

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2021.11.008

医学放射物理

## 独立三维剂量验证在鼻咽癌容积调强放射治疗计划中的应用

刘致滨, 石锦平, 李盈辉, 张利文, 谢秋英, 滕建建, 常元智  
佛山市第一人民医院(中山大学附属佛山医院)肿瘤放射物理科, 广东 佛山 528000

**【摘要】目的:**探讨独立三维剂量验证在鼻咽癌容积调强放射治疗(VMAT)计划中应用的可行性。**方法:**选取31例鼻咽癌患者的VMAT计划,采用Bland-Altman统计方法对基于独立三维剂量分布和实测重建三维剂量分布的一致性进行分析,从而论证独立三维剂量验证应用于鼻咽癌VMAT计划中的可行性。根据独立三维剂量验证的DVH图和 $\gamma$ 通过率分类绘制出受试者工作特征(ROC)曲线,得到鼻咽癌VMAT计划中独立三维剂量验证的最佳 $\gamma$ 通过率阈值。**结果:**鼻咽癌患者的VMAT计划中,两种验证方法有95.34%的测试点落在一致性界限内,因此两种验证方法之间具有较好的一致性。根据ROC曲线和AUC值,选取结构PTV2参数用于 $\gamma$ 通过率评价时效果最好,其最佳阈值为95.41%。**结论:**独立三维剂量验证可以检验计划系统计算的准确性,快速地对计划进行治疗前的验证。最佳阈值有助于对放疗计划进行筛查,为放疗计划的准确实施提供安全、有效的技术保障。

**【关键词】**鼻咽癌;容积调强;Bland-Altman分析;受试者工作特征曲线;最佳阈值

**【中图分类号】**R811.1;R737.33

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2021)11-1359-06

## Application of independent three-dimensional dose verification for volumetric modulated arc therapy of nasopharyngeal carcinoma

LIU Zhibin, SHI Jinping, LI Yinghui, ZHANG Liwen, XIE Qiuying, TENG Jianjian, CHANG Yuanzhi

Department of Radiation Physics, the First People's Hospital of Foshan (Affiliated Foshan Hospital of Sun Yat-sen University), Foshan 528000, China

**Abstract: Objective** To explore the feasibility of independent three-dimensional dose verification for volumetric modulated arc therapy (VMAT) of nasopharyngeal carcinoma (NPC). **Methods** The VMAT plans of 31 NPC patients were selected. Bland-Altman method was used to analyze the consistency between independent three-dimensional dose distribution and measured reconstructed three-dimensional dose distribution, so as to demonstrate the feasibility of independent three-dimensional dose verification for VMAT of NPC. Based on the dose-volume histogram of independent three-dimensional dose verification and the classification of gamma passing rate, receiver operating characteristic (ROC) curve was drawn, and the optimal gamma passing rate threshold of independent three-dimensional dose verification for VMAT of NPC was obtained. **Results** For two verification methods for VMAT of NPC, 95.34% of the test points were within the consistency range, indicating there was a good consistency between the two verification methods. According to ROC curve and AUC value, PTV2 was selected as the best evaluation of gamma passing rate in the independent three-dimensional dose verification for VMAT of NPC, and its optimal threshold was 95.41%. **Conclusion** Independent three-dimensional dose verification can be used as a test of the calculation accuracy of the planning system, and the pretreatment planning can be verified quickly. The optimal threshold is helpful to screen the radiotherapy plan and provides a safe and effective technical guarantee for the accurate implementation of radiotherapy plan.

**Keywords:** nasopharyngeal carcinoma; volumetric modulated arc therapy; Bland-Altman analysis; receiver operating characteristic curve; optimal threshold

