

## 独立验证中剂量差异分布及其与肿瘤类型相关性的初步研究

潘淑豪, 汪志

安徽医科大学第一附属医院肿瘤放疗科, 安徽 合肥 230022

**【摘要】目的:**对调强放射治疗(IMRT)计划进行分类独立验证,探讨计划剂量差异分布及其与肿瘤类型的相关性,并建立预测模型。**方法:**收集180例头颈部、胸部及腹部肿瘤患者固定野IMRT计划,采用独立样本 $t$ 检验对治疗计划系统中初始计算剂量与独立验证剂量进行一致性分析,以评估独立验证的可行性。比较不同肿瘤间计划靶区(PTV)的剂量差异分布。采用相关性分析及多元线性回归方法分析PTV剂量差异与靶区适形度指数(CI)、均匀性指数间相关性。**结果:**头颈部、胸部及腹部肿瘤PTV剂量差异均在 $\pm 1.2\%$ 以内,初始剂量与验证剂量间3%/3 mm平均 $\gamma$ 通过率 $>99.5\%$ ,显示独立验证与治疗计划系统的剂量分布具有良好一致性。头颈部、胸部及腹部计划中PTV剂量差异分布不同,且与CI显著相关。根据CI可在独立验证中初步判断PTV剂量差异,基于CI及均匀性指数的多元回归方程可用于预估IMRT计划的剂量验证差异。**结论:**独立验证可快速实现放疗计划治疗前验证,提高放疗计划质量控制的效率。基于剂量差异的预估对放疗计划的优化起到一定指导作用。

**【关键词】**调强放射治疗;独立剂量验证;质量控制;剂量差异

**【中图分类号】**R811.1;R814.2

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2024)03-0289-05

## Preliminary study on the distributions of dose differences and their correlations with tumor types in independent verification

PAN Shuhao, WANG Zhi

Department of Radiation Oncology, the First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230022, China

**Abstract: Objective** To explore the distributions of dose differences and their correlations with tumor types in independent three-dimensional dose verification for intensity-modulated radiotherapy (IMRT) plan, and to establish prediction models. **Methods** The fixed field IMRT plans of 180 patients with head and neck, chest, and abdominal tumors were collected. Independent sample  $t$ -test was used to analyze the consistency between the initial dose calculated in treatment planning system and the verified dose for evaluating the feasibility of independent validation. The distributions of planning target volume (PTV) dose differences among different tumor types were analyzed. The correlations of PTV dose differences with conformity index (CI) and homogeneity index were analyzed using correlation analysis and multiple linear regression method. **Results** The PTV dose differences for head and neck, chest, and abdominal tumors were within  $\pm 1.2\%$ , and the average 3%/3 mm gamma passing rate between the initial dose and the verified dose was higher than 99.5%, indicating good consistency in dose distribution between independent validation and treatment planning system. The distributions of PTV dose differences were different in head and neck, chest, and abdominal plans, and were significantly correlated with CI which could be used to preliminarily determine the PTV dose differences in independent validation. The multiple regression equation based on CI and homogeneity index could be used to estimate the dose verification differences of IMRT plan. **Conclusion** Independent verification can quickly achieve pre-treatment validation for radiotherapy plans, improving the efficiency of quality control of radiotherapy plans. The estimation based on dose differences provides guidance for optimizing radiotherapy plans.

**Keywords:** intensity-modulated radiotherapy; independent dose verification; quality assurance; dose difference

### 前言

调强放射治疗(Intensity-Modulated Radiotherapy, IMRT)可以实现靶区内更好的剂量分布,并进一步保护正常组织,已成为肿瘤放疗的常规技术手段。IMRT计划涉及复杂的机械和物理学参

