

DOI: 10.13491/j.issn.1004-714X.2023.01.008

· 论 著 ·

4D-CT 呼吸信号采集方式对运动肿瘤靶区勾画的影响

刘倩倩, 姚升宇, 陈旭明, 侯灵通, 胡喆恺

上海市第一人民医院, 上海 201600

摘要: **目的** 比较 2 种呼吸信号采集方式对运动靶区勾画的影响。**方法** 正方体模体(内含球体)置于运动平台上, 设置运动周期、频率和方向, 模拟呼吸运动。分别利用 RPM 法和 GE 法进行呼吸信号采集, 在最大密度投影(MIP)序列进行靶区勾画。比较正方体和球体不同呼吸信号采集方式下各自重建体积与理论运动体积差异。**结果** 同一种呼吸信号采集方式下, 相同呼吸幅度、不同呼吸频率的重建体积变化较小。对于球体靶区, RPM 法重建体积与理论运动体积偏差在 $-1.5\% \sim 5.7\%$ ($P < 0.05$); GE 法偏差在 $-1.3\% \sim -13.8\%$ ($P < 0.05$)。对于正方体靶区, RPM 法重建体积与理论运动体积偏差在 $0.2\% \sim 0.9\%$; GE 法偏差在 $-2.6\% \sim 0.9\%$, 2 种方法与理论体积差异均无统计学意义 ($P > 0.05$)。**结论** 对于小体积球体靶区, 2 种方法得到的 MIP 图像勾画得到的靶区体积均小于实际肿瘤运动体积; 对于大体积正方体靶区, 2 种方法重建结果与理论结果相比差异均无统计学意义。对于小体积靶区而言, RPM 法重建偏差更小且重建图像质量更高。

关键词: 4D CT; CT 模拟定位; 图像重建; 呼吸运动

中图分类号: R816 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2023)01-0035-05

Influence of 4D CT-based respiratory signal acquisition methods on delineation of moving tumor targets

LIU Qianqian, YAO Shengyu, CHEN Xuming, HOU Lingtong, HU Zhekai

Shanghai General Hospital, Shanghai 201600 China

Abstract: **Objective** To compare the effects of different respiratory signal acquisition methods on the delineation of moving tumor targets. **Methods** A cube phantom containing a sphere was placed on a motion platform to simulate respiratory movement by setting motion period, frequency, and direction. Respiratory signal was acquired by real-time position management (RPM) method and GE method independently. Target delineation was conducted using the maximum intensity projection (MIP) sequence. The difference between the reconstructed volume and the theoretical moving volume was compared under the two respiratory signal acquisition methods for cube and sphere targets. **Results** Under the same respiratory signal acquisition method, the same respiratory amplitude, and different respiratory frequencies, reconstructed volume changes were relatively small. For the sphere target, the deviation between the reconstructed volume and the theoretical moving volume was -1.5% to 5.7% with the RPM method and -1.3% to -13.8% with the GE method (both $P < 0.05$). For the cube target, the deviation between the reconstructed volume and the theoretical moving volume was 0.2% to 0.9% with the RPM method and -2.6% to 0.9% with the GE method, with no statistical significance. **Conclusion** For small-volume sphere targets, the target volumes obtained from MIP images by the two respiratory signal acquisition methods are both smaller than the actual moving volume. For large-volume cube targets, there is no significant difference between the reconstructed and theoretical results with any respiratory signal acquisition method. The RPM method produces smaller deviation and better image quality when reconstructing small-volume targets.

