



· 论 著 ·

# 基于患者出射EPID剂量验证的在体调强放疗质控技术研究

吴志强, 陈元华, 王佳舟, 胡伟刚

复旦大学附属肿瘤医院放疗科, 复旦大学上海医学院肿瘤学系, 上海 200032

**【摘要】** 背景与目的: 调强放疗(intensity-modulated radiation therapy, IMRT)中剂量投照失误可导致严重后果, 而目前常用的治疗前计划验证方法并不能反映患者真实投照剂量。实现一种评估患者在体剂量执行准确度的方法, 能够在分次治疗中及时发现较大剂量错误, 避免发生患者投照剂量过高或不足。**方法:** 复旦大学附属肿瘤医院收治的患者首次实施治疗前行锥形束计算机断层成像(cone beam computed tomography, CBCT)扫描, 与定位CT图像进行配准保证治疗体位与模拟定位时一致, 实时治疗中使用电子射野影像装置(electronic portal imaging device, EPID)获取患者出射剂量影像, 并把首次出射EPID影像作为剩余分次治疗的基准值, 后续分次实时治疗野结束后快速将其出射EPID影像与对应基准影像进行 $\gamma$ 分析比较, 以验证治疗计划是否准确执行于患者身上。设计模体实验对治疗部位错误和摆位误差情况进行分析, 来评估本方法识别放疗差错的准确性。**结果:** 本方法可有效地识别出IMRT放疗中患者治疗部位错误和非平行于射野角度方向的摆位误差, 但对平行于射野角度方向的摆位误差并不敏感, 30例鼻咽癌患者临床应用结果中能够直观显示分次治疗间摆位重复性情况。**结论:** 基于EPID实现的一种在体剂量验证方法能够对调强放疗中患者实时剂量的准确性进行评估, 在单个治疗野结束后可快速检测出较大治疗错误。

**【关键词】** 在体剂量验证; 电子射野影像装置; 治疗部位错误; 摆位误差

DOI: 10.19401/j.cnki.1007-3639.2020.09.008

中图分类号: R730.55 文献标志码: A 文章编号: 1007-3639(2020)09-0689-05

**A study of *in vivo* dosimetry verification based on EPID transit dose** WU Zhiqiang, CHEN Yuanhua, WANG Jiazhou, HU Weigang (Department of Radiation Oncology, Fudan University Shanghai Cancer Center; Department of Oncology, Shanghai Medical College, Fudan University, Shanghai 200032, China)

Correspondence to: HU Weigang E-mail: jackhuwg@gmail.com

**【Abstract】** **Background and purpose:** Mistreatment in intensity-modulated radiation therapy (IMRT) may cause major harms. However, pre-treatment plan verification approaches are not able to detect on-treatment errors. The aim of this study was to develop an *in vivo* dose verification method to quickly identify gross errors during radiation delivery and prevent larger or smaller delivered dose from adversely affecting patient. **Methods:** For each patient who was treated in Fudan University Shanghai Cancer Center, a cone beam computed tomography (CBCT) scan was acquired before the start of the first fraction treatment. The CBCT scans were implemented image registration with the planning CT. The electronic portal imaging device (EPID) images were captured during the first treatment delivery and used as the baseline measurement for the rest of the treatment. Dose comparisons were made using gamma analysis to verify whether the dose delivered to the patient as planned. Tests were developed to simulate incorrect site and setup error to evaluate the accuracy of this method. **Results:** This study showed that our method successfully detected simulated gross errors due to incorrect site and non-parallel beam direction shifts, however, it was insensitive to the translational shifts at the parallel beam direction. The inter-fraction setup was easily observed in clinical application for 30 nasopharyngeal carcinoma patients. **Conclusion:** Real-time error detection method for online IMRT treatment has been developed, and could detect gross errors immediately after an individual field is delivered.

**【Key words】** *In vivo* dosimetry; Electronic portal imaging device; Incorrect site; Setup error

放疗已经进入高精度放疗时代, 治疗技术的日益复杂易引发治疗差错事故<sup>[1]</sup>, 新技术的应

用往往还会带来新的错误类型发生<sup>[2]</sup>, 发生任何一种错误都会导致患者实际受照剂量与计划剂

基金项目: 国家自然科学基金(11675042)。

通信作者: 胡伟刚 E-mail: jackhuwg@gmail.com

量不同, 调强放疗 (intensity-modulated radiation therapy, IMRT) 剂量失误可导致患者正常功能减退、丧失甚至致命的后果。治疗部位错误和摆位误差是现阶段较为常见的两种错误类型<sup>[3]</sup>。治疗部位错误是由治疗计划系统生成数字重建透视图时错误选择等中心点进行患者移床<sup>[4]</sup>, CT模拟定位坐标系统错误<sup>[5]</sup>, 技术员错误对患者体表标记摆位 (二个部位以上易出现) 等原因引起的。摆位误差主要与患者不自主运动 (呼吸、吞咽等)、肿瘤形状大小改变、体型变化 (消瘦等) 和技术员操作水平等有关。

