

## 放射治疗在体剂量验证方法研究

何雨佳<sup>1,2,3,4</sup>, 张宇涛<sup>1,2,3,4</sup>, 谢凯<sup>1,2,3,4</sup>, 高留刚<sup>1,2,3,4</sup>, 张楠<sup>1,2,3,4</sup>, 张子腾<sup>1,2,3,4</sup>, 王子怡<sup>1,2,3,4</sup>, 胡婧<sup>1,2,3,4</sup>, 倪昕晔<sup>1,2,3,4</sup>

1. 南京医科大学第三附属医院(常州市第二人民医院), 江苏 常州 213003; 2. 江苏省医学物理工程研究中心, 江苏 常州 213003; 3. 南京医科大学医学物理中心实验室, 江苏 常州 213003; 4. 常州市医学物理重点实验室, 江苏 常州 213003

**【摘要】**精准放疗作为现代肿瘤治疗的重要手段,其核心目标是在最大程度照射肿瘤的同时,尽可能减少对周围正常组织的辐射损伤。在体剂量验证作为保障精准放疗质量与安全性的关键环节,对于预防放射性损伤具有重要意义。目前,放射治疗中的在体剂量验证方法可分为两类:基于加速器日志文件的在体剂量验证与基于加速器影像数据的在体剂量验证。本文将系统探讨这两类方法的基本原理与研究现状,分析当前面临的挑战,并展望未来发展方向,以期为临床实践提供更为全面的理论支持与实践参考。

**【关键词】**放射治疗; 日志文件; EPID; CBCT; 在体剂量验证; 综述

**【中图分类号】**R318; R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2026)03-0288-05

### Research status of *in vivo* dosimetric verification methods in radiotherapy

HE Yujia<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Yutao<sup>1,2,3,4</sup>, XIE Kai<sup>1,2,3,4</sup>, GAO Liugang<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Nan<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Ziteng<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Ziyi<sup>1,2,3,4</sup>, HU Jing<sup>1,2,3,4</sup>, NI Xinye<sup>1,2,3,4</sup>

1. The Third Affiliated Hospital of Nanjing Medical University (Changzhou Second People's Hospital), Changzhou 213003, China; 2. Jiangsu Province Engineering Research Center of Medical Physics, Changzhou 213003, China; 3. Center of Medical Physics, Nanjing Medical University, Changzhou 213003, China; 4. Changzhou Key Laboratory of Medical Physics, Changzhou 213003, China

**Abstract:** Precision radiotherapy, as a pivotal modality in modern tumor treatment, strives to maximize tumor irradiation while minimizing damage to adjacent healthy tissues. *In vivo* dosimetric verification serves as a critical procedure for ensuring the quality and safety of precision radiotherapy, and plays a significant role in preventing radiation-induced injuries. Currently, *in vivo* dosimetric verification techniques in radiotherapy can be classified into two categories: those based on accelerator log files and those relying on accelerator imaging data. Herein this review systematically explores the fundamental principles and research advances of these two approaches, analyzes the existing challenges, and outlines future development directions, with the aim of providing more comprehensive theoretical support and practical reference for clinical practice.

**Keywords:** radiotherapy; log file; electronic portal imaging device; cone beam computed tomography; *in vivo* dosimetric verification; review

### 前言

精准放疗时代,肿瘤靶区的剂量递送精度显著

**【收稿日期】**2025-11-15

**【基金项目】**国家自然科学基金(62371243);江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2022720);江苏省自然科学基金面上项目(BK20231190);江苏省医学重点学科建设单位(JS-DW202237);江苏省卫健委面上项目(M2020006);常州市社会发展项目(CE20235063)

**【作者简介】**何雨佳,硕士研究生,研究方向:在体剂量验证, E-mail: yujiahe@stu.njmu.edu.cn

**【通信作者】**倪昕晔,博士,教授,博士生导师,研究方向:医学物理, E-mail: nxy@njmu.edu.cn

提升,但同时也因技术复杂度增加引入更多潜在误差源,如患者摆位误差、器官运动、设备参数漂移等,这些因素会导致实际剂量分布与计划剂量分布产生偏差,进而增加正常组织损伤的风险<sup>[1]</sup>。仅靠治疗计划系统(TPS)的初始剂量计算和设备定期质控,难以全面保障每次照射的精准性。因此,在放疗过程中实时监测患者体内的实际照射剂量显得尤为重要<sup>[2]</sup>。

