

放射治疗质控原理: 前瞻性思考

李振江[†], 崔永斌[†], 尹勇^{*}

山东省肿瘤防治研究院(山东省肿瘤医院), 山东第一医科大学(山东省医学科学院), 济南 250117

[†] 同等贡献

^{*} 联系人, E-mail: yinyongsd@126.com

放射治疗(radiotherapy, RT)是肿瘤治疗中不可或缺的重要手段之一。放疗的目标在于将治疗剂量精准投照至肿瘤靶区, 以达到消灭肿瘤的目的, 同时最大限度地保护周围的正常组织, 避免严重副作用。放射治疗质量控制(quality control, QC)的核心目的就是确保这一目标在治疗的每一个环节都能可靠、准确地实现。近年来, 放射治疗的精准度和治疗效果均取得了显著的进展^[1]。而且随着技术的进步, 治疗方法逐步向个性化、精准化发展, 因此放射治疗的质量控制就变得愈加重要^[2]。当前, 放射治疗质控的目的不仅仅在于确保放疗设备和治疗计划的精确性, 更在于保障患者治疗过程的安全性、提升疗效, 并有效降低治疗相关的毒副作用。在这一过程中, 放射治疗质控体系需要涵盖从患者定位、治疗计划制定、剂量验证、治疗执行和患者管理的各个环节。本文将系统总结放射治疗质控的基本原理, 探讨其关键环节, 并展望未来的发展方向。

1 放射治疗质控的基本原理

放射治疗质控是指通过系统化的技术操作与检测, 确保整个放射治疗服务的各个环节符合预定的技术标准与规范的过程^[3]。质控的核心目的是确保放射治疗的精准执行^[4]。当前质控的内容主要包括以下几个方面: (1) 患者定位的精度; (2) 治疗计划计算和执行的精度; (3) 治疗过程的实时监控(位置验证与剂量递送); (4) 治疗设备的准确性与稳定性; 具体流程见图1。通过建立标准化操作流程并定期检查设备与治疗计划, 可有效降低治疗不确定性, 提升治疗效果, 减少误差。

通过结合国际权威指南(如AAPM TG-51^[5]、TG142^[6]、TG218^[7]、IAEA TRS-430^[8])和量化技术指标(如剂量输出误差 $\leq 2\%$ 、多叶准直器叶片到位精度优于0.5 mm), 能够系统性降低治疗中的不确定性。例如, 物理师需要应用每日晨检系统对直线加速器进行输出剂量稳定性检测, 确保其剂量线性度误差控制在1%以内; 治疗计划系统(treatment planning system, TPS)则依赖蒙特卡罗等算法与三维模体的联合验证, 确



尹勇 研究员(二级), 博士研究生导师, 山东第一医科大学附属肿瘤医院(山东省肿瘤防治研究院、山东省肿瘤医院)放射物理技术科主任, 山东省“泰山学者”特聘专家。主要从事肿瘤放射物理学、肿瘤精确放疗新技术、医学图像处理辅助精确放疗的研究和临床应用工作。多次荣获国家及省部级科技进步奖, 主持多项国家级课题; 任中华医学会放

射肿瘤治疗学分会常委、中国医师协会放射肿瘤治疗医师分会副会长等。

保靶区剂量分布计算的准确性, 同时验证剂量投送的精度; 患者定位环节通过图像引导放疗技术(imaging guided radiation therapy, IGRT)多模态融合(如CT+4D-MRI+呼吸门控)实现亚毫米级定位精度。

在传统的质控中, 设备校准、剂量验证、影像引导等仍然是主要的质控内容。在设备校准中, 放射治疗设备的剂量输出线性度、稳定性及射野均匀性需遵循严格的检测周期: 每日晨检通过指形电离室或者晨检仪验证剂量输出误差(2%以内)、每月月检利用质控的射线检测仪监测射线的平坦度和对称性、每年年检则使用三维水箱检测射野平坦度对称性、执行等中心精度验证(误差 ≤ 0.5 mm)等。剂量验证则在物理层面通过三维剂量验证模体结合Gamma分析(3%/2 mm标准, 通过率 $\geq 95\%$)确保治疗计划与实测剂量的一致性^[7]。图像引导放疗从早期的二维X线定位逐步升级为多模态的影像追踪, 在治疗中确保图像引导系统影像定位的精度格外重要。与此同时, 定位图像导入TPS后, TPS的优化精度也同样非常重要。这些技术手段的迭代与标准化流程的完善, 共同构成了放射治疗质控的底层逻辑, 最终实现精准治疗的目标。放射治疗质控原理实践演变框架如图1所示。

引用格式: 李振江, 崔永斌, 尹勇. 放射治疗质控原理: 前瞻性思考. 科学通报

Li Z, Cui Y, Yin Y. Principles of quality control in radiotherapy: a forward-looking perspective (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-0493](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0493)