如何降低放疗过程中各种因素造成的错误, 保证患者放疗质量, 成为当前研究的热点。因此, 已有研究提出使用如半导体探测器、热释光剂量仪等患者在体剂量验证方法<sup>[6-11]</sup>, 其中基于电子射野影像装置 (electronic portal imaging device, EPID) 的方法具有不增加患者治疗时间和额外剂量, 以及大多数加速器都已配备等优势<sup>[12-15]</sup>。本研究旨在实现一种简单快速的基于EPID在体剂量验证方法, 并设计模体实验来评估该方法识别放疗差错的敏感性, 探讨其快速发现IMRT临床治疗中可能出现的较大错误的可行性。

## 1 材料和方法

### 1.1 获取影像设备

瓦里安加速器自带的非晶硅EPID (Varian Portal Vision, aS1000) 系统由图像探测单元、图像获取单元及专用工作站组成, 其中图像探测单元的有效探测像素点为1 024×768, 探测点间距为0.39 mm, 有效探测面积为40 cm×30 cm。EPID放置在源到探测器的距离 (source to image distance, SID) 为140~150 cm的位置获取射线穿透患者或模体后的二维剂量影像。

### 1.2 EPID影像剂量校准和刻度

EPID实时采集的治疗位患者或模体透射影像经过合适的刻度可转换为剂量通量图, 从而反映治疗计划照射患者或模体时的透射剂量分布。首先对EPID的剂量学采用本底校正和泛野校正, 并对其剂量线性、剂量稳定性进行验证<sup>[16-17]</sup>, 最

后建立EPID影像-剂量刻度模型。

### 1.3 放疗差错识别

临床治疗使用的光子线能量为6 MV, 影像采集是使用Eclipse中的Portal dosimetry (V10.0) 模式, 把首次射野出射EPID影像作为剩余分次治疗的基准值, 后续分次疗程实时治疗野结束后与对应基准影像进行 $\gamma$ 分析比较, 以验证治疗计划是否准确执行于患者或模体上。本文使用MATLAB编程实现2D  $\gamma$ 分析法应用软件对Eclipse导出的出射EPID影像数据进行 $\gamma$ 通过率计算。

#### 1.3.1 治疗部位错误

患者胸腹部放疗易出现标记点移床错误, 选取肺癌和直肠癌IMRT治疗计划、胸部仿真人模体和腹部仿真人模体来实验这种错误情况。在肺癌IMRT计划照射胸部模体分次治疗中的某次另加1次错误照射腹部模体, 在直肠癌IMRT计划照射腹部模体分次治疗中的某次另加1次错误照射胸部模体, 分别计算部位正确治疗及部位错误治疗情况下的 $\gamma$ 通过率。

#### 1.3.2 摆位误差分析

摆位误差的存在使患者的各器官实际照射剂量与计划设计剂量存在差异, 特别是头颈部肿瘤IMRT放疗对摆位误差尤其敏感, 选取头颈部仿真人模体来分析摆位误差情况。对模体按激光线标记摆位后, 分别在Lateral (左右)、Vertical (背腹)、Longitudinal (头脚) 方向上依次手动移床 $\pm 3$  mm、 $\pm 5$  mm、 $\pm 8$  mm、 $\pm 10$  mm, 获得等中心点治疗和三维6个方向上引入摆位误差后治疗的出射EPID影像, 计算所有摆位误差条件下的 $\gamma$ 通过率。

### 1.4 患者临床应用

所有参与此项研究的患者首次治疗前摆位须由医师和物理师在场确认治疗体位和模拟定位时一致, 行锥形束计算机断层成像 (cone beam computed tomography, CBCT) 扫描与计划CT图像配准来检查患者的解剖结构在计划设计期间是否发生变化, 并观察CBCT图像上大体肿瘤区、临床靶区和计划靶区对肿瘤轮廓的包绕, 确认后治疗患者获取出射EPID影像。患者在体剂量验证临床实现流程见图1。