在体剂量验证作为连接计划设计与治疗实施的关键桥梁,主要通过体内剂量重建实现对患者实际受照剂量的验证<sup>[3]</sup>。区别于使用电离室、胶片和探测器阵列等传统验证设备进行的治疗前剂量验证,在体剂量验证通过捕捉患者治疗过程中的实时信息

(包括射线与人体作用的影像反馈、解剖结构动态变化及设备运行参数),克服传统验证设备难以反映个体差异和动态变化的局限<sup>[4]</sup>。

根据验证原理与技术路径的不同,当前临床主流的在体剂量验证技术主要分为两类:基于加速器日志文件的在体剂量验证与基于加速器影像数据的在体剂量验证。本文将围绕这两类方法展开,以期对剂量验证领域的进一步研究提供有价值的参考。

## 1 基于加速器日志文件的在体剂量验证

随着传统非在体验证设备在实时性和适应性方面的不足逐渐凸显,临床开始关注更具动态响应能力的日志驱动。加速器日志文件记录了治疗过程中每个治疗环节的详细参数信息,从而更准确地反映实际剂量递送过程。日志文件格式因厂商而异(如Varian的dynamlog、Elekta的trajectory log),但普遍包含高时间分辨率的多叶准直器(MLC)位置、剂量率累积、机架角度等信息<sup>[5]</sup>。这些数据为剂量重建提供基础,基于加速器日志文件的在体剂量验证通过解析这些关键信息,实现对患者实际接受剂量的精准重建与验证<sup>[6]</sup>。

早期的研究主要聚焦于如何利用加速器的日志数据进行简单的治疗计划与实际执行的对比,即通过解析加速器日志文件中的参数来推算出患者实际接收到的剂量<sup>[7]</sup>,将每次治疗的日志文件与患者第一次治疗时的日志文件做对比,从而对患者的所有分次治疗进行在线监测和剂量评估<sup>[8]</sup>。Han等<sup>[9]</sup>在一项针对调强弧形放疗(VMAT)治疗的研究中,将日志驱动的剂量重建分别与独立复算和模体测量进行对比,结果显示三者在治疗靶区体积覆盖和危及器官剂量方面高度一致,Gamma通过率(3%/3 mm)超过98%,表明日志方法具有良好的临床可行性和准确性。

为实现加速器日志数据驱动的三维剂量重建,需依赖高精度的剂量计算引擎对治疗束流进行物理建模与剂量分布解析。目前常用的剂量计算引擎主要分为两类:一类是TPS内置模块(如Eclipse的AAA、Acuros),具备良好的临床兼容性与计算效率,适用于快速验证;另一类是独立算法平台(如蒙特卡洛模拟),在高剂量梯度区域与复杂结构建模方面具有更高精度,适用于高要求的剂量重建任务。Rooshenas等<sup>[10]</sup>在异质体模中比较AAA、Acuros XB和PBC,发现AAA在金属附近存在显著剂量偏差,尤其在高密度植入物周围。Pawłowski等<sup>[11]</sup>研究则表明,Acuros XB在金属植入物附近的剂量计算结果更接近蒙特卡洛模拟,优于AAA。蒙特卡洛模拟可精

确模拟射线在组织中的传播、散射和吸收过程,借助随机抽样和物理建模对三维剂量分布进行高精度模拟,这种方法已被广泛认为是吸收剂量计算的“金标准”<sup>[12]</sup>,适用于日志驱动的三维剂量重建。为了提高计算精度,Calvo-Ortega等<sup>[13]</sup>使用PRIMO蒙特卡洛软件,将日志文件中的MLC位置、剂量率数据输入模拟,在HyperArc SRS计划中,靶区3D Gamma通过率(2%/2 mm)达99.6%,相较于传统非在体验证提升1.5%~3.5%。

