

放射肿瘤学专题

• 放射技术 •

## 基于 4D-CT 和 4D-CBCT 扫描研究呼吸运动对模体成像体积的影响\*

刘首鹏, 廖雄飞, 黎杰, 王首龙, 郎锦义<sup>△</sup>

610054 成都, 电子科技大学 医学院 (刘首鹏); 610041 成都, 四川省肿瘤医院·研究所, 四川省癌症防治中心, 电子科技大学医学院 放疗中心 (廖雄飞、黎杰、王首龙、郎锦义)

**[摘要]** 目的: 应用运动模体研究呼吸运动对四维 CT (four-dimensional computed tomography, 4D-CT) 和四维锥形束 CT (four-dimensional cone beam computed tomography, 4D-CBCT) 成像结果的影响。方法: 利用 QUASAR 运动模体模拟 16 种呼吸模式, 其中振幅设定为 5 mm、10 mm、20 mm 和 30 mm 四种; 频率设定为 10 次/min、12 次/min、15 次/min 和 20 次/min 四档。运用 4D-CT 和 4D-CBCT 对 16 种呼吸模式下的 QUASAR 模体进行扫描。将获取的图像通过 DICOM 网络传输至 MIM 工作站, 分别在各时相 CT 图像中勾画出 QUASAR 模体中包含的特定模块 (直径分别为 1 cm、2 cm 的球体以及边长为 3 cm 的正方体, 密度为  $1.41 \text{ g/cm}^3$ ), 统计并比较各时相 CT 图像中不同模块的体积。结果: 16 种呼吸模式下, 4D-CT 扫描得到的图像结果显示, QUASAR 模体中直径为 1 cm、2 cm 的球体以及边长为 3 cm 的正方体体积变化率平均值分别为  $62.42\% \pm 47.64\%$ 、 $35.95\% \pm 32.02\%$  和  $32.71\% \pm 20.31\%$ , 而 4D-CBCT 扫描得到的结果分别为  $48.59\% \pm 26.76\%$ 、 $8.80\% \pm 11.43\%$  和  $18.19\% \pm 9.05\%$ ; 4D-CT 扫描结果显示 16 种扫描模式下 40% ~ 70% 时相三个插件体积变化相对其他时相平稳, 且体积变化率平均值分别下降至  $37.02\% \pm 14.12\%$ 、 $17.29\% \pm 7.58\%$  和  $23.43\% \pm 11.11\%$ 。与 4D-CT 相比, 4D-CBCT 得到的扫描结果各时相体积变化相对稳定。结论: 呼吸运动会影响 4D-CT 和 4D-CBCT 成像的结果, 针对运动模体, 4D-CT 和 4D-CBCT 扫描的图像结果体积均偏大, 4D-CT 中 40% ~ 70% 的呼吸时相体积与真实体积更接近, 建议在肿瘤体积勾画与呼吸门控治疗时使用 40% ~ 70% 时相。

**[关键词]** QUASAR 模体; 4D-CT; 呼吸运动; 4D-CBCT

**[中图分类号]** R730.55 **[文献标志码]** A doi:10.3969/j.issn.1674-0904.2021.01.009

**引文格式:** Liu SP, Liao XF, Li J, et al. Effect of respiratory motion on imaging volume based on 4D-CT and 4D-CBCT scans: A phantom study[J]. J Cancer Control Treat, 2021, 34(1): 53-58. [刘首鹏, 廖雄飞, 黎杰, 等. 基于 4D-CT 和 4D-CBCT 扫描研究呼吸运动对模体成像体积的影响[J]. 肿瘤预防与治疗, 2021, 34(1): 53-58.]

## Effect of Respiratory Motion on Imaging Volume Based on 4D-CT and 4D-CBCT Scans: A Phantom Study

Liu Shoupeng, Liao Xiongfei, Li Jie, Wang Shoulong, Lang Jinyi

School of Medicine, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, Sichuan, China (Liu Shoupeng); Radiotherapy Center, Sichuan Cancer Hospital & Institute, Sichuan Cancer Center, School of Medicine, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610041, Sichuan, China (Liao Xiongfei, Li Jie, Wang Shoulong, Lang Jinyi)

**Corresponding author:** Corresponding author: Lang Jinyi, E-mail: langjy610@163.com

This study was supported by National Key R&D Program of China (No. 2017YFC0113100) and its supporting program (No. 2019-YF09-00095-SN).

