

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2024.07.003

医学放射物理

## 宫颈癌调强放射治疗三维在体剂量验证分析及最佳 $\gamma$ 通过率阈值

王佳浩, 谢洪玲, 陈玉凯, 唐秋

浙江大学医学院附属妇产科医院放疗科, 浙江 杭州 310000

**【摘要】目的:**对宫颈癌调强放射治疗(IMRT)进行基于电子射野影像装置的三维在体剂量验证(EIVD)分析,研究测量剂量与计划剂量间的差异,并通过剂量学敏感性探讨EIVD质控中最佳 $\gamma$ 通过率阈值。**方法:**回顾性分析浙江大学医学院附属妇产科医院行IMRT的45例宫颈癌患者,所有患者在治疗过程中行EIVD验证,获取测量剂量。采用2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3%的全局 $\gamma$ 指标进行通过率分析,采用剂量体积直方图参数评估测量剂量和计划剂量之间的差异。通过皮尔逊(Pearson)相关性分析研究 $\gamma$ 通过率与剂量学差异间的相关性,绘制受试者工作特征(ROC)曲线确定最佳 $\gamma$ 通过率阈值。**结果:**3类 $\gamma$ 指标2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3%的平均通过率分别为(83.07 $\pm$ 5.25)%、(91.69 $\pm$ 3.52)%、(95.02 $\pm$ 2.46)%;EIVD测量剂量与计划剂量在计划靶区(PTV)的平均剂量( $D_{mean}$ )偏差为2.43%( $P=0.016$ ),膀胱、直肠、小肠的 $D_{mean}$ 偏差分别为0.35%、0.46%、0.30%( $P>0.05$ )。Pearson分析显示3类 $\gamma$ 指标与PTV的剂量偏差相关性较强( $r>0.7$ ),与危及器官相关性较弱( $r<0.7$ );ROC分析显示2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3%最佳的 $\gamma$ 通过率阈值分别为79.06%、90.04%、94.19%。**结论:**EIVD能够有效保证宫颈癌IMRT过程中PTV剂量传递的精准性,利用 $\gamma$ 通过率阈值能够为下一步宫颈癌自适应IMRT提供一定的临床依据。

**【关键词】**宫颈癌;在体剂量验证;剂量学; $\gamma$ 通过率

**【中图分类号】**R737.33;R811.1

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)07-0803-05

## *In vivo* three-dimensional dose validation for intensity-modulated radiotherapy of cervical cancer and the optimal gamma passing rate threshold

WANG Jiahao, XIE Hongling, CHEN Yukai, TANG Qiu

Department of Radiation Oncology, Women's Hospital, School of Medicine, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China

**Abstract: Objective** To analyze the *in vivo* three-dimensional dose verification using electronic portal imaging device (EIVD) for intensity-modulated radiotherapy (IMRT) of cervical cancer for investigating the differences between the measured and planned doses, and explore the optimal threshold for gamma passing rate in EIVD quality control based on dosimetric sensitivity. **Methods** A retrospective analysis was conducted on a cohort of 45 patients with cervical cancer who underwent IMRT at Women's Hospital, School of Medicine, Zhejiang University. During the treatment, all patients underwent EIVD to obtain the measured doses. The passing rate was analyzed using global gamma criteria of 2 mm/2%, 2 mm/3%, and 3 mm/3%. Additionally, dose-volume histogram parameters were utilized to evaluate any differences between the measured and planned doses. Pearson correlation analysis was employed to investigate the relationship between the gamma passing rate and dosimetric differences. Furthermore, receiver operating characteristic (ROC) curve was generated to determine the optimal threshold for the gamma passing rate. **Results** The average gamma passing rates for the criteria of 2 mm/2%, 2 mm/3%, and 3 mm/3% were 83.07% $\pm$ 5.25%, 91.69% $\pm$ 3.52%, and 95.02% $\pm$ 2.46%, respectively. The  $D_{mean}$  deviation between EIVD measurement and planned dose in the planning target area was 2.43% ( $P=0.016$ ), while the  $D_{mean}$  deviations in the bladder, rectum, and small intestine were 0.35%, 0.46%, and 0.30%, respectively ( $P>0.05$ ). Pearson analysis revealed a strong correlation between the 3 gamma indexes and dosimetric differences in the PTV ( $r>0.7$ ), but a weak correlation with organs-at-risk ( $r<0.7$ ). ROC analysis indicated that the optimal gamma passing rate thresholds for the criteria of 2 mm/2%, 2 mm/3%, and 3 mm/3% were 79.06%, 90.04%, and 94.19%, respectively. **Conclusion** The implementation of EIVD can ensure the accuracy of dose delivery within the PTV during IMRT for cervical cancer. Moreover, establishing a gamma passing rate threshold provides a valuable clinical basis for subsequent adaptive IMRT for cervical cancer. **Keywords:** cervical cancer; *in vivo* dose validation; dosimetry; gamma passing rate

