

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.02.011

不同呼吸管理方式对胸腹部肿瘤质子放疗摆位精度的影响：基于CBCT的对比研究

张帆, 王礼珊, 王媛

(合肥离子医学中心 临床物理技术科, 安徽合肥 230088)

【摘要】目的 探讨在锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)图像引导下,深吸气屏气(deep inspiration breath-hold, DIBH)与自由呼吸两种呼吸管理方式在胸腹部肿瘤质子放射治疗中的摆位精度差异,为临床优化呼吸控制策略提供依据。**方法** 回顾性分析2022年1月至2025年4月于合肥离子医学中心接受质子放疗的50例胸腹部肿瘤患者,根据呼吸管理方式分为自由呼吸组($n=25$)和DIBH组($n=25$)。所有患者在前5次放疗中接受CBCT引导,记录X、Y、Z轴方向摆位误差、三维矢量误差(three-dimensional vector error, TVE)及角度偏差,同时比较治疗床调整幅度、校正时间、重定位发生率及体重变化对固定与呼吸管理效果的影响。**结果** DIBH组在Y轴方向误差和三维矢量误差方面显著优于自由呼吸组($P<0.05$),Pitch角度误差亦更小($P<0.05$)。DIBH组校正时间更短($P<0.05$),重定位率更低($P<0.05$)。两组体重波动对固定与呼吸管理的影响无显著差异($P>0.05$)。**结论** 在CBCT图像引导下,DIBH呼吸管理方式较自由呼吸可显著提高胸腹部肿瘤质子放疗的摆位精度与定位效率,降低重定位风险。

【关键词】 质子放射治疗; 锥形束计算机断层扫描; 呼吸管理; 摆位误差; 胸腹部肿瘤

【中图分类号】 R730.55

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2026) 02-0051-05

The influence of different respiratory management methods on the positioning accuracy of proton radiotherapy for thoracic and abdominal tumors: A comparative study based on cone beam computed tomography images

ZHANG Fan, WANG Lishan, WANG Yuan

(Department of Clinical Medical Physics and Technology, Hefei Ion Medical Center, Hefei 230088, Anhui, China)

【Abstract】Objective To explore the difference in positioning accuracy between deep-inspiration breath-hold (DIBH) and free-breathing under cone beam computed tomography (CBCT) image guidance in proton radiotherapy for thoracic and abdominal tumors, and to provide a basis for optimizing respiratory management strategies in clinical practice. **Method** A retrospective analysis was conducted on 50 patients with thoracic and abdominal tumors who received proton radiotherapy in Hefei Ion Medical Center from January 2022 to April 2025. They were divided into a free breathing group ($n=25$) and an DIBH group ($n=25$). All patients received CBCT guidance during the first 5 radiotherapy sessions, and the positioning errors in the X, Y, and Z directions, three-dimensional vector errors (TVE), and angle deviations were recorded. At the same time, the adjustment amplitude of the treatment bed, correction time, repositioning incidence, and the impact of weight changes were compared. **Results** DIBH group had significantly lower Y-axis error and three-dimensional vector error than the free breathing group ($P<0.05$), with smaller Pitch angle error as well ($P<0.05$). The correction time was shorter in the DIBH group ($P<0.05$), and the repositioning rate was lower ($P<0.05$). There was no significant difference in the influence of body weight fluctuation on fixation and respiratory management between the two groups ($P>0.05$). **Conclusion** Under CBCT image guidance, the DIBH method can significantly improve the positioning accuracy and efficiency of proton radiotherapy for thoracic and abdominal tumors compared to free-breathing, reduce the risk of repositioning.

【Key words】 Proton radiotherapy; Cone beam computed tomography; Respiratory management; Positioning error; Thoracic and abdominal tumors

收稿日期: 2025-10-21。

作者简介: 张帆, 本科, 放射医学技术初级, 研究方向: 放射治疗。E-mail: 19538371972@163.com。

质子放疗凭借其独特的布拉格峰效应,可在胸腹部肿瘤治疗中实现靶区高精度、高剂量照射,同时显著降低周围正常组织受照剂量,逐渐成为精确放疗的重要手段之一^[1]。然而,这一剂量学优势也对患者体位与呼吸控制提出了更高要求。胸腹部肿瘤受呼吸运动、膈肌活动及胃肠蠕动等因素影响,靶区位置在治疗前后可能发生显著偏移,导致剂量分布失真,降低疗效甚至增加不良反应风险^[2]。

锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)作为图像引导放射治疗(image guided radiotherapy, IGRT)的核心技术,能在治疗前实时采集患者摆位与呼吸状态,并与计划CT进行图像配准,从而量化三维空间位移及角度偏差,为靶区校正和摆位精度评估提供可靠依据^[3]。在此基础上,呼吸管理方式成为影响胸腹部肿瘤质子放射治疗(简称放疗)精确性的关键环节。自由呼吸是最常见的治疗状态,操作简便、患者依从性高,但呼吸运动造成的纵向位移往往难以避免。深吸气屏气(deep inspiration breath-hold, DIBH)技术则通过在呼吸周期的特定阶段屏气,稳定肿瘤位置并减少靶区与危及器官的相对运动,从而提高摆位重复性与剂量学准确性^[4-5]。已有研究提示呼吸管理方式对放疗精度有显著影响,但基于CBCT的系统性对比研究仍不足,尤其针对胸腹部肿瘤质子放疗的定量证据有限。

目前,国际放疗质控指南[如美国医学物理师协会TG76报告(American Association of Physicists in Medicine Task Group 76 Report, AAPM TG76)^[6]、欧洲放射治疗与肿瘤学学会-放射肿瘤实践咨询委员会(European Society for Radiotherapy & Oncology-Advisory Committee on Radiation Oncology Practice, ESTRO-ACROP)指南^[7]]均强调呼吸管理在胸腹部肿瘤放疗中的重要性。对于质子放疗,因布拉格峰效应导致剂量分布高度敏感,美国国家综合癌症网络(National Comprehensive Cancer Network, NCCN)指南和粒子治疗协作组(Particle Therapy Co-Operative Group, PTCOG)共识均建议采用呼吸控制技术以提高治疗精度。然而,现有指南主要针对光子放疗,针对质子放疗的呼吸管理策略仍缺乏充分的循证医学证据。

本研究基于CBCT图像引导,对比分析DIBH与自由呼吸在胸腹部肿瘤质子放疗中的摆位误差、角

度偏差、校正效率及重定位情况,旨在为临床优化呼吸管理策略、提升放疗精度与安全性提供实证依据。

1 资料与方法

1.1 研究对象

本研究回顾性纳入2022年1月至2025年4月合肥离子医学中心放疗中心收治的胸腹部肿瘤质子放疗患者86例。纳入标准:①经病理学确诊为胸部或腹部实体恶性肿瘤(如肺癌、食管癌、胃癌、肝癌等);②拟接受常规分次质子放疗,计划照射次数 ≥ 15 次;③治疗前能接受CBCT图像引导定位,影像数据完整可用;④年龄 ≥ 18 岁,身体状况允许完成整个放疗疗程;⑤对呼吸管理有一定配合度,能完成自由呼吸或DIBH屏气训练。排除标准:①合并严重呼吸系统疾病,无法配合呼吸管理;②无法耐受屏气训练或因心肺功能限制无法实施DIBH者;③放疗过程中出现频繁脱离呼吸管理模式或拒绝继续接受CBCT扫描者;④影像学数据缺失或图像质量不符合分析要求者。根据纳入与排除标准,共排除36例(其中无法配合屏气训练12例,影像学数据缺失15例,治疗中断9例),最终纳入50例。根据呼吸管理方式分为两组:自由呼吸组($n=25$)和DIBH组($n=25$)。本研究经合肥离子医学中心伦理委员会审核批准(批件号:YXMC-2021-107),研究过程严格遵循医学伦理规范。

1.2 固定与摆位流程

本研究采用64排大孔径CT模拟定位机(德国Siemens公司)及具有图像引导治疗功能的质子Probeam直线加速器(美国Varian公司)。固定装置包括科莱瑞迪脚垫(R62400)、科莱瑞迪SBRT固定板(R62400)及科莱瑞迪真空垫(R7641-25NLB2)。

1.2.1 CT模拟定位

患者取仰卧位,体位设置与实际放疗一致。定位扫描范围覆盖整个放疗靶区及周围骨性标志,并延伸至邻近解剖区域,以便图像引导时对比配准。定位完成后将图像导入治疗计划系统(treatment planning system, TPS),由放射科医师与物理师共同勾画靶区及危及器官(organs at risk, OAR),并制定个体化放疗计划。定位过程中同步完成体位固定模具制作,确保后续治疗的体位重复性与摆位一致性。