**【收稿日期】**2021-05-26

**【基金项目】**佛山市卫健局课题(20190038);国家重点研发计划(2017YFC0113205);佛山市“登峰计划”专项资金(2019D009)

**【作者简介】**刘致滨,硕士,研究方向:放疗计划设计与质量控制,E-mail: lzbin2008@sina.com

**【通信作者】**石锦平,主任技师,研究方向:肿瘤放射物理学,E-mail: rath55@126.com

## 前言

鼻咽癌是中国华南地区最常见的肿瘤之一,放射治疗已经成为鼻咽癌最主要的治疗手段<sup>[1-2]</sup>。容积调强放射治疗(VMAT)技术通过动态旋转形式,同步连续调节机架角度、多叶准直器(Multileaf Collimator, MLC)的形状和剂量率,以更多的自由度高效地实现了靶区的剂量适形度同时又保护了周围正常组织,在临床治疗上应用越来越广<sup>[3]</sup>。鼻咽癌特殊的解剖学特点和周围危及器官的剂量限制,使得计划设计难度大大增加。同时靶区边缘剂量梯度大,各射野内注量分布不均,导致计划产生较多的窄条射野。鼻咽癌VMAT计划实施的复杂性和高效性对计划的验证提出了新的挑战。近年来三维剂量验证已成为主要的验证手段,可以在患者影像信息上重建三维剂量分布,根据剂量体积直方图(Dose Volume Histogram, DVH)对靶区和危及器官做出针对性评价,并指出剂量偏差的具体位置,给予更多的信息判断误差对临床治疗产生的影响。因此本研究独立三维剂量验证在鼻咽癌VMAT计划中的可行性,并寻找鼻咽癌VMAT计划验证的最佳 $\gamma$ 通过率阈值,为独立三维剂量验证的应用奠定一定的基础。

## 1 资料与方法

### 1.1 临床资料

随机选取2019年5月~12月在佛山市第一人民医院接受VMAT的31例鼻咽癌患者为研究对象。年龄33~76岁,中位年龄55岁。

CT扫描后图像通过网络传输至Varian Eclipse计划系统工作站。结合磁共振成像(MRI)等影像勾画靶区和正常组织。勾画的靶区有原发肿瘤区的计划靶区PGTVnx、转移淋巴结肿瘤区的计划靶区PGTVnd、亚临床病灶高危靶区和低危靶区的计划靶区分别为PTV1和PTV2。危及器官主要勾画脊髓、脑干、左右腮腺等。

### 1.2 治疗计划设计

在Eclipse 13.5计划系统上设计VMAT计划,Varian Trilogy加速器上执行。采用6 MV光子线,设置为两条全弧,分别为逆时针方向179°~181°(准直器角度15°)和顺时针方向181°~179°(准直器角度345°)。PGTVnx、PGTVnd、PTV1和PTV2的处方剂量分别为70、68、62和54 Gy,分33次完成。

### 1.3 三维剂量验证

将31例VMAT计划的RT Plan、RT Structure、RT Dose和CT图像传输至Compass系统中。IBA公司的Compass三维剂量验证系统,可由内置算法的筒串卷积(Collapsed Cone Convolution, CCC)算法模型对治

疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)的计划进行独立计算,得到独立三维剂量分布(Computed Dose Distribution, CDD)。也可采用MatriXX探测器阵列实际测量得到加速器的剂量在患者CT影像的重建三维剂量分布(Reconstructed Dose Distribution, RDD),对治疗计划及治疗实施的准确性进行验证<sup>[4]</sup>。分别对独立三维剂量分布与治疗计划系统分布(CDD-TPS)和重建三维剂量分布与治疗计划系统分布(RDD-TPS)进行 $\gamma$ 通过率比较。对于靶区和正常组织的 $\gamma$ 值, $\gamma < 1$ 表示为通过,阈值选择的是3%/2 mm、10%。

### 1.4 剂量学差异

Compass系统内置的CCC算法模型计算得到的独立三维剂量与治疗计划系统相比较,选取相应的靶区和危及器官的绝对百分剂量差异来进行研究。

其中绝对百分剂量差异 $= \left| (D_{\text{CDD}} - D_{\text{TPS}}) / D_{\text{TPS}} \right| \times 100\%$ 。

本研究中评价的剂量学参数有靶区的最大剂量 $D_{2\%}$ 、平均剂量 $D_{\text{mean}}$ 、最小剂量 $D_{98\%}$ ;危及器官比较脊髓 $D_{1\%}$ 、左右腮腺的 $D_{\text{mean}}$ 以及脑干 $D_{1\%}$ 和 $D_{\text{mean}}$ 。