**[收稿日期]** 2020-03-04 **[修回日期]** 2020-10-09

**[基金项目]** \* 国家重点研发计划 (编号:2017YFC0113100); 成都市重点研发支撑计划 (编号:2019-YF09-00095-SN)

**[通讯作者]** <sup>△</sup> 郎锦义, E-mail: langjy610@163.com

**[Abstract]** **Objective:** To study the effect of respiratory motion on four-dimensional computed tomography (4D-CT) and four-dimensional cone beam computed tomography (4D-CBCT) imaging using QUASAR motion phantom. **Methods:**

Breathing patterns with different peak-peak amplitudes (5, 10, 20 and 30 mm) and frequencies (10, 12, 15 and 20 rpm) were simulated using a programmable motion phantom (Modus QA). The phantom was scanned by 4D-CT and 4D-CBCT under 16 breathing modes registered. The image datasets were transmitted to the MIM Software through Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM). The inserts [2 spheres with diameter of 1 cm and 2 cm (S1 and S2) and a cube with edge length of 3 cm (C3), density  $1.41 \text{ g/cm}^3$ ] of the QUASAR phantom were delineated in different phases of CT images. Volumes of inserts in the different phases of CT scans were recorded and analyzed. **Results:** Volume change rates of S1, S2 and C3 inserts in 10 phases of 4D-CT scan were  $62.42\% \pm 47.64\%$ ,  $35.95\% \pm 32.02\%$  and  $32.71\% \pm 20.31\%$ , respectively, and those of 4D-CBCT scan were  $48.59\% \pm 26.76\%$ ,  $8.80\% \pm 11.43\%$  and  $18.19\% \pm 9.05\%$ , respectively. Volumes of S1, S2 and C3 inserts in 40% ~ 70% phases of 4D-CT scan decreased to  $37.02\% \pm 14.12\%$ ,  $17.29\% \pm 7.58\%$  and  $23.43\% \pm 11.11\%$ , respectively, which is more stable compared to other phases. Compare with 4D-CT, the 4D-CBCT results showed a lower increase of the contoured volumes, and were lower in volume variability along the whole interval of phases. **Conclusion:** Respiratory motion will affect the results of 4D-CT and 4D-CBCT imaging. Volumes of the QUASAR phantom scanned by 4D-CT and 4D-CBCT are relatively larger than real volumes. Volumes in 40% ~ 70% phases of 4D-CT scan are comparatively closer to real volumes. It is recommended to use 40% ~ 70% phases for contouring target volumes and treatment in respiration-gated radiotherapy.

[Key words] QUASAR phantom; Four-dimensional computed tomography; Respiratory motion; Four-dimensional cone beam computed tomography

常规 CT 扫描成像仅考虑空间因素,而忽略了时间影响。既不能提供运动靶区准确的位置信息,同时又容易导致较为严重的伪影<sup>[1]</sup>。因此基于常规 CT 扫描成像且受呼吸运动影响的靶区难以达到预期精准放疗的目的。

随着科学技术的发展,四维 CT (four-dimensional computed tomography, 4D-CT) 成像技术逐渐得到广泛应用<sup>[2-7]</sup>。4D-CT 扫描采用螺旋扫描模式,对同一位置持续扫描至少一个完整呼吸周期,最后按照呼吸时相对采集的图像进行分组、重建,从而得到一组完整呼吸周期下运动目标的完整 CT 图像<sup>[8]</sup>。四维锥形束 CT (four-dimensional cone beam computed tomography, 4D-CBCT) 也称为呼吸相关锥形束 CT,其原理是在获取投影数据后,首先根据 2D 投影数据中的膈肌位置对数据进行相位拆分,分成 8 ~ 10 个时相,然后对拆分后的图像分别进行重建,形成三维 CBCT 图像。该技术不但可以消除呼吸运动引起的运动伪影,还可以在治疗之前验证运动中肿瘤的平均位置、轨迹和形状变化等信息<sup>[9]</sup>。本研究目的在于对比 4D-CT 与 4D-CBCT 两种成像技术针对运动目标的成像结果,为临床运动靶区的勾画以及门控治疗技术提供一些建议。