**【收稿日期】**2024-02-27

**【基金项目】**浙江省基础公益研究计划(ZCLTGY24H1602)

**【作者简介】**王佳浩, 硕士, 研究方向: 医学物理, E-mail: jiahao\_wang@zju.edu.cn

**【通信作者】**唐秋, 博士, 研究方向: 妇科恶性肿瘤的综合治疗, E-mail: qiutang@zju.edu.cn

## 前言

宫颈癌是最常见的恶性肿瘤之一,也是导致全球女性癌症死亡的第四大原因<sup>[1]</sup>。放疗在宫颈癌的治疗中起着至关重要的作用,随着精准调强放射治疗(IMRT)技术的不断进步,患者剂量的质量保证与质量控制已成为放疗过程中不可分割的一部分。针对患者IMRT的安全性考虑,指南建议应当制定合适的患者特性质控计划<sup>[2-4]</sup>。基于电子射野影像装置(Electronic Portal Imaging Device, EPID)的三维在体剂量验证(EPID-based *in-vivo* Dosimetry, EIVD)系统已被证明是实现可靠的患者特异性质量保证的有效工具,能够检测实际实施和计划剂量之间的差异<sup>[5-6]</sup>。 $\gamma$ 通过率与剂量体积参数则是EIVD常用的评价指标<sup>[7-8]</sup>。然而,两者间的相关性如何备受争议<sup>[9-10]</sup>。另外,由于现有测量设备的多样性和治疗部位的复杂性,确定合适的 $\gamma$ 通过率标准仍然是一项复杂的、充满挑战性的任务<sup>[11-12]</sup>。本研究回顾性分析宫颈癌患者IMRT实施过程中的EIVD验证数据,比较测量剂量与计划剂量的差异,探讨 $\gamma$ 通过率与剂量体积参数间的相关性,并通过剂量学敏感性确定最佳的 $\gamma$ 通过率阈值。

## 1 资料与方法

### 1.1 病例资料

回顾性分析收集2023年3月至9月于浙江大学医学院附属妇产科医院收治的45例宫颈癌患者临床资料。入组患者FIGO分期为IB~IVB期,组织学分级为G1~G3,患者平均年龄( $58.20 \pm 15.41$ )岁,所有患者依从性好,能顺利完成整个治疗过程,所有患者均知情同意。

### 1.2 患者定位及计划实施

患者采用仰卧位热塑膜固定,使用西门子公司的SOMATOM Conference大孔径CT模拟定位机获取5 mm层厚的计划CT图像,扫描范围为髂脊至坐骨结节。在计划CT图像上勾画肿瘤靶区与危及器官,处方剂量为4 500~5 040 cGy(180 cGy/次)。使用医科达Infinity直线加速器的6 MV FFF光子线能量在Monaco治疗计划系统(V6.0.)上设计7野均分的IMRT计划。经高年资临床医师与高年资物理师审核后,计划分别发送至加速器网络与EIVD系统(Master V1.0,瑞多思,中国)。

### 1.3 在体剂量验证

在实际治疗中,展开加速器机载的非晶硅EPID影像探测板,治疗射线透过患者,在EPID上进行能量

沉积,产生测量图像。EIVD系统会通过数据采集软件DAS自动获取每个射野的出束信息,重建射线在空气中穿过人体后的通量分布图,再用迭代算法,反推出穿过人体前的通量分布,输入到卷积算法引擎,结合患者计划CT图像,计算体内剂量分布,进行三维剂量验证。通过EIVD的测量计划与治疗计划进行 $\gamma$ 分析与剂量体积直方图(Dose-Volume Histogram, DVH)比较。