### 1.5 统计学分析

所有数据均采用SPSS 20.0统计学软件进行分析,两组间指标比较采用配对 $t$ 检验, $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。应用Bland-Altman法检验两种验证方法的一致性,95%一致性界限来评估一致性效果。使用受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线来确定最佳 $\gamma$ 通过率阈值。

## 2 结果

### 2.1 $\gamma$ 通过率

由表1可知,CDD-TPS的Body(体轮廓)、PGTVnx、PGTVnd、PTV1、PTV2、脑干、脊髓、左右腮腺的 $\gamma$ 通过率平均值为93.32%~99.38%,RDD-TPS相应的 $\gamma$ 通过率平均值为92.33%~99.09%。两种验证方式的 $\gamma$ 通过率平均值均在90%以上。CDD-TPS与RDD-TPS相比较,在Body、PGTVnd、PTV1和PTV2的 $\gamma$ 通过率差异有统计学意义( $P < 0.05$ ),而PGTVnx、脑干、脊髓和左右腮腺的 $\gamma$ 通过率均无统计学意义( $P > 0.05$ )。

### 2.2 Bland-Altman一致性分析

Bland-Altman方法常用于两种方法在同个体上的测量结果进行一致性评价。本研究应用Bland-Altman方法检验CDD-TPS和RDD-TPS两种验证方法的一致性。以每个测量点两种方法测量结果的均值为横坐标,其差值为纵坐标绘制均值-差值散点图,计算得到95%一致性界限,观察界限内测试点来评估一致性效果<sup>[5]</sup>。31例鼻咽癌计划共有279个测试点。统计结果显示:两

表 1 鼻咽癌治疗计划三维剂量验证的  $\gamma$  通过率( $n=31$ , %,  $\bar{x} \pm s$ )

Tab.1 Gamma passing rate of treatment plans of nasopharyngeal carcinoma (NPC) in three-dimensional dose verification ( $n=31$ , %,  $Mean \pm SD$ )

所选结构	CDD-TPS	RDD-TPS	P 值
Body	93.32±1.47	95.02±1.58	0.001
PGTVnx	94.08±3.42	92.63±3.88	0.148
PGTVnd	95.18±3.63	92.33±4.47	0.003
PTV1	94.88±2.55	92.71±3.45	0.005
PTV2	95.55±2.02	92.55±2.22	0.002
脑干	99.38±0.71	97.85±2.73	0.060
脊髓	97.77±2.26	99.09±1.33	0.051
左腮腺	98.79±1.80	98.28±2.61	0.348
右腮腺	98.62±1.48	98.54±1.60	0.823

种测量方法  $\gamma$  通过率均值为 86.21%~100.00%, 平均(95.81±3.10)%; 差值-14.4%~14.28%, 平均(1.17±3.93)%。Bland-Altman 分析结果: 差值检验提示两种方法在三维剂量验证测量时存在统计学差异, 差值的 95% 一致性界限为 -6.56%~8.90%。在 279 个点中位于一致性界限置信区间范围外的有 13 个, 占比 4.66%(13/279)。从图 1 可以看出, CDD-TPS 和 RDD-TPS 两种验证方法有 95.34% 的测试点落在一致性界限内, 因此可认为两种验证方法之间具有较好的一致性, 从而验证了独立三维剂量验证应用于鼻咽癌 VMAT 计划中是可行的。