## 1 材料与方法

### 1.1 设备及参数

CIRS 公司的 QUASAR 模体(图 1A)是专门用

来模拟肺部呼吸运动的模体,针对不同的呼吸模式配备不同的插件,本研究采用编号为 500 - 3317 的 4D-CT 插件,插件总长 18 cm,直径 8 cm,内嵌有边长为 3 cm 的正方体(C3,静止体积为  $27.00 \text{ cm}^3$ ),直径为 2 cm (S2,静止体积为  $4.19 \text{ cm}^3$ ) 和 1 cm (S1,静止体积为  $0.52 \text{ cm}^3$ ) 的球体模拟不同大小肺部肿瘤,密度为  $1.41 \text{ g/cm}^3$ 。该模体配备有 QUASAR Programmable Respiratory Motion V3.3.8 软件,可调节呼吸频率和振幅,本研究中振幅设定为 5 mm、10 mm、20 mm 和 30 mm 四档;频率设定为 10 次/min、12 次/min、15 次/min 和 20 次/min 四档。

4D-CT 图像采集在飞利浦大孔径 CT (Philips Brilliance Big Bores CT, 美国) 上进行,参数设置为:管电压 120 kV,管电流 40 mA,扫描层厚 3 mm,重建层厚 3 mm,螺距根据呼吸频率设定 (pitch = 呼吸频率/120),扫描范围包括运动模块上下界,利用腹部压力传感器记录模体运动轨迹,记录呼吸信号和呼气末的时相。4D-CT 根据扫描期间的呼吸信号周期等时间间隔划分为 10 个时相,然后再重建出 10 个相位 (0% ~ 90%) 的图像,0% 代表吸气末时相,80% 代表呼气末时相,如图 1B 波形图所示。

4D-CBCT 图像采集运用医科达 Infinity™ 加速器 (Elekta linear accelerator, 瑞典) 机载 X 射线容积成像系统 5.0 容积影像成像系统进行采集。4D-CBCT 扫描参数设定为:150 kV,40 mA,脉冲长度 32 ms, S20 准直器, F0 滤线器,扫描角度  $360^\circ$ ,机架转

速 60°/min, 扫描时间 6 min, 共采集 1 980 帧图像, 图像重建分辨率选用专用中等分辨率 (4D-Med-Res) 算法, 重建层厚 3 mm。X 射线容积成像系统自动重建 10 个时相图像。

### 1.2 图像和数据处理方法

将 4D-CT 与 4D-CBCT 扫描的图像均传至 MIM (Version 6.9.4) 系统, 并对 C3、S2 和 S1 三个插件进行勾画。在 MIM 软件上, 对 4D-CT 和 4D-CBCT 10 个时相图像中 3 个特定模块进行自动阈值勾画, 4D-CT 和 4D-CBCT 图像自动勾画阈值分别为 220 HU, -330 HU [该阈值根据 4D-CT 或 4D-CBCT 扫描静止模体图像自动勾画体积与静止理论体积 ( $V_s$ ) 一

致时所得] 平滑指数设置为 5.0。自动勾画后再进行手动修正。

使用公式  $\Delta V_i = (V_i - V_s) / V_s \times 100\%$  计算各插件相对于静止体积的变化率, 式中  $V_i$  代表 4D-CT 和 4D-CBCT 图像中勾画的各时相各插件靶区体积;  $V_s$  代表静止状态下各插件靶区体积。插件 S1、S2、C3 静止时体积 ( $V_s$ ) 分别为 0.52 cm<sup>3</sup>、4.19 cm<sup>3</sup>、27.00 cm<sup>3</sup>。

### 1.3 统计方法

运用 SPSS 20.0 软件对 4D-CT 和 4D-CBCT 图像中 10 个时相间各特定插件体积变化差异行 Friedman 秩和检验,  $P < 0.05$  为差异有统计学意义。

