

## 利用Delta4对放疗计划进行剂量体积直方图评价的可行性研究

刘礼东<sup>1</sup>, 杨振<sup>2</sup>, 邱小平<sup>1</sup>, 雷明军<sup>2</sup>, 曹琪<sup>2</sup>, 杨晓喻<sup>2</sup>, 唐杜<sup>2</sup>, 左宇浩<sup>1</sup>

1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421000; 2. 中南大学湘雅医院肿瘤科, 湖南 长沙 410008

**【摘要】目的:**探讨Delta4在放疗计划验证过程中进行剂量体积直方图(DVH)评价的可行性。**方法:**将基于日志文件的三维剂量重建方法(利用Mobius FX™实现)作为参考方法,采用Bland-Altman统计方法对基于Delta4的三维剂量评价方法和参考方法在宫颈癌和鼻咽癌容积调强放疗验证中的一致性进行分析,评价两种方法是否具有互换性,从而论证Delta4用于放疗计划DVH评价的可行性。Bland-Altman一致性分析利用的指标为日志文件重建剂量与Delta4实测剂量的均值和差值、TPS计算剂量和Delta4预测剂量的均值与差值,并以此分别绘制均值-差值散点图,通过观察散点分布区间来判断两种方法的一致性。**结果:**在鼻咽癌一致性分析中基于日志文件重建剂量与Delta4实测剂量、TPS计算剂量和Delta4预测剂量分别有99%的测量点和97%的测量点落在均值-差值散点图95%一致性区间内;在宫颈癌一致性分析中基于日志文件重建剂量与Delta4实测剂量、TPS计算剂量和Delta4预测剂量有95%的测量点落在均值-差值散点图95%一致性区间内,落在95%一致性区间外的测量点占比在5%之内。**结论:**基于Delta4的三维剂量评价方法和基于日志文件的三维剂量重建方法一致性很好,可以互换,因此使用Delta4对计划进行DVH评价是可行的。

**【关键词】**宫颈癌;鼻咽癌;容积调强;Bland-Altman统计分析;Delta4;剂量体积直方图;一致性评价;可行性分析

**【中图分类号】**R815

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)01-0025-06

### Feasibility of Delta4 for plan evaluation based on dose-volume histogram

LIU Lidong<sup>1</sup>, YANG Zhen<sup>2</sup>, QIU Xiaoping<sup>1</sup>, LEI Mingjun<sup>2</sup>, CAO Ying<sup>2</sup>, YANG Xiaoyu<sup>2</sup>, TANG Du<sup>2</sup>, ZUO Yuhao<sup>1</sup>

1. College of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421000, China; 2. Department of Oncology, Xiangya Hospital, Central South University, Changsha 410008, China

**Abstract: Objective** To discuss the feasibility of Delta4 for dose-volume histogram (DVH)-based evaluation in plan verification. **Methods** Taking the three-dimensional (3D) dose reconstruction method based on log files (using Mobius FX™) as a reference method, we applied Bland-Altman statistical method to analyze the agreement of 3D dose evaluation method based on Delta4 and the reference method in the verification of volumetric modulated arc therapy for cervical cancer and nasopharyngeal cancer (NPC), and to evaluate whether the two methods can be mutually replaced, thus demonstrating the feasibility of Delta4 for the DVH-based evaluation of radiotherapy plan. The indexes used in Bland-Altman agreement analysis included the mean and standard deviation of log files reconstruction dose and Delta4 measured dose, treatment planning system calculated dose and Delta4 planned dose, which were also used to draw the mean-difference scatter plots, respectively. Finally, the agreement of the two methods was determined by the scatter-point distribution interval. **Results** In the NPC agreement analysis, 99% of measuring points between log files-based reconstructed dose and Delta4 measured dose, and 97% of measuring points between TPS calculated dose and Delta4 planned dose fall within the 95% confidence interval (CI) in mean-difference scatter plots. In the cervical cancer agreement analysis, log files-based reconstructed dose and Delta4 measured dose, TPS calculated dose and Delta4 planned dose had 95% of measuring points within the 95%CI in mean-difference scatter plots, which indicated that the proportion of measurement points outside the 95%CI was within 5%. **Conclusion** Delta4-based 3D dose evaluation and log files-based 3D dose reconstruction are in a good coincidence and can be mutually replaced. Using Delta4 for DVH-based evaluation is feasible.

