

• 专家述评 • doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2020.10.001

网络首发 [https://www.cnki.net/KCMS/detail/50.1097.R.20200318.1253.004.html\(2020-03-19\)](https://www.cnki.net/KCMS/detail/50.1097.R.20200318.1253.004.html(2020-03-19))

现代放射治疗技术的若干瓶颈及其智能化可行性分析^{*}

钱金栋,孙建国[△]

(陆军军医大学第二附属医院肿瘤科,重庆 400037)

[摘要] 现代放射治疗(简称放疗)技术是肿瘤治疗的重要手段之一,已发展至高精尖阶段,但仍存在放疗数据管理与应用困难、轮廓勾画费时费力、计划设计盲目主观、体位固定及摆位技术的局限性、图像引导技术的应用瓶颈、流程管理的不足和自适应放疗有待完善等诸多不足,亟须拉开智能化放射治疗探索的大幕,将数字化技术、智能化技术成果融合到现代放疗技术中,应用大数据、人工智能等实现放疗轮廓自动勾画、放疗计划自动设计、放疗流程智能实施、智能化自适应放疗等。目前人工智能技术日新月异,在放疗应用成果斐然,为实现智能化精准放疗提供了新方法,推动个体化放疗向智能化个性化发展。

[关键词] 放射治疗;放疗大数据;智能化放疗;智能靶区勾画

[中图分类号] R730.55 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2020)10-1549-05

Limitation of modern radiotherapy technology and feasibility analysis of its intelligent development^{*}

QIAN Jindong, SUN Jianguo[△]

(Department of Oncology, the Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400037, China)

[Abstract] Modern radiotherapy (radiotherapy for short) is an important means of tumor treatment, which has developed to an advanced stage, but there are still some deficiencies, such as difficulty in data management and application, target delineation, subjectivity of design plan, limitations of postural fixation and positioning technology, application bottleneck of image guidance, insufficient process management and adaptive radiotherapy, etc. These deficiencies need intelligent development. Digital technology and intelligent technology are applied to realize target delineation, automatic plan and design, intelligent process implementation, adaptive radiotherapy. Artificial intelligence technology is developing rapidly in the application of radiotherapy, which provides new technology for the realization of intelligent precise radiotherapy and promotes the development of intelligent radiotherapy and individualized radiotherapy.

[Key words] radiotherapy; radiotherapy big data; intelligent radiotherapy; intelligent target delineation



孙建国

放射治疗(简称放疗)由早期“可能有效”的试探发展到现代疗效明确,成为三大主要治疗恶性肿瘤的方法之一,是肿瘤综合治疗的重要组成部分,目前 60%~70% 的肿瘤患者需要接受放疗,约 22% 的恶性肿瘤可以通过放疗治愈^[1]。

放疗技术由原始的“经验模式”发展至三维适形(3DCRT)乃至现代主流的精确调强放疗(IMRT)技术。IMRT 的特征是产生的凹形等剂量分布、适形度高、同步推量,同时多部位治疗和正常器官避让,使患者受益^[2-4]。IMRT 得以执行的核心技术是数字化的直线加速器(LA)、放射治疗计划系统(TPS)和图像引导(image guided)设备。