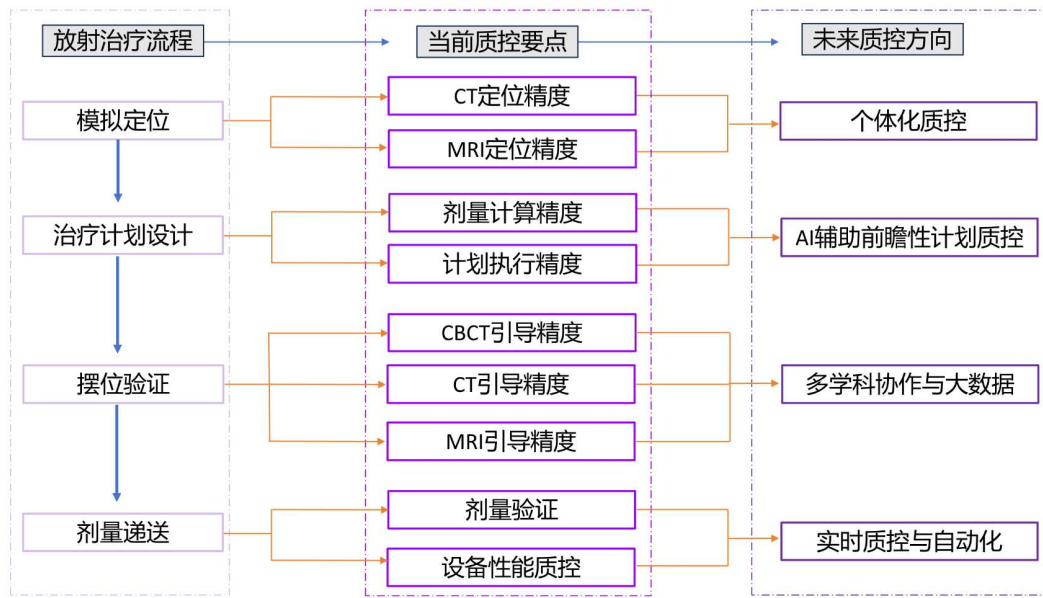


图1 放射治疗质控原理实践演变框架图

Figure 1 Evolutionary framework of radiotherapy quality control principles and practices

2 放射治疗质控中的关键环节

2.1 患者定位与影像引导

患者的模拟定位是决定放射治疗成败的核心环节，其本质是通过空间坐标的精确映射，将虚拟治疗计划与患者真实解剖结构精准对接。任何细微的定位误差也可能导致靶区剂量不足或正常组织照射过量，从而引发肿瘤局部复发或相关毒副作用。在传统放射治疗中，计算机断层扫描(computed tomography, CT)影像作为患者定位的“金标准”，通过识别骨性解剖标志或追踪植入的金属标记物，不仅能够精确定位治疗靶区的空间位置和三维解剖结构，还能获取各组织的CT值(Hounsfield unit, HU)，并根据CT值-电子密度转换曲线，为后续的剂量计算提供关键的电子密度信息^[9]。但是，CT影像对软组织的分辨率有限，同时也难以实时反映治疗过程中肿瘤生物学和解剖结构的动态变化。例如，在肺癌治疗中，呼吸运动可导致肿瘤靶区位移高达10~20 mm，而盆腔肿瘤患者因膀胱充盈或肠道蠕动可导致定位误差超过5 mm，直接影响治疗效果^[10]。

相较于传统CT定位依赖于物质对X线衰减的差异，进行解剖结构位置的构建，磁共振影像(magnetic resonance imaging, MRI)凭借其卓越的软组织分辨率(空间分辨率可达0.5 mm×0.5 mm×1 mm)与多序列成像能力，能够清晰区分肿瘤边界与邻近正常组织的微结构差异^[11]。例如，在头颈部肿瘤中，MRI的T2加权成像可精准勾画舌根癌向咽旁间隙浸润的范围，而肌肉组织与肿瘤组织对X线的衰减相近，可能导致基于CT的靶区勾画误差达2~5 mm^[12]。在复杂解剖部位(如头

颈、盆腔)的定位中，MRI的多序列融合有望进一步突破传统影像的局限。通过将功能序列，如扩散加权成像(diffusion weighted imaging, DWI)、动态增强图像(dynamic contrast enhanced, DCE)与结构影像融合，可识别肿瘤的生物异质性。以胶质母细胞瘤为例，在0.35 T MR引导的直线加速器上，MRI的功能序列，如DCE图像及其相关的K-trans值变化可以反映胶质母细胞瘤对放射治疗的敏感性^[13]。更进一步的技术突破在于多模态影像融合与人工智能驱动的动态修正。例如，将正电子发射断层扫描-计算机断层扫描(positron emission tomography-computed tomography, PET-CT)的功能代谢信息与MRI的软组织解剖细节融合，可精准区分肿瘤活性区域与坏死组织(尤其在脑胶质瘤治疗中)，提升靶区勾画精度提升^[14]。

传统机载影像主要用于治疗前的摆位修正，而随着技术的进步，图像引导放疗逐步向在线图像引导发展。影像技术的革新正在逐步突破实时运动难以监控的瓶颈。从最初的二维影像引导放疗、三维影像引导放疗，到目前常用的锥形束计算机断层扫描(cone-beam computed tomography, CBCT)引导放疗，再到近年来可在治疗过程中每秒生成2~3帧高分辨率影像的1.5T MRI引导直线加速器放疗(magnetic resonance imaging-linear accelerator, MR-Linac)，在线影像引导放疗有望实现对实时运动的捕捉^[15]。这种实时成像能力不仅使医生能够直观追踪肿瘤的位移(如肝脏肿瘤随呼吸的上下移动)，还能监测治疗中因患者体型变化(如体重下降或水肿)导致的靶区形变，实时影像对运动的捕捉或者对治疗中靶区改变的实时修正有助于放疗中剂量的准确递送。除了MR Linac，