Keywords: 4D CT; CT simulation; Image reconstruction; Respiratory motion

Corresponding author: HU Zhekai, E-mail: hzk801023@163.com

放射治疗是治疗肿瘤的主要手段, 约 60%~70% 的肿瘤患者均需要接受不同程度的放射治疗^[1-2]。由于电离辐射存在损伤效应, 在肿瘤剂量足够的同时, 应尽可能减少正常组织受量, 保证疗效并降

低辐射损伤。由于呼吸运动、心脏及大血管搏动、胃肠蠕动等生理性活动导致肿瘤的移位、变形, 严重影响临床靶区勾画结果^[3]。

呼吸运动对胸部肿瘤勾画的影响最为显著。常

作者简介: 刘倩倩 (1989—), 女, 技师, 从事放射医学物理工作。E-mail: liuqq201613@163.com
通信作者: 胡喆恺, E-mail: hzk801023@163.com

规 CT 扫描的只是某一呼吸时相的肿瘤静止状态, 不能代表整个呼吸过程中位置改变。四维 CT(four-dimensional computed tomography, 4D CT)技术与传统 CT 相比引入了时间维度, 能够动态地捕捉患者呼吸规律, 通过绘制平稳的呼吸波形采集患者整个呼吸周期的 CT 图像, 为运动肿瘤靶区的勾画提供了更为准确的估计手段。四维 CT 有多种呼吸信号采集方式, 其中包括 GE 公司的锡丝标记方法, 还有美国瓦里安公司的图像实时位置管理系统(real time position management, RPM)等。本研究探讨 GE 锡丝标记法和 RPM 法对于运动靶区勾画精度的影响, 旨在选择较为精确的图像采集方式, 为临床运动靶区勾画提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料及设备 ① CIRS 008PL 呼吸运动平台, 该装置能够自主设置运动的周期和振幅, 在主平台上放置检测模体, 同时连接一个独立控制的模拟呼吸信号平台, 通过与主平台运动周期一致的上下移动来模拟呼吸运动。② GE Discovery 590RT 大孔径 4D CT 模拟定位机完成四维图像信息采集。③ CIRS 编号 038-05 边长为 6.35 cm 正方体(中心含不同密度直径为 3 cm 的均匀球体)作为检测模体, 用来模拟 2 种不同大小不同形状的运动肿瘤。

1.2 模拟呼吸运动及靶区移动 将检测模体置于主平台上, 通过运动控制软件设置不同呼吸周期、不同呼吸幅度的肿瘤运动状态, 分别设定沿头脚方向以 ± 5 mm、 ± 10 mm、 ± 15 mm 的幅度做周期为 3 s、4 s 和 5 s 的规律运动。利用 2 种呼吸信号采集方式: ① 第一种方式为 RPM 系统, 利用红外线摄影装置追踪置于运动平台上模块的荧光标记点的运动轨迹, 收集呼吸波形信号, 本研究简称其为 RPM 法。具体步骤为在小平台上放置一个含有红外荧光点的模块, 扫描床尾部放置红外线发射器和接收红外信号的摄像机来采集荧光模块的运动轨迹, 由专用计算机将荧光模块的运动轨迹转换为患者的呼吸信号, CT 设备接收到 RPM 系统的呼吸信号后采集数据。② 第二种方式为 GE 自带呼吸信号采集方法, 本研究简称 GE 法, 具体步骤为在小平台上固定一段锡丝, GE 模拟机在扫描过程中探测锡丝信号, 根据锡丝位移变化绘制呼吸曲线, 由 GE 四维工作站采集并重建运动图像。

2 种方法均是利用激光定位系统对准检测模体, 规则运动状态下采用大孔径 CT 模拟定位机行四维扫描, 扫描范围大于模体运动范围, 重建层厚

2.5 mm, 四维 CT 工作站依据呼吸曲线, 将一个完整呼吸周期的图像序列平均分成 10 个呼吸时相, 指定 T0 为吸气末时相, T5 为呼气末时相。然后重建最大密度投影图像序列, 用于靶区勾画。

1.3 靶区勾画 CT 扫描图像重建完成后上传至 Eclipse13.6 放疗计划系统进行靶区勾画及体积计算工作, 在 MIP 图像序列中勾画正方体及球体轮廓作为靶区。为提高靶区勾画准确性, 由同一位高年资医师勾画所有图像序列, 勾画条件统一处理, 窗宽窗位保持一致。在传统 CT 扫描图像中勾画静止状态下正方体靶区与球体靶区, 比较勾画体积与静止理论体积差异(均 $< 1\%$), 保证后续勾画准确性。其中每个运动状态勾画 3 次, 测量体积求均值, 以降低勾画随机误差。