现代放疗的主要矛盾随着人们对肿瘤治疗认知

^{*} 基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0106400)。 专家简介:孙建国,博士,教授/主任医师,博士生导师,国家重点研发计划首席专家,全军肿瘤诊治研究所副所长,新桥医院肿瘤科副主任。美国斯坦福大学访问学者,中华医学会数字医学分会副主任委员、重庆市中西医结合学会肿瘤免疫治疗专委会主任委员、全军肿瘤学会放疗专委会青委副主任委员、重庆市医学会肿瘤学专业委员会青委副主任委员、重庆市中西医结合学会肿瘤学专委会副主任委员、西部放射治疗协会“胸部放疗专委会”常务委员、中国临床肿瘤学会(CSCO)患者教育专家委员会常务委员兼秘书长、International Society of Digital Medicine (ISDM) Council member。获得国家重点研发计划 1 项,国家自然科学基金项目 4 项,博士后基金项目 1 项,重庆市自然科学基金重点项目 1 项,CSCO 青年基金项目 1 项、吴阶平基金项目 1 项,军队医疗成果二等奖(第 1 作者)、重庆市科技进步一等奖(第 5 作者)、重庆市教学成果二等奖(第 3 作者),发表 SCI 论文 40 余篇(单篇 14 分以上)。 作者简介:钱金栋(1986—),工程师,硕士,主要从事 TPS 质量控制与质量保证的研究。 [△] 通信作者,E-mail:sunjg09@aliyun.com。

的提升已非常明确,日渐凸显。精准医疗、个性化医疗时代的要求,亟须提升完备放疗相关软硬件和配套技术,提高放疗设备的数字化、集成化、自动化和智能化程度^[5-6]。探索推广个性化放疗,最大限度地提高医疗效率、医疗质量、治疗效果,并降低不良反应,以及实现各地区、各层级医院的同质化放疗,都是当前亟待解决的重大问题。

目前大数据、人工智能技术在其他领域的发展与应用为放疗的发展提供了新方法,尝试将智能化技术引入到放疗全流程^[7-8],以解决现代放疗的不足,顺应智能化时代的呼唤。2017 年 11 月 12 日,中华医学会第十四次全国放射肿瘤治疗学学术会议(CSTRO),将“人工智能和大数据”列入专题研讨,将其赋名为“人工智能与放疗”。智能放疗是一门将数字医学、人工智能、计算机信息技术及通信技术深度融合应用于现代放疗的新学科,以提高肿瘤放疗诊治效率和降低人为因素的不确定性为目的,实现快速化、精准化、同质化的智能放疗及智能放疗流程管理,替代放疗医务工作者烦琐的病案信息管理、靶区勾画、计划设计、质量控制、肿瘤控制评价等重复性强、劳动量大、耗时长的工作。

1 放疗数据管理技术的自身局限

现代数字化、信息化技术在医院应用广泛。肿瘤放疗患者的医疗数据也实现了数字化,即基本信息、检验指标、放疗技术相关的诊断报告、影像资料等,这些来源不同的海量数据形成了放疗数据的多样性^[9-11]。各放疗单位的独立性导致了放疗单位数据的不统一。患者放疗过程复杂烦琐,个体放疗过程的数据多样性、独立性、个体化差异加剧了放疗数据的离散。现代放疗数据的管理因其特点而困难重重,数据的有效管理与应用是智能化放疗实现与否的首要因素,对其智能化管理已刻不容缓。

数字化放疗产生的数据构成了放疗大数据。它具有一般大数据的特征,又具有放疗特色,即各放疗单位的数据相互独立难以建立相互关联的关系、数据的存储和使用缺乏统一的规划和设计、大数据资源目标需求差异很大。挖掘放疗大数据并建立数据间的关联体系,形成数据资源体系,进而通过有效的管理,让数据最大程度地发挥价值,这是决定其能否形成大数据资源化体系的主要因素。

目前,放疗大数据的智能化管理的难度非常大,体现在放疗影像数据通过人工的方式标注进行前处理,工作量巨大,耗费大量的人力、物力和财力,占据开发成本的绝大部分。另外数据的多中心独立来源和私密性也加大了放疗人工智能研发单位获取数据的难度。从技术上看,未来云计算技术对于放疗大数据管理具有极大优势,应用云计算技术、区块链加密技术等,在数据的人工前处理基础上,“教会”服务器实现人工智能统一数据清洗与标注,提高放疗影像数据前处理和标注的质量,实现数据资源价值,对放疗人工智能发展的性能有着举足轻重的影响。