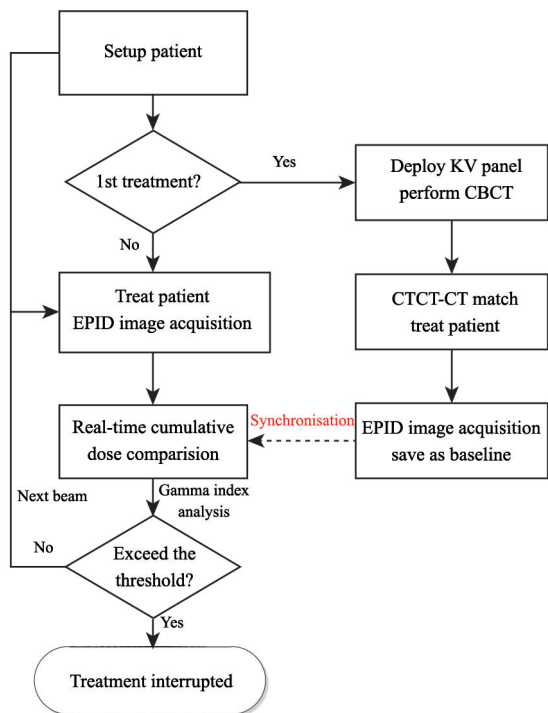


图 1 在体剂量验证工作流程

Fig. 1 The workflow of *in vivo* dosimetry verification

## 2 结 果

### 2.1 在体剂量验证识别放疗错误分析

#### 2.1.1 治疗部位错误情况

肺癌IMRT计划正确治疗情况 $\gamma$ 通过率均值为99.8%，部位错误治疗情况 $\gamma$ 通过率均值为36.9%，直肠癌IMRT计划正确治疗情况 $\gamma$ 通过率均值为99.9%，部位错误治疗情况 $\gamma$ 通过率均值为40.7%，设置合理阈值可有效区分出治疗部位错误情况。表1所示为直肠癌IMRT计划投照腹部模体第3分次治疗（参考基准为腹部首次治疗出射EPID影像）另加1次错误治疗胸部模体，得到的部位正确治疗和部位错误治疗的 $\gamma$ 分析结果。

#### 2.1.2 摆位误差分析

鼻咽癌IMRT计划对头颈部仿真人模体在等中心点处治疗获得的出射EPID影像分别与三维6个方向上引入摆位误差后治疗获得的影像进行 $\gamma$

表 1 部位错误治疗的 $\gamma$ 分析结果

Tab. 1 Results of  $\gamma$ -comparison for incorrect site

Classification (fraction)	$\gamma$ pass rate (3%/3 mm)/%								
	70°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	265°	290°
1st vs fraction ( $n \geq 2$ )	99.91	99.93	99.79	99.54	100.00	99.99	99.81	100.00	100.00
1st vs wrong fraction ( $n \geq 2$ )	51.33	32.88	16.01	45.29	56.29	48.39	27.89	37.03	51.45

分析比较，图2为在其中Vertical摆位误差方向上不同射野角度 $\gamma$ 通过率的变化趋势，结果显示，能够检测出来非平行射野角度方向的摆位误差，但对平行于射野角度方向的摆位差异并不敏感。表2所示为射野90度时引入摆位误差的 $\gamma$ 分析结果值。

### 2.2 患者临床应用

初步应用的30例鼻咽癌患者剂量验证的射野平均 $\gamma$ 通过率为98.2% (3%/3 mm)，构造盒须图以提供治疗分次射野 $\gamma$ 通过率的位置和分散的参考，直观分次治疗间患者摆位重复性。随着疗程的进行，患者1的治疗总体不确定性有增大趋势（图3A）。患者2放疗第16次出现射野 $\gamma$ 通过率偏低情况，在第17次治疗前物理师检查整个剂量验证流程，验证摆位射野源皮距，行CBCT扫描并

由医师确认肿瘤轮廓（内边界）与计划CT病灶轮廓吻合，最终治疗野 $\gamma$ 通过率较好（图3B）。图3C为患者2疗程第16和17分次的部分角度射野出射剂量影像与基准影像的剂量差异值图对比。