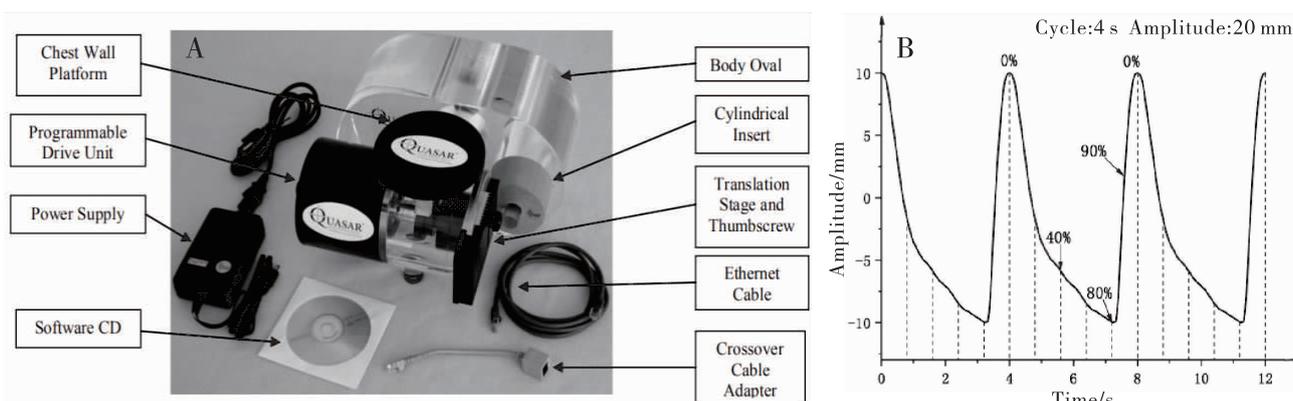


图 1 QUASAR 呼吸运动模体、组件及呼吸运动波形图

Figure 1. QUASAR Respiratory Motion Phantom, Its Components and Respiration Waveform

A. QUASAR Respiratory Motion Phantom; B. Respiration waveform and phase division.

## 2 结果

### 2.1 16 种呼吸模式下 4D-CT 与 4D-CBCT 扫描结果对比

16 种呼吸模式下 4D-CT 与 4D-CBCT 扫描的到 S1、S2 和 C3 插件十个时相中绝对体积如图 2 所示。经统计学分析得知, 16 种呼吸模式下, 4D-CT 扫描结果 S1、S2 和 C3 三种插件十个时相体积变化率平均值分别为 62.42% ± 47.64%、35.95% ± 32.02% 和 32.71% ± 20.31%, 而 4D-CBCT 扫描结果分别为 48.59% ± 26.76%、8.80% ± 11.43% 和 18.19% ± 9.05%。由表 1 和图 2 中 A、B、C 图可见, 4D-CT 扫描结果中 S1、S2 和 C3 三种插件在 40% ~ 70% 时相体积变化较其它时相平稳, 且 40% ~ 70% 时相体积变化率平均值分别降至 37.02% ± 14.12%, 17.29% ± 7.58% 和 23.43% ± 11.1%; 图 2 中 D、

E、F 图分别显示 S1、S2 和 C3 三种插件 4D-CBCT 扫描结果, 0% ~ 90% 十个时相三种插件体积变化差异有统计学意义 ( $P$  均小于 0.001)。4D-CT 扫描结果中 S1、S2 和 C3 插件体积变化率范围分别为 1.15% ~ 279.77%、5.05% ~ 148.99% 和 10.90% ~ 104.26%; 而 4D-CBCT 扫描结果分别为 3.05% ~ 159.54%、1.52% ~ 81.19% 和 1.78% ~ 65.59%。

### 2.2 S1、S2 与 C3 三种插件不同扫描模式下 40% ~ 70% 时相体积变化统计学比较

16 种呼吸模式下, 4D-CT 与 4D-CBCT 扫描得到 S1、S2 与 C3 三种插件 40% ~ 70% 时相绝对体积变化如表 2 所示。统计学结果显示, 在两种扫描模式下 S1、S2 和 C3 三种插件, 在 40% ~ 70% 四个时相间其绝对体积变化差异均无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。