2 放疗固定及摆位技术的局限性

现有的体位固定及摆位技术过于依赖人为因素,摆位随机误差大、波动大^[12-13]。多数单位虽然配备了二维或三维的图像引导系统[如电子射野影像系统(EPID)、kV 级锥形束 CT(CBCT)],但受患者经济承担能力、医保政策、设备治疗效率等因素的影响,难以实现每次治疗都实施图像验证,因此难以有效解决摆位误差引起的剂量偏差。如何实现快速化、精确化的摆位误差校正,是智能放疗的一个研究方向,即智能摆位。

放疗智能摆位的理想目标是实现患者治疗时体位实时监控、实时校正、实时反馈,以达到在放疗实施中,通过实时影像监测,发现因器官运动或体位位移等引起的偏差,利用治疗床智能化自动化位置调整实现智能化的个性化位置追踪,实现剂量精准放疗。

现阶段智能摆位技术探索的方向主要是应用图像引导放疗(IGRT)技术,反馈靶区位置信息,但仍难以适时化位置纠正、适时化剂量纠正,不能实现自适应放疗(ART)的目的。未来应用增强现实(AR)与虚拟现实(VR)技术在智能摆位方面有很大的潜力^[14-15],可以帮助最优地使用位置引导图像,提高患者摆位的准确性或加快摆位决策,使治疗执行能快速而准确地实现。在患者进行放疗前和治疗期间,AR/VR 技术通过计算机图形图像和真实材料的同时显示,直观快速纠正患者的摆位误差,与剂量累积 AR 显示系统共同运行,可实时监测靶区受照射剂量;患者通过佩戴 AR/VR 眼镜,可以直接观看到自己的呼吸、靶区位置情况,配合医生的指令提升放疗的精确度。

3 放疗轮廓勾画费时费力

基于 CT、MR 图像的放疗轮廓勾画主要还是依靠放疗医生的经验判断和临床技能手动完成,费时费力、效率低下^[7,16-17];勾画影像来源复杂,需联合多种影像技术以弥补单一影像信息的缺陷;放疗轮廓勾画虽有一定的指南规范,但不能具体到个体病例,勾画具有较大的不确定性。

利用人工智能实现放疗轮廓自动勾画具有重要意义,不受人为因素干扰,易实现快速化、精确化、同质化的放疗轮廓自动勾画^[17-18]。目前在智能放疗轮廓勾画方面主要有基于模板图谱库的智能勾画方法,“教会”计算识别肿瘤区域和危及器官的基于图像分割的智能勾画方法,基于深度学习的可持续学习训练的智能勾画方法,但均处于初期阶段。未来,将各放疗单位的信息网络纳入云计算中心,实时传入放疗数据,统一规范地标注影像数据,通过机选中心快速有效地处理,持续地进行机器学习训练,从而提高智能化、自动化勾画能力。最后,机器学习实现肿瘤的自动识别和解剖定位,完成肿瘤、非肿瘤组织、感兴趣区域的自动分割,放疗医生只需要对自动分割后的影像进行审核、微调和修改,就可以用于临床治疗,极大地减轻放疗医生的工作强度。另外,通过大量的学习,

计算机能够获取人类可能忽略或者不易察觉的影像细节信息和特征状态。一旦机器学习完成,在新样本到来时,只需要进行一次计算就可以得到处理结果,此时的处理时间非常短,会指数倍降低放疗轮廓勾画的工作时间,提高放疗医生靶区勾画工作效率。同时,大量样本持续化训练,可保证放疗靶区勾画质量,减少不同医生间、不同放疗单位间的放疗靶区勾画差异。

4 放疗计划设计盲目主观

TPS 是现代肿瘤放疗重要的基础设备^[5],现代 TPS 基于二维单一方向和尺寸的平面切片信息,缺乏空间的三维信息,不能直观地反映病灶区情况,可能造成治疗的偏差;计划设计和优化过程中,物理师往往凭借经验和感觉进行射野角度、权重和子野分布的调整,较为盲目和“主观”,难以获得最优化放疗计划。另外,国内医院放疗物理师欠缺,水平参差不齐,存在大量患者接受不规范放疗的可能,人工智能技术的引入有望实现智能化的 TPS,突破现代 TPS 的盲目主观。