### 1.4 评价指标

在EIVD系统中采用全局分析方法计算分次放疗的 $\gamma$ 通过率,按照指南与文献推荐<sup>[13-14]</sup>,采用剂量阈值为10%的3类 $\gamma$ 指标(2 mm/2%、2 mm/3%和3 mm/3%)。采用DVH指标评估计划剂量与测量剂量的差异。计划靶区(PTV)的评估采用平均剂量( $D_{\text{mean}}$ )、百分体积接受的辐射剂量 $D_2$ 、 $D_{98}$ ;危及器官的评估包括:膀胱、直肠、小肠的 $D_{\text{mean}}$ 。根据ICRU 83号报告<sup>[15]</sup>的建议,PTV的剂量学指标绝对百分剂量差异小于3.5%视为临床可接受计划,否则视为临床不可接受计划。

### 1.5 统计学方法

采用SPSS 19.0软件进行统计学分析,应用Shapiro-Wilk方法检验数据正态性,符合正态分布的计量资料采用均数 $\pm$ 标准差表示,采用配对样本 $t$ 检验。采用皮尔逊(Pearson)相关性分析计算3类 $\gamma$ 指标与剂量学差异间的相关性。结合受试者工作特征(ROC)曲线与约登指数确定最佳 $\gamma$ 通过率阈值,并通过计算敏感性和特异性判断最佳 $\gamma$ 通过率阈值识别假阴性和假阳性情况的能力。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 $\gamma$ 通过率

对宫颈癌IMRT计划2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3%的 $\gamma$ 通过率进行统计分析。 $\gamma$ (2 mm/2%)的平均通过率为( $83.07 \pm 5.25$ )%, $\gamma$ (2 mm/3%)的平均通过率为( $91.69 \pm 3.52$ )%, $\gamma$ (3 mm/3%)的平均通过率为( $95.02 \pm 2.46$ )%,基于EIVD的3类 $\gamma$ 指标分布如图1所示。

### 2.2 测量剂量与计划剂量的差异

在EIVD系统对验证数据进行统计分析,测量剂量与计划剂量在PTV与危及器官的剂量学差异见表1。PTV测量剂量与计划设计数据相比, $D_{\text{mean}}$ 减少2.43%, $D_2$ 增加2.45%, $D_{98}$ 减少2.92%;膀胱、直肠、小肠的 $D_{\text{mean}}$ 偏差分别为0.35%、0.46%、0.30%。在3类 $\gamma$ 标准下患者经EIVD验证的剂量差异如图2所示。

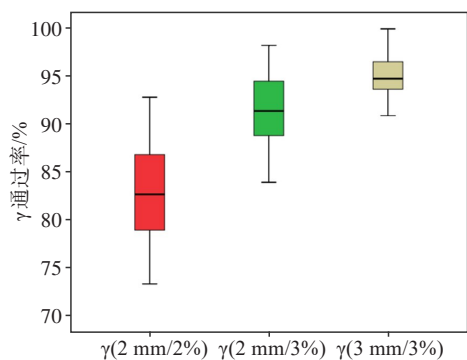


图1 基于EIVD验证的3类 $\gamma$ 通过率  
Figure 1 Gamma passing rates based on EIVD

2.3  $\gamma$ 通过率与剂量学差异间的相关性

通过 Pearson 相关性分析计算 3 类  $\gamma$  指标与 PTV、危及器官剂量学差异间的相关性。结果显示 2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3% 3 类  $\gamma$  指标与 PTV 的剂量学差异相关性较强( $r>0.7$ ),与危及器官相关性较弱( $r<0.7$ )。 $\gamma$  指标与 PTV、危及器官剂量学差异的 Pearson 相关性分析见表 2。

2.4 3 类 $\gamma$ 指标的最佳通过率阈值

通过 ROC 曲线分析,2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3% 3 类  $\gamma$  指标在 ROC 曲线下的面积 (AUC) 分别为

表 1 基于 EIVD 测量剂量与计划剂量在 PTV 与危及器官的剂量学参数比较(cGy)  
Table 1 Comparison of dosimetric parameters between measured dose and planned dose based on EIVD for PTV and organs-at-risk (cGy)