表 1 4D-CT 扫描 10 个时相 S1、S2 与 C3 插件体积变化率 (平均值 ± 标准差, %)

Table 1. Volume Change Rates of S1, S2 and C3 Inserts in 10 Phases of 4D-CT Scan ( $\bar{x} \pm s, \%$ )

Variable	S1	S2	C3
0%	94.89 ± 67.02	62.06 ± 46.62	45.28 ± 25.89
10%	78.67 ± 43.68	41.02 ± 24.26	35.17 ± 15.51
20%	85.71 ± 54.65	49.43 ± 33.55	37.57 ± 20.46
30%	61.85 ± 33.87	29.50 ± 20.74	28.48 ± 14.19
40%	40.50 ± 15.03	20.03 ± 10.04	22.11 ± 6.04
50%	39.90 ± 11.18	17.39 ± 6.43	21.63 ± 5.17
60%	34.66 ± 14.93	16.34 ± 7.11	22.59 ± 8.44
70%	32.99 ± 13.43	15.39 ± 4.97	27.38 ± 18.38
80%	45.39 ± 20.85	35.90 ± 23.19	34.43 ± 19.41
90%	109.56 ± 63.00	72.44 ± 38.90	52.42 ± 27.96

4D-CT: Four-dimensional computed tomography.