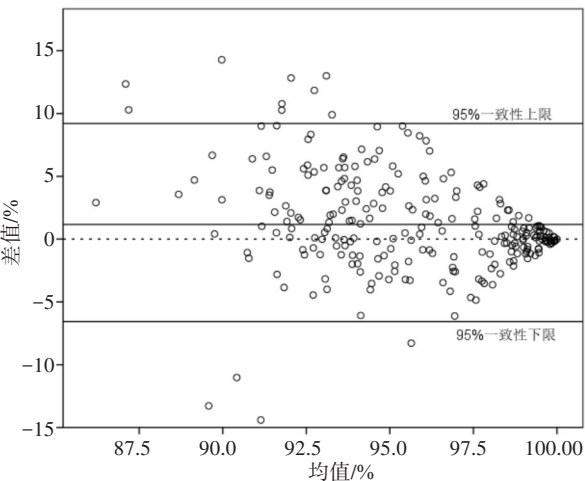


图 1 CDD-TPS 和 RDD-TPS  $\gamma$  通过率均值-差值散点图

Fig.1 Mean-difference scatter plot of gamma passing rates in CDD-TPS and RDD-TPS

2.3 最佳阈值的确定

ROC 曲线是临床评价诊断试验的重要工具, 它是二元分类模型, 以假阳性(1-特异性)为 x 轴、敏感性(真阳性)为 y 轴绘制而成的曲线, 曲线下面积

(Area Under the Curve, AUC) 显示诊断判别阳性和阴性的能力。通过寻找最佳阈值, 使得敏感性和特异性达到平衡, 减少漏判和误判的发生<sup>[6]</sup>。31 例鼻咽癌治疗计划从 DVH 中剂量学参数获得绝对百分剂量差异, 一旦计划中任意一个参数出现绝对百分剂量差异 > 5%, 该计划将被视为临床上不可接受的计划。共有 8 例为临床可接受计划, 其余 23 例均为不可接受计划, 见表 2。

利用图 2 和表 2, 可生成 VMAT 计划中 5 种不同结构的 AUC, 根据 AUC 值来评价哪种结构参数作为  $\gamma$  通过率的评价指标效果最好, 约登系数(即敏感性+特异性-1)最大时确定最佳  $\gamma$  通过率阈值。结果如表 3 所示。在 Body、PGTVnx、PGTVnd、PTV1 和 PTV2 5 种结构中, 选取 PTV2 将得到最大的 AUC 值(0.946), 其中最大约登系数为 0.826, 对应的  $\gamma$  通过率最佳阈值为 95.41%。

3 讨论

精确放射治疗对于放射治疗计划的质控要求非常严格。传统的二维剂量验证通过将治疗计划移植到模体内进行测量, 比较所选取层面上计划系统计算和实际测量之间的差异, 获得二维平面的剂量信息。但是单一平面的剂量验证无法判断患者计划是否与机器照射得到的测量剂量相一致, 而且没有具体的解剖信息, 不能清晰看到偏差出现的位置, 对临床的指导意义有限。Compass 三维验证系统可以弥补传统的二维剂量验证的不足, 并能给出与患者解剖结构相关的体积剂量误差、 $\gamma$  通过率、误差的位置等信息, 有利于临床的评估。

本研究基于 Compass 的三维剂量验证进行治疗前的独立三维剂量验证工作, 目前国内外已有相关的文献对独立三维剂量验证进行了研究。Jeong 等<sup>[7]</sup>应用 Compass 进行前列腺癌 VMAT 计划的三维剂量验证, 分别将独立三维剂量和三维剂量重建的剂量分布进行了比较, 结果显示所有结构的  $\gamma$  失败率在 2 mm/2% 标准中小于 8%, 而在 3 mm/3% 标准中则小于 1%。刘潇等<sup>[8]</sup>验证了 Mobius 3D 在宫颈癌 IMRT 计划中进行独立三维剂量验证的可行性, 可提高计划验算的准确性。赵涵铨等<sup>[9]</sup>基于日志文件的三维独立剂量验证系统在 IMRT 质控中的可行性研究表明该系统可快速进行临床计划的验证, 为治疗提供安全可靠的技术。

本研究结果显示, 在 3%/2 mm、10% 标准下 CDD-TPS 和 RDD-TPS 的  $\gamma$  通过率平均值在 90% 以上。从得到的绝对百分剂量差异数据来看, PGTVnx 的  $D_{98\%}$ 、脊髓的  $D_{1\%}$ 、左右腮腺的  $D_{mean}$  差异平均值均大

表 2 鼻咽癌治疗计划剂量学参数的绝对百分剂量差异( $n=31, \%$ )

Tab.2 Absolute percentage dose difference in dosimertric parameters of NPC plan ( $n=31, \%$ )