除此之外,硬件技术的升级也为蒙特卡洛模拟的效率提升提供底层支撑,GPU凭借数千个并行核心将粒子输运任务细化为独立计算单元同步处理,解决长期制约临床应用的效率瓶颈<sup>[14]</sup>。Peng等<sup>[15]</sup>基于NVIDIA A100 GPU优化的蒙特卡洛代码,结合日志参数重建头颈部肿瘤剂量,计算时间从传统CPU的4 h缩短至12 min,且与实测剂量偏差<2%。Von Münchow等<sup>[16]</sup>结合CPU的逻辑控制能力与FPGA的低延迟特性,构建“CPU+GPU+FPGA”异构架构,其中FPGA负责实时处理患者呼吸信号与CT影像数据,GPU并行执行蒙特卡洛模拟,CPU协调放疗计划任务调度,使动态肿瘤的剂量计算效率提升2~3倍,同时保证运动伪影的抑制效果。深度学习技术则进一步提高剂量重建的效率与精度。卷积神经网络(CNN)可自动解析患者CT影像,识别靶区与危及器官等剂量敏感区域,对复杂解剖结构具有良好的泛化能力<sup>[17]</sup>。Xiao等<sup>[18]</sup>提出的Transdose模型可融合剂量梯度特征,通过动态采样机制对高剂量梯度区域(如靶区边缘)分配更多资源,从而优化计算资源分配。Szeverinski等<sup>[19]</sup>在VMAT前列腺计划中,结合4 Hz高频日志数据与CNN驱动的蒙特卡洛模拟,将剂量计算误差控制在2%以内,同时计算效率提升40%。

基于加速器日志文件的在体剂量验证具有诸多优势。一方面,相较于传统非在体验证设备,该方法不受分辨率、探头角度响应及测量摆位条件等因素的影响<sup>[20]</sup>;另一方面,它简单易行,可在治疗过程中进行多次验证,且不占用患者的治疗时间。然而,该方法对治疗过程中患者的运动、体位变化的适应性较差,无法准确评估治疗过程中的实时剂量分布,亟需借助放疗影像手段进一步提升在体剂量验证的实时性与准确性<sup>[21]</sup>。

## 2 基于加速器影像数据的在体剂量验证

在体剂量验证通常依赖于患者治疗过程中获取的加速器影像数据,电子射野影像装置(EPID)和锥形束计算机断层扫描(CBCT)由于直接安装在加速

器上,在当前临床应用最为广泛。EPID具备高分辨率与良好的成像稳定性,可实时获取二维透射野信息<sup>[22]</sup>;CBCT则可反映患者治疗当天的三维解剖结构,为二维至三维及更高维度的剂量计算提供图像基础<sup>[23]</sup>。根据验证原理的不同,基于加速器影像数据的在体剂量验证方法可分为以下3类:二维出射剂量验证,侧重于治疗前后EPID平面剂量的快速比对;二维剂量重建验证,通过物理建模与反投影实现特定平面的剂量重建与误差定位;三维剂量重建验证,融合CT/CBCT图像与EPID通量信息,在参考图像空间内重建患者体内剂量分布,实现对治疗过程的动态剂量学评估。

### 2.1 二维出射剂量验证

该方法通过治疗前预测EPID平面上的剂量分布,与治疗过程中实际测量结果进行比较,以二维 $\gamma$ 分析为依据进行快速验证<sup>[24]</sup>。一旦检测到超过限值的偏差,则自动停止出束,防止患者受到较大剂量的错误照射。这种方法计算效率高,适用于在线治疗监控,已在多中心广泛应用。Muralidhar等<sup>[25]</sup>研究使用EPID图像与TPS预测剂量进行 $\gamma$ 分析,验证EPIbeam系统在无需模体的前提下能够实现在多部位治疗中快速准确的剂量验证。Avelino等<sup>[26]</sup>在120例宫颈癌调强放疗(IMRT)患者中,采用2%/2 mm的 $\gamma$ 标准对EPID平面剂量进行验证,发现 $\gamma$ 通过率与靶区实际剂量偏差呈显著负相关( $r=-0.68$ ,  $P<0.001$ )。虽然 $\gamma$ 分析结果优异,但EPID平面的预测和实测剂量间的差别不能直接反映患者组织器官内的受照剂量,也不能对靶区和危及器官的受照剂量进行定量分析。