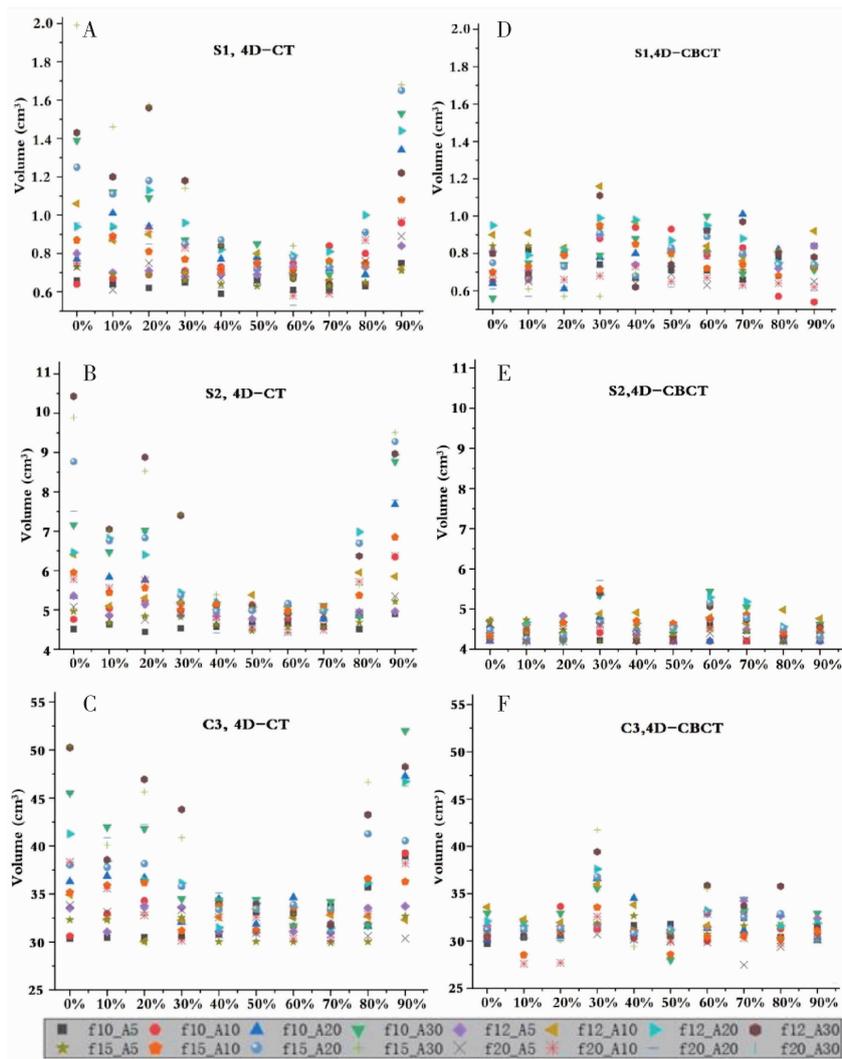


图 2 16 种呼吸模式下 4D-CT 与 4D-CBCT 扫描 QUASAR 模体得到的 S1、S2 与 C3 插件在 10 个时相下的体积分布情况  
Figure 2. Volume Distribution of S1, S2 and C3 10 Inserts in 10 Phases of 4D - CT and 4D - CBCT Scans of a QUASAR Phantom under 16 Breathing Modes

Panel A, B and C show volumes of S1, S2 and C3 inserts in 4D-CT scan; Panel D, E and F show volumes of S1, S2 and C3 inserts in 4D-CBCT scan. f: Frequency; A: Amplitude.

表 2 4D-CT 与 4D-CBCT 扫描结果 40%~70% 时相 S1、S2 与 C3 插件绝对体积统计学对比 (cm<sup>3</sup>)Table 2. Absolute Volumes of S1, S2 and C3 Inserts in 40% ~70% Phases of 4D-CT and 4D-CBCT Scans (cm<sup>3</sup>)

Variable	S1		S2		C3	
	4D-CT	4D-CBCT	4D-CT	4D-CBCT	4D-CT	4D-CBCT
40%	0.73 ± 0.08	0.80 ± 0.14	4.94 ± 0.27	4.42 ± 0.21	32.80 ± 1.60	31.22 ± 1.42
50%	0.73 ± 0.06	0.76 ± 0.10	4.89 ± 0.27	4.37 ± 0.17	32.69 ± 1.35	30.52 ± 1.03
60%	0.70 ± 0.08	0.82 ± 0.11	4.82 ± 0.24	4.76 ± 0.39	33.12 ± 2.44	32.20 ± 1.80
70%	0.69 ± 0.08	0.77 ± 0.12	4.83 ± 0.22	4.59 ± 0.35	34.51 ± 5.28	32.09 ± 1.85
$\chi^2$	2.263	6.076	7.069	4.201	1.964	5.878
<i>P</i>	0.520	0.108	0.070	0.330	0.581	0.118

4D-CT: Four-dimensional computed tomography; 4D-CBCT: Four-dimensional cone beam computed tomography.

### 3 讨论

呼吸运动一直都是影响肺部肿瘤放射治疗精确性的主要因素,如何精确地定位靶区的形态、捕捉其运动轨迹是其中的关键环节<sup>[10]</sup>。随着科学技术的进步,多种呼吸运动管理技术包括快速 CT 扫描技术、深吸气屏气技术<sup>[11-12]</sup>、主动呼吸控制技术<sup>[13-15]</sup>、呼吸门控技术<sup>[16-17]</sup>、实时追踪技术<sup>[18-21]</sup>以及慢速 CT 扫描技术<sup>[22]</sup>等均得到了不同程度的发展,然而上述多种技术均存在不同程度的弊端,不能在临床上得到广泛的推广。四维 CT 扫描技术的出现能够较好地解决呼吸运动问题<sup>[23-25]</sup>。4D-CT 与 4D-CBCT 两者在扫描成像原理基础以及重建方法等多方面均存在差异,本研究针对这两种扫描技术在运动模体的成像结果方面进行一些临床研究。

本研究结果显示,在 16 种呼吸模式下,4D-CT 与 4D-CBCT 扫描得到的运动模体插件 S1、S2 和 C3 各时相绝对体积均有不同程度的增加。4D-CT 扫描结果中 S1、S2 和 C3 插件体积变化率最大值分别为 279.77%、148.99% 和 104.26%;而 4D-CBCT 扫描结果分别为 159.54%、81.19% 和 65.59%。两种扫描方式得到结果差异较大,可能是由于获取图像方式差异造成<sup>[8-9]</sup>,4D-CT 是扇形束扫描模式,根据外部呼吸运动信号等时间间隔对数据进行相位拆分,再重建各个时相图像;而 4D-CBCT 是容积扫描模式,根据 2D 投影数据中的膈肌位置对数据进行相位拆分,分成 8~10 个时相,然后对拆分后的图像分别进行重建,形成三维 CBCT 图像。由图 2 可见,16 种扫描模式下 4D-CT 扫描结果中 40%~70% 时相体积变化明显降低,同时表 2 中结果显示,此四个时相之间的体积变化差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),故建议将此段时相获取的图像作为运动靶区的勾画