1.4 统计分析 本研究采用 SPSS 22.0 统计软件进行分析。数据经正态性检验符合正态分布, 用 $\bar{x} \pm s$ 表示对 GE 法和 RPM 法重建模式下勾画得到的 GTV 体积与理论运动体积偏差进行配对 t 检验, 检验水准 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果

2.1 GTV 重建体积比较 不同呼吸状态下球体和正方体靶区重建体积具体见表 1, 与理论计算结果比较见图 1 和图 2。在呼吸周期相同条件下, 随着头脚方向呼吸幅度增大, 肿瘤出现的范围增大, 运动靶区重建体积增大。在振幅为 5~15 mm, 球体靶区运动与静止体积变化在 50%~150%; 正方体靶区体积变化在 16%~47%。相同呼吸幅度, 不同呼吸频率的重建体积差异相对较小。

表 1 不同呼吸呼吸信号采集方式下球体和正方体靶区重建体积

Table 1 Reconstructed volumes with different respiratory signal acquisition methods for sphere and cube targets

周期	幅度/mm	球体靶区/cm ³		正方体靶区/cm ³	
		RPM	GE	RPM	GE
3 s	5	20.69	19.67	298.99	298.87
	10	27.13	24.37	337.20	327.79
	15	33.77	33.54	378.10	371.46
4 s	5	20.77	19.13	298.78	295.67
	10	27.78	27.05	338.06	327.79
	15	34.20	34.07	377.58	373.21
5 s	5	21.34	20.91	296.97	298.35
	10	27.56	24.99	337.57	337.84
	15	34.78	34.86	377.78	374.53

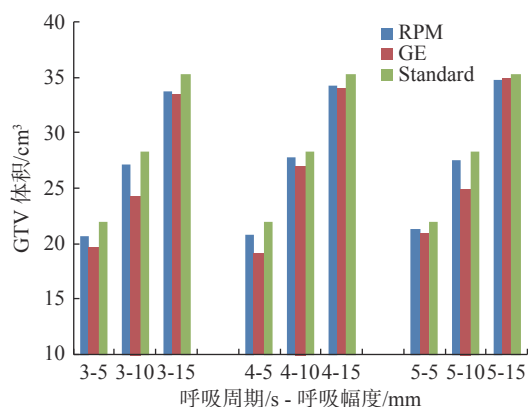


图1 球体靶区在不同呼吸状态下重建体积与理论运动体积比较

Figure 1 Comparison of reconstructed volume and theoretical moving volume of sphere target under different breathing states

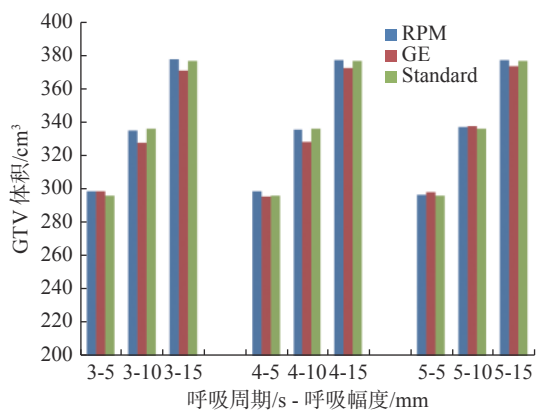


图2 正方体靶区在不同呼吸状态下重建体积与理论运动体积比较

Figure 2 Comparison of reconstructed volume and theoretical moving volume of cube target under different breathing states