1.2.2 呼吸管理方式

根据分组不同,采取以下呼吸管理措施。

自由呼吸组:患者保持自然呼吸状态完成模拟

定位及后续放疗。定位过程中记录呼吸运动范围,并在治疗计划中设置适当的靶区边界以涵盖呼吸运动带来的不确定性。

DIBH组:模拟定位前对患者进行屏气训练,确保其能在DIBH状态下维持至少15~20 s。定位时患者于屏气状态完成CT扫描,后续放疗亦在相同呼吸状态下进行。每次治疗前,技师通过呼吸监测系统确认患者达到既定吸气水平,并在屏气状态下完成CBCT采集及质子照射。

1.2.3 摆位与CBCT图像引导

每次质子放疗前均行CBCT扫描。患者按首次模拟定位体位固定后,启动CBCT采集治疗部位图像,所得图像实时导入放疗系统并自动与计划CT配准。配准主要依据脊柱、肋骨等骨性标志及靶区周围软组织影像,进行六自由度位移分析,包括3个线性方向(左右X轴、头脚Y轴、前后Z轴)及3个角度方向(Pitch、Roll、Yaw)。系统计算摆位偏差后,技师根据建议位移值调整治疗床,确认摆位误差在可接受范围内后启动质子束照射。摆位误差数据及调整幅度自动记录,用于后期误差趋势分析与治疗质控。整个过程严格依照放疗中心质控流程执行,确保治疗精度及患者安全。

1.3 观察指标与数据采集

(1)摆位误差指标:所有患者在治疗初期(第1~5次放疗)均行CBCT扫描并采集摆位数据。摆位误差为CBCT图像与计划CT图像自动配准后系统生成的六维空间偏移值。具体包括:①三轴方向摆位误差(单位:mm),X轴为左右方向位移,Y轴为头脚方向位移,Z轴为前后方向位移;②三维矢量偏差(three-dimensional vector error, TVE), $TVE(mm) = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$,其中X、Y、Z分别为3个方向的线性误差;③六自由度角度误差(单位:°),Pitch(俯仰角)绕X轴旋转,Roll(翻滚角)绕Z轴旋转,Yaw(偏航角)绕Y轴旋转。角度误差 $> \pm 1.5^\circ$ 者单独记录分析。根据科室质控标准及国际指南,本研究设定摆位误差可接受阈值:线性误差 ≤ 5 mm,角度误差 $\leq 1.5^\circ$,超过此阈值需重新摆位。

(2)校正相关指标:①每次治疗床调整幅度(mm),记录CBCT配准后治疗床在X/Y/Z轴方向的实际移动距离,评估不同固定方式下治疗初始摆位精度;②摆位校正时间(min),从患者上机固定至最终校

正确的时间,反映定位效率与操作稳定性;③摆位重定位发生率,若初次摆位偏差超过5 mm需重新固定和CBCT扫描,记录发生次数及原因并计算发生率。

(3)放疗过程中相关记录:①体重变化(每周1次),体重波动 $> 5\%$ 者予以标记,评估体位固定适应性变化及可能引起的固定误差;②固定模具适应性评分(技师评分,满分10分),包括:①贴合度(4分):模具与身体表面完全贴合4分,局部间隙 ≤ 2 mm 3分,间隙2~5 mm 2分,间隙 > 5 mm 1分;②舒适性(3分):患者自觉舒适3分,轻度不适2分,明显不适1分;③稳定性(3分):固定牢固无移位3分,轻微松动2分,明显松动1分。评分由2名资深技师独立打分,取平均值, ≥ 8 分为贴合良好、适应性强,6~7分为轻度不适或轻度松动, < 6 分为贴合较差或需更换模具。为提高可重复性,所有技师接受统一培训,评分差异 > 2 分时讨论并重新评估。

(4)数据采集与管理:所有数据实时录入质控数据库,由独立研究人员核查编码。将5次摆位误差值分别计算均值、标准差作为该患者个体代表值,各组数据汇总供统计分析。固定方式更换、中断治疗或图像质量不合格者记录原因,不纳入正式分析。