利用放疗大数据的智能学习,在 TPS 中引入经验引导的治疗计划(knowledge-based treatment planning),将过去获得的治疗经验,融入新患者的治疗决策中去,可望显著提高放疗计划优化的效率、避免人为因素的盲目主观。目前智能计划设计主要的探索发展方向有基于人工智能神经网络的剂量计算和基于大数据深度学习方法剂量体积直方图预测模型^[18-19]。

放疗靶区和危及器官智能勾画完成并审核后,应用 TPS 智能计划设计模块,由放射物理师依据处方剂量进行照射野分布设计和虚拟剂量模拟予以确认,进行放疗计划的智能化设计和优化,根据不同患者的具体病情,能够快速高效地得到最优解,从而为患者的照射方式、照射范围、照射剂量提供参考,得到确定的放疗计划,输出治疗文件。另一方面,基于 IGRT 的影像反馈,实现智能化在线的快速靶区剂量和位置修正,实施真正的自适应放疗。

智能计划设计实现的方式可基于云处理的智能计算方式,云端积累的不同人类模型数据也将用于后续的深度学习优化,进一步提升计划设计的精度,实现多中心数据来源,避免单一放疗单位数据的局限性、独立性,提升智能计划的认可度。

5 IGRT 的瓶颈

IGRT 应用影像技术探测摆位误差和器官运动,纠正靶区位置偏差后实施治疗,用以指导此次或后续分次治疗,以提高放疗精准性,在临床上取得了良好效果^[20]。IGRT 是调强放疗得以精准执行的有力保障。现代 IGRT 的影像设备主要有:EPID、CBCT、非正交 kV 级 X 线摄片透视系统、光学表面成像(OSI)。现代放疗向图像引导下的精确放疗发展,目前 IGRT 应用成熟,但也存在着配准结果人为因素影响大、自动化不足、采集图像费时、空间分辨率不理想等因素,

限制了其应用。

精确放疗是放疗的必然发展趋势,IGRT 也在不断地发展与完善,使之更好地为精确放疗提供医学影像、引导放疗、给肿瘤组织最大的剂量和保护正常组织免于被照射,将智能化发展的相关成果引入到 IG-RT 中,更能够进一步发挥 IGRT 的积极作用。

IGRT 在三维放疗技术的基础上加入了时间因素后形成的一种四维放疗技术,利用人工智能技术,将放疗机与影像设备相结合,在放疗过程中考虑摆位误差、呼吸动度、靶区剂量分布等因素所造成的误差,应用各种影像设备在患者治疗前、治疗中对肿瘤及肿瘤周围的正常组织器官进行实时监控,对偏差做出相应的调节以提高肿瘤放疗的精准性,可以充分发挥四维放疗技术的优势,实现实时的智能计划执行方式,避免靶区位移、器官运动、肿瘤体积变化引起的剂量偏差。另外,智能化图像引导技术的位置信息实时反馈是实现自适应放疗的基础。最后,以功能影像、分子成像、代谢成像等为代表的生物成像技术,可以非侵入性实时获得体内肿瘤和正常组织的放射生物学应答信息,将这些个体化的应答信息转化为智能放疗计划执行过程的手段,提升治疗增益比,实现智能化的生物应答引导放疗(BRGR^T)^[21-22]。

6 放疗流程管理的不足

放疗的全流程包括诊断、建立放疗档案、定位、靶区勾画、计划设计、计划验证、计划执行、位置验证、信息文档记录等,各流程相互独立,只能渐次序不能跨越。从确立放疗方案至结束,通常需要 1~8 周时间,各流程有机衔接问题需要大量人力、物力、时间进行处理。如何高效管理及推进放疗各流程,保证各个环节准确、顺畅的执行,是现代放疗发展的瓶颈之一,引入智能化技术,可以促进放疗精细化管理的发展应用。