### 2.2 二维剂量重建验证

该方法利用治疗过程中获取的EPID射野影像,通过物理建模与几何反演,推算出患者体内特定平面的剂量分布。通常包括两个主要环节:首先,通过剂量响应建模将EPID记录的灰度信号转化为具有剂量学意义的射野剂量图像,需考虑探测器的非水当量响应、能量依赖性及系统增益校正;其次,在将该剂量信息反投影至参考平面时,对射束在传输过程中的衰减与散射进行修正<sup>[27]</sup>。Nasseri等<sup>[28]</sup>提出基于水等效路径长度的反投影算法,将EPID图像像素值转化为水中吸收剂量,该方法可检测到靶区 $D_{95\%}$ 的偏差达 $4.1\%\pm 1.2\%$ ,明显优于传统平面比对方法的 $2.8\%\pm 0.9\%$ 。等效门户剂量方法通过系统响应与散射校正,将EPID信号转化为剂量学意义明确的门户剂量分布<sup>[29]</sup>,并与TPS计算结果进行Gamma分析,从而提升误差检测的物理可解释性。在此基础上,Marini等<sup>[30]</sup>提出一种基于深度学习的方法,利用

CNN将原始EPID图像直接映射为门户剂量分布,显著减少了对复杂物理建模的依赖,在3%/3 mm条件下的平均Gamma通过率为98.4%,相较于传统物理方法提高1.2%。Sun等<sup>[31]</sup>对一种基于EPID、蒙特卡罗计算的patient-specific QA系统进行评估,系统测试包括监测单位、准直器角度、场位移、场尺寸和MLC功能错误,说明二维剂量重建在误差类型定位方面具有优势,能够区分机头端(如输出波动、MLC偏移)与计划端(如摆位误差、解剖变化)的偏差来源,但因其缺乏体积解剖约束,在评估剂量体积直方图等三维剂量学指标及解剖结构变化方面存在一定局限。

### 2.3 三维剂量重建验证

三维剂量重建模型包括患者位置信息和解剖结构三维密度信息,可以是计划CT、治疗前或后采集的CBCT或其他合适的图像数据<sup>[32]</sup>。早期研究通常将治疗过程中EPID采集的射野通量图像反投影到患者计划CT上,重建患者体内三维剂量分布图,再与TPS中的计划剂量进行比较。Li等<sup>[33]</sup>通过将EPID通量图像反投影至计划CT构建三维体内剂量分布,并分别评估该方法在IMRT和VMAT治疗中的检测灵敏度与剂量重建精度,在3D Gamma(3%/3 mm)分析中,EPID重建剂量平均通过率达96.2%。Martins等<sup>[34]</sup>以患者的计划CT和由EPID信号反投影得到的一阶剂量近似作为双通道输入,采用深度神经网络进行训练,将透射剂量图映射为三维体内剂量分布,在3%/2 mm条件下的平均Gamma通过率达97%,在每个子野上的推理时间仅0.6 s,显著优于传统方法。Dong等<sup>[35]</sup>开展一项针对乳腺癌IMRT中体内剂量验证的研究,将计划CT结合EPID通量图实现治疗前与治疗中剂量分布的重建,发现重建剂量与计划剂量高度一致,剂量体积参数偏差均控制在5%以内,进一步证明三维剂量重建在高复杂度治疗中表现出良好效果。