**Keywords:** cervical cancer; nasopharyngeal cancer; volumetric modulated arc therapy; Bland-Altman statistical analysis; Delta4; dose-volume histogram; agreement evaluation; feasibility analysis

**【收稿日期】**2017-07-29

**【作者简介】**刘礼东, 研究生, 主要研究方向: 医学剂量, E-mail: liulidong1114@163.com

**【通信作者】**邱小平, E-mail: nh6651@163.com; 杨振, E-mail: yangzhen@188.com

### 前言

Delta4(ScandiDos, Uppsala, Sweden)作为常用三维剂量验证设备,除了能够快速给出病人的伽马通过率之外,还可以获取结构(靶区和危及器官)的剂

量体积直方图(Dose-Volume Histogram, DVH),从而直观比较测量剂量与预测剂量(通过Delta4计算得到)之间的差别<sup>[1-2]</sup>。但Delta4只有两个交叉的探测器平面上的剂量是实测的,其它位置的剂量则是通过计算模型计算获得<sup>[3]</sup>,因此将其用于三维的DVH剂量评价的可行性还有待进一步验证。考虑到基于日志文件的三维剂量重建方法已广泛应用于调强放疗的剂量验证<sup>[4-8]</sup>,因此我们拟将基于日志文件的三维剂量重建方法作为参考,采用Bland-Altman统计方法对基于Delta4的三维剂量评价方法和参考方法在容积调强验证中的一致性进行分析,评价两种方法是否具有互换性,从而论证Delta4用于放疗计划DVH评价的可行性。

## 1 材料与方法

### 1.1 病人计划设计

选取2016~2017年中南大学湘雅医院接受容积调强放射(VMAT)治疗(采用瓦里安RapidArc™技术)的20例宫颈癌和8例鼻咽癌VMAT计划,靶区和危及器官均由临床医生进行勾画,其中鼻咽癌肿瘤靶区(GTV)包括原发灶(GTVnx)和转移淋巴结(GTVnd),分别外扩5和3 mm作为计划原发灶靶区(PGTVnx)和计划淋巴结靶区(PGTVnd);临床靶区(CTV)包括高危区(CTV1)和预防照射区(CTV2),将其外扩3 mm得到计划靶区(PTV1和PTV2),PGTVnx:5 992~7 040 cGy,PGTVnd:5 950~6 996 cGy,分28次照射治疗<sup>[9]</sup>,危及器官主要包括脊髓、脑干、腮腺、晶体等。宫颈癌处方剂量为4 600~6 000 cGy,每日单次照射剂量为200 cGy,危及器官包括膀胱、直肠、小肠等。所有计划设计均在瓦里安Eclipse TPS(11.3版)上进行,并使用AAA算法进行优化,计算网格边长为2.5 mm。射线类型采用瓦里安Trilogy 6 MV X射线。RapidArc计划采用双弧设计(第一个弧顺时针181°~179°、第二个弧逆时针179°~181°),为了尽可能减少叶片之间的漏射,准直器分别设置为10°(第一个弧)和350°(第二个弧)。

### 1.2 Delta4剂量验证

首先将20例宫颈癌和8例鼻咽癌VMAT计划移植到Delta4虚拟模体中进行剂量计算,随后将虚拟模体中的RT Plan、RT Dose以及原计划的RT Structure导入Delta4中进行治疗前的病人特定质量保证(Quality Assurance, QA),Delta4设备主要由一块主板和两块翼板组成,其中包含1 069个P型硅圆柱形半导体探测器,有效探测面积为20 cm×20 cm<sup>[10]</sup>。为了确保每次测量结果的一致性,在测量前都必须先对