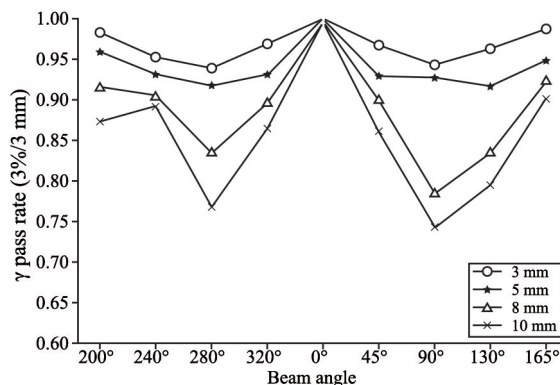
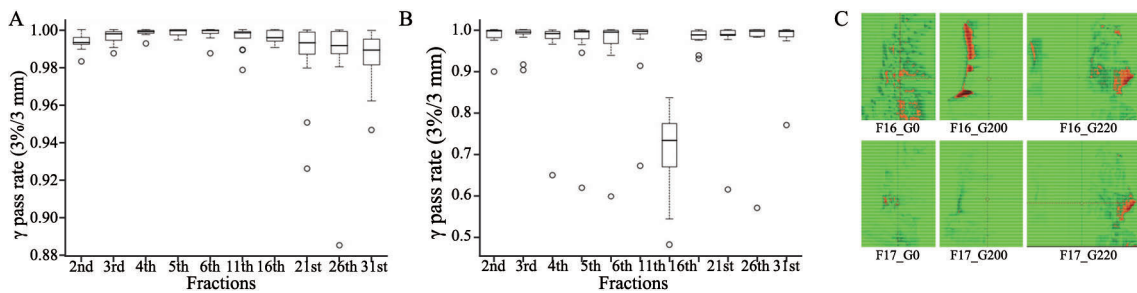


图 2 Vertical摆位误差方向上不同射野角度 $\gamma$ 通过率的变化

Fig. 2 Variations in beam angle  $\gamma$  pass rate with vertical direction shifts

表2 摆位误差的 $\gamma$ 分析结果Tab. 2 Results of  $\gamma$ -comparison for setup error

Shift D/mm	$\gamma$ pass rate (3%/3 mm)/%						$\gamma$ Pass rate (2%/2 mm)/%					
	Vrt-up	Vrt-down	Lat-left	Lat-right	Lng-out	Lng-in	Vrt-up	Vrt-down	Lat-left	Lat-right	Lng-out	Lng-in
3	94.26	100.00	100.00	100.00	98.74	98.42	81.91	99.93	100.00	100.00	85.69	92.23
5	92.78	93.13	100.00	100.00	91.98	86.66	78.74	85.32	100.00	100.00	77.38	71.07
8	78.59	85.39	99.90	99.73	75.71	74.83	65.29	72.14	100.00	100.00	63.21	61.35
10	74.40	81.62	99.82	99.69	73.78	71.78	61.77	66.95	99.98	99.88	62.03	60.62

图3 患者1射野 $\gamma$ 通过率盒须图(A)、患者2射野 $\gamma$ 通过率盒须图(B)及第16、17分次治疗的射野 $\gamma$ 值图对比(C)Fig. 3 Box plot of the distributions of  $\gamma$  values (A), box plot of the distributions of  $\gamma$  values (B), and the comparison of  $\gamma$  maps between fraction 16 and 17 (C)

### 3 讨 论

本文实现的基于EPID二维出射剂量验证的患者在体实时质控方法可以有效地检测出较大计划照射剂量误差, 将分次治疗射野出射剂量与首次基准剂量进行比较分析, 直接反映实际照射到患者身上剂量的准确性, 并设置可以接受的误差阈值, 进而发现有可能出现的高剂量误差, 避免发生可能的严重放疗事故。

EPID在使用之前需进行刻度, 确保其像素具有相似的剂量响应。通过仿真人体实验表明本方法可有效检测出治疗部位错误情况, 且能够检测到非平行于射野方向上的较大摆位误差, 但对平行于射野方向的摆位误差不敏感, 可通过分析射野角度及 $\gamma$ 值来判断摆位误差最有可能是来自哪个方向。治疗计划是在放疗前采集的静态CT图像上设计的, 在整个放疗过程中, 尽管采用了热塑膜等固定患者, 但是患者体态外形、肿瘤大小等的变化使得IMRT照射剂量的准确性受到限制。特别是鼻咽癌患者在脊髓、脑干等周围的剂量梯度陡峭区域, 受摆位误差的影响较大, 即使

是很小的摆位误差也可能造成靶区剂量的不足和危及器官受照过量, 从而导致肿瘤局部复发、放疗并发症增加。30例鼻咽癌患者临床应用结果显示本方法发现的患者受照剂量误差, 分析患者2第16分次治疗出现的结果原因可能有: 患者体质量减轻, 与面罩贴合性变差, 技术员摆位不准确; 治疗中患者因严重口腔黏膜炎吞咽咳嗽引起面罩松动, 加之颈部出现放射性皮炎与面罩接触引起疼痛, 而发生颈部较大移动。下一步将在现有的基础上进行更多病例临床应用的相关研究。本方法利用放疗过程中采集到的出射EPID剂量影像信息来指导当次和剩余分次治疗, 能够直接为医师自适应放疗决策提供参考, 减少了患者整个疗程中的CBCT位置验证扫描次数, 以及不必要的重复定位CT扫描, 从而降低患者的额外照射剂量。