基于计划CT的剂量重建能够反映计划剂量与治疗剂量之间的差异,但在治疗周期中,患者体型变化、呼吸运动等因素会引入偏差,从而影响验证准确性<sup>[36]</sup>。相比之下,基于CBCT的剂量重建能够动态反映患者治疗期间的解剖变化和体内的实际剂量分布,尤其适用于评估因体位或解剖结构变化所引起的剂量偏差<sup>[37]</sup>。在具体实现上,一类是通过建立HU-电子密度校正模型,将CBCT图像转换为可用于剂量计算的伪CT数据集进行剂量验证<sup>[38]</sup>。在剂量计算环节,有研究尝试直接将CBCT图像的HU值转换为电子密度<sup>[39]</sup>,但由于CBCT图像存在的固有噪声和伪影等问题,导致计算准确性受限。Rossi等<sup>[40]</sup>提出利

用生成对抗网络(CycleGAN)对每日CBCT进行HU校正,生成与计划CT质量接近的合成CT(sCT),该方法显著改善CBCT的HU一致性,使3%/2 mm  $\gamma$ 通过率由53.78%提升至90.26%。另一类是将治疗前的计划CT图像与治疗中的CBCT图像进行配准,使患者的实时解剖结构与TPS中的解剖结构对齐,进而计算患者实际接收到的剂量<sup>[41]</sup>。配准方法包括刚性配准和非刚性配准,传统刚性配准方法在应对解剖结构形变时存在明显局限,无法有效处理CT与CBCT图像域间的结构差异与伪影干扰<sup>[42]</sup>。对此,Cao等<sup>[43]</sup>创新性地提出跨域融合配准网络(CDFRegNet),结合边界引导注意力模块(EGAM)和跨域注意力模块(CDAM),前者能引导网络关注两个域中相同的解剖边界,抑制CBCT图像的噪声和伪影;后者则利用全局和局部信息将两图像域特征映射到共同空间,减少图像域分布差异,实验结果在临床CT-CBCT数据上平均DSC为(80.01±7.16)%,而传统方法仅达到74.02%。Zhang等<sup>[44]</sup>提出另一种跨模态注意力网络BCSwinReg,融合Transformer架构与多尺度注意力机制,实验结果表明DSC系数提升约3.3%,能够在保持边缘结构的同时抑制CBCT伪影影响,从而进一步提高配准精度。

总体而言,三维剂量重建相较二维验证在空间分辨率和剂量分布的体积可视化方面更具优势,能够更全面地反映靶区覆盖与危及器官剂量的真实情况,但其实际临床应用仍面临一些挑战,如EPID信号的校准精度不足、CBCT图像质量差及较高的计算需求等。未来在体剂量验证的发展应聚焦于提升算法精度与计算效率,实现高精度、低延迟的个体化剂量验证。同时,推进EPID与CBCT的多模态影像融合,Razinskas等<sup>[45]</sup>在自适应放疗背景下探讨此类方法的可行性,指出将EPID与CBCT图像联合使用,有望显著提升剂量重建的实时性与准确性,为适应性放疗提供更坚实的剂量学基础。

### 3 总结与展望

随着加速器日志驱动验证和EPID、CBCT等影像手段的不断成熟,当前的研究热点正逐步从传统的离线验证方法向具备实时响应能力的在体验证方法转移<sup>[46]</sup>。这一趋势不仅源于放疗技术不断向高精度发展的内在驱动,也是当前临床实践的迫切需求。同时,国内外质量控制指南对在体验证流程的规范化要求,也为该领域的发展提供明确方向与标准支撑。

本文对目前常用的在体剂量验证方法进行综述,并展望未来的研究方向。未来的研究可以从以

下3个方面展开:(1)依托加速器日志文件记录的动态参数,结合快速剂量计算引擎或QA系统,重构递送剂量并反映执行误差<sup>[47]</sup>,实现放疗过程中对误差的即时捕捉与自适应修正,从而快速应对患者体位和肿瘤形态的变化。(2)基于扩散模型对CBCT图像进行降噪与金属伪影校正<sup>[48]</sup>,从源头改善CBCT图像质量,将患者体内的实际剂量分布投影到CBCT图像上,从而实现更高精度的剂量重建。(3)通过图像配准技术融合CBCT的三维解剖结构和EPID的实时射野影像,构建多模态影像引导的剂量验证框架<sup>[49]</sup>,从而提升剂量验证的准确性。