诊断级CT或者PET与加速器的结合,也为治疗过程中靶区位置和形状,甚至是肿瘤治疗响应的自适应提供了可能^[16,17]。对于新型的IGRT设备,质控不仅是对加速器精准度的检测,更是对影像引导系统精准度的检测。

2.2 治疗计划计算与执行的质控

治疗计划的制定是放射治疗中的另一重要环节,治疗计划的优劣直接决定了治疗的效果。TPS能够根据患者的CT或MRI影像数据,进行肿瘤靶区和危及器官的分割,并基于CT图像的HU值转换得到电子密度信息,最后进行剂量分布的计算。在此基础上,物理师设定最佳的放射治疗计划方案。但治疗计划的制定必须经过严密的质控验证,确保剂量的分布符合预期。

在计划设计的过程中,剂量计算的精度直接影响放射治疗计划的质量与安全性。在临床实践中,应根据所采用的放射治疗技术合理选择计算模型,并针对性优化参数,以确保剂量分布的准确性和可执行性。针对常规的光子调强放疗,建议采用蒙特卡罗算法和Acuros XB算法。该算法基于解决Boltzmann输运方程,能充分考虑组织异质性对剂量传输的影响,相较传统的各向异性解析算法(anisotropic analytical algorithm, AAA),在肺部、头颈部等密度变化显著区域具有更高的计算精度,组织异质性相关剂量误差可控制在1.5%。对于质子治疗,则推荐采用蒙特卡罗算法。该方法通过模拟质子在介质中传播的物理过程,精确反映布拉格峰的位置及周围剂量分布,尤其在穿越复杂组织结构或金属植入物时具有较高的准确性。计算网格大小是影响剂量计算精度和时间的重要因素,应根据治疗类型动态调整。常规分割放疗:推荐采用2.5 mm网格,兼顾计算效率与临床所需精度。对于立体定向放射治疗(stereotactic body radiotherapy, SBRT)或者立体定向放射外科(stereotactic radiosurgery, SRS),此类技术对剂量梯度要求极高(通常大于10%/mm),推荐采用1 mm的剂量计算网格,以准确刻画靶区边界及临近危及器官(organ at risks, OARs)的剂量过渡带,避免因网格粗糙导致的剂量失真。

在确保剂量覆盖与器官保护的基础上,应控制计划的技术复杂性,并根据计划特征合理匹配验证测量工具,以提升放疗质量控制效率与准确性。计划参数控制方面,为避免因计划过度复杂而影响剂量投送稳定性,应设置合适的复杂度阈值。特别是调强放疗中:建议将单个控制点的最小控制单元(monitor unit, MU)设定为不小于5 MU,以防止在MU过小的情况下出现剂量不稳定、束流调节误差等问题,尤其对高剂量率加速器更为重要。其次,控制多叶准直器(multi-leaf collimator, MLC)运动复杂度,如控制平均叶子运动距离、控制点间形状变化等。在测量技术匹配方面,为了实现计划复杂度与测量资源之间的合理匹配,应构建标准化的优化工作流程。具体而言,可依据计划的技术复杂度将其划分为低、中、高三个等级,并分别匹配相应的质控测量工具与评价标准。低

复杂度计划:通常指MLC运动规律性好、剂量分布平缓的常规调强放射治疗(intensity modulated radiotherapy, IMRT)或单野计划,可采用二维剂量阵列或射野胶片进行验证。推荐使用较为宽松的 γ 分析标准(例如2%/2 mm),并设定通过率阈值为不低于95%。中等复杂度计划:如大多数旋转调强放疗(volumetric modulated arc therapy, VMAT)计划或部分调强放疗计划,建议使用三维剂量测量设备进行全面剂量验证。此类计划可采用 γ 分析标准为3%/2 mm,通过率建议不低于90%。高复杂度计划:包括小野照射、SBRT、靶区周围存在高梯度结构的计划,需采用更高精度的验证手段,如EPID剂量重建结合三维剂量验证,以精确评估MLC定位和剂量传递的准确性。建议采用严格的 γ 分析标准(例如2%/1 mm),通过率阈值设置为不低于90%。通过这种基于复杂度分级的测量资源配置策略,可以有效提升放射治疗计划的质控效率和精准度,避免资源浪费,同时确保高风险计划获得充分验证。在放射治疗的全流程质控体系中,治疗计划与剂量验证构成了保障临床疗效与患者安全的基石环节。随着技术的发展,这一环节已从传统的二维验证模式演进为多维度的动态质控系统。治疗计划阶段的质控始于影像引导的物理精度验证,通过多模态影像融合技术实现靶区与危及器官的精准勾画,同时利用蒙特卡罗算法、深度学习辅助的剂量计算引擎对剂量分布进行迭代优化,在此过程中需重点关注异质性组织校正与动态呼吸运动补偿等关键参数的合理性。剂量验证系统则通过三维水箱测量、EPID、体表光学追踪等技术手段构建复合验证网络,其中基于半导体探测器的实时在线剂量监测技术以实现治疗过程中每0.1 s的剂量采样频率,显著提升误差捕捉的时效性。

前瞻性质控理念强调将验证节点前移至计划设计阶段,运用人工智能技术对历史治疗数据进行特征挖掘,建立剂量预测模型与风险预警系统。例如,通过卷积神经网络分析CT影像的纹理特征,自动识别可能影响剂量分布的解剖结构异变,为计划设计提供参考,提升效率;基于强化学习的计划优化算法能够模拟物理师决策过程,在满足临床约束条件的同时主动规避潜在的热点风险,提高计划质量。在质子治疗等新型放疗技术中,剂量验证需特别关注布拉格峰位置的稳定性,采用多层电离室阵列与闪烁体探测器联用方案,结合实时束流监测数据实现动态剂量重建。

