



肿瘤学杂志

Journal of Chinese Oncology

ISSN 1671-170X, CN 33-1266/R

《肿瘤学杂志》网络首发论文

题目：《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》解读
作者：陈明
收稿日期：2024-12-01
网络首发日期：2024-12-25
引用格式：陈明.《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》解读[J/OL]. 肿瘤学杂志.
<https://link.cnki.net/urlid/33.1266.r.20241224.1035.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》解读

陈明^{1,2}

(1. 华南恶性肿瘤防治全国重点实验室, 广东省鼻咽癌诊治研究重点实验室, 广东省恶性肿瘤临床医学研究中心, 中山大学肿瘤防治中心, 广东 广州 510060; 2. 中山大学-国科离子放射治疗前沿技术联合实验室, 广东 广州 510060)

摘要: 肺癌是我国发病率和死亡率最高的恶性肿瘤。精准放疗显著提高了肿瘤控制率、降低了不良反应, 在肺癌治疗中发挥着重要作用, 在图像引导放疗基础上发展起来的在线自适应放疗 (adaptive radiotherapy, ART) 逐步进入临床。为规范 ART 在肺癌治疗中的临床应用, 推动技术发展与临床协作, 我国专家基于现有文献和临床经验, 制定了《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》。全文对该共识进行解读, 梳理其产生背景、核心内容、亮点以及未来研究方向。

关键词: 肺肿瘤; 放射疗法; 自适应放疗; 专家共识; 解读

中图分类号: R734.2 **文献标识码:** A

Interpretation of the Chinese Expert Consensus on Online Adaptive Radiotherapy for Lung Cancer

CHEN Ming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Oncology in South China, Guangdong Key Laboratory of Nasopharyngeal Carcinoma Diagnosis and Therapy, Guangdong Provincial Clinical Research Center for Cancer, Sun Yat-sen University Cancer Center, Guangzhou 510060, China; 2. United Laboratory of Frontier Radiotherapy Technology of Sun Yat-sen University & Chinese Academy of Sciences Ion Medical Technology Co., Ltd, Guangzhou 510060, China)

Abstract: Lung cancer is a malignant tumor with the highest morbidity and mortality. Precision radiotherapy significantly improves tumor control and reduces treatment-related toxicities, which plays a critical role in treatment of lung cancer. With the rapid development of advanced technology, online adaptive radiotherapy (ART) based on image-guided radiotherapy has been widely applied in China. In order to standardize clinical application and to improve the cooperation of technology and scientific research, the Chinese Expert Consensus on Online Adaptive Radiotherapy for Lung Cancer has been developed. This paper interprets the consensus, focusing on its background, core content, highlights, and future research directions.

Subject words: lung neoplasms; radiotherapy; adaptive radiotherapy; expert consensus; interpretation

肺癌是我国发病率和死亡率最高的恶性肿瘤^[1]。作为当今三大肿瘤治疗手段之一, 放疗在肺癌治疗中发挥着不可替代的作用。目前普遍应用的调强放疗 (intensity modulated radiotherapy, IMRT) 和图像引导放疗 (image guided radiotherapy, IGRT) 技术在给予肿瘤规定照射剂量的同时, 可最大限度地降低危及器官 (organ at risk, OAR) 的受照剂量。但由于放疗实施多持续数周, 与初始放疗计划相比, 肺部肿

瘤及其周围 OAR 在放疗分次间经常发生位置和解剖形态改变, 造成靶区漏照或使 OAR 卷入射野内, 最终导致肿瘤未控或放疗并发症增加。因此, 放疗过程中有必要在适当的时机修改放疗计划。

1997 年, Yan 等^[2]首次提出自适应放疗 (adaptive radiotherapy, ART) 概念, 他把整个放疗过程, 即从模拟定位、计划设计、放疗实施到验证作为一个可自我响应、自我修正的动态闭环系统, 进而实现肿瘤患者的个体化治疗。然而 20 余年来, ART 的开展一直受制于计算机技术、设备性能和人员配合度等诸多因素。随着机载影像技术进步, 人工智能