综上所述,在多模态医学影像技术和人工智能优化算法的双重驱动下,在体剂量验证正朝着实时化、智能化和个体化方向发展,将推动肿瘤治疗向更精准、更安全的目标迈进<sup>[50]</sup>。

### 【参考文献】

- [1] Bolt M, Clark CH, Nisbet A, et al. Quantification of the uncertainties within the radiotherapy dosimetry chain and their impact on tumour control[J]. *Phys Imaging Radiat Oncol*, 2021, 19: 33-38.
- [2] Olaciregui-Ruiz I, Beddar S, Greer P, et al. *In vivo* dosimetry in external beam photon radiotherapy: requirements and future directions for research, development, and clinical practice[J]. *Phys Imaging Radiat Oncol*, 2020, 15: 108-116.
- [3] Ismailova AA, Zavestovskaya IN, Gromova NV, et al. Commissioning and validation method of the quality control system of radiation therapy plans based on transit dosimetry[J]. *Phys Atom Nuclei*, 2023, 86(11): 2531-2534.
- [4] Vivas Maiques B, Ruiz IO, Janssen T, et al. Clinical rationale for *in vivo* portal dosimetry in magnetic resonance guided online adaptive radiotherapy[J]. *Phys Imaging Radiat Oncol*, 2022, 23: 16-23.
- [5] Lin XT, Sun T, Liu X, et al. Comparison of MLC positioning deviations using log files and establishment of specific assessment parameters for different accelerators with IMRT and VMAT[J]. *Radiat Oncol*, 2022, 17(1): 123.
- [6] Menten MJ, Mohajer JK, Nilawar R, et al. Automatic reconstruction of the delivered dose of the day using MR-linac treatment log files and online MR imaging[J]. *Radiother Oncol*, 2020, 145: 88-94.
- [7] 马阳光, 麦日珍, 李国文, 等. 基于医用直线加速器轨迹日志进行放射治疗剂量投照的质控[J]. *郑州大学学报(医学版)*, 2020, 55(2): 258-262.  
Ma YG, Mai RZ, Li GW, et al. A method research of radiotherapy dosimetry quality control based on medical linear accelerator trajectory log file[J]. *Journal of Zhengzhou University (Medical Sciences)*, 2020, 55(2): 258-262.
- [8] 国家癌症中心/国家肿瘤质控中心. 基于EPID和MLC运行日志文件的调强放疗在线剂量验证实践指南[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2024, 33(1): 1-6.  
National Cancer Center/National Cancer Quality Control Center. Practice guidelines of patient-specific online dosimetric verification based on EPID and MLC log files for intensity-modulated radiotherapy[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2024, 33(1): 1-6.
- [9] Han C, Yi JL, Zhu KC, et al. Cross verification of independent dose recalculation, log files based, and phantom measurement-based pretreatment quality assurance for volumetric modulated arc therapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(11): 98-104.
- [10] Rooshenas A, Gholami S, Barough MS, et al. Dosimetric accuracy comparison between ACUROSE XB, AAA and PBC dose calculation algorithms in EclipseTM TPS using a heterogeneous phantom[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2020, 6(4): 168-173.
- [11] Pawalowski B, Ryczkowski A, Panek R, et al. Accuracy of the doses computed by the Eclipse treatment planning system near and