放射治疗设备的校准是确保治疗质量的重要组成部分。设备的输出剂量、射束均匀性、线性度等都需要经过严格的质控。在放射治疗中,设备的精确度直接关系到肿瘤靶区剂量的准确性和治疗的效果。当前,治疗设备的校准与质控已从单纯机械参数校验演变为贯穿设备全生命周期的动态监测体系。传统机械等中心验证通过胶片与激光定位系统的联合校准,确保治疗床、机架与准直器旋转轴的空间一致性,而现代六维治疗床的引入则要求校准系统额外整合六自由度运动误差补偿算法,利用光学表面引导与电磁追踪技术实

现亚毫米级动态定位精度。辐射输出稳定性作为质控核心,已从简单的电离室绝对剂量校准发展为多参数实时监测网络,其中MLC叶片到位精度验证采用高速红外相机捕捉叶片运动轨迹,结合蒙特卡罗模拟动态修正叶片透射效应与端面漏射造成的剂量偏差。

前瞻性校准理念强调设备性能参数的预测性维护,通过设备运行日志大数据分析建立关键部件(如加速管、磁控管)的故障预警模型。例如,基于机器学习的束流稳定性分析系统可实时监测加速器脉冲重复频率波动,在输出剂量偏差超过0.5%阈值前触发自动校准程序。在VMAT技术普及的背景下,机架动态旋转与剂量率联动的协同性验证成为新挑战,采用三维半导体探测器阵列同步采集机械运动参数与剂量分布数据,通过四维剂量重建算法识别潜在的时间-空间剂量误差。针对新型MR-Linac设备,则需特别处理磁场环境对电离室读数的影响,开发基于有机闪烁体探测器的磁场兼容剂量校准系统,并建立梯度磁场强度与剂量分布畸变的定量修正模型。

当前质控体系正朝着智能化、标准化方向革新。基于云平台的远程质控系统可实现多中心设备参数的横向比对,利用区块链技术确保质控数据的不可篡改性。值得注意的是,设备质控正从物理参数验证向临床疗效验证延伸,例如通过EPID获取的实时剂量分布与计划系统计算结果的 γ 分析结果,将直接关联到生物等效剂量模型的临床效果预测。这种融合工程校准与临床验证的全链条质控模式,正在重新定义放射治疗设备质量保证的实践范式。

2.3 自适应放射治疗及其质控体系

机载影像成像速度和图像分辨率的提高也为在线自适应放疗提供了可能。自适应放射治疗(adaptive radiotherapy, ART)是一种以患者解剖与生理状态变化为基础的精准治疗模式,旨在通过实时或周期性影像引导,动态调整放疗计划,从而优化靶区覆盖并最小化正常组织受量^[18]。现代ART技术主要依赖于CBCT、CT及MRI等成像手段的集成与实时处理能力。为保证其临床安全性与有效性,系统的QC体系贯穿整个工作流程。

CBCT引导放疗广泛应用于每日放疗前后患者体位校正与图像引导,这种自适应主要是以离线形式实现,其自适应功能主要包括:每日影像与计划CT配准,实现骨性或软组织定位校正;识别靶区轮廓、器官体积变化或充盈状态差异;触发计划调整流程,基于新解剖结构重新计算剂量分布。所以,每日需要对摆位精度进行严格质控;每周需要采用QC模体进行图像质量评估;每月对剂量输出一致性进行检测。而CT引导的ART,可实现计划级图像质量的每日成像,特别适合需要高精度剂量重建的治疗区域。其自适应操作流程包括:获取每日高质量CT影像;自动或人工勾画靶区与危及器官;根据解剖变化重新优化剂量计划。所以,每次治疗前需要采

用第三方软件进行剂量重建验证;每周需要评估结构一致性;每月需采用标准剂量模体测试,进行CT剂量指数(CT dose index, CTDI)校准。

MRI引导的ART将高场磁共振成像与直线加速器融合,可实现实时软组织图像采集与治疗同步控制,主要特点包括:无电离辐射高分辨率成像,特别适合软组织肿瘤;实时追踪靶区移动并自动暂停/调整射束;自动重勾画与在线计划重建,支持每日自适应治疗;其每日质控需要对计划和射束进行对照验证,也需要对靶区进行追踪与延迟评估。每日检查影像与治疗控制的延迟时间是否小于系统规定最大值(如<500 ms);每周需要随机抽查自动勾画结果并与人工勾画对比,确保勾画准确性;每月需使用几何模体对MR影像进行质控,最大畸变应<2 mm^[19]。

当前研究热点也正聚焦于ART中的闭环质控体系。通过在线影像引导与机器学习算法的协同作用,实现治疗计划的动态修正与剂量验证的实时反馈。其中,基于形变配准技术的剂量累加系统可自动计算分次治疗间的剂量偏差,而区块链技术的引入则为多中心质控数据的可信共享提供了新范式。值得关注的是,生物剂量验证概念的提出突破了传统物理剂量的验证范畴,通过功能性影像标记与液体活检技术,辐射生物效应与物理剂量分布之间的动态映射模型正在建立。这种将影像验证、物理验证与生物验证相结合的前瞻性质控体系,标志着放射治疗质量保证正在向个体化、智能化的新维度演进。