**【收稿日期】**2023-09-06

**【基金项目】**安徽高校协同创新项目(GXXT-2022-011)

**【作者简介】**潘淑豪,博士,工程师,研究方向:肿瘤放射物理, E-mail: haoshu\_123@163.com

数,为保证放疗计划的安全实施,有必要对患者放疗计划进行质量保证(Quality Assurance, QA),验证治疗计划系统(Treatment Planning System, TPS)输出计划的剂量分布,以确保剂量传递的精确性<sup>[1-2]</sup>。目前计划验证主要包括基于测量和基于计算两大类方法。基于测量的剂量验证无法考虑患者的异质性解剖结构且测量设备的验证精度有限,测量过程耗时耗力,降低需尽量开始治疗如姑息性放疗的计划执行效率。基于计算的独立验证满足对计划QA高效率的要求,目前国内外关于独立验证已有相关研究<sup>[3-5]</sup>。刘潇等<sup>[6]</sup>验证了Mobius3D在宫颈癌调强计划验证中的可行性,可提高验算准确性;赵涵钰等<sup>[7]</sup>展开了基于日志文件的剂量验证研究,可实现临床计划的快速验证;曹午飞等<sup>[8]</sup>验证了IMsure软件调强质控的可行性,可用于计划系统初期的验收;Ono等<sup>[9]</sup>对肺癌立体定向放射治疗计划进行了独立验算,质控过程省时高效。独立验证涉及多种方法,包括基于锥形束CT<sup>[10]</sup>和电子射野影像装置<sup>[11]</sup>的剂量计算以及蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)验算<sup>[12]</sup>等。剂量独立验证可以重建患者体内剂量分布,并根据剂量体积直方图(Dose-Volume Histogram, DVH)对靶区及危及器官(Organs-at-Risk, OAR)做出针对性评价,目前常用算法为MC算法<sup>[13-15]</sup>。基于计算的剂量验证还未被广泛深入研究,且不同机构间关于IMRT计划验证的方法和结果分析存在差异,尚未有统一标准<sup>[16]</sup>。本研究将基于AAPM-TG218号报告提出的计划验证容差限值<sup>[17]</sup>分析独立验证在头颈部、胸部及腹部肿瘤IMRT计划中的可行性;研究不同肿瘤间剂量差异分布,并对剂量差异的影响因素做初步研究,为优化放疗计划提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 临床资料

选择2021年8月至2022年2月在安徽医科大学第一附属医院接受放疗的头颈部、胸部及腹部肿瘤患者,总计180例,其中头颈部28例、胸部83例、腹部69例;涉及的瘤种有全脑、鼻咽癌、乳腺癌、食管癌、宫颈癌及前列腺癌。患者扫描CT图像经本地瓦里安ARIA网络传输至TPS。

### 1.2 治疗计划设计

采用美国瓦里安VitalBeam加速器执行放疗计划,选择6 MV光子线输出,剂量率为600 MU/min。TPS为瓦里安Eclipse 13.6系统,采用向异性分析算法(Anisotropic Analytical Algorithm, AAA)对头颈部、胸部及腹部计划进行剂量初始计算,计算网格为2.5 mm。放疗计划均采用固定野调强技术,5~7个照

射野不等。治疗实施前均通过计划验证,3%/3 mm平均 $\gamma$ 通过率为98.51%±1.44%。

### 1.3 计划独立验证

采用德国PTW公司的VERIQA软件进行放疗计划的独立验证。IMRT计划数据通过ARIA网络传至VERIQA服务器,数据包括患者CT-DICOM图像、RT Plans、RT Structures及RT Dose。VERIQA基于MC算法重建光子的剂量分布。分析独立验证中计划靶区(Planning Target Volume, PTV)的剂量差异,并使用3%/3 mm的平均 $\gamma$ 通过率评估PTV和OAR在初始计算与验算间的剂量一致性。VERIQA自动计算并输出验证报告,内容涵盖靶区剂量、DVH比较、 $\gamma$ 通过率等。