1.4 统计学方法

所有数据采用SPSS 26.0软件进行统计分析。正态性检验采用Shapiro-Wilk检验,方差齐性检验采用Levene检验。当数据不满足正态分布或方差不齐时,采用Mann-Whitney *U* 检验或Kruskal-Wallis检验。计量资料以均数 \pm 标准差($\bar{x} \pm s$)表示,组间比较使用独立样本*t*检验。分类变量采用 χ^2 检验。TVE数据满足正态分布时进行方差分析,非正态分布数据采用非参数检验。 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 基线资料

两组患者的年龄、性别、体重指数(body mass index, BMI)、基线体重、肿瘤部位构成及计划放疗次数等基线资料经倾向性匹配(propensity score matching, PSM)后,基线变量的标准化均数差异(standardized mean difference, SMD)均 $P < 0.1$,且均 $P > 0.05$,提示基线资料均衡可比(表1)。

2.2 摆位误差

DIBH组在Y轴方向的位移误差显著小于自由呼吸组($P < 0.05$),三维矢量误差整体水平亦低于自

表1 两组患者基线资料比较

组别	年龄 ($\bar{x}\pm s$, 岁)	男/女 (例)	BMI ($\bar{x}\pm s$, kg/m ²)
自由呼吸组 (n = 25)	56.8±9.7	16/9	23.4±2.8
DIBH组 (n = 25)	54.9±10.2	14/11	22.9±2.6
t/χ^2	0.675	0.083	0.654
<i>P</i>	0.503	0.773	0.516

组别	基线体重 ($\bar{x}\pm s$, kg)	胸部/腹部肿瘤 (例)	计划放疗次数 ($\bar{x}\pm s$, 次)
自由呼吸组 (n = 25)	62.7±8.9	14/11	23.6±4.1
DIBH组 (n = 25)	61.3±8.1	15/10	24.2±4.4
t/χ^2	0.582	0.000	-0.499
<i>P</i>	0.564	1.000	0.620

注: BMI: 体重指数; DIBH: 深吸气屏气。

由呼吸组($P < 0.05$); *X*轴与*Z*轴方向差异无统计学意义($P > 0.05$)(表2)。

表2 两组患者三轴摆位误差与TVE比较($\bar{x}\pm s$, mm)

组别	<i>X</i> 轴误差 (左右)	<i>Y</i> 轴误差 (头脚)	<i>Z</i> 轴误差 (前后)	TVE
自由呼吸组 (n = 25)	1.76±0.58	2.38±0.65	2.62±0.79	3.31±0.91
DIBH组 (n = 25)	1.61±0.47	1.74±0.52	2.35±0.68	2.68±0.76
<i>t</i>	1.139	3.741	1.337	2.734
<i>P</i>	0.26	<0.001	0.188	0.009

注: TVE: 三维矢量误差; DIBH: 深吸气屏气。

2.3 角度误差

DIBH组在Pitch方向(绕*X*轴旋转)误差显著低于自由呼吸组($P < 0.05$),而在Roll(绕*Z*轴)及Yaw(绕*Y*轴)方向,两组差异无统计学意义($P > 0.05$)(表3)。

表3 两组患者角度误差比较($\bar{x}\pm s$)

组别	Pitch (俯仰)	Roll (翻滚)	Yaw (偏航)
自由呼吸组 (n = 25)	1.27±0.45	0.89±0.36	0.94±0.41
DIBH组 (n = 25)	0.92±0.38	0.80±0.31	0.86±0.37
<i>t</i>	3.095	0.988	0.699
<i>P</i>	0.003	0.328	0.488

注: DIBH: 深吸气屏气。

2.4 治疗床调整幅度与校正时间

DIBH组在3个方向(*X*、*Y*、*Z*轴)上平均调整幅度均小于自由呼吸组(均 $P < 0.05$),但*X*、*Z*轴方向上差异无统计学意义($P > 0.05$),*Y*轴(头脚方向)差异具有统计学意义($P < 0.05$)。DIBH组平均校正时间显著短于自由呼吸组($P < 0.05$)(表4)。

表4 两组患者治疗床调整幅度与校正时间比较($\bar{x}\pm s$)

