

呼吸门控技术在肝癌常规分割调强放射治疗中的剂量学优势研究

黄鹏飞, 王 凡*

安徽医科大学第一附属医院肿瘤放射肿瘤科, 安徽 合肥

收稿日期: 2026年1月10日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月11日

摘 要

目的: 探讨呼吸门控技术在肝癌常规分割调强放射治疗中的靶区控制及剂量学优势。方法: 选取安徽医科大学第一附属医院放疗中心治疗的10例原发性或转移性肝癌患者, 所有患者均接受4D-CT扫描。分别基于30%~70%呼吸时相制定呼吸门控计划(Plan 3~10)及自由呼吸下的全时相常规放疗计划(Planall), 处方剂量为63 Gy/21次, 采用VMAT技术。比较两种计划在ITV、PTV体积、靶区剂量、肝脏及其他危及器官剂量学参数, 并记录机器跳数(MU)及单次治疗耗时。结果: 与常规放疗计划相比, 呼吸门控计划的ITV与PTV体积显著减小($P < 0.05$), 肝脏Dmean及V5、V10、V20、V30明显降低($P < 0.05$)。呼吸门控计划的MU及单次治疗时间显著高于常规计划($P < 0.05$)。结论: 在肝癌常规分割IMRT/VMAT治疗中, 呼吸门控技术可有效缩小靶区体积、降低危及器官受照剂量, 但会增加治疗时间与机器负荷, 临床应用中需在剂量学获益与治疗效率、患者耐受性之间进行权衡。

关键词

肝癌, 呼吸门控技术, 调强放射治疗, VMAT, 4D-CT

Dosimetric Advantages of Respiratory Gating Technique in Conventional Fractionated Intensity Modulated Radiotherapy for Liver Cancer

Pengfei Huang, Fan Wang*

Department of Radiation Oncology, The First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei Anhui

Received: January 10, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 11, 2026

*通讯作者。

文章引用: 黄鹏飞, 王凡. 呼吸门控技术在肝癌常规分割调强放射治疗中的剂量学优势研究[J]. 临床医学进展, 2026, 16(2): 2230-2236. DOI: 10.12677/acm.2026.162622

Abstract

Objective: To investigate the dosimetric advantages of respiratory gating in conventionally fractionated IMRT/VMAT for liver cancer. **Methods:** Ten patients with primary or metastatic liver cancer treated at the Radiation Oncology Center of the First Affiliated Hospital of Anhui Medical University were enrolled. All patients underwent 4D-CT scanning. A respiratory-gated plan based on 30%~70% respiratory phases (Plan 3~10) and a free-breathing full-phase plan (Planall) were generated with a prescription dose of 63 Gy in 21 fractions using VMAT. Target volumes, dosimetric parameters of organs at risk, monitor units (MU), and treatment time were compared. **Results:** Compared with the free-breathing plan, respiratory-gated plans significantly reduced ITV and PTV volumes ($P < 0.05$), decreased liver dose parameters and doses to other organs at risk ($P < 0.05$), while increasing MU and treatment time ($P < 0.05$). **Conclusion:** In the conventional fractionated IMRT/VMAT treatment of liver cancer, respiratory gating technology can effectively reduce the volume of the target area and reduce the irradiation dose of endangered organs, but it will increase the treatment time and machine load. In clinical application, it is necessary to make a tradeoff among the dosimetric benefit, treatment efficiency and patient tolerance.

Keywords

Liver Cancer, Respiratory Gating, IMRT, VMAT, 4D-CT

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

根据世界卫生组织国际癌症研究机构(IARC)和我国国家癌症中心的统计数据,肝癌在全球及我国均是重大癌症负担的主要来源。2022年 GLOBOCAN 数据显示,全球肝癌新发病例为 86.53 万例,位列所有恶性肿瘤的第六位,死亡病例为 75.79 万例,排名第三;在中国,2022 年肝癌新发病例为 36.77 万例,居第 4 位,死亡病例为 31.65 万例,仅次于肺癌,位列第二。我国每年新增的病例和死亡人数占全球近一半[1]。在肝癌治疗中,随着精准技术的不断进步,放射治疗已逐渐从辅助治疗转变为核心治疗手段,其临床价值日益凸显。随着影像引导与调强放疗技术的发展,放射治疗在肝癌中的应用逐渐从辅助治疗转向重要的局部治疗手段。对于无法手术或消融的肝癌患者,常规分割或大分割调强放射治疗(IMRT/VMAT)可在保证正常肝组织耐受的前提下,实现较好的局部控制率。然而,肝脏随呼吸运动产生的位移是限制放疗精准性的关键因素[2] [3]。传统自由呼吸下的放疗计划通常需要通过扩大 ITV 和 PTV 来覆盖肿瘤的运动范围,从而增加了正常组织的受照剂量。呼吸门控技术通过在呼吸相对稳定的时相内实施照射,为提高肝癌常规分割放疗的精准性提供了重要技术手段。近年来,SBRT 在肝癌治疗中的应用研究逐渐增多,并取得了显著疗效[4]。