3 未来放射治疗质控的发展方向

3.1 实时质控与自动化

随着人工智能(artificial intelligence, AI)、大数据和物联网技术的飞速发展,放射治疗的质控体系正在逐步向实时监控与自动化方向转变。通过实时获取患者在治疗过程中的各项数据(如位置、剂量、治疗设备状态等),并进行智能分析,质控系统能够实时判断治疗的执行情况。一旦发现偏差,系统可以自动进行调整,以保证治疗的精确性与安全性。

在放射治疗质量控制的演进进程中,实时质控与自动化技术的深度融合正改变传统质控体系的底层逻辑。随着治疗设备的动态复杂性持续升级,质量控制已从离散的阶段性检测转向全流程的连续动态监测,其核心在于建立具有自感知、自决策能力的闭环反馈系统。新型半导体探测器阵列与高速光学追踪技术的结合,使得治疗过程中机架旋转、MLC叶片运动、剂量率波动等多个参数能够实现毫秒级同步采集,并通过边缘计算平台进行实时异常检测。例如,基于量子传感技术的束流监测系统可突破传统电离室的采样频率限制,在纳秒时间尺度上捕捉脉冲式质子束流的瞬时波动,结合强化学习算法动态调整束流配送参数,将剂量输出误差控制在0.3%的临床阈值内。

自动化质控体系的发展正突破传统人工干预的局限性,通过数字孪生技术构建虚拟-现实交互的验证场景。治疗前设备状态自检系统可自动执行包括等中心精度验证、射野平坦度对称性检测等在内的质控项目,利用数字孪生模型对比历史数据与实时测量值,在短时间内完成传统需要数小时的质控流程^[20]。在治疗实施阶段,搭载深度学习算法的实时剂量验证系统通过EPID持续获取透射剂量数据,并与蒙特卡罗算法重建的预期剂量分布进行四维 γ 分析,当局部通过率低于95%时自动触发束流暂停并启动自适应计划优化^[21]。

区块链技术在质控数据管理中的应用正在构建去中心化的信任机制,通过执行多中心质控协议确保每个治疗分次的质控数据不可篡改且可溯源。在自动化发展的伦理维度,质控系统开始整合风险预测与决策解释功能。基于生成式对抗网络(generative adversarial network, GAN)构建的虚拟患者库,可模拟十种以上临床场景对质控流程进行压力测试,提前识别系统脆弱性。而自然语言处理(natural language processing, NLP)引擎则将复杂的质控参数转化为临床可理解的风险提示,帮助医务人员在自动化决策过程中保持有效监管。这种智能质控范式,既充分发挥了机器学习的速度优势,又保留了临床专家在关键决策中的主导地位,为放射治疗质量保障的智能化转型提供了安全可控的实现路径。

3.2 个性化质控策略

随着精准医疗和个性化治疗理念的推广,放射治疗的质控策略也应向个性化方向发展。每位患者的肿瘤类型、治疗历史、体型、基因特征等都可能影响治疗的效果,因此,质控系统也应根据患者的具体情况进行量身定制。

个性化质控策略不仅仅体现在患者定位与影像引导上,还应该贯穿治疗计划制定、剂量验证、治疗执行等整个过程中。例如,利用患者的基因组信息与生物标志物数据,结合治疗计划中的剂量计算,能够更加精准地预测肿瘤的放射敏感性,从而为每位患者提供最佳的治疗方案。

在放射治疗质控的范式转型中,个性化质控策略的提出标志着从群体化标准向患者特异性保障的深刻变革。传统基于统计学的质控阈值体系,正被融合个体解剖特征、生物特性及治疗响应的动态评估模型所重构。通过高分辨率四维CT与功能影像(如PET/CT动态示踪)的深度配准,可提取患者特有的组织异质性分布图谱,进而构建基于蒙特卡罗算法的个性化剂量计算引擎。例如,针对肺尖部肿瘤患者的呼吸运动轨迹特征,质控系统可自动生成包含组织密度动态补偿的剂量验证协议,其验证点位的空间分布密度随呼吸相位变化率自动调整,较传统均匀布点方案显著提升误差检出率。

智能化工具为个性化质控提供了可扩展的技术载体。基于迁移学习构建的患者相似性网络,能够从历史治疗数据库中筛选解剖特征、病理类型及设备参数匹配的参照案例,自动生成个性化的质控基线阈值。在质子治疗场景下,针对儿

童患者骨骼生长引起的解剖结构变化,质控系统通过GAN网络模拟不同生长阶段的剂量分布漂移模式,提前制定适应性验证方案。更前沿的探索中,纳米级无线剂量传感器通过可降解材料植入靶区周边组织,实现了真正意义上的体内三维剂量实时反馈,其空间分辨率达到细胞簇级别,为超个性化质控提供了颠覆性技术路径。

通过区块链技术构建的个人质控数据,完整记录从计划设计到晚期毒副反应的全程质控参数,为个体化放射生物模型的迭代优化提供闭环证据链。值得关注的是,个性化质控并非否定标准化体系,而是通过联邦学习框架实现群体智慧与个体特征的动态平衡。