组别	<i>X</i> 轴调整 幅度 (mm)	<i>Y</i> 轴调整 幅度 (mm)	<i>Z</i> 轴调整 幅度 (mm)	校正时间 (min)
自由呼吸组 (n = 25)	1.85±0.52	2.42±0.67	2.66±0.73	4.6±1.1
DIBH组 (n = 25)	1.58±0.44	1.78±0.49	2.31±0.58	3.2±0.9
<i>t</i>	1.952	3.719	1.97	4.657
<i>P</i>	0.057	<0.001	0.055	<0.001

注: DIBH: 深吸气屏气。

2.5 重定位发生情况与固定适应性

在治疗过程中,重定位发生率=(重定位次数/总摆位次数)×100%。本研究共记录两组摆位各125次(25×5)。自由呼吸组重新定位率高于DIBH组($P < 0.05$)。多数重定位事件集中在第1~2次治疗,主要原因包括纵向漂移过大及固定贴合不良。在固定模具适应性方面,DIBH组平均评分显著高于自由呼吸组($P < 0.05$)。两组中患者在治疗期间体重波动超过5%的例数差异无统计学意义($P > 0.05$)(表5)。

表5 两组患者重定位发生情况与固定适应性比较

组别	重定位 发生率	固定模具 适应性评分 ($\bar{x}\pm s$, 分)	体重波动 > 5%患者例数 (例)	因体重变 化导致固 定失效
自由呼吸组 (n = 25)	5.6% (7/125)	7.9±0.8	4	1
DIBH组 (n = 25)	0.8% (1/125)	8.6±0.7	3	0
t/χ^2	4.889	2.544	0.153	—
<i>P</i>	0.027	0.014	0.696	—

注: DIBH: 深吸气屏气。

3 讨论

质子放疗凭借布拉格峰效应在胸腹部肿瘤治疗中具有显著优势,可在提高靶区剂量集中性的同时减少周围正常组织的损伤^[8]。然而,这种高精度的剂量学特性也使治疗对靶区定位与摆位精度的要求更高。胸腹部受呼吸运动、膈肌活动和胃肠蠕动等因素影响,靶区在治疗过程中存在动态位移,尤以纵向(*Y*轴)方向偏移最为明显,可能导致剂量分布失真,降低治疗效果^[9]。因此,选择合适的呼吸管理方式以减少摆位误差,是胸腹部肿瘤质子放疗的关键环节。

本研究结果显示,与自由呼吸相比,DIBH能显著降低*Y*轴位移误差和三维矢量误差,同时在Pitch角度控制方面亦具有优势。这表明DIBH通过在呼吸周期的特定阶段屏气,可有效固定肿瘤位置,减少

膈肌和胸腹壁运动引起的纵向位移,从而提升摆位稳定性和可重复性。此外,DIBH组平均校正时间明显缩短,重定位发生率亦显著降低,提示该技术不仅能提高定位精度,还能提升治疗效率,减少因摆位不稳造成的治疗中断。从临床意义来看,DIBH在保障放疗精度的同时,还可减少心脏、肺组织、肝脏等周围危及器官的剂量累积,尤其适用于肿瘤邻近关键器官的病例。自由呼吸虽操作简便、患者依从性要求较低,但呼吸运动引起的位移难以避免,需在计划中增加较大的安全边界,可能导致正常组织受照增加。相较之下,DIBH通过提高摆位精度,有助于缩小计划靶体积(planning target volume, PTV)边界,进一步发挥质子放疗的剂量学优势。国内外多项研究证实了呼吸管理对放疗精度的影响。Josipovic等^[10]对肺癌患者的研究发现,DIBH技术可将摆位误差从(4.2±2.1)mm降至(2.1±1.3)mm。Degrande等^[11]研究发现,在乳腺癌放疗中,DIBH可显著降低心脏受照剂量。周楫^[12]研究也证实,在肝癌放疗中屏气技术显著优于自由呼吸。本研究结果与上述研究一致,但针对质子放疗的特殊性,其误差控制要求更为严格。质子放疗的布拉格峰效应使高剂量区集中于靶区,剂量梯度陡峭,摆位误差对剂量分布的影响较光子放疗更敏感。研究表明,3 mm摆位误差可导致靶区剂量下降5%~10%,OAR剂量可能增加15%~20%^[13]。本研究中DIBH组Y轴误差较自由呼吸组降低约2 mm,理论上可减少靶区剂量损失3%~7%,这对需要高精度照射的胸腹部肿瘤具有重要临床意义。