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFC2413900); 国家自然科学基金 (82303577)

通信作者: 陈明, E-mail: chenming@sysucc.org.cn

收稿日期: 2024-12-01

(artificial intelligence, AI)的赋能,基于 IGRT 发展延伸出的 ART 有望成为下一代革命性放疗技术,其中的在线 ART(online or real-time ART)更是成为当今“网红技术”。近年,欧洲学者们报道了在线 ART 在肝癌、前列腺癌和膀胱癌等腹盆腔肿瘤中的小样本应用结果^[3-9],证实在线 ART 可保证肿瘤剂量覆盖率的同时,减少计划靶体积(planning target volume, PTV)外放边界、降低 OAR 受量,进而可能降低发生急性和远期不良反应的风险。去年,我国北京协和医院、复旦大学附属肿瘤医院和中山大学肿瘤防治中心(以下简称“中肿”)等头部医疗单位也纷纷开展了在线 ART 在宫颈癌、直肠癌、鼻咽癌和肺癌等领域的临床应用,标志着我国精准放疗正迈入在线 ART 的新时代。

为规范 ART 在肺癌治疗中的临床应用,推动技术发展与临床协作,我国专家基于现有文献和临床经验,制定了《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》^[10]。本文将对该共识进行深度解读,详细梳理其产生背景、核心内容、亮点以及未来研究方向。

1 共识的产生与制定过程

1.1 背景与目的

肺癌是全球范围内常见的恶性肿瘤之一,其发病率和死亡率均居高不下。放疗作为肺癌综合治疗的重要手段,对提高患者生存率、改善生活质量具有不可替代的作用。然而,传统放疗方式在面对肿瘤形态变化、患者个体差异以及放疗过程中可能出现的并发症等方面存在诸多挑战。因此,探索更为精准、个体化的放疗策略显得尤为重要。

ART 正是在这一背景下应运而生。它通过在治疗过程中实时或离线地调整放疗计划,以更好地适应肿瘤和正常组织的变化,从而提高治疗效果,降低副作用。然而,ART 的临床实施并非易事,涉及复杂的技术要求、工作流程调整以及患者选择和治疗时机的确定等多个方面。因此,制定一份全面、权威的专家共识,对于规范 ART 的临床应用、推动技术发展与临床协作具有重要意义。

1.2 制定过程与参与人员

《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》的制定过程严谨而科学。首先,由国内肺癌治疗领域的知

名专家组成编写委员会,负责共识的整体框架设计和内容规划。随后,编写委员会广泛搜集国内外相关文献和临床数据,对 ART 在肺癌治疗中的应用现状、技术进展、临床效果等方面进行深入分析和评估。在此基础上,编写委员会结合我国实际情况和临床需求,制定了共识的初稿。

为确保共识的科学性和实用性,编写委员会还多次组织专家会议进行讨论和修订。会议邀请了放射治疗、医学物理、放疗技术等多学科的专家参与,共同对共识的内容进行审议和完善。经过多轮修改和审议,最终形成了《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》的正式版本。

1.3 与其他相关指南的关联

《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》在制定过程中充分参考了国内外相关指南和共识,如国际抗癌联盟(Union for International Cancer Control, UICC)的放疗指南、美国国立综合癌症网络(National Comprehensive Cancer Network, NCCN)的肺癌治疗指南等。同时,该共识也结合了我国肺癌治疗的实际情况和临床需求,对 ART 在肺癌治疗中的应用进行了更为具体和细致的阐述。因此,该共识不仅与国际接轨,也体现了中国特色和临床实用性。

2 主要内容与亮点

2.1 ART 的分类与工作流程

2.1.1 自适应放疗的分类

ART 根据适应时机的不同,可分为离线适应、在线适应和实时适应三种类型。离线适应是在治疗完成后根据患者的影像数据更新治疗计划;在线适应则是在每次治疗前根据实时获取的影像数据调整治疗计划;实时适应则更为先进,它能够在治疗过程中基于实时成像技术自动调整放疗计划。