器官	参数	测量剂量	计划剂量	<i>t</i> 值	<i>P</i> 值
PTV	D <sub>mean</sub>	5 007.42±186.09	5 132.03±176.39	-2.582	0.016
	D <sub>2</sub>	5 492.75±302.84	5 361.28±300.88	3.773	<0.001
	D <sub>98</sub>	4 755.21±325.93	4 898.00±298.63	-5.810	<0.001
膀胱	D <sub>mean</sub>	4 347.84±280.84	4 332.57±284.20	1.535	0.130
直肠	D <sub>mean</sub>	4 631.03±272.01	4 652.28±243.30	-1.491	0.140
小肠	D <sub>mean</sub>	1 761.91±378.78	1 756.69±384.03	1.307	0.200

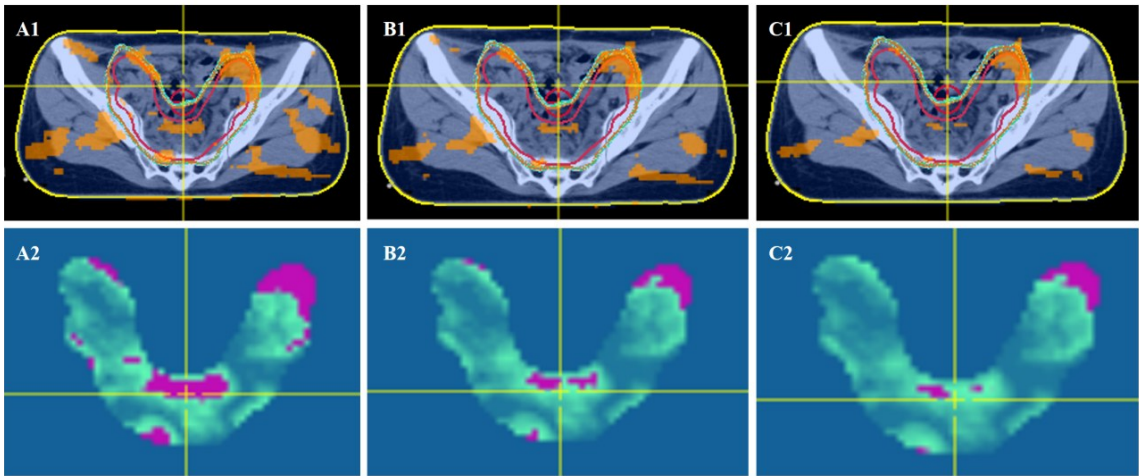


图2 基于EIVD验证的剂量分布差异  
Figure 2 Differences in dose distribution based on EIVD  
图A1、A2:  $\gamma$  通过率在 2 mm/2% 的剂量分布差异;图B1、B2:  $\gamma$  通过率在 2 mm/3% 的剂量分布差异;图C1、C2:  $\gamma$  通过率在 3 mm/3% 的剂量分布差异。橙黄色区域为测量剂量与计划剂量的偏差;图A2、B2、C2中红色区域为 $\gamma$ 计算不通过区域

0.888、0.825、0.767,结合约登指数确定最佳 $\gamma$ 通过率截断值分别为: $\gamma$ (2 mm/2%)为 79.06%(敏感性=1.000,特异性=0.711), $\gamma$ (2 mm/3%)为 90.04%(敏感性=0.793,特异性=0.770), $\gamma$ (3 mm/3%)为 94.19%(敏感性=0.759,特异性=0.687)。ROC 曲线分析见图 3,

最佳 $\gamma$ 通过率阈值见表 3。

3 讨论与结论

使用 EIVD 系统进行剂量验证具备诸多优势,例 如不增加患者治疗时间与额外剂量,且大多数加速



表2  $\gamma$ 指标与PTV、危及器官剂量学差异的相关性分析  
Table 2 Correlation analysis between gamma index and dosimetric difference in target areas and organs-at-risk