3.3 多学科协作与大数据分析

放射治疗质控的未来将依赖于多学科的协作,尤其是物理学、医学影像学、数据科学等领域的融合。通过整合各学科的专业知识和技术手段,质控系统能够更全面地对治疗过程进行监控和优化。大数据分析将是推动放射治疗质控进步的核心力量。通过采集和分析大量的治疗数据,质控系统能够发现潜在的问题,并根据数据反馈进行实时调整。未来,放射治疗中的数据不仅仅限于患者的影像数据,还可以包括患者的生物学数据、治疗历史、医疗文献等,构建一个全方位的、动态更新的治疗数据平台。

在放射治疗质量控制的范式重构中,需要多学科协作与大数据分析的深度融合。例如,将加速器日志文件中的百万级机械运动参数与患者基因组学特征通过图神经网络进行关联映射,揭示设备性能波动与放射敏感性的潜在相关性。在质子治疗中心,由医学物理师、束流工程师与临床医生组成的实时质控小组,通过增强现实(augmented reality, AR)协作平台同步解析束流配送系统的毫秒级运行数据与患者体内剂量沉积的生物学效应,实现设备性能验证与临床疗效评估的闭环。

多学科协作的深度整合体现在影像、生物、物理闭环验证系统的构建。MR-linac等设备产生的实时功能影像数据,通过与放射组学特征提取算法、肿瘤微环境代谢模型的耦合,驱动质控参数从物理精度向生物效应维度动态延伸。例如,在胰腺癌治疗中,基于DWI影像ADC变化的在线分析,可自动触发质控系统调整验证重点——当肿瘤核心区出现早期治疗反应时,系统将提高周边危及器官的剂量监测频率并激活生物等效剂量重优化模块^[22,23]。这种将影像科、肿瘤内科与医学物理团队专业知识编码为算法规则的技术路径,使得质控体系能够自适应不同肿瘤类型的生物学行为特征。

大数据驱动的质控决策支持系统正重新定义质量控制的时间与空间维度。基于云原生架构构建的放射治疗数据湖,可实时汇聚来自全球数千家机构的设备校准记录、剂量验证报告及患者随访数据,利用时空序列挖掘技术识别传统质控规程未能覆盖的隐性风险模式。例如,对调强放疗中MLC

叶片速度的历史数据分析显示,特定型号加速器在连续治疗中存在微米级定位漂移趋势,这一发现直接推动了动态MLC校准算法的迭代升级^[24]。更前沿的探索中,NLP引擎可自动解析放疗科医师的临床注释与物理师的质控报告,通过知识蒸馏技术构建跨学科风险预警模型,在计划审核阶段即提示可能存在的生物学剂量与物理验证结果之间的逻辑断层。

联邦学习框架支持下的分布式质控网络,允许医疗机构在保护患者隐私的前提下共享质控模型而非原始数据,通过多中心协同训练提升小样本场景下的误差预测准确性。区块链技术的引入则构建了去中心化的质控证据链,将物理师的校准操作、工程师的设备维护记录与临床治疗结果通过智能合约进行不可篡改的关联存证。值得关注的是,多学科协作正从人类专家延伸至人工智能体之间的交互——基于大语言模型(large language model, LLM)构建的虚拟质控顾问,可实时融合放射生物学最新文献、设备厂商技术公告与本中心历史数据,为不同学科背景的临床团队提供动态决策支持。

3.4 创新技术临床转化的挑战与研发方向

在人工智能、图像引导放疗技术快速发展的当下,自适应放疗及相关质控技术正迅速进步,但在临床推广和应用过程中仍面临诸多挑战,可归纳为技术层面与实践层面两大方面。第一是技术方面的挑战,尽管人工智能赋能的ART技术展现出潜力,其临床应用仍面临多重壁垒。首先是物理的限制,比如MR-Linac中磁场对剂量分布的干扰;其次是AI驱动的质控算法泛化性不足,AI模型在小型医疗机构的数据稀缺场景下表现下降;最后是实时性的瓶颈仍然难以突破,当前从图像采集到计划更新的自适应闭环耗时平均为5~8分钟,远高于“实时”要求的小于2分钟,需要更高效的图像分割、剂量优化与质控集成算法。第二是实践方面的挑战。首先, workflow整合性不足, AI质控与自适应系统在集成至现有放疗信息系统过程中常面临接口、数据结构不统一等兼容问题,影响临床效率;其次,成本与效益平衡:如MR-guided ART单次治疗成本较常规放疗增加2~3倍,但经济负担与医保支付政策尚未完全对接,成为推广障碍;最后是标准化建设的问题,当前尚缺乏针对AI质控工具的FDA/CE临床认证路径,公共测试数据库建设不足,也限制了业界的协同发展。这些问题的存在,也为未来的研发提供了方向:首先,推动“高通量AI质控平台”的研发,融合自动图像处理、剂量审查与误差预测;其次,构建国家级多中心数据共享平台,提升AI算法泛化能力;然后,鼓励开发开源测试数据集,促进算法标准化评估体系建设;最后,加强功能影像(如PET、MRI等)与放疗系统的深度融合,为生物学自适应治疗提供质控支持。未来,自适应质控将成为连接治疗物理精准性与临床疗效评估的桥梁,并作为智慧放疗系统中的核心控制节点持续演进。

4 总结

放射治疗质控是确保治疗安全和效果的基础,随着技术的进步,质控体系正逐步向自动化、智能化、个性化方向发展。通过不断引入先进的技术和理念,放射治疗质控不仅可以提高治疗的精准性,还可以大大减少副作用,提升患者的治疗体验和生存质量。未来,随着人工智能、大数据等技术的应用,放射治疗质控体系将更加智能化、个性化,极大推动肿瘤治疗的精准化进程。