2.1.2 自适应放疗的工作流程

ART 的工作流程包括患者定位、影像引导、靶区勾画、计划再优化以及质量保证等多个环节。其中,影像引导是 ART 的核心环节之一,它要求使用高质量的影像技术[如锥形束计算机断层扫描(cone-beam computed tomography, CBCT)、扇形束 CT(fan beam CT, FBCT)或磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)]来实现精准的靶区勾画和剂

量计算。同时,高效的工作流程和统一的计算机生态系统也是 ART 成功实施的重要保障。

2.2 ART 的技术要求与临床应用

2.2.1 技术要求

作为 IGRT 下一代技术进展的代表,在线 ART 可在治疗过程中基于肿瘤或正常组织的变化短时间内动态优化放疗方案,实现个性化精准放疗^[11-13]。随着在线 ART 概念的持续升温,不少医疗单位正逐步或已具备执行在线 ART 的硬件条件。以肺癌为例,准确、顺利地执行在线 ART 需具备如下关键技术。

2.2.1.1 多模态高清影像与快速配准技术

在线 ART 以直线加速器的机载影像为基础,进行放疗间靶区勾画与再计划,这需要高质量影像引导。然而传统 CBCT 生成的图像往往缺乏软组织对比度,难以准确识别正常脏器和肿瘤间的精确边界。另外,图像还存在由患者呼吸运动产生的伪影,进一步降低了成像质量与治疗效率。目前,Varian 的 Ethos™ 智慧放疗平台通过迭代 CBCT (iterative-CBCT, iCBCT) 算法对扫描图像的重构显著改善了加速器机载影像质量; 联影的 uRT-linac 搭载的 FBCT 也具备诊断级的成像清晰度及动态四维成像。每次放疗前通过在线 4D-CT 技术,可对运动的肺癌精准定位并为靶区的精准勾画提供强大支撑。同时,高质量的影像为快速准确的图像配准提供了保证^[14],越来越多的研究正尝试基于深度学习的图像配准方法优化现有 ART 流程,近年已有不少相关研究^[15-19]。另外,通过 HU 值和电子密度的正确转换, KV-CBCT 形式的 IGRT 能够计算靶区每次受量,从而对整个治疗过程进行剂量追踪。许多研究已报道通过使用重复 CT 扫描观察肿瘤和 OAR 的变化,并评估照射剂量^[20-21]。高清机载影像的出现夯实了在线 ART 的靶区勾画和剂量计算的基础,在线 ART 图像“看得清”才能“治的准”。目前,中肿对于肺癌在线 4D-CT 扫描与配准平均耗时 308 s。

对于中央型、纵隔型肺癌或存在肺不张状态的患者,可加做 MRI 模拟用于辅助 CT 模拟定位。MRI 具有优异的软组织对比度,在放疗输送过程中有助于区分肿瘤和邻近的正常脏器,软组织移动的可视化让医生精确了解治疗期间这些结构的剂量分布变化,进而提高放疗精准度。此外,有证据表明治疗期间基于 MRI 序列(如灌注和扩散)成像的影像组学

数据变化与治疗结局显著相关^[22]。通过使用 MRI 引导,这些生物学数据将在放疗期间常规获取,若此类预测模型被最终验证,理论上可通过动态影像组学数据模型指导个体化处方剂量。然而,尽管 MRI 引导放疗具有诸多理论优势,我们仍应认识到该技术存在着局限性。首先,尚不清楚放疗可视化的进步能否最终改善临床结局,这需要积极的开展前瞻性研究来探索。近期一些使用 MRI 引导放疗原发性肺癌和肺转移瘤的报道发现,对于靠近中央型肺癌的软组织(如血管结构和气道)的可视化可能具有优势^[23-25]。Finazzi 等^[24-26]发表了 MRI 引导 ART 的安全性和可行性的系列研究结果,他们对 50 例具有放疗毒性危险因素的患者进行 MRI 引导的立体定向 ART 治疗中央型肺癌或肺转移瘤,发现该方式可降低 3 度及以上毒性发生率,并提高肿瘤早期局部控制率^[25]。其次,治疗过程中每日采集 MRI 需耗费大量时间与精力,且对患者也有一定限制,即无某些类型金属和电子设备植入,无严重的幽闭恐惧症,这些给基于 MRI 的 ART 的常规推广带来了挑战。目前,市售的两种 MRI 引导放疗系统均具有在线 ART 功能,可解读每天观察到的肿瘤和 OAR 的变化^[27-28]。中肿的 Elekta Unity 加速器已于 2021 年 6 月开始 MRI 引导 ART 患者的临床收治。