Delta4进行校准。测量完成之后Delta4内置的三维剂量插值算法会给出不同结构的实测DVH,根据得到的实测DVH与预测DVH,选取相应的剂量学指标来进行研究(表1),其中D<sub>95</sub>表示95%的体积受到的最低剂量,以此类推。

表1 宫颈癌和鼻咽癌计划选取的剂量学评价指标

Tab.1 Dosimetric evaluation indexes for cervical and NPC plans

Plans	Structures	Dosimetric indexes
Cervical cancer	PTV	D <sub>95</sub> , D <sub>98</sub> , D <sub>2</sub>
	Rectum	D <sub>35</sub> , D <sub>50</sub>
	Small intestine	D <sub>30</sub> , D <sub>50</sub>
	Bladder	D <sub>35</sub> , D <sub>50</sub>
NPC	PGTVnx	D <sub>95</sub> , D <sub>98</sub> , D <sub>2</sub>
	GTVnd	D <sub>98</sub> , D <sub>2</sub>
	Brain stem	D <sub>1</sub>
	Spinal cord	D <sub>1</sub>
	Left and right parotid gland	D <sub>50</sub>

NPC: Nasopharyngeal carcinoma; PTV: Planning target volume; GTV: Gross tumor volume; PGTV: Planning gross tumor volume

### 1.3 加速器日志文件分析

当病人计划实施照射时,加速器会以50 ms为间隔记录一次MLC叶片位置信息并写入相应的日志文件,文件是按时序生成的一连串ASCII字符<sup>[9]</sup>,我们需要借助Mobius™软件(Mobius Medical Systems, Houston, TX)来对其进行分析与数据提取。Mobius™软件分为Mobius 3D和Mobius FX两大模块, Mobius 3D能利用自带的CCC算法(Collapsed Cone Convolution)对从TPS上传过来的计划进行三维剂量重建<sup>[11]</sup>;而Mobius FX则是对该计划治疗后产生的相应日志文件进行解析,提取病人在实际治疗时的MLC叶片位置、机架角度等重要信息,重建出照射剂量来评估计划执行之后产生的剂量误差<sup>[12]</sup>。

### 1.4 统计学分析

**1.4.1 相关性分析** 采用SPSS 17.0软件分别对Mobius FX解析日志文件得到的照射剂量和Delta4实测剂量、TPS计算剂量和Delta4预测剂量进行相关性分析(所选指标见表1),根据皮尔森相关系数( $r$ )的高低来判断它们之间的相关性强弱程度( $r < 0.3$ 表示几乎不相关,  $0.3 < r < 0.5$ 表示弱相关,  $0.5 < r < 0.8$ 表示中度相关,  $r > 0.8$ 表示强相关)。

**1.4.2 Bland-Altman一致性分析** Bland-Altman分析

主要以原始数据的均值为横坐标,差值为纵坐标绘制出均值-差值散点图,并求出差值的均数和标准差,利用式(1)和式(2)计算出95%的一致性界限,观察所测试点有多少落在95%一致性界限之内来判断两种方法之间的一致性效果。

95%一致性上限=差值平均数+1.96×差值标准差(1)

95%一致性下限=差值平均数-1.96×差值标准差(2)

## 2 结果

### 2.1 相关性分析

20例宫颈癌和8例鼻咽癌VMAT计划经过Mobius FX解析日志文件和Delta4实测、TPS计算与Delta4预测获得504个点剂量,其平均剂量见表2。

表2 20例宫颈癌和8例鼻咽癌VMAT计划在不同评价指标下得到的平均剂量及标准差(Gy,  $\bar{x} \pm s$ )

Tab.2 Doses in VMAT plans with different evaluation indexes for twenty cases of cervical cancer and eight cases of NPC (Gy,  $Mean \pm SD$ )