2. 资料与方法

2.1. 一般资料

本研究收集了 2022 年 9 月到 2025 年 6 月期间,在安徽医科大学第一附属医院放疗科接受治疗的 10 例肝癌患者的资料。所有患者的病灶均通过病理或影像学检查确诊。患者中男性 6 例,女性 4 例,平均

年龄 55 岁。病灶分布在肝脏左叶 4 例, 右叶 7 例; Child-Pugh A 级 6 例, B 级 4 例。纳入标准包括: 无放疗禁忌症并已签署放疗知情同意书, 且患者依从性良好。排除标准包括: 存在放疗禁忌症, 年龄小于 18 岁, 或患者依从性差。

2.2. 治疗设备

美国瓦里安 VitalBeam 直线加速器; 大孔径模拟定位 CT-Discovery RT (美国 GE 公司); 瓦里安实时位置管理系统(Real-Time Position Management, RPM)。

2.3. 体位固定及图像扫描

在模拟定位前, 评估患者的肺功能并进行呼吸训练, 对患者进行详细的操作流程讲解, 确保患者能够积极配合定位和后续治疗; 定位时患者脱去外套上衣, 外裤褪到双脚腕处, 留内裤, 仰卧位平躺到负压真空垫上, 双手抱头, 防止手臂遮挡对计划设计的影响, 减少手臂照射, 对真空垫抽取真空后可对患者背部进行塑形; 使用 Discovery RT 结合实时位置管理系统(RPM)进行回顾性 4D-CT 扫描, 扫描范围涵盖整个肝脏区域, 以及膈肌顶端上方 5 cm 至肝下缘下方 5 cm, 扫描层厚设定为 2.5 mm。通过红外摄像机检测反光盒的运动, 并通过计算机软件将其转换为呼吸节律曲线。当患者的呼吸节律曲线趋于稳定时, 开始同步采集 CT 图像及其对应的呼吸相位信息。扫描结束后, 利用 Advantage 4D (GE Healthcare)软件对图像及呼吸运动轨迹进行处理, 将所有 CT 图像按照呼吸相位进行分组并进行三维重建, 得到 0%、10%、20%……90%共 10 个时相(0%为吸气末, 50%为呼气末)。最后, 重建的图像被传输至瓦里安 Eclipse13.6 治疗计划系统, 以进行靶区勾画和计划设计。

2.4. 靶区勾画

在呼吸门控计划(Plan 3~10)中, 选择呼吸幅度较小的 30%~70%时相的 GTV 进行融合, 并将其叠加到相应的 AIP 图像上, 生成 ITV。接着, 按照相同方式外扩 5 mm 形成 PTV, 用以模拟呼吸门控计划下的 CT 图像。对于常规放疗计划(Planall), 在 10 个呼吸时相的图像中分别勾画 GTV, 之后将这些 GTV 与对应的 AIP 图像融合生成 ITV, 并在 ITV 基础上沿头脚、前后、左右方向外扩 5 mm 形成 PTV, 最终模拟自由呼吸状态下的常规 CT 图像。

2.5. 设计计划

由经验丰富的物理师完成计划设计, 分别制定呼吸门控计划(Plan 3~10)和自由呼吸常规放疗计划(Planall), 处方剂量为 63 Gy/21 次/4 周, 属于常规分割调强放射治疗。

所有计划均采用 VMAT 技术, 使用 6 MV FFF 射束, 剂量率为 1400 MU/min, 以提高剂量输送效率。根据肿瘤位置选择全弧或半弧照射方式, 必要时采用多中心照射策略。

危及器官剂量限制参考 QUANTEC 及 HyTEC 报告中针对肝脏及腹部器官的推荐标准, 重点关注肝脏 Dmean 及体积剂量参数(V5、V10、V20、V30), 并兼顾胃、小肠、结肠、肾脏、心脏及脊髓等重要器官的耐受剂量。剂量计算采用 AXB 算法, 计算网格大小为 1.25 mm。