### 1.4 剂量学差异

根据ICRU83报告<sup>[18]</sup>计算PTV的适形度指数(Conformity Index, CI)及均匀性指数(Homogeneity Index, HI)。分析比较PTV剂量差异,涉及的剂量学参数包括最小剂量 $D_{2\%}$ 、最大剂量 $D_{98\%}$ 、平均剂量 $D_{mean}$ 、中位剂量 $D_{50\%}$ 和95%体积剂量 $D_{95\%}$ 。OAR比较初始计算与验算间 $\gamma$ 通过率。

剂量学差异值由式(1)获得:

$$\text{Diff}(\text{TPS}, \text{Ver}) = \frac{D_{\text{Ver}} - D_{\text{TPS}}}{D_{\text{TPS}}} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $D_{\text{Ver}}$ 为VERIQA验算剂量, $D_{\text{TPS}}$ 为TPS初始计算剂量。

### 1.5 统计学分析

使用SPSS 20.0进行数据分析,采用均数±标准差表示,评估验证软件与TPS的一致性。采用独立样本 $t$ 检验分析头颈部、胸部及腹部肿瘤间剂量验算的差异, $P<0.05$ 为差异有统计学意义。对头颈部、胸部及腹部肿瘤剂量差异进行相关性分析及多元回归分析。

## 2 结果

### 2.1 PTV参数及 $\gamma$ 通过率

头颈部、胸部和腹部肿瘤PTV的CI和HI的独立样本 $t$ 检验结果显示头颈部及腹部肿瘤PTV的CI和HI均优于胸部肿瘤,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。对于PTV初始剂量与验算剂量间的平均 $\gamma$ 通过率进行分析发现腹部的 $\gamma$ 通过率最高,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),显示验证软件与TPS具有很好的一致性(表1)。

### 2.2 PTV剂量差异分布

在PTV初始计算与验算间的剂量误差中,乳腺癌的验算剂量相对于TPS初始剂量偏高;全脑、鼻咽癌、食管癌、宫颈癌及前列腺癌的验算剂量基本低于TPS初始剂量(图1)。

表 1 头颈部、胸部及腹部病例 PTV 剂量学比较( $\bar{x}\pm s$ )

Table 1 Dosimetric comparison of PTV for head and neck, chest, and abdominal tumors (*Mean±SD*)

指标	头颈部	胸部	腹部	P 值		
				头颈部 vs 胸部	头颈部 vs 腹部	胸部 vs 腹部
CI	0.86±0.04	0.73±0.10	0.86±0.04	0.000	0.682	0.000
HI	0.11±0.06	0.17±0.09	0.11±0.04	0.016	0.862	0.000
γ 通过率/%	99.27±0.84	99.37±1.26	99.87±0.19	0.523	0.005	0.001

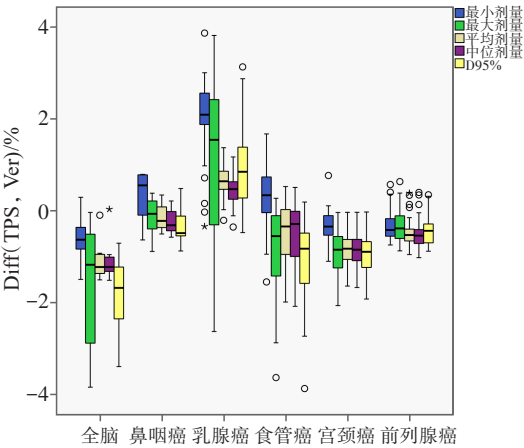


图 1 不同计划 PTV 剂量差异对比箱线图

Figure 1 Boxplot of PTV dose differences among different plans

头颈部、胸部及腹部的 PTV 剂量差异基本在 1% 以内,进一步证明验证软件与 TPS 间具有良好的一致性。对 PTV 初始计算与验算间剂量差异进行独立样本 *t* 检验,受检验参数包括  $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 、 $D_{mean}$ 、 $D_{50\%}$  及  $D_{95\%}$ ,结果显示胸部肿瘤 PTV 的剂量误差与头颈部及腹部肿瘤相比,差异有统计学意义( $P<0.05$ ),头颈部与腹部间 PTV 剂量误差的差异无统计学意义( $P>0.05$ )(表 2)。