放射治疗质量控制体系的演进史,本质上是一部技术革新与临床需求相互驱动的创新史。从基于电离室与胶片验证的机械精度时代,到融合人工智能与生物组学的智能质控新纪元,质控体系的底层逻辑已发生根本性重构。传统质控框架通过刚性流程保障设备精度与剂量准确性,其核心价值在于建立可量化的安全边界——无论是AAPM TG-142协议对MLC叶片到位精度的 ± 0.5 mm阈值,还是三维水箱检测对射野平坦度 $\pm 3\%$ 的严苛要求,都体现了以物理参数为核心的标准化控制理念。然而,随着精准放疗技术向时空四维动态治疗范式演进,单纯依赖物理参数的质控体系已难以满足个体化治疗需求。这种矛盾催生了质控理念的变化:从离散的节点验证转向全流程连续监测,从群体化标准转向患者特异性策略,从物理参数验证延伸至生物效应关联。

当前质控体系的核心突破在于构建了多维度动态监测网络。影像引导技术通过MR-Linac系统的实时软组织追踪能力,将靶区定位精度提升至亚毫米级;治疗计划系统借助深度学习算法实现剂量分布的动态补偿,在呼吸运动管理中误差检出率提升37%;设备校准领域则通过数字孪生技术将传统数小时的质控流程压缩至10分钟。更值得关注的是,质控体系开始突破物理维度的限制——基于循环肿瘤DNA (circulating tumor DNA, ctDNA)的放射敏感性预测模型将分子特征转化为质控权重因子,EPID实时剂量验证与生物等效剂量模型的直接关联,标志着质控标准正从“剂量正确性”向“临床有效性”本质进化。

面向未来的质控体系呈现出三大融合趋势:实时化与自动化的技术融合、个性化与标准化的范式融合、多学科与大数据的方法融合。量子束流监测系统实现纳秒级误差捕捉,数字孪生驱动的智能质控项目,以及区块链构建的去中心化质控证据链,共同构筑起智能闭环质控网络。在个性化维度,四维CT与PET动态示踪的深度配准生成患者特异性验证协议,可穿戴柔性剂量计有望实现放疗过程中的实时剂量检测,联邦学习框架则在群体智慧与个体特征间建立动态平衡。多学科协作通过图神经网络关联百万级设备参数与基因组特征,AR协同平台打破学科壁垒实现毫秒级临床决策,而LLM构建的虚拟质控顾问正在重塑人机协作的知识生产模式。

质量控制不再是单纯的技术合规性检查,而是演变为连接物理精度与临床疗效的智能中介系统。当质控体系能够实

时解析肿瘤微环境代谢变化、自动关联设备状态与生物效应、动态平衡个体化需求与标准化规范时,放射治疗便真正实现了从“误差控制”到“疗效保障”的质控价值跃升。然而,这

种变化也带来新的挑战——智能算法的可解释性、隐私保护与数据共享的平衡、自动化决策的伦理边界等问题,都需要在技术变革中保证合理化进展。

推荐阅读文献

- Petroni G, Cantley L C, Santambrogio L, et al. Radiotherapy as a tool to elicit clinically actionable signalling pathways in cancer. *Nat Rev Clin Oncol*, 2022, 19: 114–131
- Xiao Q, Li G. Application and challenges of statistical process control in radiation therapy quality assurance. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2024, 118: 295–305
- National Center for Cancer Diagnosis and Treatment Quality Control, Committee of Quality Control in Radiotherapy, He J, Wang L, et al. Basic guidelines of quality control for radiotherapy (in Chinese). *Chin J Radiat Oncol*, 2018, 27: 335–342 [国家肿瘤诊疗质控中心放疗质控专家委员会, 赫捷, 王绿化, 等. 放射治疗质量控制基本指南. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27: 335–342]
- Rassow J. Quality control of radiation therapy equipment. *Radiother Oncol*, 1988, 12: 45–55
- Almond P R, Biggs P J, Coursey B M, et al. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys*, 1999, 26: 1847–1870
- Klein E E, Hanley J, Bayouth J, et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. *Med Phys*, 2009, 36: 4197–4212
- Miften M, Olch A, Mihailidis D, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM Task Group No. 218. *Med Phys*, 2018, 45: e53–e83
- Dyk J V, Barnett R B, Cygler J E, et al. Commissioning and quality assurance of treatment planning computers. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 1993, 26: 261–273
- Aird E G A, Conway J. CT simulation for radiotherapy treatment planning. *BJR*, 2002, 75: 937–949
- McClelland J R, Hawkes D J, Schaeffter T, et al. Respiratory motion models: a review. *Med Image Anal*, 2013, 17: 19–42
- Li T, Wang J, Yang Y, et al. Multi-parametric MRI for radiotherapy simulation. *Med Phys*, 2023, 50: 5273–5293
- Ahmed M, Schmidt M, Sohaib A, et al. The value of magnetic resonance imaging in target volume delineation of base of tongue tumours – A study using flexible surface coils. *Radiother Oncol*, 2010, 94: 161–167
- Maziero D, Azzam G A, de La Fuente M, et al. Implementation and evaluation of a dynamic contrast-enhanced MR perfusion protocol for glioblastoma using a 0.35 T MRI-Linac system. *Physica Medica*, 2024, 119: 103316
- Niyazi M, Andratschke N, Bendszus M, et al. ESTRO-EANO guideline on target delineation and radiotherapy details for glioblastoma. *Radiother Oncol*, 2023, 184: 109663
- Psoroulas S, Paunoiu A, Corradini S, et al. MR-linac: role of artificial intelligence and automation. *Strahlenther Onkol*, 2025, 201: 298–305
- Bissonnette J, Balter P A, Dong L, et al. Quality assurance for image-guided radiation therapy utilizing CT-based technologies: a report of the AAPM TG-179. *Med Phys*, 2012, 39: 1946–1963
- Dona Lemus O M, Cao M, Cai B, et al. Adaptive radiotherapy: next-generation radiotherapy. *Cancers*, 2024, 16: 1206
- Yan D, Georg D. Adaptive radiation therapy. *Z für Medizinische Physik*, 2018, 28: 173–174
- Glide-Hurst C K, Paulson E S, McGee K, et al. Task group 284 report: magnetic resonance imaging simulation in radiotherapy: considerations for clinical implementation, optimization, and quality assurance. *Med Phys*, 2021, 48: e636
- Pearson M, Eaton D, Greener T. Long-term experience of MPC across multiple TrueBeam linacs: MPC concordance with conventional QC and sensitivity to real-world faults. *J Appl Clin Med Phys*, 2020, 21: 224–235
- Dhoundiyal M, Rasal S, Gupta A, et al. Validation and efficiency evaluation of automated quality assurance software SunCHECK™ machine for mechanical and dosimetric quality assurance. *J Med Phys*, 2024, 49: 311–315
- Dalah E, Erickson B, Oshima K, et al. Correlation of ADC with pathological treatment response for radiation therapy of pancreatic cancer. *Transl Oncol*, 2018, 11: 391–398
- Mittauer K E, Yarlagadda S, Bryant J M, et al. Online adaptive radiotherapy: assessment of planning technique and its impact on longitudinal plan quality robustness in pancreatic cancer. *Radiother Oncol*, 2023, 188: 109869
- Kerns J R, Childress N, Kry S F. A multi-institution evaluation of MLC log files and performance in IMRT delivery. *Radiat Oncol*, 2014, 9: 176