2.6. 指标观察及剂量学比较

比较两组计划的 ITV、PTV 体积及靶区剂量参数(D_{mean}、D_{max}、D_{min}), 危及器官剂量参数, 同时记录并比较两组计划的机器跳数(MU)及单次治疗耗时。

2.7. 统计学方法

数据统计分析使用 SPSS 26.0 软件。计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示, 使用 Shapiro-Wilk 法(S-W 法)进行正态

性检验, 观察两组数据差异是否符合正态分布。如果数据符合正态分布, 使用配对样本 T 检验; 不符合正态分布则采用非参数秩和检验(Wilcoxon)。P 值 < 0.05 表示差异具有统计学意义。

3. 结果

3.1. 两组计划靶区参数比较

在呼吸门控计划中, ITV 和 PTV 的体积显著小于常规放疗计划, 且差异具有统计学意义($P < 0.05$)。此外, 靶区 D_{mean} 也高于常规放疗计划, 且差异显著($P < 0.05$); 然而, 靶区 D_{mean} 高于常规放疗计划, 差异有统计学意义($P < 0.05$), 而 D_{max} 、 D_{min} 的差异不具有统计学意义($P > 0.05$), 见表 1。

Table 1. Comparison of target area volume and dosimetric parameters between two groups of plans ($x \pm s$)

表 1. 两组计划靶区体积及剂量学参数比较($x \pm s$)

指标项目	Plan 3~10 (呼吸门控计划)	Planall (常规计划)	t 值	P 值
ITV 体积(cm^3)	41.86 \pm 49.23	82.97 \pm 78.31	-4.135	0.003
PTV 体积(cm^3)	71.92 \pm 67.89	115.76 \pm 95.64	-4.025	0.003
靶区 D_{mean} (Gy)	64.85 \pm 2.13	63.21 \pm 2.45	-2.497	0.013
靶区 D_{max} (Gy)	72.56 \pm 4.32	73.18 \pm 4.56	-0.724	0.487
靶区 D_{min} (Gy)	45.12 \pm 9.34	46.78 \pm 7.56	-0.683	0.512

呼吸门控组 ITV、PTV 体积较常规组分别缩小 49.5%、37.9% ($P < 0.05$), 得益于选取 30%~70% 平稳呼吸时相压缩靶区冗余。其靶区 D_{mean} 更高($P < 0.05$), 利于杀瘤, 且 D_{max} 、 D_{min} 无差异($P > 0.05$), 保障治疗安全。

3.2. 两组计划危机器官的计量学比较

在呼吸门控计划下, 肝脏的平均剂量(D_{mean})以及 V5、V10、V20 和 V30 的剂量值明显低于常规放疗计划, 且差异具有统计学意义($P < 0.05$)。涉及的小肠、结肠、胃、肾脏、心脏和脊髓等重要器官的辐射剂量也显著降低, 这些差异同样达到了统计学显著性($P < 0.05$), 见表 2。

Table 2. Comparison of dosimetric parameters of endangered organs between two groups of plans ($x \pm s$)

表 2. 两组计划危及器官剂量学参数比较($x \pm s$)

评估指标	Plan 3~10 (呼吸门控计划)	Planall (常规计划)	t 值	P 值
肝脏 D_{mean} (Gy)	11.35 \pm 5.42	14.28 \pm 6.59	-5.106	0.001
肝脏 V5 (%)	34.87 \pm 12.21	37.92 \pm 15.03	-2.548	0.011
肝脏 V10 (%)	20.76 \pm 8.72	22.35 \pm 9.16	-2.953	0.016
肝脏 V20 (%)	10.21 \pm 3.85	12.15 \pm 5.92	-2.291	0.022
肝脏 V30 (%)	5.98 \pm 2.53	7.68 \pm 4.21	-2.700	0.007
小肠 D_{max} (Gy)	21.08 \pm 8.47	26.42 \pm 11.76	-3.939	0.003
结肠 D_{max} (Gy)	20.75 \pm 9.01	25.51 \pm 12.31	-3.732	0.005
胃 D_{max} (Gy)	20.81 \pm 10.02	25.03 \pm 11.59	-3.682	0.005
肾脏 D_{mean} (Gy)	2.61 \pm 3.40	3.48 \pm 4.00	-2.570	0.030
心脏 D_{max} (Gy)	14.02 \pm 11.82	20.31 \pm 17.15	-2.449	0.037
脊髓 D_{max} (Gy)	11.95 \pm 7.30	13.31 \pm 8.32	-2.654	0.026