计划	PGTVnx			PGTVnd		PTV1		PTV2		脊髓	脑干		左腮腺	右腮腺	接受程度
	D <sub>2%</sub>	D <sub>98%</sub>	D <sub>mean</sub>	D <sub>98%</sub>	D <sub>mean</sub>	D <sub>98%</sub>	D <sub>mean</sub>	D <sub>98%</sub>	D <sub>mean</sub>	D <sub>1%</sub>	D <sub>1%</sub>	D <sub>mean</sub>	D <sub>mean</sub>	D <sub>mean</sub>	
1	0.7	2.9	0.4	0.5	0.5	1.2	0.3	0	0.4	4.0	1.0	0.7	3.7	5.1	不接受
2	0.9	0.9	0.3	1.4	0.3	0.6	0.1	0.2	0.2	2.2	1.5	3.0	5.5	4.2	不接受
3	1.0	1.33	0	0.6	0.5	1.4	0	0	0.4	3.5	2.0	1.4	4.3	1.6	接受
4	1.4	2.9	0.5	0	1.0	0	0	0	1.0	5.9	0	1.8	1.9	1.4	不接受
5	0.5	8.0	0.4	0	1.3	3.4	0.6	0.2	0.5	4.5	0.4	1.3	2.7	1.9	不接受
6	1.4	1.3	1.0	1.0	0.6	0.8	0.8	0.1	0.4	2.4	2.8	1.3	5.6	2.4	不接受
7	1.9	1.3	0.5	0.5	0.9	0.4	0.5	0.5	0.9	4.0	0.9	0.9	4.4	0.2	接受
8	1.2	3.0	0.9	0.4	0.3	3.1	0.9	0.1	1.0	3.5	2.9	0.1	6.3	1.5	不接受
9	0.5	0.8	1.1	0	1.3	0.9	0.1	0.5	0.5	5.4	2.3	6.6	4.5	0	不接受
10	0.6	4.8	0	0.4	0.9	1.5	0	0	0	2.7	0.3	0.5	4.6	1.2	接受
11	1.7	5.8	0.8	0.5	1.2	2.3	0.3	0.4	0.4	4.6	3.2	1.5	7.6	5.0	不接受
12	0.3	7.5	0	1.3	0.8	7.0	0.5	1.5	0.5	1.1	0.7	0.3	2.2	1.8	不接受
13	0.9	3.8	0.6	0.8	0.6	2.4	0.1	0.6	0	2.6	0.4	5.1	2.1	3.1	不接受
14	1.0	8.1	0.2	0.2	1.2	3.1	0.2	1.0	0.2	4.0	1.0	0.6	7.1	4.4	不接受
15	0.5	1.7	0.2	0.1	0.6	2.0	0.4	1.3	0.4	4.1	0.5	0.8	1.6	4.4	接受
16	1.0	0.2	0.5	0.2	1.9	0.2	0.7	0.4	0.6	5.1	0.9	0	5.0	4.2	不接受
17	0.5	2.3	0	0.6	1.4	1.2	0.1	0.5	0.3	4.9	0.2	2.0	5.1	3.1	不接受
18	1.9	1.0	0.5	0.5	1.4	0.4	0.5	0	0.5	3.9	1.6	2.7	5.9	3.8	不接受
19	0.2	1.7	0.6	0.1	0.6	1.4	0.6	0.4	0	3.3	0.7	1.8	4.6	3.4	接受
20	1.0	2.7	0.6	0.3	0.7	2.6	0.2	0.5	0.2	5.1	1.2	1.8	1.1	1.7	不接受
21	0.6	5.1	0.6	1.1	0.7	5.5	0.8	0.3	0.4	2.3	1.9	1.6	3.8	0.5	不接受
22	1.0	4.0	0.7	1.0	0.7	5.5	0.4	0.5	0.5	3.5	3.2	2.6	5.0	3.6	不接受
23	2.5	8.3	0.1	0.7	0.3	8.0	0.9	1.5	0	4.7	0.3	0.8	6.3	0.6	不接受
24	0.5	7.7	0.3	0.4	1.3	3.4	0.4	1.0	0.3	5.8	0.4	1.1	0.5	0.5	不接受
25	1.8	4.6	1.0	1.4	0.4	2.4	0.7	0.2	1.5	5.5	3.0	1.8	7.5	9.7	不接受
26	0.9	6.3	0.3	0.8	1.0	4.7	0	0	0.3	4.2	1.6	1.0	6.8	6.7	不接受
27	0.9	1.9	0.8	0.5	1.5	0.2	0.5	0.5	0.7	4.4	0.5	0.6	5.6	3.7	不接受
28	0.8	0.6	0.7	0.8	0.6	0.8	0.6	0.3	0	4.3	0.5	1.3	5.2	4.9	不接受
29	0.9	0.6	0.1	0.2	0.7	0.7	0	0	0.2	3.1	1.0	1.6	4.7	2.2	接受
30	0.7	1.4	0.2	1.0	0.1	2.5	0	0.5	0	3.4	2.5	0.5	4.9	1.9	接受
31	0.8	3.8	0	1.1	0	2.6	0	1.0	0.6	3.2	2.3	1.9	4.2	4.7	接受
均值	0.98	3.43	0.45	0.59	0.82	2.33	0.36	0.45	0.42	3.91	1.35	1.58	4.53	3.01	-