放疗流程智能化管理希望实现整个诊治过程的自动化、智能化,为每例患者提供精确、智能、快速、高效、优化的个体放疗方案,避免易出现的人为失误。目前在智能信息管理系统、放疗诊疗方案的智能化、智能放疗定位、智能放疗摆位、智能放疗实施和智能质量控制等方面也得到了探索发展。未来智能流程的实施可以整合实现操作台管理和直线加速器管理的统一化和智能化,实现直线加速器、治疗床智能调整一体化,简化计划执行程序,提高治疗精度。此外,通过智能化的监护监测,加以自动人脸识别系统,充分保障患者治疗时的生命安全和治疗安全,避免重大医疗事故的发生。

在计划执行方面,通过 VR、AR、MR 技术^[14-15],实现执行环节信息三维可视化精确显示,可以帮助最优地使用图像位置验证,提高患者摆位的准确性或加快患者摆位,从而实现快速而准确的放疗执行。另外,VR、AR、MR 在放疗数据智能交互方面就有更直观、更便捷的优势,应用 VR、AR 真实世界的虚拟在线,在智能放疗领域也有广泛的应用前景,未来的放

疗人员将能够以更直观和高效的智能化方式操作三维和四维图像,并且随时都可以操作,这有助于更好地利用现代诊断工具提供的大量信息,诸如临床病例讨论或复杂病例规划等协作性任务。甚至能为智能靶区勾画、智能计划设计等提供新方法,基于 VR、AR 技术虚拟现实的显示,医生能够更好地全方位掌握患者解剖结构,智能化提升患者计划质量,保障治疗疗效。

7 ART 有待完善

现代放疗的焦点之一在于如何减少治疗过程中摆位误差、器官运动、肿瘤退缩、患者体质量变化等原因带来的剂量偏差,虽然在分次治疗时通过 IGRT 技术能有效解决摆位与靶区位置偏差的问题^[23],但引起的剂量偏差仍然无法有效解决。现代基于 IGRT 技术发展出的 ART,局限于离线的下次剂量纠正或耗时的在线纠正,只是形式上的 ART,实现实时的 ART 技术,需要高效的 IGRT 技术、快速的 TPS 计划响应、高效的加速器执行能力三者的无缝对接,需要在现代放疗设备的基础上有所突破提升,人工智能的引入为 ART 技术的发展提供了新方法、新思路。

ART 是智能摆位技术和智能计划技术的联合效果,智能摆位发现体位偏差引起的剂量偏差后,立即修正放疗计划,纠正剂量给予的偏差,达到精确智能放疗的目的。随着智能化 IGRT 及智能化 TPS 的发展,未来人工智能干预下的 ART 将真正实现。智能化 ART 可实时监控患者治疗中放疗靶区是否得到精确照射、危及器官是否受到意外照射,在线发现位置偏差并判断是否需要自动位置或在线计划修正预警,待医务人员对预警方案进行确认执行,提高治疗精度。一方面,在放疗过程中,部分患者肿瘤明显退缩或体质量变化明显,需要通过导入分次引导图像与原始计划定位图像进行刚性配准和形变配准,生成放疗靶区和危及器官的再次轮廓勾画,重新计算剂量分布及直方图;根据原始处方约束条件及临床要求进行放疗计划的快速在线修改,以确保治疗安全。另一方面,放射生物学的发展、基因检测技术的应用、免疫组织化学等生物化学检验在肿瘤治疗中的深入应用,可以无创实时获取个体对射线的生物应答信息^[21-22];在智能化 ART 执行中,考虑个体化的生物应答信息,可以在个体层面更加精准地实现智能化 ART。