结果	剂量学差异	$\gamma$ 指标	相关性分析
PTV	$\Delta D_{\text{mean}}$	2 mm/2%	$r=-0.705, P=0.000$
		2 mm/3%	$r=-0.701, P=0.000$
		3 mm/3%	$r=-0.729, P=0.000$
	$\Delta D_2$	2 mm/2%	$r=-0.761, P=0.000$
		2 mm/3%	$r=-0.728, P=0.000$
		3 mm/3%	$r=-0.707, P=0.000$
	$\Delta D_{98}$	2 mm/2%	$r=0.742, P=0.000$
		2 mm/3%	$r=0.725, P=0.000$
		3 mm/3%	$r=0.703, P=0.000$
膀胱	$\Delta D_{\text{mean}}$	2 mm/2%	$r=-0.423, P=0.015$
		2 mm/3%	$r=-0.351, P=0.032$
		3 mm/3%	$r=-0.333, P=0.040$
直肠	$\Delta D_{\text{mean}}$	2 mm/2%	$r=-0.334, P=0.041$
		2 mm/3%	$r=-0.321, P=0.055$
		3 mm/3%	$r=-0.233, P=0.132$
小肠	$\Delta D_{\text{mean}}$	2 mm/2%	$r=-0.488, P=0.032$
		2 mm/3%	$r=-0.329, P=0.059$
		3 mm/3%	$r=-0.328, P=0.062$

$\Delta D_{\text{mean}}$ 、 $\Delta D_2$ 、 $\Delta D_{98}$ 表示测量剂量与计划剂量在 $D_{\text{mean}}$ 、 $D_2$ 、 $D_{98}$ 上的剂量差异

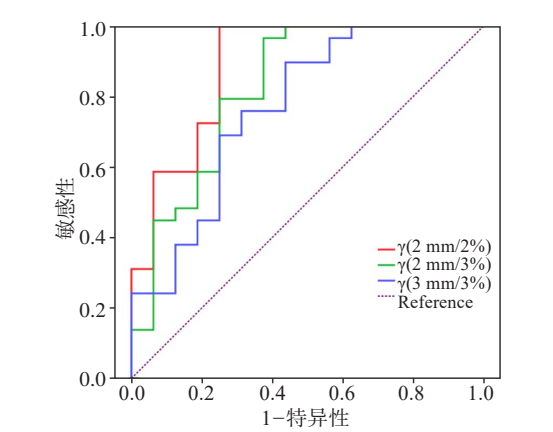


图3 3类 $\gamma$ 指标的ROC曲线分析  
Figure 3 ROC curve analysis for 3 different gamma criteria

器均配备EPID,适用性较广<sup>[16-18]</sup>。与此同时,EIVD系统能够为患者IMRT计划提供有效的特异性检查,识别实际治疗过程中相关的剂量学偏差<sup>[19-20]</sup>。一般来说,治疗过程中的剂量学偏差是由一些误差引起的,例如机器相关<sup>[21]</sup>、计划相关或患者相关<sup>[22]</sup>,而检测这些误差通常需要额外的技术专长和人力成

表3 3类 $\gamma$ 指标的最佳通过率阈值  
Table 3 The optimal thresholds for 3 different gamma criteria

$\gamma$ 指标	AUC	敏感性	特异性	$\gamma$ 截断值/%
2 mm/2%	0.888(0.778~0.998)	1.000	0.711	79.06
2 mm/3%	0.825(0.687~0.964)	0.793	0.770	90.04
3 mm/3%	0.767(0.615~0.920)	0.759	0.687	94.19

本<sup>[23]</sup>。因此,建立适用于EIVD系统的剂量评估方案,便于理解剂量学偏差至关重要。本研究旨在通过相关性分析和ROC曲线选择基于剂量学灵敏度的 $\gamma$ 标准,以发现宫颈癌患者IMRT中的剂量学偏差。