于 3%。Eclipse 计划系统常采用各向异性分析算法 (Anisotropic Analytical Algorithm, AAA), 而 Compass 采用的是 CCC 算法, 不同算法之间的差异造成较大的百分剂量偏差从而导致临床上不可接受计划的增多。PGTVnx 主要是原发肿瘤区, 存在较多空腔且临近高密度骨<sup>[10]</sup>。AAA 在对组织异质性的敏感性上低于 CCC 算法<sup>[11-13]</sup>。陈华等<sup>[14]</sup>研究空腔边缘剂量 CCC 算法和 AAA 的准确性, 与蒙特卡罗算法相比 CCC 算

法和 AAA 均高估了剂量, CCC 算法计算精确性优于 AAA, 但误差依然存在。腮腺由于比较靠近皮肤, 且部分处于低剂量区域, 因此  $D_{mean}$  误差较大, 最大误差可达 9.7%。这与柏朋刚等<sup>[15]</sup>研究结果类似。

TG218 号报告建议: 3%/2 mm 的  $\gamma$  通过率通用容差限值  $\geq 95\%$ , 通用干预限值  $\geq 90\%$ <sup>[16-17]</sup>。本研究使用治疗计划 DVH 中剂量学参数的差异和  $\gamma$  通过率作为标准, 结合 ROC 曲线确定最佳  $\gamma$  通过率阈值。AUC



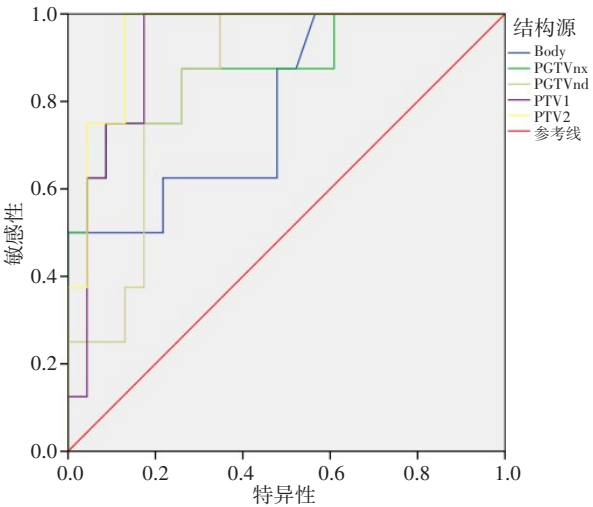


图 2 鼻咽癌治疗计划中 5 种不同结构的 ROC 曲线

Fig.2 Receiver operating characteristic curves of 5 different kinds of structures in NPC plan

表 3 鼻咽癌治疗计划中 5 种结构 ROC 曲线确定的最佳阈值参数

Tab.3 The optimal threshold parameters determined by the ROC curve of 5 kinds of structures in NPC plan

所选结构	AUC	置信区间	最佳阈值/%	最大约登系数
Body	0.834	0.660~1.000	94.35	0.582
PGTVnx	0.924	0.830~1.000	95.13	0.745
PGTVnd	0.772	0.610~0.933	94.97	0.602
PTV1	0.916	0.853~1.000	94.67	0.709
PTV2	0.946	0.856~1.000	95.41	0.826

