划导入、计算、3D 剂量分析和报告生成流程。如果治疗计划没有通过预设的伽马分析接受标准，RadCalc 的全自动化流程会即时通知您。RadCalc 允许根据用户定义的规则，自动应用不同的伽马计算默认值和接受标准。



自动建模

RadCalc 3D 模块可以将自动射束调试流程与用户测量数据结合起来使用，生成定制的射束模型；用户只需按下一个按钮，即可根据现有数据生成必要的模型。

简串卷积建模流程会充分利用 RadCalc 中的现有测量数据，因此无需用户提供新数据。

蒙特卡罗建模流程则会部分使用 RadCalc 中的现有测量数据。简单匹配过程会使用这些数据，根据预先计算的一组 PDD 和离轴剂量分布曲线数据来确定最佳匹配的 RadCalc 蒙特卡罗机器文件。确定了这一点后，RadCalc 就会执行参考剂量计算，计算将沉积能量转换为患者吸收剂量的参考剂量转换因子。

在调试过程中，查看和分析标准射束几何形状都可以在一个简单的用户界面轻松完成。

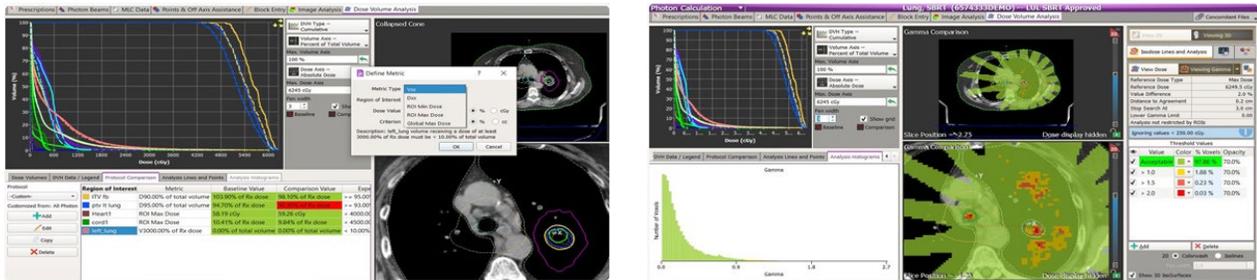


图1: RadCalc 主要的3D 分析功能

1.3 临床评估证据

RadCalc 采纳了美国医学物理学家协会 (AAPM) 的新建议，不断发展，提高自身的准确性和可靠性。其中包括 AAPM TG-218 和 TG-219 的建议^{1,2}。

虽然标准不断发展，但达到 $\pm 5.0\%$ 误差范围仍然是基本标准，这有助于确保性能的一致性。一直以来，RadCalc 开发团队都致力于尽量缩窄这些误差，力求在剂量验证中实现最高水平的精度³。RadCalc 后续版本搭载的强大临床评估功能和持续的性能改进，就是不断追求准确性的体现。



RadCalc 不断采纳严格的标准并顺应新的准则，证明了自身是放射治疗领域值得信赖且可靠的工具，同时确保患者获得更安全、更有效的治疗。

3D 筒串卷积模块

3D 蒙特卡罗模块

1.3.1 3D 筒串卷积模块

3D 筒串卷积算法

筒串卷积算法源自从 Math Resolutions, LLC 公司收购的 Dosimetry Check（剂量验证）技术，现归 LifeLine Software, Inc. 公司全资拥有。

RadCalc 支持使用 CT 影像，可将 CT 体素从亨氏单位（HU）转换为密度，便于进行 3D 筒串卷积剂量计算。

计算所用的通量文件基于自 2001 年 RadCalc 4.0 版发布以来一直使用的通量。剂量算法会根据 CT 值计算得出的密度考虑通过患者的初级辐射（即通量）的衰减过程。此过程类似于自 6.1 版起提供的兴趣区域模块中使用的光线轨迹。筒串卷积是 256 个方向的光线轨迹（自 RadCalc 7.3.2.0 版本起为 160 个方向），覆盖剂量兴趣点周围的 3D 空间，用于确定沿每个筒串卷积的各个步骤沉积到剂量兴趣点的能量。使用 3D 剂量点矩阵定义患者的整个区域，从而确定 3D 剂量分布。