2.3 相关性分析

PTV 剂量差异与 CI 显著相关(均  $P<0.005$ ),且为负相关关系;PTV 的  $D_{2\%}$ 、 $D_{mean}$ 、 $D_{50\%}$  及  $D_{95\%}$  剂量差异与 HI 显著相关( $P<0.001$ ),为正相关关系。详见表 3。

表 2 头颈部、胸部及腹部病例 PTV 剂量差异比较( $\bar{x}\pm s$ )

Table 2 Comparison of PTV dose differences for head and neck, chest, and abdominal tumors ( $\bar{x}\pm s$ )

参数	头颈部	胸部	腹部	独立样本 <i>t</i> 检验 P 值		
				头颈部 vs 胸部	头颈部 vs 腹部	胸部 vs 腹部
$D_{2\%}$	-0.21±0.71	1.11±1.12	-0.33±0.34	0.000	0.539	0.000
$D_{98\%}$	-0.99±1.31	0.03±1.63	-0.71±0.51	0.029	0.437	0.000
$D_{mean}$	-0.69±0.61	0.04±0.75	-0.70±0.38	0.001	0.960	0.000
$D_{50\%}$	-0.72±0.58	-0.06±0.72	-0.73±0.40	0.002	0.943	0.000
$D_{95\%}$	-1.19±1.03	-0.15±1.32	-0.76±0.48	0.006	0.147	0.000

表 3 PTV 剂量差异与 CI、HI 相关性

Table 3 Correlations of PTV dose differences with CI and HI

参数	CI		HI	
	Pearson 相关系数	P 值	Pearson 相关系数	P 值
$D_{2\%}$	-0.527	0.000	0.455	0.000
$D_{98\%}$	-0.234	0.004	0.055	0.503
$D_{mean}$	-0.469	0.000	0.455	0.000
$D_{50\%}$	-0.442	0.000	0.458	0.000
$D_{95\%}$	-0.316	0.000	0.282	0.000

2.4 回归分析

对 CI、HI 与 PTV 剂量差异的关系行多元回归分析。对于  $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 、 $D_{mean}$ 、 $D_{50\%}$  及  $D_{95\%}$ ,各模型的复相关系数分别为 0.569、0.247、0.531、0.517 及 0.345,表明  $D_{2\%}$ 、 $D_{mean}$  及  $D_{50\%}$  的剂量验算差异与 CI、HI 的回归效果较好,这 3 种剂量参数的模型检验均  $P<0.001$ ,可见各模型的使用是合适的。表 4 显示了 3 种模型的回归系数及其标准误差、*t* 值和 *P* 值。3 种参数的标准回归方程分别为: $Diff_{min}=-0.398\times CI+0.249\times HI$ ; $Diff_{mean}=-0.319\times CI+0.29\times HI$ ; $Diff_{median}=-0.28\times CI+0.313\times HI$ 。

表4 不同模型的多元回归系数

Table 4 Multiple regression coefficients of different models

参数	CI				HI			
	非校准化系数		t值	P值	非校准化系数		t值	P值
	B	SE			B	SE		
D <sub>2%</sub>	-4.645	0.919	-5.053	0.000	3.611	1.143	3.160	0.002
D <sub>mean</sub>	-2.350	0.598	-3.932	0.000	2.650	0.743	3.568	0.000
D <sub>50%</sub>	-1.967	0.576	-3.416	0.001	2.735	0.716	3.821	0.000

2.5 OAR的γ通过率比较

头颈部OAR包括晶体、脑干、视交叉、视神经和腮腺;胸部OAR包括脊髓、食管、双侧肺和心脏;腹部OAR包括膀胱、直肠和股骨头。头颈部、胸部及腹部OAR的平均γ通过率均高于99%,说明VERIQA与TPS具有良好的一致性;在各器官平均γ通过率比较中,肺与食管的平均γ通过率偏低(图2)。