值能综合反映 ROC 曲线的特性,表示试验标准中阳性和阴性诊断结果分布的重叠程度,反映了诊断试验价值的高低。当数值为 0.5~0.7 时,诊断价值较小,分类的准确性不高;0.7~0.9 时,诊断价值中等,分类准确性较好;0.9 以上时,诊断价值较高,分类的准确性很高<sup>[18]</sup>。从表 3 的数据来看,5 种不同结构中 PTV2 的 AUC 值最大(其值为 0.946),适合选取 PTV2 用于诊断  $\gamma$  通过率,其阈值为 95.41%,此时敏感性和特异性比例趋于平衡。如果选用常规的  $\gamma$  通过率限值 95%,其敏感性基本不变,但是特异性降低,增加了可接受计划被误判的机会。刘礼东等<sup>[19]</sup>研究宫颈癌 VMAT 计划验证中  $\gamma$  通过率的最佳阈值,全局 3%/3 mm 和 2%/2 mm 标准下最佳阈值分别为 98.3% 和 87.05%,在 3%/3 mm 标准下最佳阈值相对于常规阈值的全局  $\gamma$  敏感性可达 0.93,得到显著提升,提高了阻止不可接受计划通过的能力,也降低了可接受计划误判的可能。闫慧芳等<sup>[20]</sup>研究基于日志文件分析 PerFRACTION 系统的敏感度和特异度,利用 PerFRACTION 系统测量工具对头颈 VMAT 计划的  $\gamma$  通过率进行 ROC 曲线分析,在敏感度和特异度均较

高的情况下,获得 3%/2 mm 标准下头颈 VMAT 计划对应的最佳  $\gamma$  通过标准分别是 96.32%,为头颈 VMAT 计划的 QA 提供了更为精确的通过标准,实现精准放疗。

综上所述,独立三维剂量验证可作为计划系统计算准确性的检验,同时在不影响临床治疗的情况下,可快速地对计划进行治疗前的验证。最佳阈值有助于计划的筛查,对于独立三维剂量验证  $\gamma$  通过率低于最佳阈值的计划,可结合实测的重建三维剂量分布,不仅可以筛选出明显错误的计划,还可以减轻物理师的验证工作量。独立三维剂量验证可以快速地为患者提供治疗前治疗计划计算准确性的检验,为放疗计划准确的实施提供安全、有效的技术保障。

【参考文献】

[1] AKBAS U, KOKSAL C, KESEN N D, et al. Nasopharyngeal carcinoma radiotherapy with hybrid technique[J]. Med Dosim, 2019, 44(3): 251-257.

[2] SUN X S, LI X Y, CHEN Q Y, et al. Combinatorial strategies of radiotherapy in the management of nasopharyngeal carcinoma[J]. Br J Radiol, 2019, 92(3): 20190209.

[3] 程燕铭, 胡彩容, 阴晓娟, 等. 鼻咽癌 IMRT 和 VMAT 计划对机器跳数和 MLC 误差剂量学敏感度对比研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(10): 1199-1203.

CHENG Y M, HU C R, YIN X J, et al. Dosimetric sensitivity with MU and MLC errors in IMRT versus VMAT plan for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(10): 1199-1203.

[4] 褚薛刚, 邢晓汾, 崔桐, 等. CompassR 在宫颈癌调强放疗三维剂量验证中的应用研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2015, 35(7): 548-549.

CHU X G, XING X F, CUI T, et al. Study on the application of CompassR in three-dimensional dose verification of intensity modulated radiotherapy for cervical cancer[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2015, 35(7): 548-549.

[5] 王颖, 丁金旺, 韩志江, 等. 超声检查和病理测量甲状腺乳头状癌肿瘤大小的对比研究[J]. 中国耳鼻咽喉头颈外科, 2017, 24(3): 149-152.

WANG Y, DING J W, HAN Z J, et al. Consistency of tumor sizes measured by sonographic and pathological examination in papillary thyroid carcinoma[J]. Chinese Archives of Otolaryngology-Head and Neck Surgery, 2017, 24(3): 149-152.

[6] 刘礼东, 杨振, 邱小平, 等. 食管癌调强计划三维剂量验证中  $\gamma$  通过率最佳阈值的研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2018, 38(4): 297-301.

LIU L D, YANG Z, QIU X P, et al. The optimal gamma passing rate thresholds of IMRT dosimetric verification in the treatment of esophageal cancer[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2018, 38(4): 297-301.