Plans	Structure	Dosimetric indexes	TPS calculated dose	Delta4 planned dose	Delta4 measured dose	Mobius FX reconstructed dose
Cervical cancer	PTV	D <sub>98</sub>	46.55±3.22	48.15±3.88	45.55±3.52	47.55±3.29
		D <sub>95</sub>	47.54±3.29	49.40±3.97	47.20±3.66	48.66±3.36
		D <sub>2</sub>	54.72±5.65	59.30±6.11	57.71±5.72	56.39±5.78
	Rectum	D <sub>50</sub>	41.24±5.38	45.83±5.86	45.58±5.05	42.47±5.25
		D <sub>35</sub>	45.35±4.80	50.42±4.38	49.06±4.19	46.53±4.78
	Bladder	D <sub>50</sub>	37.22±4.48	37.89±4.44	37.14±4.30	38.45±4.57
		D <sub>35</sub>	44.31±3.94	46.09±4.41	44.67±4.21	45.59±3.92
		D <sub>30</sub>	19.46±6.40	29.59±5.25	29.11±5.02	19.94±6.48
Small intestine	D <sub>50</sub>	26.41±4.48	34.94±5.11	34.22±4.93	27.08±4.53	
	D <sub>30</sub>	26.41±4.48	34.94±5.11	34.22±4.93	27.08±4.53	
NPC	PGTVnx	D <sub>98</sub>	61.19±2.57	53.01±2.15	51.08±2.02	61.66±2.68
		D <sub>95</sub>	62.06±3.14	53.82±2.49	51.89±2.25	62.84±3.05
		D <sub>2</sub>	67.38±4.34	58.67±3.52	57.44±3.19	69.30±4.43
	GTVnd	D <sub>98</sub>	58.41±12.16	47.11±8.66	45.89±8.19	59.70±12.50
		D <sub>2</sub>	68.03±4.38	57.42±3.42	56.38±2.79	69.19±4.10
	Brain stem	D <sub>1</sub>	43.63±4.84	38.89±4.17	40.68±4.15	45.73±4.99
	Spinal cord	D <sub>1</sub>	27.16±3.05	26.18±3.55	26.79±2.74	27.78±3.12
	Left parotid gland	D <sub>50</sub>	29.06±3.67	27.14±3.28	29.02±2.89	29.86±3.60
	Right parotid gland	D <sub>50</sub>	28.63±4.19	26.77±3.36	27.61±3.27	29.43±4.14

VMAT: Volumetric modulate arc therapy; TPS: Treatment planning system

表3展示了20例宫颈癌和8例鼻咽癌VMAT计划经Mobius FX解析日志文件得到的照射剂量和Delta4实测剂量、TPS计算剂量与Delta4预测剂量经过统计分析获得的相关系数及对应P值。

### 2.2 Bland-Altman一致性分析

分别计算Mobius FX解析日志文件得到的照射剂量和Delta4实测剂量、TPS计算剂量和Delta4预测剂量的相应均值、差值以及95%的一致性界限(表4)。

以均值为横坐标,差值为纵坐标绘制出对应的均值-差值散点图(图1和图2),其中上下两条水平粗

实线表示95%一致性的上下界限,中间的粗实线表示差值均数,虚线表示差值均数为0。

## 3 讨论

基于DVH的计划评价作为日常病人QA的重要工具,它能够定量评价计划在执行之后所产生的剂量偏差,在剂量验证方面更具有临床相关性。Stasi等<sup>[13]</sup>就曾使用3DVH软件对15例头颈部RapidArc计划进行DVH评价发现相比于TPS计算剂量,靶区重建的平均剂量差异为0.64%,危及器官脊髓和腮腺重

表3 20例宫颈癌和8例鼻咽癌VMAT计划的Mobius FX重建剂量和Delta4实测剂量、TPS计算剂量与Delta4预测剂量之间的相关系数  
Tab.3 Correlation indexes between Mobius FX reconstructed dose and Delta4 measured dose, Delta4 planned dose and TPS calculated dose in VMAT plans for twenty cases of cervical cancer and eight cases of NPC