综上所述, 本研究方法可对IMRT治疗患者进行实时剂量评估, 能够在单个治疗野结束后快速检测出较大治疗错误。

#### [参 考 文 献]

- [1] BISSONNETTE J P, MEDLAM G. Trend analysis of radiation

- therapy incidents over seven years [ J ] . Radiother Oncol, 2010, 96(1): 139-144.
- [ 2 ] AMOLS H I. New technologies in radiation therapy: ensuring patient safety, radiation safety and regulatory issues in radiation oncology [ J ] . Health Phys, 2008, 95(5): 658-665.
- [ 3 ] FORD E C, GAUDETTE R, MYERS L, et al. Evaluation of safety in a radiation oncology setting using failure mode and effects analysis [ J ] . Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 74(3): 852-858.
- [ 4 ] FORD E C, SMITH K, HARRIS K, et al. Prevention of a wrong-location misadministration through the use of an intradepartmental incident learning system [ J ] . Med Phys, 2012, 39(11): 6968-6971.
- [ 5 ] BOJECHKO C, PHILLIPS M, KALET A, et al. A quantification of the effectiveness of EPID dosimetry and software - based plan verification systems in detecting incidents in radiotherapy [ J ] . Med Phys, 2015, 42(9): 5363-5369.
- [ 6 ] MANS A, WENDLING M, MCDERMOTT L N, et al. Catching errors with *in vivo* EPID dosimetry [ J ] . Med Phys, 2010, 37(6): 2638-2644.
- [ 7 ] BOJECHKO C, FORD E C. Quantifying the performance of *in vivo* portal dosimetry in detecting four types of treatment parameter variations [ J ] . Med Phys, 2015, 42(12): 6912-6918.
- [ 8 ] WENDLING M, MCDERMOTT L N, MANS A, et al. A simple backprojection algorithm for 3D *in vivo* EPID dosimetry of IMRT treatments [ J ] . Med Phys, 2009, 36(7): 3310-3321.
- [ 9 ] EATON D J, BEST B, BREW-GRAVES C, et al. *In vivo* dosimetry for single-fraction targeted intraoperative radiotherapy (TARGIT) for breast cancer [ J ] . Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 82(5): e819-e824.
- [ 10 ] WOOTTON L, KUDCHADKER R, LEE A, et al. Real-time *in vivo* rectal wall dosimetry using plastic scintillation detectors for patients with prostate cancer [ J ] . Phys Med Biol, 2014, 59(3): 647-660.
- [ 11 ] QI Z Y, DENG X W, HUANG S M, et al. Real-time *in vivo* dosimetry with MOSFET detectors in serial tomotherapy for head and neck cancer patients [ J ] . Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 80(5): 1581-1588.
- [ 12 ] CILLA S, AZARIO L, GRECO F, et al. An *in vivo* dosimetry procedure for Elekta step and shoot IMRT [ J ] . Med Phys, 2014, 30(4): 419-426.
- [ 13 ] LIN M H, LI J, WANG L, et al. 4D patient dose reconstruction using online measured EPID cine images for lung SBRT treatment validation [ J ] . Med Phys, 2012, 39(10): 5949-5958.
- [ 14 ] ROZENDAAL R A, MIJNHEER B J, HAMMING-VRIEZE O, et al. Impact of daily anatomical changes on EPID-based *in vivo* dosimetry of VMAT treatments of head-and-neck cancer [ J ] . Radiother Oncol, 2015, 116(1): 70-74.
- [ 15 ] VAN ZIJTVELD M, DIRKX M, BREUERS M, et al. Portal dose image prediction for *in vivo* treatment verification completely based on EPID measurements [ J ] . Med Phys, 2009, 36(3): 946-952.
- [ 16 ] DESHPANDE S, BLAKE S J, XING A, et al. A simple model for transit dosimetry based on a water equivalent EPID [ J ] . Med Phys, 2018, 45(3): 1266-1275.
- [ 17 ] VAN UYTVEN E, VAN BEEK T, MCCOWAN P M, et al. Validation of a method for *in vivo* 3D dose reconstruction for IMRT and VMAT treatments using on - treatment EPID images and a model - based forward - calculation algorithm [ J ] . Med Phys, 2015, 42(12): 6945-6954.

( 收稿日期: 2020-04-28 修回日期: 2020-07-14 )