2.2 靶区重建体积与理论运动体积之间的差异 不同靶区不同呼吸周期 RPM 法与 GE 法重建体积及其与理论运动体积差异的统计结果见表 2。对于球体小靶区而言, RPM 法重建体积与理论运动体积偏差在 $-1.5\% \sim 5.7\%$; GE 法重建体积与理论运动体积偏差在 $-1.3\% \sim -13.8\%$ 。对于正方体大靶区, RPM 法重建体积与理论运动体积偏差在 $0.2\% \sim 0.9\%$; GE 法重建

表 2 不同靶区不同呼吸周期 RPM 法与 GE 法重建体积与理论运动体积比较

Table 2 Comparison of reconstruction volume and theoretical moving volume of targets in different respiratory periods using RPM method and GE method

比较项目	重建方式	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
球体靶区/cm ³	RPM	-7.570	0.000
	GE	-5.253	0.001
正方体靶区/cm ³	RPM	1.361	0.210
	GE	-1.858	0.100

体积与理论运动体积偏差在 $-2.6\% \sim 0.9\%$ 。结果显示, 对于小体积的球体靶区, RPM 法重建得到的图像所勾画的靶区体积与理论运动体积差异有统计学意义($t = -7.570, P < 0.05$)。GE 法重建得到的图像所勾画的靶区体积与理论运动体积差异有统计学意义($t = -5.253, P < 0.05$)。2 种方法结果均普遍偏小; 对于相对大体积的正方体靶区, RPM 法和 GE 法两者重建得到的图像所勾画的靶区体积与理论运动体积相比差异均无统计学意义($P > 0.05$)。

2.3 不同呼吸信号采集方式的重建效果比较 具体结果如表 3。分析可见, 无论是对于小体积球体靶区还是相对大体积的正方体靶区而言, GE 法图像重建误差均高于 RPM 法, 两者差异有统计学意义($t = 2.990, 2.943, P < 0.05$); 总体来讲, 2 种方法的重建效果差异明显, 有统计学意义($t = 3.220, P < 0.05$)。

表 3 RPM 法与 GE 法重建体积偏差 ΔV 绝对值比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Comparison of absolute reconstructed volume deviation using RPM method and GE method ($\bar{x} \pm s$)

比较项目	RPM/cm ³	GE/cm ³	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
球体靶区	0.95 ± 0.36	2.0 ± 1.08	2.990	0.017
正方体靶区	1.20 ± 0.75	4.03 ± 2.74	2.943	0.022
总体	1.08 ± 0.60	3.01 ± 2.31	3.220	0.005

3 讨论

GTV 指临床可见的、可通过临床诊断检查手段确定的肿瘤范围, 是靶区勾画的起始和放射治疗的基础, 通常基于 CT 图像确定^[4]。一般根据群体平均值或临床经验值确定一定外放范围最终得到治疗所用 PTV 靶区, 但无法解决运动伪影导致的剂量偏差^[5]。对于运动肿瘤而言, 存在极大的过度照射或欠量照射风险^[6]; 若靶区不确定度外扩范围小于其真实运动轨迹, 会使靶区边缘剂量不足而降低疗效, 增大复发风险; 若外扩范围大于其真实运动轨迹, 则会增加不必要的正常组织受量。Erridge 等^[7]利用 EPID 系统动态监测 25 例肺癌患者肿瘤运动情况, 发现肿瘤在头脚方向的位移较大, 达 (12.5 ± 7.3) cm。有研究显示, 运动靶区 CT 图像重建的体积变化在常规呼吸运动范围内可能达到 67%^[8]。本研究实验条件下模拟的正方体靶区运动体积与静止体积相比, 偏差最大达 47%, 而体积较小的球体靶区偏差则达 150%。偏差结果受靶区体积与呼吸幅度影响较大。