2.2.1.2 AI 辅助再勾画与再计划

准确的靶区勾画是进行放疗的重要前提,以往肺癌患者放疗的靶区基本全靠人工勾画。一方面,尽管我国已颁布非小细胞肺癌 (non-small cell lung cancer, NSCLC) 和小细胞肺癌 (small cell lung cancer, SCLC) 的放射治疗临床指南^[29-30],但人工勾画和放疗计划设计的准确性与同质化水平依然较差^[31]; 另一方面,人工靶区勾画和放疗计划设计繁琐耗时,1 例肺癌放疗患者的靶区勾画通常需要 1~2 h,计划设计的时间更长达 2~3 h。对于在线 ART,为了尽可能降低患者治疗期间发生位移的可能,对感兴趣区域 (region of interest, ROI) 的勾画和计划设计的时间尤其紧迫。当前 AI 掀起的全方位产业升级已势不可挡,在放疗领域,AI 不仅能解决医师短缺问题、提升治疗精度和效率,还能缩小医疗资源差距,实现医疗质量同质化,拥有广阔的应用潜力^[32-34]。经过海量训练的人工神经网络做出的 ROI 勾画和物理计划,只需医生与物理师微调即可审核,让勾画和计划实现

显著提速^[35-37]。目前,中肿肺癌在线 ART 的 ROI 勾画和计划完成的耗时在整个流程中占比最高,为 7~10 min, 因此 AI 的算力及准确性决定了整个在线 ART 流程的成败。

2022 年 5 月,中肿发起了一项局限期 SCLC 在线 ART 的单臂 II 期临床试验:患者在放疗期间每周进行 1 次 4D-CT 扫描,其余时间进行 FBCT 扫描,若 PTV 改变超过 $\pm 10\%$;或内部大体肿瘤靶体积(internal gross tumor volume,IGTV)处方剂量覆盖率发生变化($>2\text{ mm}^3$ 接受 $>120\%$ 处方剂量;或 $<95\%$ 靶体积接受 95% 处方剂量),或观察到胸腔内解剖结构发生较大变化,则进行在线 ART,IGTV 根据在线 ART 模拟扫描所显示的重新勾画。主要研究终点为局部失败率、边缘失败率和区域失败率。

针对上述研究设计,放疗过程中根据肿块消退情况实时修改靶区是否安全,放射野外复发是否增加,是医生和患者所关心的问题。对此,一项比较局限期 SCLC 患者照射诱导化疗前原发灶范围或诱导化疗后残留灶范围的疗效与安全性的随机对照研究在一定程度上证明了实时修改放疗靶区的可行性:结果显示,照射化疗前原发灶或化疗后残留灶的局部区域复发率分别为 28.6% 和 31.6% ($P=0.81$),未观察到残留灶照射野外复发;照射化疗后残留灶组放射性食管炎和放射性肺纤维化的发生率均显著降低($P=0.01$)^[38-39]。此外,在当前肺癌累及野放疗技术已被广泛接受的背景下,本课题组前期对 SCLC 周围 95% 微小病灶的浸润范围进行测量,发现初治 SCLC 瘤床的浸润距离为 10.2 mm ,而接受 2 个疗程诱导化疗后的浸润范围则为 1.4 mm ,该结果为 SCLC 临床靶区的研究提供了微观层面上的证据支持。