[7] JEONG Y, JEONG G O, JEONG K K, et al. Three-dimensional dose reconstruction-based pretreatment dosimetric verification in volumetric modulated arc therapy for prostate cancer[J]. Radiat Oncol J, 2020, 38(1): 60-67.

[8] 刘潇, 尹勇, 王莉, 等. 宫颈癌 IMRT 计划独立三维剂量验证的初步应用与探讨[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(4): 433-436.

LIU X, YIN Y, WANG L, et al. Preliminary application and discussion of independent 3D dose calculation in intensity-modulated radiotherapy for cervical cancer[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26 (4): 433-436.

[9] 赵涵铨, 吕胜, 王大荣, 等. 基于日志文件的三维独立剂量验证系统在 IMRT 质控中的可行性研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27 (10): 920-924.

ZHAO H Y, CHANG S, WANG D J, et al. Evaluation of the feasibility of log file-based three-dimensional independent dose verification system in quality assurance of intensity-modulated radiation therapy

- [J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2018, 27(10): 920-924.
- [10] 刘志萍, 田源, 王洪智, 等. 鼻咽癌IMRT中气腔对靶区及OAR剂量影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(8): 862-866.  
LIU Z P, TIAN Y, WANG H Z, et al. Dosimetric effects of air cavity on target volume and organs at risk during intensity-modulated radiation therapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(8): 862-866.
- [11] VANGVICHITH M, AUTRET D, TIPLICA T, et al. Comparison of five dose calculation algorithms in a heterogeneous media using design of experiment[J]. Phys Med, 2019, 61(3): 103-111.
- [12] CHOPRA K L, LEO P, KABAT C, et al. Evaluation of dose calculation accuracy of treatment planning systems in the presence of tissue heterogeneities[J]. Ther Radiol Oncol, 2018, 2: 28.
- [13] KATHIRVEL M, SUBRAMANIAN S, CLIVIO A, et al. Critical appraisal of the accuracy of Acuros-XB and anisotropic analytical algorithm compared to measurement and calculations with the compass system in the delivery of RapidArc clinical plans[J]. Radiat Oncol, 2013, 8(1): 140.
- [14] 陈华, 徐义果, 庄志邈, 等. 放疗计划系统中空腔边缘剂量计算准确性研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, 26(1): 69-73.  
CHEN H, XU Y G, ZHUANG Z M, et al. Dose accuracy research on air cavity interface in treatment planning system[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(1): 69-73.
- [15] 柏朋刚, 李奇欣, 陈开强, 等. COMPASS系统在鼻咽癌容积旋转调强剂量验证中的应用[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2012, 32(3): 304-307.  
BAI P G, LI Q X, CHEN K Q, et al. Dosimetric verification of volumetric modulated arc therapy in nasopharyngeal carcinoma using COMPASS 3D patient anatomy based system[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2012, 32(3): 304-307.
- [16] 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.
- [17] 肖青, 李光俊, 李治斌, 等. 基于AAPM TG-218报告应用统计过程控制技术监测患者个体化容积旋转调强放疗质量保证过程的初步研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2020, 37(5): 842-847.  
XIAO Q, LI G J, LI Z B, et al. Preliminary study on monitoring patient-specific volumetric modulated arc therapy quality assurance process with statistical process control methodology on the basis of TG-218 report[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2020, 37(5): 842-847.
- [18] CARLONE M, CRUJE C, RANGEL A, et al. ROC analysis in patient specific quality assurance[J]. Med Phys, 2013, 40(4): 042103.
- [19] 刘礼东, 杨振, 钟美佐, 等. 宫颈癌容积调强计划验证中伽马通过率最佳阈值研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2019, 28(1): 32-36.  
LIU L D, YANG Z, ZHONG M Z, et al. Study of the optimal thresholds of gamma passing rate in VMAT plan verification for cervical cancer[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2019, 28(1): 32-36.
- [20] 闫慧芳, 刘洪源, 杨志勇, 等. 基于日志文件分析PerFRACTION系统的敏感度和特异度[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(4): 404-410.  
YAN H F, LIU H Y, YANG Z Y, et al. Analysis of sensitivity and specificity of PerFRACTION system based on log files[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(4): 404-410.

(编辑: 薛泽玲)