时相或作为门控技术治疗时相,此时运动靶区体积与真实体积最为接近,减少了正常组织不必要的勾画,危及器官(organs at risk, OAR)辐照剂量更低;与 4D-CT 相比,4D-CBCT 扫描得到的结果无明显规律可寻,S1、S2 和 C3 三种插件 40%~70% 时相体积变化差异无统计学意义( $P > 0.05$ ),此段时相获取的图像可回传至计划系统进行靶区勾画或者作为治疗前 CBCT 配准时的参考图像。

本研究结果显示 1 cm 的靶区体积变化率明显大于直径 2 cm 和边长 3 cm 的靶区。可能是直径 1 cm 的小球部分容积效应更明显,扫描层厚为 3 mm 对其有较大影响<sup>[26]</sup>。而边长 3 cm 的正方体体积变化率大于直径 2 cm 的小球,可能由靶区形状的区别导致,球体两端横截面积较小,容易在快速螺旋 CT 扫描时漏掉。本研究的不足之处是 QUASAR 运动模体只能模拟 Y 轴(头脚)方向运动,不能模拟三维方向的运动及旋转,此外未考虑不规则呼吸运动。

总之,呼吸运动会影响 4D-CT 和 4D-CBCT 的成像结果,针对运动模体,4D-CT 和 4D-CBCT 扫描的图像结果体积均偏大,4D-CT 中 40%~70% 的呼吸时相体积与真实体积更接近,建议在肿瘤体积勾画与呼吸门控治疗时使用 40%~70% 时相。