Plans	Structures	Dosimetric indexes	Delta4 measured dose and Mobius		Delta4 planned dose and	
			FX reconstructed dose		TPS calculated dose	
			Correlation indexes	P value	Correlation indexes	P value
Cervical cancer	PTV	D <sub>98</sub>	0.87	<0.001	0.84	<0.001
		D <sub>95</sub>	0.87	<0.001	0.84	<0.001
		D <sub>2</sub>	0.97	<0.001	0.96	<0.001
	Rectum	D <sub>50</sub>	0.86	<0.001	0.89	<0.001
		D <sub>35</sub>	0.84	<0.001	0.86	<0.001
	Bladder	D <sub>50</sub>	0.94	<0.001	0.93	<0.001
		D <sub>35</sub>	0.93	<0.001	0.91	<0.001
	Small Intestine	D <sub>50</sub>	0.69	0.006	0.70	0.005
D <sub>30</sub>		0.69	0.006	0.68	0.007	
NPC	PGTVnx	D <sub>98</sub>	0.91	0.002	0.88	0.004
		D <sub>95</sub>	0.95	<0.001	0.91	0.002
		D <sub>2</sub>	0.96	<0.001	0.96	<0.001
	GTVnd	D <sub>98</sub>	0.99	<0.001	0.98	<0.001
		D <sub>2</sub>	0.85	0.008	0.90	0.002
	Brain stem	D <sub>1</sub>	0.99	<0.001	0.99	<0.001
	Spinal cord	D <sub>1</sub>	0.87	0.006	0.92	0.001
	Left parotid gland	D <sub>50</sub>	0.93	0.001	0.96	<0.001
	Right parotid gland	D <sub>50</sub>	0.90	0.002	0.93	0.001

表4 20例宫颈癌和8例鼻咽癌VMAT计划Mobius FX重建剂量和Delta4实测剂量、TPS计算剂量与Delta4预测剂量间的差值平均值、差值标准差及95%一致性界限

Tab.4 Mean and standard deviation of the differences and the 95% confidence interval (CI) between Mobius FX reconstructed dose and Delta4 measured dose, Delta4 planned dose and TPS calculated dose in VMAT plans for twenty cases of cervical cancer and eight cases of NPC

Plans	Differences	Mean of the differences	Standard deviation of the differences	95%CI for the upper limits of agreement	95%CI for the lower limits of agreement
Cervical cancer	Delta4 measured dose - Mobius FX reconstructed dose	1.96	4.99	11.74	-7.83
	Delta4 planned dose - TPS calculated dose	4.31	4.34	12.82	-4.19
NPC	Delta4 measured dose - Mobius FX reconstructed dose	-7.63	5.51	3.16	-18.43
	Delta4 planned dose - TPS calculated dose	-6.28	4.17	1.89	-14.45

建的平均剂量差异为2%,使用基于DVH的计划评价能够提升放射治疗的安全性和准确性。目前已有大量文献[14-15]表明Delta4能够应用于VMAT的病人质控,但就Delta4对计划进行DVH评价是否真正可