精确放疗首先要保证靶区勾画精确^[9-10],对靶区外扩范围的估计也更为严格苛刻。4DCT 可以采集整个呼吸周期的图像^[11],该技术的出现很好地解决了靶区运动带来的不确定性问题^[12]。其中最大密度投影(maximal intensity projection, MIP)序列是所有图像序列的最大密度投影集合,涵盖整个呼吸过程中肿瘤运动的最大范围,对于与周围组织密度相差较大或距离较远的病灶,能很好地显示肿瘤位移信息^[13]。本研究利用 RPM 法和 GE 法分别进行图像重建,两者均有相应的不足之处。其中, RPM 系统探测并记录到荧光标记挡块的运动是一维矢量,会丢失靶区部分运动信息^[14]。RPM 法耗时、出束时间长,操作较 GE 法复杂,对咳嗽等不规律的呼吸信号较为敏感。Mizuno 等^[15]研究显示,当呼吸幅度 < 3 mm 时, RPM 系统通常检测不到呼吸信号。而对于 GE 法来说,重建图像的呼吸幅度小时, GE 法也无法探测到锡丝的运动轨迹。并且伪影相对较重,部分容积效应更为明显,靶区边缘重建清晰度不如 RPM 系统,从而影响临床医生的靶区边缘确定,易引入一定的人工勾画误差。另一方面实际病人扫描时, RPM 法采集的是整个扫描周期内的病人呼吸信号,而 GE 法仅采集了几个呼吸周期的呼吸信号,对于病人扫描过程中出现的呼吸变化, GE 法就无法真实反应,从而会导致重建误差增大。当出现不规则呼吸波时 2 种方法的重建误差均较大,在此条件下进行 GTV 勾画很有可能导致肿瘤靶区边缘甚至野外复发概率增加。因此对于呼吸运动下肿瘤靶区 GTV 的确定,必须参考患者呼吸规律性和呼吸幅度加以修正,必要时对患者进行呼吸训练。

真实情况下肿瘤靶区边缘毛糙且形状各异,加上患者呼吸过程复杂,重建误差不可忽视^[16-17]。呼吸运动中头脚方向位移最大,因此本研究模拟了头脚方向运动,真实情况下运动是三维的,运动过程中也可能会发生形变,因此运动轨迹也更加复杂^[18]。本研究结果显示,实际体积较大的正方体靶区与体积小的球体靶区相比,图像重建体积误差小,因此特别提示对于小体积靶区,肿瘤体积越小,部分容积效应越大,重建误差和勾画误差也更大。另外,对于小体积靶区,根据四维 CT 的 RPM 法和 GE 法不同呼吸信号采集方式重建得到的 MIP 图像勾画的靶区体积均小于实际肿瘤体积,与真实运动体积存在一定偏差,因此在临床应用中对于小靶区的处理应更为谨慎,应适当修正扫描条件,提高分辨率,如减小扫描层厚,减少

FOV 等。对于大体积靶区,2 种方法重建方法与理论体积比较无明显差异。然而对于小体积靶区,考虑到重建偏差和重建图像质量,建议使用 RPM 法进行四维重建,以减小勾画误差。本研究模拟较为简化,肿瘤模型规则,呼吸曲线规律,无法反应真实情况,还需后续更为深入细致的研究。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展,排名无争议。文章不涉及任何利益冲突

作者贡献声明 刘倩倩负责设计研究方案,实施研究过程、实验数据分析、实验结果可视化、论文初稿撰写;姚升宇负责参与论文选题和设计,参与资料分析与解释,研究方案调查审核,论文审阅;陈旭明负责实验研究可行性分析、论文审阅与修订;侯灵通负责实验数据审核与整理,部分文献调研;胡喆恺负责研究概念生成、研究资源采集、实验设计验证与核实、研究课题监管与指导、论文审阅与修订