- inside metal elements[J]. *Sci Rep*, 2022, 12(1): 5974.
- [12] Fielding AL. Monte-Carlo techniques for radiotherapy applications I: introduction and overview of the different Monte-Carlo codes [J]. *J Radiother Pract*, 2023, 22: e80.
- [13] 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.
- [14] Karbalaee M, Shahbazi-Gahrouei D, Tavakoli MB, et al. A novel GPU-based fast Monte Carlo photon dose calculating method for accurate radiotherapy treatment planning[J]. *J Biomed Phys Eng*, 2020, 10(3): 329-340.
- [15] Peng Z, Lu Y, Xu Y, et al. Development of a GPU-accelerated Monte Carlo dose calculation module for nuclear medicine, ARCHER-NM: demonstration for a PET/CT imaging procedure [J]. *Phys Med Biol*, 2022, 67(6): 06NT02.
- [16] von Münchow A, Straub K, Losert C, et al. Statistical breathing curve sampling to quantify interplay effects of moving lung tumors in a 4D Monte Carlo dose calculation framework[J]. *Phys Med*, 2022, 101: 104-111.
- [17] Azzarouali S, Goudschaal K, Visser J, et al. Minimizing human interference in an online fully automated daily adaptive radiotherapy workflow for bladder cancer[J]. *Radiat Oncol*, 2024, 19(1): 138.
- [18] Xiao F, Cai JJ, Zhou XR, et al. TransDose: a transformer-based UNet model for fast and accurate dose calculation for MR-LINACs [J]. *Phys Med Biol*, 2022, 67(12): 125013.
- [19] Szeverinski P, Kowatsch M, Künzler T, et al. Evaluation of 4-Hz log files and secondary Monte Carlo dose calculation as patient-specific quality assurance for VMAT prostate plans[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2021, 22(7): 235-244.
- [20] Chan LT, Tan YI, Tan PW, et al. Comparing log file to measurement-based patient-specific quality assurance [J]. *Phys Eng Sci Med*, 2023, 46(1): 303-311.
- [21] Lechner W, Kanalas D, Haupt S, et al. Evaluation of a novel CBCT conversion method implemented in a treatment planning system [J]. *Radiat Oncol*, 2023, 18(1): 191.
- [22] Jia MY, Wu Y, Yang Y, et al. Deep learning-enabled EPID-based 3D dosimetry for dose verification of step-and-shoot radiotherapy [J]. *Med Phys*, 2021, 48(11): 6810-6819.
- [23] Xu SY, Yang B, Xu CC, et al. Sparse angle CBCT reconstruction based on guided image filtering[J]. *Front Oncol*, 2022, 12: 832037.
- [24] Zhang J, Cheng ZB, Fan ZT, et al. A feasibility study for *in vivo* treatment verification of IMRT using Monte Carlo dose calculation and deep learning-based modelling of EPID detector response[J]. *Radiat Oncol*, 2022, 17(1): 31.
- [25] Muralidhar KR, Nishaanth B, Kumar AV, et al. Clinical application of portal dosimetry for pre-treatment dosimetric verification across various diagnoses using electronic portal imaging integrated with Epibeam[J]. *Am J Clin Exp Med*, 2025, 13(1): 1-7.
- [26] Avelino SR, Dias JR, Peron TM, et al. Evaluation of an EPID *in vivo* monitoring system using local and external independent audit measurements[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2022, 23(12): e13822.
- [27] 李丽琴, 李光俊, 沈九零, 等. 基于EPID的在体剂量验证研究进展 [J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2017, 26(7): 833-837.
- Li LQ, Li GJ, Shen JL, et al. Research progress in electronic portal imaging device-based *in vivo* dosimetry verification [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2017, 26(7): 833-837.
- [28] Nasser S, Bahreyni MH, Momenneshad M, et al. Dosimetric verification of IMRT and 3D conformal treatment delivery using EPID [J]. *Appl Radiat Isot*, 2022, 182: 110116.
- [29] Esposito M, Marrazzo L, Vanzi E, et al. A validation method for EPID *in vivo* dosimetry algorithms[J]. *Appl Sci*, 2021, 11(22): 10715.
- [30] Marini L, Avanzo M, Kraan AC, et al. Deep learning methods for 2D *in-vivo* dose reconstruction with EPID detector[J]. *Nucl Instrum Methods Phys Res Sect A*, 2024, 1069: 169908.
- [31] Sun W, Ge C, Shi Y, et al. Evaluation of a Monte Carlo based EPID system for patient-specific IMRT and VMAT quality assurance[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2025, 26(7): e70178.