呼吸门控计划显著降低肝脏 D_{mean} (降幅 20.5%)及 V5、V10 等体积剂量, 胃、小肠等邻近脏器及肾脏、心脏、脊髓受照剂量亦明显下降(均 $P < 0.05$), 见表 2。其得益于靶区缩小, 精准聚焦肿瘤, 减少正常组织不必要照射, 降低放疗并发症风险。

3.3. 两组计划的靶区适型指数和均匀性指数的比较

两组计划的 CI 与 HI 差异均无统计学意义($P > 0.05$), 见表 3。

Table 3. Comparison of CI and HI indicators between two groups of plans ($x \pm s$)

表 3. 两组计划 CI 与 HI 指标比较($x \pm s$)

指标项目	Plan 3~10 (呼吸门控计划)	Planall (常规计划)	t 值	P 值
适形指数(CI)	0.86 ± 0.08	0.82 ± 0.06	1.469	0.176
均匀性指数(HI)	1.03 ± 0.08	1.02 ± 0.09	0.724	0.487

两组计划的 CI 分别为 0.86 ± 0.08 和 0.82 ± 0.06 , HI 分别为 1.03 ± 0.08 和 1.02 ± 0.09 , 差异均无统计学意义($P > 0.05$)。这说明呼吸门控技术虽然通过选取部分呼吸时相缩小了靶区体积, 但并未牺牲放疗计划的适形度与剂量均匀度。CI 接近 1 表明两组计划的处方剂量包绕靶区的贴合度良好, HI 较小且相近说明靶区内剂量分布均匀合理, 确保了呼吸门控计划在提升精准度的同时, 维持了高水平的治疗质量。

3.4. 机器跳数(MU)及单次治疗耗时比较

呼吸门控计划的 MU 和单次治疗耗时均显著高于常规放疗计划($P < 0.05$), 提示呼吸门控在获得剂量学优势的同时, 治疗效率有所下降, 见表 4。

Table 4. Comparison of MU and treatment time between two groups ($x \pm s$)

表 4. 两组计划 MU 及治疗时间比较($x \pm s$)

指标	Plan 3~10 (呼吸门控)	Planall (自由呼吸)	t 值	P 值
MU	1023 ± 186	812 ± 154	4.217	0.002
单次治疗耗时(min)	9.8 ± 1.6	5.9 ± 1.2	6.103	<0.001

4. 讨论

4.1. 呼吸门控计划对靶区体积及剂量分布的优化价值

本研究结果表明因呼吸门控技术对呼吸时相进行精准筛选, 故呼吸门控计划的 ITV 和 PTV 体积分别较常规放疗计划显著缩小 49.5%和 37.9%, 且差异有统计学意义($P < 0.05$), 鉴于常规放疗计划需覆盖肿瘤在全呼吸周期内的运动范围而导致靶区包含大量正常组织冗余, 呼吸门控选取 30%~70%的平稳呼吸时相进而有效压缩肿瘤运动空间使靶区定位更精准。

在靶区剂量学参数方面, 呼吸门控计划的 D_{mean} 显著高于常规计划($P < 0.05$)而 D_{max} 、 D_{min} 无统计学差异($P > 0.05$), 此结果具重要临床意义, 因 D_{mean} 的提升可增强对肿瘤细胞的杀伤效果以契合放疗“精准杀瘤”的核心目标, D_{max} 未显著升高可避免靶区周围正常组织因剂量过高引发严重损伤, D_{min} 稳定能保障肿瘤组织获得最低有效杀伤剂量, 从而实现疗效与安全的平衡。从临床实践角度看, 靶区体积缩小既减少正常组织的受照范围又为提升靶区剂量创造条件, 尤其适用于胸腔、腹腔等受呼吸运动影响较大的肿瘤治疗[5]。

4.2. 呼吸门控计划在危机器官保护中的显著作用

危及器官的剂量控制是肝癌放射治疗中的关键问题。肝脏本身对辐射较为敏感,且常与胃、小肠、结肠等重要腹腔器官毗邻,其受照剂量直接影响放疗相关毒副反应的发生风险。本研究结果表明,呼吸门控计划在危及器官保护方面具有明显优势。

与常规放疗计划相比,呼吸门控计划下肝脏的平均剂量 D_{mean} 降幅达 20.5%且 V5、V10、V20、V30 等体积剂量均显著低于常规计划($P < 0.05$),同时小肠、结肠、胃的 D_{max} 以及肾脏的 D_{mean} 、心脏和脊髓的 D_{max} 也均显著降低($P < 0.05$),上述结果表明,呼吸门控技术通过缩小靶区体积并提高照射时相的稳定性,实现了辐射剂量对肿瘤的精准聚焦,从而有效减少了周围正常组织的不必要受照。