**作者声明:** 本文全部作者对于研究和撰写的论文出现的不端行为承担相应责任;并承诺论文中涉及的原始图片、数据资料等已按照有关规定保存,可接受核查。

**学术不端:** 本文在初审、返修及出版前均通过中国知网(CNKI)科技期刊学术不端文献检测系统的学术不端检测。

**同行评议:** 经同行专家双盲外审,达到刊发要求。

**利益冲突:**所有作者均声明不存在利益冲突。

**文章版权:**本文出版前已与全体作者签署了论文授权书等协议。

#### [参考文献]

- [1] Rodríguez-Romero R, Castro-Tejero P. The influence of respiratory motion on CT image volume definition[J]. *Med Phys*,2014,41(4):041701.
- [2] Li F, Li J, Xing J, *et al.* Analysis of the advantage of individual PTVs defined on axial 3D CT and 4D CT images for liver cancer[J]. *J Appl Clin Med Phys*,2012,13(6):62-71.
- [3] 张颖,王艳强,肖志清,等.应用4DCT技术确定食管癌放疗靶区及其剂量学研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*,2014,23(4):348-351.
- [4] Ahmed N, Venkataraman S, Johnson K, *et al.* Does motion assessment with 4-dimensional computed tomographic imaging for non-small cell lung cancer radiotherapy improve target volume coverage?[J]. *Clin Med Insights Oncol*,2017,11:1179554917698461.
- [5] 张利伟,娄志霞,林琳,等.4D-定位CT在胸腹部肿瘤精确放疗中的应用[J]. *影像研究与医学应用*,2019,3(12):12-15.
- [6] Yan Y, Lu Z, Liu Z, *et al.* Dosimetric comparison between three- and four-dimensional computerised tomography radiotherapy for breast cancer[J]. *Oncol Lett*,2019,18(2):1800-1814.
- [7] 吴文婧,李毅,孙玄子,等.基于4DCT和形变配准技术评估呼吸运动对肺癌立体定向放射治疗过程中剂量的影响[J]. *中国医学物理学杂志*,2019,36(12):1406-1410.
- [8] Pan T, Lee TY, Rietzel E, *et al.* 4D-CT imaging of a volume influenced by respiratory motion on multi-slice CT[J]. *Med Phys*,2004,31(2):333-340.
- [9] Sonke JJ, Zijp L, Remeijer P, *et al.* Respiratory correlated cone beam CT[J]. *Med Phys*,2005,32(4):1176-1186.
- [10] Korreman SS. Motion in radiotherapy: Photon therapy [J]. *Phys Med Biol*,2012,57(23):R161-91.
- [11] Rosenzweig KE, Hanley J, Mah D, *et al.* The deep inspiration breath-hold technique in the treatment of inoperable non-small-cell lung cancer[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*,2000,48(1):81-87.
- [12] Hanley J, Debois MM, Mah D, *et al.* Deep inspiration breath—hold technique for lung tumor: The potential value of target immobilization and reduced lung density in dose escalation[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*,1999,45(3):603-611.
- [13] Wang X, Zhong R, Bai S, *et al.* Lung tumor reproducibility with active breath control (ABC) in image-guided radiotherapy based on cone-beam computed tomography with two registration methods [J]. *Radiother Oncol*,2011,99(2):148-154.
- [14] Gagel B, Demirel C, Kientopf A, *et al.* Active breathing control (ABC): Determination and reduction of breathing-induced organ motion in the chest[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*,2007,67(3):742-749.
- [15] Wong JW, Sharpe MB, Jaffray DA, *et al.* The use of active breathing control (ABC) to reduce margin for breathing motion[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*,1999,44(4):911-919.
- [16] Jang SS, Huh GJ, Park SY, *et al.* The impact of respiratory gating on lung dosimetry in stereotactic body radiotherapy for lung cancer [J]. *Phys Med*,2014,30(6):682-689.
- [17] 刘穆平,初磊,邓煜,等.呼吸门控技术以及非均整模式应用于早期非小细胞肺癌小病灶立体定向放疗的优势[J]. *肿瘤预防与治疗*,2019,32(8):707-710.
- [18] Katoh N, Onishi H, Uchinami Y, *et al.* Real-time tumor-tracking radiotherapy and general stereotactic body radiotherapy for adrenal metastasis in patients with oligometastasis[J]. *Technol Cancer Res Treat*,2018,17:1533033818809983.
- [19] Menten MJ, Guckenberger M, Herrmann C, *et al.* Comparison of a multileaf collimator tracking system and a robotic treatment couch tracking system for organ motion compensation during radiotherapy [J]. *Med Phys*,2012,39(11):7032-7041.
- [20] Gu C, Li R, Jiang SB, *et al.* A multi-radar wireless system for respiratory gating and accurate tumor tracking in lung cancer radiotherapy[J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*,2011,2011(2):417-420.
- [21] 伍锐,陈超敏.肿瘤靶区呼吸运动实时反向跟踪系统在精确放疗中的应用研究[J]. *南方医科大学学报*,2010,30(1):100-102.
- [22] Lagerwaard FJ, Van Sornsen de Koste JR, Nijssen-Visser MR, *et al.* Multiple "slow" CT scans for incorporating lung tumor mobility in radiotherapy planning[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*,2001,51(4):932-937.
- [23] Rehailia-Blanchard A, De Oliveira Duarte S, Baury M, *et al.* Use of 4D-CT: Main technical aspects and clinical benefits[J]. *Cancer Radiother*,2019,23(4):334-341.
- [24] Coolens C, Bracken J, Driscoll B, *et al.* Dynamic volume vs respiratory correlated 4DCT for motion assessment in radiation therapy simulation[J]. *Med Phys*,2012,39(5):2669-2681.
- [25] Rietzel E, Liu AK, Chen GT, *et al.* Maximum-intensity volumes for fast contouring of lung tumors including respiratory motion in 4DCT planning[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*,2008,71(4):1245-1252.
- [26] Ding C, Huang L, Papiez L, *et al.* Tumor alignment between 4DCT and 4D cone beam CT for irregular respiratory patient-A phantom study [C]. Munich (DE): World congress on medical physics and biomedical engineering; Radiation oncology, 2009: 515-518.