行的国内外相关文献较少。

Bland-Altman作为一种用于一致性评价的统计方法,它在使用时常以其中一种方法作为参考标准,即便两者都不是公认标准,利用此分析也可以判断



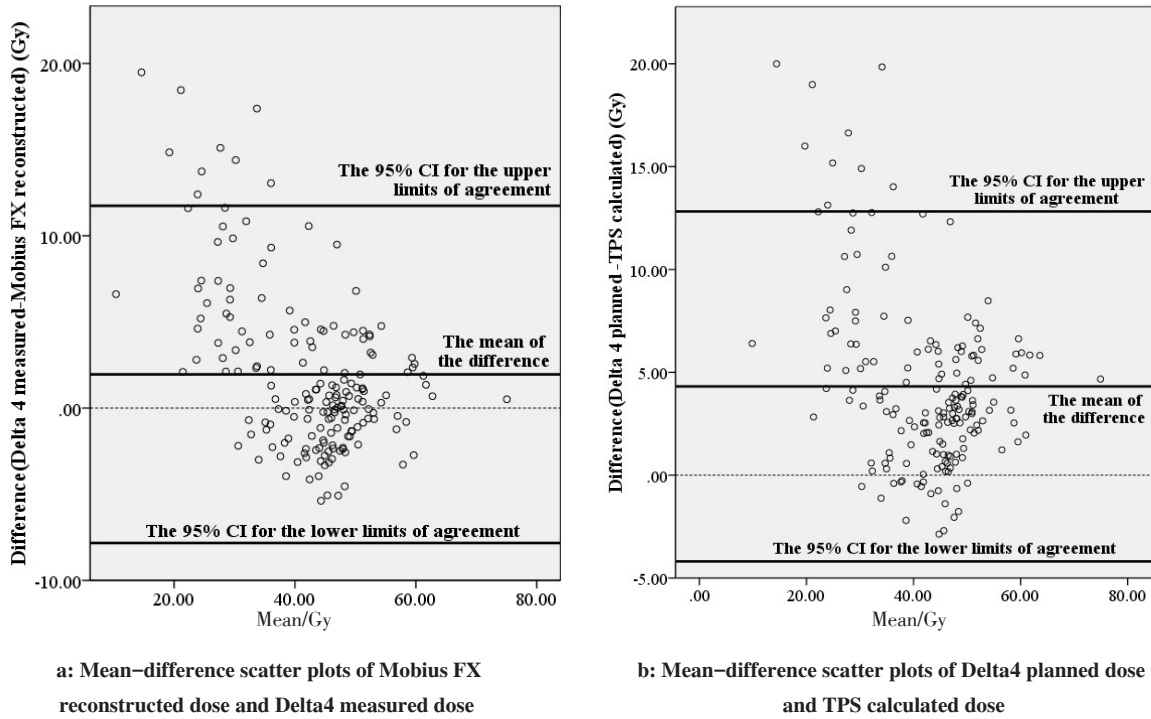


图1 宫颈癌Mobius FX重建剂量与Delta4实测剂量、Delta4预测剂量与TPS计算剂量的均值-差值散点图  
 Fig.1 Mean-difference scatter plots of Mobius FX reconstructed dose and Delta4 measured dose, Delta4 planned dose and TPS calculated dose for cervical cancer