验证测试最初在 CIRS 的 IMRT Thorax 异质模体上进行⁴。该测试旨在将使用筒串卷积算法计算出的剂量与测量点测得的剂量进行比较，以此验证算法计算肺接收剂量的准确性。

使用带不均匀性嵌件物的模体来创建 CT 值与密度（单位为 gm/cc）的曲线。由于用于 CT 扫描的 kVp 能量 X 射线射束硬化，模体水当量组织材料的密度从 1.00 到 1.009 不等。肺部区域测得的密度为 0.156，骨骼区域测得的密度为 1.482。在模体内，这些值会因位置而异，但会显示出三种量级的密度。模体使用两种不同的治疗计划进行照射：四野盒式照射和 360 度弧照射；两者均使用相同的等中心。

四野盒式照射计划由前后左右四个射野构成，每个射野大小 10x10 cm，各 200 机器跳数（Monitor Unit，MU）。

360 度弧照射方案由单个 10x10 cm 大小的全弧射野构成，共有 200 MU。筒串卷积计算以每 10 度有一个射束模拟了旋转计算。

在瓦里安医用直线加速器（美国加州瓦里安公司）上以 6 MV 的能量照射模体。使用 PTW 31006 型（德国弗莱堡市 PTW 公司）PinPoint 电离室在左肺等中心点处测量剂量。在瓦里安 Eclipse 治疗计划系统上使用 AAA 和 Acuros 两种不同算法计算剂量，进行比较。



四野盒式照射，等中心剂量 (cGy):

射野	Meas (cGy)	RadCalc 筒串卷积 (cGy)	百分偏 差 (%)	AAA (cGy)	百分偏 差 (%)	Acuros (cGy)	百 分 偏 差 (%)
前 (0)	194	192.4	-0.80%	193.5	-0.30%	188.9	-2.70%
后 (180)	177	175.1	-1.10%	176	-0.60%	172.5	-2.60%
左 (90)	189.1	187	-1.10%	184.8	-2.30%	183.3	-3.20%
右 (270)	123.5	124.9	1.10%	113.9	-8.40%	120.8	-2.20%
总计	683.6	679.4	-0.60%	668.2	-2.30%	665.5	-2.70%

360 度弧照射，等中心剂量 (cGy):

射野	Meas (cGy)	RadCalc 筒串卷积 (cGy)	百分偏 差 (%)	AAA (cGy)	百分偏 差 (%)	Acuros (cGy)	百 分 偏 差 (%)
弧形	169	167	-1.20%	162.9	-3.70%	164.4	-2.80%

表 1: 上述数据表明，在最复杂的放射肿瘤治疗方案（肺接收剂量）中，所有射束的 RadCalc 筒串卷积算法计算值与测量值之间的百分偏差在 +/-1.2% 以内。相比之下，瓦里安的 AAA 算法偏差为-2.3%，Acuros 算法偏差为-2.7%。对于弧照射方案，瓦里安的 AAA 算法偏差为-3.7%，Acuros 算法偏差为-2.8%；RadCalc 筒串卷积算法偏差为-1.2%。

对这些筒串卷积计算结果的评估表明，标准模体计算结果均在预期值的 2% 以内。此外，客户出于测试目的免费提供的匿名患者数据均显示点剂量比较结果的偏差在 2% 以内，并且这些方案的伽马分析指数均在 90% 以上。

1.3.2 3D 蒙特卡罗模块

3D 蒙特卡罗算法

用于执行 3D 剂量计算的蒙特卡罗算法现在以现成软件的形式提供：BEAMnrc（又名 EGSnrc）和 DOSExyz。这些软件程序由加拿大国家研究委员会开发，比较所有剂量计算算法之后这两种被广泛视作标准算法。BEAMnrc 和 DOSExyz 虽不是 LifeLine Software, Inc. 开发的，但在剂量计算过程中也会用到它们。这两款软件用于模拟粒子输送，通过机器部件，再输送到患者体内。

剂量计算过程非常简单。首先使用 CT-密度表将 CT 数据集转换为密度和材料矩阵（使用空气和水两种材料）。除此之外，以 BEAMnrc 和 DOSExyz 所需的格式写入射束参数。这些参数用于执行蒙特卡罗模拟，形成剂量矩阵，展示每个体素沉积的能量。接着将此剂量矩阵转换为 RadCalc 的内部格式。转换过程会将参考剂量转换因子应用于沉积能量，将沉积能量转换为吸收剂量。