采用2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3%的全局 $\gamma$ 分析,3类 $\gamma$ 指标的平均通过率分别为 $(83.07\pm 5.25)\%$ 、 $(91.69\pm 3.52)\%$ 、 $(95.02\pm 2.46)\%$ 。 $\gamma$ 通过率的结果与Feng等<sup>[24]</sup>先前报道的基于EPID的在体剂量学研究结果大致相似。在测量剂量与计划剂量的DVH比较中,PTV的 $D_{\text{mean}}$ 偏差为2.43%, $D_2$ 偏差为2.45%, $D_{98}$ 偏差为2.92%;膀胱、直肠、小肠的 $D_{\text{mean}}$ 偏差分别为0.35%、0.46%、0.30%,PTV与危及器官剂量学差异符合ICRU 83号报告的要求。然而,在剂量学差异的比较中,PTV的剂量学偏差高于危及器官,这可能由于IMRT中PTV周围的剂量迅速跌落,导致任何随机误差或系统误差都会对PTV产生较大的剂量扰动,而危及器官所受的影响较小。因此,选择合适的 $\gamma$ 标准对提高EIVD系统检测剂量学偏差的可靠性至关重要,尤其是在PTV的高剂量梯度区域。图2展示了基于EIVD验证的不同 $\gamma$ 指标下的剂量分布差异,使用更严格的 $\gamma$ 指标,能够检测出高剂量区域更多的剂量偏差。

Bojechko等<sup>[25]</sup>指出 $\gamma$ 指标和剂量差异之间的相关性高度依赖于治疗部位和技术。本研究3类 $\gamma$ 指标与PTV、危及器官剂量学差异的相关性分析显示,2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3%与PTV的剂量学差异相关性较强( $r>0.7$ ),与危及器官相关性较弱( $r<0.7$ )。这些结果可能提示,使用2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3%的全局 $\gamma$ 标准对于PTV来说,能够检测到临床实际治疗中的显著剂量差异;但是对于危及器官来说,无法检测到用于EIVD验证的临床显著偏差,可能需要更加严格的全局 $\gamma$ 指标(如1 mm/1%等)或者与危及器官相关的局部 $\gamma$ 指标。

ROC曲线分析显示,2 mm/2%、2 mm/3%、3 mm/3%的AUC值分别是0.888、0.825、0.767,且最佳 $\gamma$ 通过率截断值分别为79.06%、90.04%、94.19%。2 mm/2%、2 mm/3%较3 mm/3%具有更好的AUC值,这表明

EIVD系统在使用2 mm/2%或者2 mm/3%的 $\gamma$ 指标时,具有潜在的能力区分剂量学上可接受和不可接受的IMRT计划。在敏感度与特异性计算方面,使用2 mm/3%的 $\gamma$ 指标,其敏感性与特异性数值更为接近(0.793、0.770),说明其在阻止临床不可接受计划的同时,也降低了将可接受的计划判定为不可接受计划的机会。

综上所述,本研究证明了基于EIVD验证的全局 $\gamma$ 分析与IMRT剂量学参数之间存在一定的相关性,能够有效保证宫颈癌IMRT过程中肿瘤靶区剂量传递的精准性。在 $\gamma$ 标准的选择上,可以选择全局分析2 mm/3%,以有效地检测宫颈癌放疗的剂量学偏差,为下一步宫颈癌自适应IMRT提供一定的临床依据。此外,对于使用更严格的全局 $\gamma$ 指标或者局部 $\gamma$ 指标来检测特定误差所引起的剂量学偏差是下一步需要深入研究的。