Summary for “放射治疗质控原理: 前瞻性思考”

Principles of quality control in radiotherapy: a forward-looking perspective

Zhenjiang Li[†], Yongbin Cui[†] & Yong Yin^{*}

Shandong Cancer Hospital and Institute, Shandong First Medical University and Shandong Academy of Medical Sciences, Jinan 250117, China

[†] Equally contributed to this work

^{*} Corresponding author, E-mail: yinyongsd@126.com

Quality control (QC) is the cornerstone of modern radiotherapy, playing a vital role in ensuring both the precision and safety of therapeutic delivery. It encompasses a wide array of critical processes, including equipment calibration, patient positioning, treatment plan verification, and *in vivo* or phantom-based dose monitoring. Traditionally, QC has relied on standardized protocols, such as American Association of Physicists in Medicine Task Group No. 142 (AAPM TG-142), with a primary focus on verifying physical parameters and minimizing deviations in dose delivery. Advanced technologies such as image-guided radiotherapy (IGRT), Monte Carlo-based dose calculation, and 3D dosimetric verification form the backbone of modern radiotherapy QC, enabling submillimeter accuracy, minimizing treatment errors, and improving reproducibility. However, with the rapid evolution of radiotherapy technology, QC strategies are undergoing a paradigm shift. The integration of artificial intelligence (AI) now enables real-time monitoring of radiation dose distributions, automated anomaly detection, and adaptive plan optimization based on daily anatomical variations. Machine learning models can predict potential deviations before they occur, improving safety and treatment precision. In the context of IGRT, magnetic resonance-guided radiotherapy systems such as MR-Linac offer superior soft tissue contrast compared to conventional imaging systems, allowing for more accurate tumor localization and continuous intrafraction tracking. Functional imaging techniques such as diffusion-weighted MRI and PET provide dynamic biological information that can be used to assess tumor hypoxia, proliferation, and response to treatment, enabling personalized and adaptive radiotherapy. Furthermore, the implementation of federated learning and blockchain technology into QC systems addresses key challenges in data security, interoperability, and multicenter collaboration. Federated learning allows decentralized institutions to collaboratively train AI models without sharing raw patient data, thereby protecting privacy while enhancing model robustness. Blockchain ensures transparency, traceability, and data integrity across institutions, laying the foundation for trustworthy quality control frameworks at scale. In the future, radiotherapy QC is expected to become increasingly automated, intelligent, and patient-centric. Supported by high-throughput data from treatment logs, imaging, genomic, and clinical sources, big data analytics will uncover hidden risks and guide the development of individualized QC protocols tailored to specific patient biology and treatment context. The integration of radiobiology and systems science will enable QC systems to shift from reactive error detection to proactive efficacy prediction, aligning quality assurance processes with personalized medicine goals. As a result, QC will no longer be viewed as a purely technical or regulatory checkpoint, but will evolve into a dynamic, intelligent intermediary that bridges physical precision with clinical outcomes. It will assist in clinical decision-making, support real-time adjustments, and ensure that each treatment session is optimized not just for accuracy but also for biological effectiveness and therapeutic value. This transformation will ultimately enhance the safety, efficiency, and effectiveness of radiotherapy and redefine the role of QC in the era of precision oncology.

radiotherapy, quality control, artificial intelligence, automation, multidisciplinary collaboration

doi: [10.1360/CSB-2025-0493](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0493)