2.2.1.3 在线质保和高效的工作流程

在线质保(quality assurance,QA)是在线 ART 流程中不可缺失的一环,是保证全疗程在线 ART 计划准确与否的基石。使用高水平在线 QA 系统,并在短时间内验证通过,才能缩短整个流程时间。EthosTM 和联影 uRT-linac 放疗平台 QA 系统覆盖患者治疗前、治疗中和治疗后的全过程,同时可对 QA 结果做出全面的评估报告,确保了每次在线计划的精准实施。在中肿,肺癌在线 ART 计划 QA 平均耗时 220 s 。

在线 ART 的本质是基于软硬件一体化的流程

体系,需要高质量机载影像,快速、精准的 ROI 勾画、计划设计与 QA,和高效的出束加速器等诸多模块有机地整合在一起;需要统一的计算机生态系统,无需在各模块衔接之间消耗时间;同时需放疗医生、物理师和技术员的全体参与。此外,还包括算法优化、图像形变算法优化、治疗经验的累积、基于大数据的预测等。在中肿,肺癌放疗患者通过在线 ART-标准作业程序,将原本数天的自适应放疗流程压缩至 $20\sim 30\text{ min}$ 。

2.2.2 临床应用

ART 在肺癌治疗中显示出显著的优势。通过动态调整放疗计划,ART 能够更好地适应肿瘤和正常组织的变化,从而提高肿瘤剂量覆盖率,降低正常组织受量。特别是在中央型肺癌或存在肺不张的患者中,MRI 引导的 ART 能够更准确地定位肿瘤边界,减少正常组织的损伤。此外,ART 还能够根据患者的个体情况制定个性化的治疗方案,提高治疗效果和患者的生活质量。

2.3 患者选择与适应时机

2.3.1 患者选择

目前尚无统一的标准来确定哪些患者最适合接受 ART 治疗。然而,一些研究表明,使用 CBCT 监测肿瘤大小变化可能有助于预测 ART 的潜在获益者。对于肿瘤形态变化较大、放疗过程中可能出现并发症或对传统放疗不敏感的患者,可以考虑使用 ART 来提高治疗效果。

2.3.2 适应时机

ART 的最佳适应时机仍存在争议。一些研究表明,在放疗中期(如第 $15\sim 20$ 次分次)进行适应可能获得最大的剂量学效益。然而,具体的适应时机需要根据患者的个体情况和肿瘤的变化来个性化决定。因此,在临床实践中,放疗团队需要密切关注患者的病情变化,及时调整治疗计划。

2.4 ART 的疗效与安全性

2.4.1 疗效

多项研究表明,ART 能够提高肺癌患者的局部控制率,特别是在接受剂量递增的患者中。然而,由于 ART 的临床应用时间相对较短,长期生存数据仍有限。因此,未来需要开展更大规模、前瞻性的随机对照试验来评估 ART 的长期疗效和生存获益。

2.4.2 安全性

ART 通过动态调整放疗计划来减少正常组织的剂量暴露,从而降低放射性肺炎等副作用的发生率。然而,ART 的实施也可能增加工作流程负担和成本。因此,在临床实践中需要权衡利弊,确保 ART 的安全性和经济性。

2.5 有待进一步解决与更新的研究问题

2.5.1 ART 的预测模型与优化算法

尽管 ART 在肺癌治疗中显示出显著的优势,但其临床实施仍面临诸多挑战。其中,如何准确预测哪些患者将从 ART 中获益最大以及如何优化适应时机是亟待解决的问题。未来需要开发更准确的预测模型和优化算法,以提前确定潜在获益者并制定个性化的治疗方案。这不仅可以提高 ART 的临床效果,还可以减少不必要的医疗资源和成本浪费。

2.5.2 ART 的长期疗效与安全性评估

目前关于 ART 的长期疗效和安全性数据仍相对匮乏。为了更全面地评估 ART 的临床价值,未来需要开展大规模、前瞻性的随机对照试验。这些试验应该包括长期随访数据,以评估 ART 对患者生存率、生活质量以及副作用发生情况的影响。同时,还需要建立有效的监测机制,及时发现并处理可能出现的长期毒性反应。