基于本研究结果,建议临床应用DIBH时注意以下事项:①治疗前进行充分的屏气训练,确保患者能稳定屏气15~20 s;②对于肺功能较差[第1秒用力呼气容积(forced expiratory volume in one second, FEV₁) < 1.5 L]或无法配合屏气的患者,可考虑采用呼吸门控技术或4D-CT指导的放疗作为替代方案;③建议结合在线CBCT进行每次治疗的摆位验证,确保误差在可接受范围内。

需要指出的是,本研究存在以下局限性:样本量较小,且为单中心回顾性研究,可能存在选择偏倚;未进行剂量学分析,无法直接评估摆位误差对实际剂量分布的影响;DIBH训练效果未量化评估,不同患者的屏气稳定性可能存在差异;未纳入4D-CT数据,无法全面评估呼吸运动对靶区的影响。此外,

DIBH对患者呼吸配合度有较高要求,部分心肺功能较差或无法耐受屏气训练的患者难以应用。因此,未来应扩大多中心研究规模,结合4D-CT、呼吸门控及实时追踪等技术,进一步评估不同呼吸管理方式对剂量分布和临床结局的综合影响。

综上,在CBCT图像引导下,DIBH呼吸管理方式能显著改善胸腹部肿瘤质子放疗的摆位精度与定位效率,降低重定位风险,具有良好的临床应用前景。对于能够耐受屏气训练的患者,应优先推荐DIBH,以最大化保障放疗的安全性和精准性。

参考文献

- [1] 李丽清, 苏庭世. 质子放疗与光子放疗在头颈部肿瘤治疗中的疗效及安全性比较: 一项系统回顾和Meta分析[J]. 中国癌症防治杂志, 2025, 17(3): 358-365.
- [2] 张倩. 不同体位固定技术在胸腹部肿瘤放射治疗中的应用比较分析[J]. 航空航天医学杂志, 2023, 34(6): 689-692.
- [3] 刘杰, 马茗微, 王庆安, 等. 基于锥形束CT的前列腺癌放射治疗两种体位固定方式摆位误差比较[J]. 北京大学学报(医学版), 2025, 57(4): 1-15.
- [4] 李宝, 陈永忠, 金军, 等. 锥形束CT图像用于盆腔肿瘤剂量计算准确性评估[J]. 中国医疗器械杂志, 2025, 49(3): 302-307.
- [5] 肖春晖, 邱梅英, 李静文, 等. 基于CBCT和六维床比较分析两种固定方式在子宫颈癌术后放疗中的摆位误差[J]. 中国医学创新, 2025, 22(16): 67-72.
- [6] LI H, DONG L, BERT C, *et al.* AAPM Task Group Report 290: Respiratory motion management for particle therapy[J]. *Med Phys*, 2022, 49(4): e50-e81.
- [7] FREISLEDERER P, BATISTA V, ÖLLERS M, *et al.* ESTRO-ACROP guideline on surface guided radiation therapy[J]. *Radiother Oncol*, 2022, 173: 188-196.
- [8] 孙良超, 孙佳新, 孟雪. 质子放疗的研究进展和前景[J]. 中国肿瘤临床与康复, 2024, 31(12): 764-774.
- [9] 杨志, 左权, 刘蓉, 等. 两种不同体位固定装置在肿瘤患者放疗中的应用研究[J]. 实用癌症杂志, 2024, 39(1): 149-153.
- [10] JOSIPOVIC M, AZNAR M C, THOMSEN J B, *et al.* Deep inspiration breath hold in locally advanced lung cancer radiotherapy: validation of intrafractional geometric uncertainties in the INHALE trial[J]. *Br J Radiol*, 2019, 92(1104): 20190569.
- [11] DEGRANDE F A M, MARTA G N, ALVES T M M T, *et al.* Deep inspiration breath hold: dosimetric benefits to decrease cardiac dose during postoperative radiation therapy for breast cancer patients[J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2023, 28(2): 172-180.
- [12] 周楫. 不同呼吸运动管理方法在肝癌放疗中应用的临床效果研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [13] XIAO N, YUAN C, ZHAO T, *et al.* Comparative impact of supine vs prone positioning on dose distribution, acute toxicity, and setup error in postoperative radiotherapy for cervical cancer: a multidimensional propensity-matched cohort study[J]. *Front Oncol*, 2025, 15: 1637443.