- [32] 李玉成, 程晶晶, 蒋璐, 等. 基于EPID三维剂量重建在肿瘤患者中的应用[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2018, 27(11): 984-988.
- Li YC, Cheng PJ, Jiang L, et al. Application of EPID-based 3D dose reconstruction in cancer patients[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2018, 27(11): 984-988.
- [33] Li YH, Zhu JH, Shi JP, et al. Investigating the effectiveness of monitoring relevant variations during IMRT and VMAT treatments by EPID-based 3D *in vivo* verification performed using planning CTs[J]. *PLoS One*, 2019, 14(6): e0218803.
- [34] Martins JC, Maier J, Gianoli C, et al. Towards real-time EPID-based 3D *in vivo* dosimetry for IMRT with deep neural networks: a feasibility study[J]. *Phys Med*, 2023, 114: 103148.
- [35] Dong J, Li ZH, Huang WT, et al. Preliminary application of EPID three-dimensional dose reconstruction in *in vivo* dose verification of breast cancer intensity-modulated radiation therapy[J]. *Phys Med*, 2025, 129: 104884.
- [36] Sande EPS, Acosta Roa AM, Hellebust TP. Dose deviations induced by respiratory motion for radiotherapy of lung tumors: impact of CT reconstruction, plan complexity, and fraction size[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(4): 68-79.
- [37] Dogan N, Mijnhoeer 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-e903.
- [38] Gong HS, Liu B, Zhang GL, et al. Evaluation of dose calculation based on cone-beam CT using different measuring correction methods for head and neck cancer patients[J]. *Technol Cancer Res Treat*, 2023, 22: 15330338221148317.
- [39] Huang YQ, Hu XY, Zhong YC, et al. Improving dose calculation accuracy in preclinical radiation experiments using multi-energy element resolved cone-beam CT[J]. *Phys Med Biol*, 2021, 66(24): 245003.
- [40] Rossi M, Belotti G, Mainardi L, et al. Feasibility of proton dosimetry overriding planning CT with daily CBCT elaborated through generative artificial intelligence tools [J]. *Comput Assist Surg (Abingdon)*, 2024, 29(1): 2327981.
- [41] Yuan ZL, Rong Y, Benedict SH, et al. "Dose of the day" based on cone beam computed tomography and deformable image registration for lung cancer radiotherapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21(1): 88-94.
- [42] Brock KK, Mutic S, McNutt TR, et al. Use of image registration and fusion algorithms and techniques in radiotherapy: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 132[J]. *Med Phys*, 2017, 44(7): e43-e76.
- [43] Cao YZ, Fu TX, Duan LW, et al. CDFRegNet: a cross-domain fusion registration network for CT-to-CBCT image registration[J]. *Comput Methods Programs Biomed*, 2022, 224: 107025.
- [44] Zhang JM, Qing C, Li Y, et al. BCSwinReg: a cross-modal attention network for CBCT-to-CT multimodal image registration[J]. *Comput Biol Med*, 2024, 171: 107990.
- [45] Razinskas G, Schindhelm R, Tamihardja J, et al. Feasibility of EPID based *in vivo* dosimetry for on-couch adaptive radiotherapy[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2023, 117(2): e712.
- [46] Salman MD, Radzi YM, Rahman AA, et al. Advancements and applications of dosimetry techniques in modern medical radiation therapy: a comprehensive review[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2024, 333(8): 3713-3737.
- [47] Ma Y, Mou X, Beeraka NM, et al. Machine Log File and Calibration Errors-based Patient-specific Quality Assurance (QA) for Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT)[J]. *Curr Pharm Des*, 2023, 29(34): 2738-2751.
- [48] Rusanov B, Hassan GM, Reynolds M, et al. Deep learning methods for enhancing cone-beam CT image quality toward adaptive radiation therapy: a systematic review[J]. *Med Phys*, 2022, 49(9): 6019-6054.
- [49] Zhu WL, Fang J, Zhang Y, et al. Validation of *in vivo* dose using EPID combined with fan-beam CT guidance in post-breast-conserving radiotherapy for early-stage breast cancer[J]. *BMC Cancer*, 2025, 25(1): 667.
- [50] Yang X, Feng B, Yang H, et al. CNN-based multi-modal radiomics analysis of pseudo-CT utilization in MRI-only brain stereotactic radiotherapy: a feasibility study[J]. *BMC Cancer*, 2024, 24(1): 59.

(编辑:薛泽玲)