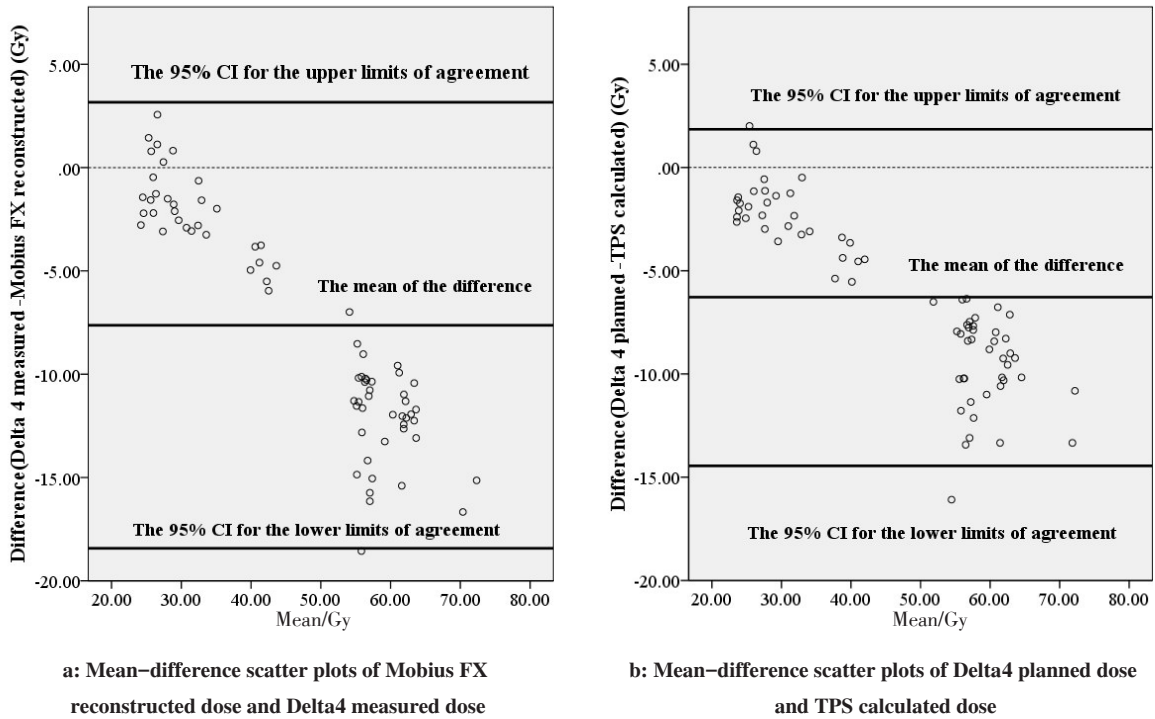


图2 鼻咽癌Mobius FX重建剂量与Delta4实测剂量、Delta4预测剂量与TPS计算剂量的均值-差值散点图  
 Fig.2 Mean-difference scatter plots of Mobius FX reconstructed dose and Delta4 measured dose, Delta4 planned dose and TPS calculated dose for NPC

两种方法之间是否具有良好的一致性<sup>[16-18]</sup>。Varatharaj等<sup>[19]</sup>就曾利用此统计方法对Delta4与胶片测量同一计划的伽马通过率进行比较得出两者之间

一致性很好可以相互替换,以此来证明在病人QA过程中使用Delta4进行伽马分析是可行的。而加速器日志文件作为加速器治疗时生成的重要文件,记录

了调强放疗治疗中每个射野的实际机架角度以及MLC叶片位置等主要误差来源信息,同时不少学者<sup>[4-8]</sup>也都认为基于日志文件的剂量重建可以作为一种常规的剂量验证手段。因此在本研究中我们将Mobius FX解析日志文件得到的照射剂量和TPS计算剂量作为参考,使它们分别与Delta4实测剂量以及预测剂量进行Bland-Altman统计分析,观察两者的一致性关系来判定Delta4在剂量验证中使用DVH评价的可行性。表3中两种测量方法和两种预测方法之间存在着很高的正相关性;而从图1和图2不难看出,在鼻咽癌一致性分析中经Mobius FX解析日志文件得到的照射剂量与Delta4实测剂量、TPS计算剂量和Delta4预测剂量分别有99%的测量点和97%的测量点落在均值-差值散点图95%一致性区间内,而在宫颈癌一致性分析中经Mobius FX解析日志文件得到的照射剂量与Delta4实测剂量、TPS计算剂量和Delta4预测剂量有95%的测量点落在均值-差值散点图95%一致性区间内,落在95%一致性区间之外的测量点较总测量点而言基本控制在5%之内,因此根据分析可以认为两种测量方法以及两种预测方法之间一致性很好能够相互替换。

值得说明的是,从表2所得的数据来看Delta4实测剂量和Mobius FX解析日志文件得到的照射剂量之间存在着一定差距,这主要归因于实施验证的模体不同,Delta4使用的是PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)模体,而Mobius则是以病人为主,这就导致两者之间必然存在较大差异;同样使用不同模体进行剂量计算时也会造成TPS计算剂量与Delta4预测剂量之间出现一定偏差。

综上所述,基于Delta4的三维剂量评价方法和基于日志文件的三维剂量重建方法一致性很好,在一定程度上能够反映放疗病人具体结构的三维剂量准确性,使用Delta4对鼻咽癌和宫颈癌VMAT计划进行DVH评价是可行的。