2.5.3 ART 的标准化与普及

为了推动 ART 在肺癌治疗中的广泛应用,需要实现其标准化实施。这包括统一的工作流程、技术要求和质量控制标准等。通过制定标准化的操作规范和质量管理体系,可以提高 ART 的临床实施效率和准确性,确保患者的安全和治疗效果。此外,还需要加强 ART 技术的培训和推广,提高医疗机构和放疗团队对 ART 的认知和应用能力。这不仅可以促进 ART 技术的普及和发展,还可以为更多肺癌患者带来福音。

2.5.4 跨学科合作与技术创新

ART 的成功实施需要多学科的合作与技术创新。放疗、影像、外科、内科等学科的专家应该加强交流与合作,共同探索更为精准、个体化的治疗方案。同时,还需要关注新技术的发展和應用,如人工智能、大数据等。这些技术可以为 ART 提供更强大的数据支持和决策依据,推动其在肺癌治疗中的不断创新和发展。

3 总结与展望

《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》的发布标志着我国在肺癌治疗领域取得了新的突破。该共识不仅规范了 ART 在肺癌治疗中的临床应用,还推动了技术发展与临床协作。未来,随着科技的不断进步和临床经验的积累,我们有理由相信 ART 将在肺癌治疗中发挥更加重要的作用。

然而,我们也应该清醒地认识到 ART 的临床实施仍面临诸多挑战和问题。为了进一步提高 ART 的临床效果和安全性,我们需要不断加强研究与创新,探索更为精准、个体化的治疗方案。同时,还需要加强跨学科的合作与交流,共同推动肺癌治疗领域的发展与进步。

总之,《肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识》的发布为我国肺癌治疗领域带来了新的机遇和挑战。我们应该以此为契机,不断加强研究与实践,为更多肺癌患者带来希望和福音。

参考文献:

- [1] SUNG H, FERLAY J, SIEGEL R L, et al. Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA Cancer J Clin*, 2021, 71(3):209–249.
- [2] YAN D, VICINI F, WONG J, et al. Adaptive radiation therapy[J]. *Phys Med Biol*, 1997, 42(1):123–132.
- [3] GUBERINA M, SANTIAGO GARCIA A, KHOUYA A, et al. Comparison of online-onboard adaptive intensity-modulated radiation therapy or volumetric-modulated arc radiotherapy with image-guided radiotherapy for patients with gynecologic tumors in dependence on fractionation and the planning target volume margin [J]. *JAMA Netw Open*, 2023, 6(3):e234066.
- [4] WAHLSTEDT I, ANDRATSCHKE N, BEHRENS C P, et al. Gating has a negligible impact on dose delivered in MRI-guided online adaptive radiotherapy of prostate cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2022, 170:205–212.
- [5] CHRISTIANSEN R L, DYSAGER L, HANSEN C R, et al. Online adaptive radiotherapy potentially reduces toxicity for high-risk prostate cancer treatment [J]. *Radiother Oncol*, 2022, 167:165–171.
- [6] ÅSTRÖM L M, BEHRENS C P, STORM K S, et al. Online adaptive radiotherapy of anal cancer: normal tissue spar-