参考文献

- [1] Zubizarreta EH, Fidarova E, Healy B, et al. Need for radiotherapy in low and middle income countries - the silent crisis continues[J]. *Clin Oncol*, 2015, 27 (2) : 107-114. DOI: [10.1016/j.clon.2014.10.006](https://doi.org/10.1016/j.clon.2014.10.006).
- [2] 刘思涵, 张大昕, 宋颖辉. PPAR γ 与放射治疗联合应用的前景[J]. *现代生物医学进展*, 2012, 12 (29) : 5786-5788,5800. DOI: [10.13241/j.cnki.pmb.2012.29.046](https://doi.org/10.13241/j.cnki.pmb.2012.29.046).
Liu SH, Zhang DX, Song YH. The prospect of the combination use of PPAR γ and radiotherapy[J]. *Prog Mod Biomed*, 2012, 12 (29) : 5786-5788,5800. DOI: [10.13241/j.cnki.pmb.2012.29.046](https://doi.org/10.13241/j.cnki.pmb.2012.29.046).
- [3] 王银亮, 王慧涛, 郑安平, 等. TOMO-HD图像引导不同部位肿瘤放疗摆位误差的研究[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30 (3) : 331-338. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.03.015](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.03.015).
Wang YL, Wang HT, Zheng AP, et al. Study on setup errors for different body carcinoma radiotherapy with image guidance in TOMO-HD[J]. *Chin J Radiol Health*, 2021, 30 (3) : 331-338. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.03.015](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.03.015).
- [4] 刘茹佳, 陈颖, 钟志鹏, 等. 两种算法在非小细胞肺癌调强放疗中的剂量学比较[J]. *中国辐射卫生*, 2019, 28 (6) : 705-708. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.029](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.029).
Liu RJ, Chen Y, Zhong ZP, et al. Dosimetric comparison of two algorithms in intensity-modulated radiation therapy for NSCLC[J]. *Chin J Radiol Health*, 2019, 28 (6) : 705-708. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.029](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2019.06.029).
- [5] Borm KJ, Oechsner M, Wiegandt M, et al. Moving targets in 4D-CTs versus MIP and AIP: comparison of patients data to phantom data[J]. *BMC Cancer*, 2018, 18 (1) : 760. DOI: [10.1186/s12885-018-4647-4](https://doi.org/10.1186/s12885-018-4647-4).