80 多例患者计划被用于蒙特卡罗计算测试，测试结果在可接受的范围内，RadCalc 计算结果与治疗计划系统之间的平均剂量差异为 1% 至 3%，同时伽马通过率也很高（即使 3%/3mm 伽玛通过率为 96% 及以上）。



1.4 其他 3DCC 和 3DMC 科研文章

RadCalc 具有出色的准确性，采用兼具筒串卷积叠加算法和 BEAMnrc 蒙特卡罗程序的单一模型，无论射野大小为何，都能确保可信度和可靠性。下文对两篇论文进行了总结：

1: 根据测量数据评估 RadCalc 3DCC 算法⁵

- **研究目标：**根据临床数据验证 RadCalc 3D 模块 (3DCC)。
- **方法：**主要使用水模体将 (3DCC) 剂量计算结果与各种治疗方案中的测量数据进行比较。
- **关键指标：**伽玛通过率，比较计算剂量与测量剂量。
- **结果：**研究结果显示，在大多数病例中，RadCalc 3DCC 计算数据与测量数据之间呈现高度的一致性。
- **主要发现：**
 - 根据治疗方案的复杂程度，3%/3mm 伽玛通过率为 90% 到 98%。
 - 对于高度调强计划和组织密度不均匀的病例，性能略差。

总结：

遵照国际准则和已发布的标准（例如 TG 114 和 TG 219），对简单和复杂几何形状、是否存在异质性、各种射野尺寸的计划都采用直接测量的方式验证了 RadCalc 3D 筒串卷积算法的准确性。使用用户的自定义射束数据进行了建模，并独立验证了机器特性，包括附加光野射野偏移。使用 NVIDIA Tesla K20 和 RTX 3080 GPU 进行了计算，证明了 RadCalc 硬件的灵活性。

评估了 RadCalc 7.1.4.1 版中的筒串卷积算法，以及 7.2.2.0 版中实施的更改。此次研究并未评估 RadCalc 7.2.3.1 版中的最新改进。不过，毫不意外的是，即使使用 7.2.2.0 版，复杂的 IMRT 和 VMAT 计划也符合 TG 219 的建议，其中 IMRT 计划使用 2%/2mm 标准，最复杂的鼻咽 VMAT 计划使用 3%/2mm 标准。总体而言，在调强计划剂量梯度陡峭的区域内，DTA 小于 1 mm 的一致性特别好。

开野的 PDD 比较偏差小于 0.5%，中心 80%区域的离轴比 (OAR) 在 2% 以内。此外，研究人员还对异质模体进行了剂量结果比较，包括水面上方 2 cm 阶梯式模体（采用正面和斜射束几何形状），以及利用肺、骨、空气和纵隔几何形状，计算结果与测量剂量结果偏差通常小于 3.5%。这些结果优于均匀介质中简单开野或 MLC 静态野推荐的 2.5% 剂量偏差，以及异质计算剂量超过 5% 偏差时建议的干预限值。



2: 基于新款 RadCalc 3DMC 的治疗前验证工具的调整和验证⁶

- **研究目标:** 开发并验证 RadCalc 蒙特卡罗 (3DMC) 模块, 用于放射治疗前验证。
- **方法:** 基于模体和患者数据 的 3DMC 计算剂量值与临床测量剂量值之间的比较。对 70 个 VMAT 计划进行了验证。
- **关键指标:** 伽玛通过率, 通过调整附加光野射野偏移 (ARLF) 参数来实现剂量准确性。
- **结果:**
 - 模型调整后所有能量类型的 3%/3mm 伽玛通过率均高于 95%。
 - 由于组织不均匀的问题得到了更好的处理, 复杂病例 (尤其是肺癌患者) 的剂量准确性得到提高。
- **主要发现:**
 - 与 3DCC 相比, 尤其是在复杂的治疗部位中, RadCalc 3DMC 具有更高的准确性。
 - ARLF 调整显著提高了 3DMC 计算结果与测量数据之间的一致性。

总结:

对数据模型进行微调后, 使用 2%/2mm/50%剂量阈值的伽马标准, 将 RadCalc 3D 蒙特卡罗算法基于患者异质 CT 数据集的二次剂量验证结果与治疗床上的均质模体测量结果进行了比较。使用 70 个 VMAT 计划对 RadCalc 3D 蒙特卡罗算法进行临床验证 (主要能量类型: 6x、10x、6FFF 和 10FFF), 与 Eclipse v13.7 上的 AAA 和 Acuros XB 算法结果进行比较。在这 70 个计划中, 20 个计划用于调整, 其余 50 个计划用作验证集。

RadCalc MC 建模流程允许用户选择最适合三个开野的光斑大小和平均能量。RadCalc 会根据此光斑大小和平均能量的组合, 来加载 BEAMnrc 建模的机器, 建模每个物理部件。RadCalc 独特的自动建模方法提供近乎瞬时的建模结果, 且只需微调一个参数: 附加光野射野偏移 (ARLF), 即瓦里安术语中的剂量叶片间隙 (DLG)。

作者引用了每种能量的 DLG 以及模型调整后得到的 ARLF。作者展示了 RadCalc 蒙特卡罗算法与 Eclipse 算法的准确性对比, 以及治疗床上均质模体测量结果与 Eclipse 算法结果的对比。正如即将发表的 TG 360 号报告的主题一样, 作者对伽玛通过率的比较结果运用了统计方法。他们利用 ROC 曲线分析将治疗床上测量结果和 RadCalc 蒙特卡罗计算结果的可接受标准分别设置为 95% 和 90%。混淆矩阵 (包括真阳性/阴性和假阳性/阴性的数量) 展示了与 AAA/Acuros XB 计算结果比较的伽玛通过率, 以及一个包含治疗床上测量的箱形图。总之, 这些数据表明 RadCalc MC 和 Acuros XB 计算结果之间呈现高度一致性, 这一点在肺部测试计划上尤其明显。

正如作者总结的那样, 经调整后, RadCalc 3D 蒙特卡罗算法提供的解决方案可以直接在患者的 CT 上独立验证治疗方案, 灵敏度和特异性与基于模体测量的方式近乎相同。该算法还可以检测出基于模体测量的方式检测不到的不均匀组织中的不准确性。



项目	论文 1: 根据测量数据评估 RadCalc 3DCC ⁴	论文 2: 基于新 RadCalc 3DMC 的治疗前验证工具调整和验证 ⁵
模块类型	3D 计算 (3DCC)	3D 蒙特卡罗 (3DMC)
验证目标	比较 3DCC 计算结果与测量结果	使用模体和临床方案验证 3DMC
方法	测量剂量与计算剂量比较 (水模体)	使用 VMAT 方案 (模体 + 患者) 进行调整和验证
关键指标	伽玛通过率	伽玛通过率, ARLF 调整
主要能量类型	6X、10X	6X、10X、6FFF、10FFF
结果	伽玛通过率: 3%/3mm 为 90% 到 98%	伽玛通过率: 3%/3mm 调整后高于 95%
不均匀性处理	性能受组织不均匀性影响	肺部和复杂不均匀部位的性能更佳
临床验证	复杂病例的准确性略有降低	所有复杂方案 (尤其是肺) 的准确性高
改进/创新	-	调整 ARLF 参数提高了剂量一致性



参考文献

1. Miften M et al. *Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM Task Group No. 218*. Med Phys. 2018;45(4):e53-e83. doi: 10.1002/mp.12810
2. Zhu TC, et al. *Report of AAPM Task Group 219 on Independent Calculation-Based Dose/MU Verification for IMRT*. Med Phys ;2021 48(10):e808 – 29. doi: 10.1002/mp.15069
3. Bohorquez. *Whitepaper on RadCalc Classic: The Original Comprehensive Secondary Dose Calculation Software for Radiation Therapy*. Lifeline Software Inc. (2024).
4. Renner WD. *Test of the Convolution/Superposition “Collapsed Cone ” Algorithm To Compute the Dose in the Lung*. 2016 May.
5. Richmond N, et al. *Evaluation of the RadCalc collapsed cone dose calculation algorithm against measured data*. Med Dosim. 2023; 48(4):216-224. doi: 10.1016/j.meddos.2023.04.004
6. Sceni G, et al. *Tuning And Validation Of The New Radcalc 3D Monte Carlo Based Pre-Treatment Plan Verification Tool*. Journal of Mechanics in Medicine and Biology. 2023; 23(6). doi: 10.1142/S021951942340047X

备注：并非所有产品或功能在所有市场有售。