- ing, target propagation methods, and first clinical experience[J]. *Radiother Oncol*, 2022, 176:92–98.
- [7] ÅSTRÖM L M, BEHRENS C P, CALMELS L, et al. Online adaptive radiotherapy of urinary bladder cancer with full re-optimization to the anatomy of the day: initial experience and dosimetric benefits [J]. *Radiother Oncol*, 2022, 171:37–42.
- [8] INTVEN M P W, DE MOL VAN OTTERLOO S R, et al. (2021). Online adaptive MR-guided radiotherapy for rectal cancer; feasibility of the workflow on a 1.5T MR-linac: clinical implementation and initial experience [J]. *Radiother Oncol*, 154:172–178.
- [9] HENKE L, KASHANI R, ROBINSON C, et al. Phase I trial of stereotactic MR-guided online adaptive radiation therapy (SMART) for the treatment of oligometastatic or unresectable primary malignancies of the abdomen [J]. *Radiother Oncol*, 2018, 126(3):519–526.
- [10] 陈明, 王绿化, 傅小龙, 等. 肺癌在线自适应放射治疗中国专家共识[J]. *中国肿瘤*, 2024, 33(4):255–261.
CHEN M, WANG L H, FU X L, et al. Chinese expert consensus on online adaptive radiotherapy for lung cancer[J]. *China Cancer*, 2024, 33(4):255–261.
- [11] KEALL P, POULSEN P, BOOTH J T. See, think, and act: real-time adaptive radiotherapy [J]. *Semin Radiat Oncol*, 2019, 29(3):228–235.
- [12] GREEN O L, HENKE L E, HUGO G D. Practical clinical workflows for online and offline adaptive radiation therapy [J]. *Semin Radiat Oncol*, 2019, 29:219–227.
- [13] WEISS E, FATYGA M, WU Y, et al. Dose escalation for locally advanced lung cancer using adaptive radiation therapy with simultaneous integrated volume-adapted boost [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2013, 86(3):414–419.
- [14] WANG X, LI H, ZHU X R, et al. Multiple-CT optimization of intensity-modulated proton therapy—is it possible to eliminate adaptive planning? [J]. *Radiother Oncol*, 2018, 128:167–173.
- [15] EPPENHOF K A J, LAFARGE M W, VETA M, et al. Progressively trained convolutional neural networks for deformable image registration[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2020, 39(5):1594–1604.
- [16] DALCA A V, BALAKRISHNAN G, GUTTAG J, et al. Unsupervised learning of probabilistic diffeomorphic registration for images and surfaces [J]. *Med Image Anal*, 2019, 57:226–236.
- [17] FAN J, CAO X, YAP P T, et al. BIRNet: brain image registration using dual-supervised fully convolutional networks[J]. *Med Image Anal*, 2019, 54:193–206.
- [18] CAO X, YANG J, ZHANG J, et al. Deformable image registration using a cue-aware deep regression network [J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2018, 65(9):1900–1911.
- [19] SHUN M, WANG Z J, LIAO R. A CNN regression approach for real-time 2D/3D registration [J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2016, 35(5):1352–1363.
- [20] ZHONG H, SIDDIQUI S M, MOVSAS B, et al. Evaluation of adaptive treatment planning for patients with non-small cell lung cancer [J]. *Phys Med Biol*, 2017, 62 (11):4346–4360.
- [21] RAZIEE H, MORAES F Y, MURGIC J, et al. Improved outcomes with dose escalation in localized prostate cancer treated with precision image-guided radiotherapy [J]. *Radiother Oncol*, 2017, 123(3):459–465.
- [22] VAN HOUTD P J, YANG Y, VAN DER HEIDE U A. Quantitative magnetic resonance imaging for biological image-guided adaptive radiotherapy [J]. *Front Oncol*, 2020, 10:615643.
- [23] HENKE L E, KASHANI R, HILLIARD J, et al. In Silico trial of MR-guided midtreatment adaptive planning for hypofractionated stereotactic radiation therapy in centrally located thoracic tumors [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2018, 102(4):987–995.
- [24] FINAZZI T, PALACIOS M A, SPOELSTRA F O B, et al. Role of on-table plan adaptation in MR-guided ablative radiation therapy for central lung tumors [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2019, 104(4):933–941.
- [25] FINAZZI T, HAASBEEK C J A, SPOELSTRA F O B, et al. Clinical outcomes of stereotactic MR-guided adaptive radiation therapy for high-risk lung tumors [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2020, 107(2):270–278.
- [26] FINAZZI T, PALACIOS M A, HAASBEEK C J A, et al. Stereotactic MR-guided adaptive radiation therapy for peripheral lung tumors[J]. *Radiother Oncol*, 2020, 144:46–52.
- [27] MUTIC S, DEMPSEY J F. The ViewRay system:magnetic resonance-guided and controlled radiotherapy [J]. *Semin Radiat Oncol*, 2014, 24(3):196–199.
- [28] RAAYMAKERS B W, JÜRGENLIEMK-SCHULZ I M, BOL G H, et al. First patients treated with a 1.5 T MRI-Linac:clinical proof of concept of a high-precision, high-field MRI guided radiotherapy treatment[J]. *Phys Med Biol*, 2017, 62(23):L41–L50.
- [29] 中华医学会放射肿瘤治疗学分会, 中国医师协会放射肿瘤治疗医师分会, 中国抗癌协会放射治疗专业委员会, 等. 中国非小细胞肺癌放射治疗临床指南 (2020 版)[J].