## 【参考文献】

- [1] Siegel RL, Miller KD, Wagle NS, et al. Cancer statistics, 2023[J]. CA Cancer J Clin, 2023, 73(1): 17-48.
- [2] Hartford AC, Galvin JM, Beyer DC, et al. American College of Radiology (ACR) and American Society for Radiation Oncology (ASTRO) practice guideline for intensity-modulated radiation therapy (IMRT)[J]. Am J Clin Oncol, 2012, 35(6): 612-617.
- [3] Miften M, Olch A, Mihailidis D, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: recommendations of AAPM task group No.218[J]. Med Phys, 2018, 45(4): e53-e83.
- [4] Low DA, Moran JM, Dempsey JF, et al. Dosimetry tools and techniques for IMRT[J]. Med Phys, 2011, 38(3): 1313-1338.
- [5] Fidanzio A, Azario L, Greco F, et al. Routine EPID *in-vivo* dosimetry in a reference point for conformal radiotherapy treatments[J]. Phys Med Biol, 2015, 60(8): N141-N150.
- [6] Celi S, Costa E, Wessels C, et al. EPID based *in vivo* dosimetry system: clinical experience and results[J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(3): 262-276.
- [7] Anders M. Patient-specific quality assurance *in vivo* 3D Dose verification [M]//Mijnheer B. Clinical 3D Dosimetry in Modern Radiation Therapy. Boca Raton, FL: CRC Press, 2017: 457-481.
- [8] Olaciregui-Ruiz I, Rozendaal R, Mijnheer B, et al. Site-specific alert criteria to detect patient-related errors with 3D EPID transit dosimetry[J]. Med Phys, 2019, 46(1): 45-55.
- [9] van der Bijl E, van Oers RFM, Olaciregui-Ruiz I, et al. Comparison of gamma-and DVH-based *in vivo* dosimetric plan evaluation for pelvic VMAT treatments[J]. Radiother Oncol, 2017, 125(3): 405-410.
- [10] Baran M, Tabor Z, Tulik M, et al. Are gamma passing rate and dose-volume histogram QA metrics correlated?[J]. Med Phys, 2021, 48(9): 4743-4753.
- [11] Fiagan YA, Bossuyt E, Nevens D, et al. The use of *in-vivo* dosimetry to identify head and neck cancer patients needing adaptive radiotherapy[J]. Radiother Oncol, 2023, 184: 109676.
- [12] Rozendaal RA, Mijnheer BJ, van Herk M, et al. *In vivo* portal dosimetry for head-and-neck VMAT and lung IMRT: linking  $\gamma$ -analysis with differences in dose-volume histograms of the PTV[J]. Radiother Oncol, 2014, 112(3): 396-401.
- [13] 国家癌症中心/国家肿瘤质控中心. 基于EPID和MLC运行日志文件的调强放疗在线剂量验证实践指南[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2024, 33(1): 1-6.  
National Cancer Center/National Quality Control Center for Cancer. Practice guidelines of patient specific online dosimetric verification based on EPID and MLC log files for intensity-modulated radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2024, 33(1): 1-6.
- [14] McKenzie EM, Balter PA, Stingo FC, et al. Toward optimizing patient-specific IMRT QA techniques in the accurate detection of dosimetrically acceptable and unacceptable patient plans[J]. Med Phys, 2014, 41(12): 121702.
- [15] The International Commission on Radiation Units and Measurements. Prescribing, recording, and reporting intensity-modulated photon-beam therapy (IMRT). ICRU Report 83[J]. J ICRU, 2010: 10.
- [16] Cilla S, Azario L, Greco F, et al. An *in-vivo* dosimetry procedure for Elekta step and shoot IMRT[J]. Phys Med, 2014, 30(4): 419-426.
- [17] Zijtveld MV, 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.
- [18] Rozendaal RA, Mijnheer BJ, 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.
- [19] Mijnheer B, Beddar S, Izewska J, et al. *In vivo* dosimetry in external beam radiotherapy[J]. Med Phys, 2013, 40(7): 070903.
- [20] 李玉成, 程晶晶, 蒋璐, 等. 基于EPID三维剂量重建在肿瘤患者中应用[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27(11): 984-988.  
Li YC, Cheng PJ, Jiang L, et al. Application of EPID-based 3D dose reconstruction in cancer patients[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2018, 27(11): 984-988.
- [21] Moustakis C, Tazehmahalleh FE, Elsayad K, et al. A novel approach to SBRT patient quality assurance using EPID-based real-time transit dosimetry: a step to QA with *in vivo* EPID dosimetry[J]. Strahlenther Onkol, 2020, 196(2): 182-192.
- [22] Steers JM, Bojorquez JZ, Moore K, et al. Using *in vivo* EPID images to detect and quantify patient anatomy changes with gradient dose segmented analysis[J]. Med Phys, 2020, 47(11): 5419-5427.
- [23] Bedford JL, Hanson IM, Hansen VN. Comparison of forward- and back-projection *in vivo* EPID dosimetry for VMAT treatment of the prostate[J]. Phys Med Biol, 2018, 63(2): 025008.
- [24] Feng B, Yu L, Mo EW, et al. Evaluation of daily CT for EPID-based transit *in vivo* dosimetry[J]. Front Oncol, 2021, 11: 782263.
- [25] Bojchko C, Ford EC, et al. Quantifying the performance of *in vivo* portal dosimetry in detecting four types of treatment parameter variations[J]. Med Phys, 2015, 42(12): 6912-6918.

(编辑:陈丽霞)