在临床实践中,肝脏及消化道器官剂量的降低有助于减少放射性肝损伤及放射性胃肠道反应的发生风险,而对心脏和脊髓等关键器官的剂量控制,则进一步提升了治疗的整体安全性,对于胸腹部肿瘤患者来说因危机器官与肿瘤位置邻近常规放疗易造成叠加照射。呼吸门控技术通过动态追踪肿瘤运动在肿瘤处于最佳照射位置时实施放疗,大幅降低危机器官的受照概率和剂量,为提高放疗耐受性、改善患者生活质量提供有力支撑[6]。

4.3. 呼吸门控计划的质量稳定性与治疗效率的权衡

在呼吸门控计划关于质量稳定性与治疗效率的权衡探讨中,作为评估放疗计划治疗质量关键指标的适形指数(CI)和均匀性指数(HI),经研究发现两组计划的这两项指标差异在统计学上均不具有显著性($P > 0.05$),这一结果表明呼吸门控计划在实现缩小靶区、保护危机器官目的的同时,并未以牺牲治疗质量为代价;其中呼吸门控计划的 CI 为 0.86 ± 0.08 ,常规计划为 0.82 ± 0.06 ,两者数值均接近 1,充分说明处方剂量对于靶区的包绕贴合程度处于良好状态,而 HI 分别为 1.03 ± 0.08 和 1.02 ± 0.09 ,数值不仅较小且相互接近,这提示着靶区内剂量分布呈现均匀合理的态势,进而确保肿瘤组织能够获得一致的杀伤剂量,此结果成功打消了临床实践中对于“缩小靶区可能会引发剂量分布不均或者适形度下降”的顾虑,有力证明呼吸门控技术在提升放疗精准度的进程中,有效维持了放疗计划核心治疗质量指标的稳定性,为该项技术的临床应用提供了重要的支撑力量。

4.4. 呼吸门控计划治疗效率的权衡与临床应用考量

针对呼吸门控计划治疗效率的权衡以及临床应用方面的考量,本研究成果显示,呼吸门控计划的机器跳数(MU)和单次治疗所耗费的时间都显著高于常规放疗计划($P < 0.05$),这一现象主要与呼吸门控技术需要额外的呼吸监测、时相筛选以及动态控制流程有关,同时在缩小靶区体积后,为维持良好的剂量分布,计划优化复杂度亦相应增加。

从临床应用角度来看,治疗效率与剂量学获益之间需要进行个体化权衡。对于呼吸运动幅度较大、肿瘤与危及器官位置关系密切的患者,呼吸门控技术所带来的剂量学优势和潜在毒副反应降低,往往能够抵消治疗时间延长所带来的不便,具有较高的临床应用价值。相反,对于肿瘤运动幅度较小或患者体位耐受性较差的病例,应综合评估患者状况,合理选择治疗方式。

未来可通过进一步优化呼吸时相筛选策略、提高设备运行效率以及改进计划软件算法,在保持呼吸门控技术剂量学优势的同时,尽可能缩短治疗时间,从而提升该技术在临床中的可行性与适用范围。

参考文献

- [1] Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R.L., *et al.* (2021) Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries. *CA*, **71**, 209-249. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- [2] Liu, J., *et al.* (2023) Stereotactic Body Radiation Therapy for Unresectable Early-Stage Hepatocellular Carcinoma.

International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics, **115**, 382-391.

- [3] Wang, Y., *et al.* (2022) Salvage Stereotactic Body Radiation Therapy for Recurrent Hepatocellular Carcinoma. *Radiotherapy and Oncology*, **168**, Article ID: 109732.
- [4] Tse, R.V., Hawkins, M., Lockwood, G., *et al.* (2008) Phase I Study of Individualized Stereotactic Body Radiotherapy for Hepatocellular Carcinoma and Intrahepatic Cholangiocarcinoma. *Journal of Clinical Oncology*, **26**, 657-664.
<https://doi.org/10.1200/JCO.2007.14.3529>
- [5] 毕正宏, 梁馨月, 陈财忠, 等. 三种自由呼吸门控技术在肝脏 MRI 中的临床应用对比[J]. 放射学实践, 2023, 38(2): 216-221.
- [6] 刘明, 马宇彤, 谢万明, 等. Q.Static 和 Q.Freeze 呼吸门控技术对肺高摄取结节图像质量的影响[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2022, 28(5): 552-557.