通信作者简介

陈明, 博士, 毕业于苏州医学院、上海医科大学和武汉大学, 美国密歇根大学博士后。现任中山大学肿瘤防治中心放疗科主任、华南肿瘤学国家重点实验室PI、国家临床重点专科建设项目负责人、中山大学-国科离子(兰州泰基)放射治疗前沿技术联合实验室主任, 聘任教授、主任医师, 博士生导师。从事放疗新装备和新技术研发, 放疗大数据和人工智能研究, 肺癌和食管癌的临床研究和转化研究。

- 中华放射肿瘤学杂志, 2020, 29(8):599-607.
Radiation Oncology Branch of Chinese Medical Association, Radiation Oncologist Branch of Chinese Medical Doctor Association Professional Committee on Radiation Oncology, China Anti-Cancer Association Experts Committee on Radiation Oncology, et al. Clinical practice guideline for radiation therapy of non-small cell lung cancer (2020 version)[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2020, 29(8):599-607.
- [30] 中华医学会放射肿瘤治疗学分会, 中国医师协会放射肿瘤治疗医师分会, 中国抗癌协会放射治疗专业委员会, 等. 中国小细胞肺癌放射治疗临床指(2020版)[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2020, 29(8):608-614.
Radiation Oncology Branch of Chinese Medical Association, Radiation Oncologist Branch of Chinese Medical Doctor Association Professional Committee on Radiation Oncology, China Anti-Cancer Association Experts Committee on Radiation Oncology, et al. Clinical practice guideline for radiation therapy of small cell lung cancer (2020 version)[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2020, 29(8):608-614.
- [31] LIN L, DOU Q, JIN Y M, et al. Deep learning for automated contouring of primary tumor volumes by MRI for nasopharyngeal carcinoma[J]. Radiology, 2019, 291(3):677-686.
- [32] SHENG K. Artificial intelligence in radiotherapy: a technological review[J]. Front Med, 2020, 14(4):431-449.
- [33] VANDEWINCKELE L, CLAESSENS M, DINKLA A, et al. Overview of artificial intelligence-based applications in radiotherapy: recommendations for implementation and quality assurance[J]. Radiother Oncol, 2020, 153:55-66.
- [34] HUYNH E, HOSNY A, GUTHIER C, et al. Artificial intelligence in radiation oncology[J]. Nat Rev Clin Oncol, 2020, 17(12):771-781.
- [35] SRITHARAN K, TREE A. MR-guided radiotherapy for prostate cancer: state of the art and future perspectives[J]. Br J Radiol, 2022, 95(1131):20210800.
- [36] CUSUMANO D, BOLDRINI L, DHONT J, et al. Artificial Intelligence in magnetic resonance guided radiotherapy: medical and physical considerations on state of art and future perspectives[J]. Phys Med, 2021, 85:175-191.
- [37] PANG Y, WANG H, LI H. Medical imaging biomarker discovery and integration towards AI-based personalized radiotherapy[J]. Front Oncol, 2021, 11:764665.
- [38] HU X, BAO Y, ZHANG L, et al. Omitting elective nodal irradiation and irradiating postinduction versus preinduction chemotherapy tumor extent for limited-stage small cell lung cancer: interim analysis of a prospective randomized noninferiority trial[J]. Cancer, 2012, 118(1):278-287.
- [39] HU X, BAO Y, XU Y J, et al. Final report of a prospective randomized study on thoracic radiotherapy target volume for limited-stage small cell lung cancer with radiation dosimetric analyses[J]. Cancer, 2020, 126(4):840-849.