ART 技术针对放疗过程中肿瘤运动靶区实时追踪和实时剂量监测反馈,在时无时延、大带宽、高可靠的 5G 移动通信技术支持下^[24-25],能够有效传输至 TPS,即时完成放疗计划微调整,进一步保障真正的自适应、个体化放疗目标。

8 结论与展望

未来以数字化、智能化、可视化为基础的智能放疗将实现质的飞越,肿瘤放疗进入“智慧新纪元”时代^[12-13,16]。从技术上来说,人工智能在放疗的应用主要是数据训练人工智能得出最优化的算法,应用于肿瘤放疗各历程,形成智能化放疗体系,智能放疗发展

中也存在着一些不可忽视的问题。智能放疗技术取得了成效,但研发不够深入,仍处于起步阶段,总体发展不均衡,目前的技术重点集中在放疗数据库、信息管理、放疗轮廓勾画和智能计划设计等方面,其他方面如智能诊断、智能固定、智能摆位、智能计划、智能复位、放疗并发症预测和随访网络建设等,则较为薄弱。智能放疗的准确率依赖于经验积累或验证病例的样本质量,不能自主创新应用新的放疗技术,不能建立新的诊疗标准,更不能从新的病例中发现新的放疗方法。

智能放疗技术诊疗原理跟放疗医生有本质区别,医生能够从患者表象的临床症状,结合患者全身因素,深入思考疾病的本质,把握肿瘤放疗的愈后状况;智能放疗只能依据疾病表象进行机械的模仿诊疗,它能够提高工作效率,避免人为因素的干扰,是局限在各流程局部的智能化,但不是基于人类经验和智慧的全盘智能化。另一方面,智能放疗缺乏以人为本的社会、心理关怀,这些人文因素能够提升患者放疗过程中的接受度、舒适度和心理适应性。智能放疗技术基于计算机通信技术,存在着其安全共性问题,又有医疗信息安全的问题,对用户隐私、数据主权、数据迁移与传输、灾难准备等方面进行有效保护是智能放疗发展的挑战之一。如何对数据进行客观的加密保护、对数据进行备份、对云资源进行访问控制都是现实存在的问题。

另外,我国医疗人才的培养周期长、成本高,优质医生资源短缺,地域分布不均,优质资源多集中在发达地区,随着老龄化社会的到来,医疗资源的供给不足日渐凸显。人工智能医疗的引入发展有望缓解我国从业人员少、放疗技术不完善、影像技术自身局限、放疗流程的自动化程度低、缺乏中国版放疗指南及个体化放疗标准等现代放疗的不足问题。

参考文献

- [1] 郎锦义,王培,吴大可,等. 2015 年中国大陆放疗基本情况调查研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016,25(6):541-545.
- [2] International Atomic Energy Agency. Specification and acceptance testing of radiotherapy treatment planning systems: IAEA-TECDOC-1540[S/OL]. Vienna: IAEA. [2020-02-10]. http://lcr.uerj.br/Manual_ABFM/te_1540%20specification%20and%20acceptance%20testing%20of%20radiotherapy%20treatment%20planning%20systems.pdf.
- [3] HODAPP N. The ICRU Report 83: prescribing, recording and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)[J]. Strahlenther Onkol, 2012,188(1):97-99.
- [4] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京:原子能出版