- [6] 黄玉玲, 潘纯国, 袁星星, 等. 4D-CT在肺转移瘤个体化精准放疗中的研究[J]. *实用癌症杂志*, 2021, 36 (12) : 2007-2010. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5930.2021.12.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5930.2021.12.026).
Huang YL, Pan CG, Yuan XX, et al. Internal target volume determined with 4D-CT in lung metastases[J]. *Pract J Cancer*, 2021, 36 (12) : 2007-2010. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5930.2021.12.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5930.2021.12.026).
- [7] Erridge SC, Seppenwoolde Y, Muller SH, et al. Portal imaging to assess set-up errors, tumor motion and tumor shrinkage during conformal radiotherapy of non-small cell lung cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2003, 66 (1) : 75-85. DOI: [10.1016/S0167-8140\(02\)00287-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8140(02)00287-6).
- [8] 戴威, 邓小武, 黄劲敏, 等. 放疗靶区呼吸运动对CT模拟定位图像重建的几何体积精度的体模实验研究[J]. *中国医学物理学杂志*, 2007, 24 (6) : 391-395,414. DOI: [10.3969/j.issn.1005-202X.2007.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-202X.2007.06.001).
Dai W, Deng XW, Huang SM, et al. Precision analyzing on virtual volume by using respiration motion phantom[J]. *Chin J Med Phys*, 2007, 24 (6) : 391-395,414. DOI: [10.3969/j.issn.1005-202X.2007.06.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-202X.2007.06.001).
- [9] Zhang JJ, Srivastava S, Wang CY, et al. Clinical evaluation of 4D MRI in the delineation of gross and internal tumor volumes in comparison with 4DCT[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20 (9) : 51-60. DOI: [10.1002/acm2.12699](https://doi.org/10.1002/acm2.12699).
- [10] Dai HD, Dong LF, Lv BW, et al. Feasibility study of permanent magnet-based tumor tracking technique for precise lung cancer radiotherapy[J]. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2021, 70: 4002010. DOI: [10.1109/TIM.2020.3039645](https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3039645).
- [11] Dupre PJ, Fitzherbert CM, Hand CM, et al. A new technique using 4DCT scans to create custom cardiac blocks for left-sided breast cancer treatments[J]. *Pract Radiat Oncol*, 2019, 9 (6) : e572-e578. DOI: [10.1016/j.prro.2019.06.002](https://doi.org/10.1016/j.prro.2019.06.002).
- [12] McWilliam A, Lee L, Harris M, et al. Benefit of using motion compensated reconstructions for reducing inter-observer and intra-observer contouring variation for organs at risk in lung cancer patients[J]. *Radiother Oncol*, 2018, 126 (2) : 333-338. DOI: [10.1016/j.radonc.2017.11.021](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2017.11.021).
- [13] Koksall C, Kesen ND, Okutan M, et al. Investigation of approaches for internal target volume definition using 4-dimensional computed tomography in stereotactic body radiotherapy of lung cancer[J]. *Med Dosim*, 2021, 46 (2) : 136-142. DOI: [10.1016/j.meddos.2020.10.004](https://doi.org/10.1016/j.meddos.2020.10.004).
- [14] Li G, Wei J, Li D, et al. SU-E-J-120: Characterization of 4D lung ventilation based on 4DCT lung density[J]. *Med Phys*, 2019, 39 (6Part7) : 3680. DOI: [10.1118/1.4734956](https://doi.org/10.1118/1.4734956).
- [15] Mizuno K, Song YL, Obcemea C. Comparison of the sensitivities of two 4DCT techniques: RPM and bellows system[J]. *Int J Biomed Eng Technol*, 2012, 8 (2/3) : 220-229. DOI: [10.1504/IJBET.2012.046087](https://doi.org/10.1504/IJBET.2012.046087).
- [16] Chung H, Jung J, Jeong C, et al. Evaluation of delivered dose to a moving target by 4D dose reconstruction in gated volumetric modulated arc therapy[J]. *PLoS One*, 2018, 13 (9) : e0202765. DOI: [10.1371/journal.pone.0202765](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202765).
- [17] Rabe M, Thieke C, Düsberg M, et al. Real-time 4DMRI-based internal target volume definition for moving lung tumors[J]. *Med Phys*, 2020, 47 (4) : 1431-1442. DOI: [10.1002/mp.14023](https://doi.org/10.1002/mp.14023).
- [18] Chi YW, Liang J, Qin X, et al. Respiratory motion sampling in 4DCT reconstruction for radiotherapy[J]. *Med Phys*, 2012, 39 (4) : 1696-1703. DOI: [10.1118/1.3691174](https://doi.org/10.1118/1.3691174).

(收稿日期:2022-07-13)

(上接第 25 页)

- [9] 国家卫生健康委员会. GBZ 128—2019 职业性外照射个人监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
National Health Commission of the People's Republic of China. GBZ 128 —2019 Specifications for individual monitoring of occupational external exposure[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18871—2002 Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [11] 王恺怡, 丁艳秋, 胡爱英, 等. 2020年全国外照射个人剂量监测能力考核结果与分析[J]. *中国辐射卫生*, 2021, 30 (5) : 555-559. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.006](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.006).
Wang KY, Ding YQ, Hu AY, et al. Results and analysis of monitoring ability assessment of external exposure personal dose in 2020[J]. *Chin J Radiol Health*, 2021, 30 (5) : 555-559. DOI: [10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.006](https://doi.org/10.13491/j.issn.1004-714X.2021.05.006).
- [12] 郝述霞, 郭文, 胡爱英, 等. 2016年外照射个人剂量监测能力考核检测报告书写存在问题的分析[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2017, 37 (10) : 786-788. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.10.012](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.10.012).
Hao SX, Guo W, Hu AY, et al. Analysis on the problems existing in the writing of the test reports of external individual dose monitoring in 2016[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2017, 37 (10) : 786-788. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.10.012](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.10.012).

(收稿日期:2022-07-06)