## 【参考文献】

- [1] STINE K, JOAKIM M. Dosimetric verification of RapidArc treatment delivery[J]. Acta Oncol, 2009, 48(6): 185-191.
- [2] THUC P, LUO J J. Clinical implementation of a 3D dosimeter for accurate IMRT and VMAT patient specific QA[J]. Open J Biophys, 2013, 3(1): 99-111.
- [3] 胡彩容. 三维验证系统在容积旋转调强剂量验证中的应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- HU C R. The application study of 3D dose verification for volume-modulated arc therapies[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [4] 石锦平, 滕建建, 张利文, 等. 直线加速器日志文件对容积调强三维剂量验证研究[J]. 中华肿瘤防治, 2014, 8(21): 1271-1273.
- SHI J P, TENG J J, ZHANG L W, et al. 3D dosimetric verification of volumetric-modulated arc therapy using Linac log files[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2014, 8(21): 1271-1273.
- [5] SCHREIBMANN E, DHABAAN A, ELDER E, et al. Patient-specific quality assurance method for VMAT treatment delivery[J]. Med Phys, 2009, 36(10): 4530-4535.
- [6] RANGARAJ D, ZHU M, YANG D, et al. Catching errors with patient-specific pretreatment machine log file analysis[J]. Pract Radiat Oncol, 2013, 3(2): 80-90.
- [7] BAI S, LI G J, WANG M J, et al. Effect of MLC leaf position, collimator rotation angle, and gantry rotation angle errors on intensity-modulated radiotherapy plans for nasopharyngeal carcinoma[J]. Med Dosim, 2013, 38(2): 143-147.
- [8] LUO W, LI J, PRICE R A, et al. Monte Carlo based IMRT dose verification using MLC log file and R/V output[J]. Med Phys, 2006, 33(7): 2557-2564.
- [9] 曹瑛, 杨振, 邱小平, 等. 基于多叶准直器日志文件的鼻咽癌调强放疗的累积剂量验证[J]. 中华放射医学与防护, 2015, 9(35): 1531-1535.
- CAO Y, YANG Z, QIU X P, et al. The IMRT accumulative dosimetric verification of NPC using MLC log files[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 9(35): 1531-1535.
- [10] STINE K, JOAKIM M. Dosimetric verification of RapidArc treatment delivery[J]. Acta Oncol, 2009, 48(6): 185-191.
- [11] JONAS D F. Evaluation of a novel secondary check tool for intensity-modulated radiotherapy treatment planning[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(5): 207-215.
- [12] FRANCISCO C G. Dosimetric validation and clinical implementation of two 3D dose verification systems for quality assurance in volumetric-modulated arc therapy techniques[J]. J Appl Clin Med Phys, 2015, 16(2): 198-216.
- [13] STASI M, BRECIANI S, MIRANTI A, et al. Pre-treatment patient specific IMRT quality assurance: a correlation study between gamma index and patient clinical dose volume histogram[J]. Med Phys, 2012, 39(12): 7626-7634.
- [14] JAMES L B, YOUNG K L, PHILIP W, et al. Evaluation of the Delta4 phantom for IMRT and VMAT verification[J]. Phys Med Biol, 2009, 54(8): 167-176.
- [15] RAMASWAMY S, JOSE A B, RAFAEL L M, et al. Characterization and clinical evaluation of a novel IMRT quality assurance system[J]. J Appl Clin Med Phys, 2009, 10(2): 104-118.
- [16] BLAND J M, ALTMAN D G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement[J]. Lancet, 1986, 1(8476): 307-310.
- [17] ALTMAN D G, BLAND J M. Measurement in medicine: the analysis of method comparison studies[J]. J R Stat Soc, 1983, 32(3): 307-317.
- [18] BLAND J M, ALTMAN D G. Measuring agreement in method comparison studies[J]. Stat Methods Med Res, 1998, 8(2): 135-160.
- [19] VARATHARAJ C, RAVIKUMAR M, CARLOS E, et al. Comparison of four commercial devices for RapidArc and sliding window IMRT QA[J]. J Appl Clin Med Phys, 2011, 12(2): 338-349.

(编辑:陈丽霞)