- 社,1999.
- [5] 王冬,田金,许锋.放疗新技术的研究进展[J].中国医疗设备,2015,30(2):69-71.
- [6] 国产放疗设备集成应用专家组,中华医学会数字医学分会,重庆市医学会放射肿瘤治疗学专业委员会,等.国产放疗设备集成应用专家共识[J].中华放射肿瘤学杂志,2019,28(8):561-565.
- [7] 王卫东,郎锦义.基于生命/影像组学和人工智能的精确放射治疗思考与展望[J].中国肿瘤临床,2018,45(12):604-608.
- [8] GILLIES R J, KINAHAN P E, HRICAK H. Radiomics: images are more than pictures, they are data[J]. Radiology, 2015, 278(2): 563-577.
- [9] KAMIYA A, MURAYAMA S, KAMIYA H, et al. Kurtosis and skewness assessments of solid lung nodule density histograms: differentiating malignant from benign nodules on CT[J]. Jpn J Radiol, 2014, 32(1): 14-21.
- [10] LEE G, LEE H Y, PARK H, et al. Radiomics and its emerging role in lung cancer research: imaging biomarkers and clinical management: State of the art[J]. Eur J Radiol, 2017, 86: 297-307.
- [11] COROLLER T P, AGRAWAL V, NARAYAN V, et al. Radiomic phenotype features predict pathological response in non-small cell lung cancer[J]. Radiother Oncol, 2016, 119(3): 480-486.
- [12] 杜晓昕,王波,胡斌,等.用于肿瘤癌症大数据分类的新型仿生优化计算研究[J].科学技术创新,2018,17(1):17-18.
- [13] 段永璇,甄天民,谷景亮,等.大数据环境下肿瘤放疗的数据解析[J].中华医学图书情报杂志,2018,27(3):10-13.
- [14] KAMPHUIS C, BARSOM E, SCHIJVEN M, et al. Augmented reality in medical education? [J]. Perspect Med Educ, 2014, 3(4): 300-311.
- [15] BUTLER E. The use of interactive, real-time, three-dimensional (3D) volumetric visualization for image guided assistance in the brachytherapy needle placement for advanced gynaecological malignancies[J]. Int J Radiat Oncol, 2011, 81 (2): 482-483.
- [16] 宋波,朱甜甜,于旭,等.医疗大数据在肿瘤疾病中的应用研究[J].中国数字医学,2017,12(11): 35-37.
- [17] LI Q, KIM J, BALAGURUNATHAN Y, et al. Imaging features from pretreatment CT scans are associated with clinical outcomes in non-small-cell lung cancer patients treated with stereotactic body radiotherapy[J]. Med Phys, 2017, 44(8): 4341-4349.
- [18] HUYNH E, COROLLER T P, NARAYAN V, et al. CT-based radiomic analysis of stereotactic body radiation therapy patients with lung cancer[J]. Radiother Oncol, 2016, 120(2): 258-266.
- [19] CUNLIFFE A, ARMATO S G, CASTILLO R, et al. Lung texture in serial thoracic computed tomography scans: correlation of radiomics-based features with radiation therapy dose and radiation pneumonitis development [J]. Int J Radiat Oncol, 2015, 91(5): 1048-1056.
- [20] ADAMS D L, ADAMS D K, HE J, et al. Sequential tracking of PD-L1 expression and RAD50 induction in circulating tumor and stromal cells of lung cancer patients undergoing radiotherapy[J]. Clin Cancer Res, 2017, 23(19): 5948-5958.
- [21] BUTLER E. The use of interactive, real-time, three-dimensional (3D) volumetric visualization for image guided assistance in the brachytherapy needle placement for advanced gynaecological malignancies[J]. Int J Radiat Oncol, 2011, 81 (2): 482-483.
- [22] WANG W, LANG J. Strategies to optimize radiotherapy based on biological responses of tumor and normal tissue[J]. Exp Ther Med, 2012, 4(2): 175-180.
- [23] SHEN G, XIAO W, HAN F, et al. Advantage of PET/CT in target delineation of MRI-negative cervical lymph nodes in intensity-modulated radiation therapy planning for nasopharyngeal carcinoma[J]. J Cancer, 2017, 8(19): 4117-4123.
- [24] NAKATA N, SUZUKI N, HATTORI A, et al. Informatics in radiology: intuitive user interface for 3D image manipulation using augmented reality and a smartphone as a remote control[J]. Radiographics, 2012, 32(4): E169-174.
- [25] 叶东矗,陈木子.5G时代的智慧医院建设[J].中国医学装备,2019,16(8):150-153.