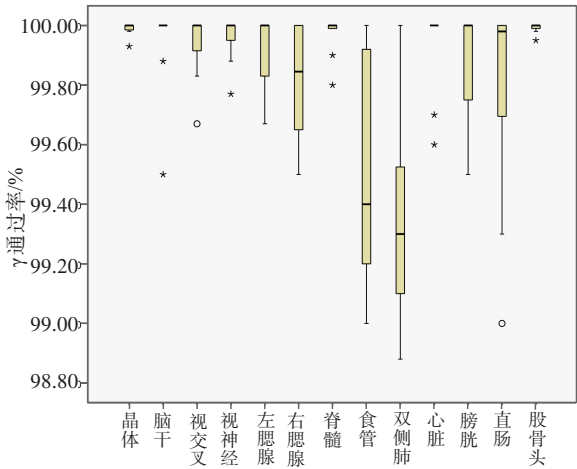


图2 OAR的γ通过率对比箱线图

Figure 2 Boxplot of gamma passing rates in OAR

3 讨论

放疗计划QA是现代肿瘤放疗过程中的关键环节,精准放疗对放疗计划QA提出更为严格的要求。Nelms等<sup>[19]</sup>发现传统的测量验证未能发现有临床意义的剂量学误差,错误均源于TPS模型、算法或配置,而非数据传输或执行问题,且传统的测量验证无法判断患者计划是否与测量剂量一致,不含具体的解剖信息,临床指导意义有限。VERIQA验证系统可以弥补传统的测量验证的不足,给出与患者解剖结构相关的体积剂量误差、γ通过率等信息,有利于临床评估及放疗安全。

本研究基于VERIQA的三维独立验证进行治疗前放疗计划的独立验证,结果发现PTV剂量差异符合AAPM-TG218号报告的建议值,说明治疗计划的独立验证符合QA要求,能为肿瘤患者的放疗实施提供保障。本研究涵盖头颈部、胸部及腹部IMRT计划,结果显示TPS与VERIQA关于剂量计算具有良好的-一致性,剂量差异均在±1.2%以内。相较头颈部及腹部,胸部肿瘤中乳腺癌靶区的TPS计算剂量偏低。IMRT计划中气腔会影响靶区及OAR剂量<sup>[20]</sup>,不同类型算法的剂量计算结果也不同<sup>[21]</sup>。剂量计算算法一般可分为a、b及c型,其中,a型为基于异质性修正的算法,如克拉克森算法;b型为应用叠加/卷积方法的基于模型的算法,如AAA或简串卷积(Collapsed Cone Convolution, CCC)算法<sup>[22]</sup>;c型算法可以在生物组织中计算剂量沉积,如外照射光子剂量算法(Acuros External Beam, AXB)和MC。与AAA、CCC等b型算法相比,AXB、MC等c型算法在异构区域的剂量测量更精确<sup>[23]</sup>。使用AAA时,靶区内空腔和骨性结构的体积会影响剂量的计算准确性<sup>[24]</sup>。在研究空腔边缘剂量CCC算法和AAA的准确性时,陈华等<sup>[25]</sup>发现MC算法剂量结果偏低-于CCC算法和AAA。在本研究中,TPS采用AAA,VERIQA采用MC算法。由于乳腺癌靶区紧邻肺腔且靠近皮肤,因此TPS初始剂量整体偏低。在靶区的γ通过率比较中,全脑计划的通过率偏低;在OAR比较中,肺及食管的通过率整体偏低。

本研究显示头颈部、胸部及腹部IMRT计划的剂量差异分布不同。肿瘤位置、处方剂量、射野布置、子野数及OAR限值等因素都会影响IMRT计划验证结果<sup>[26]</sup>。本研究利用靶区的适形度、均匀性对各因素进行归纳,研究上述各因素对PTV剂量差异的总体影响。在对适形度较差或均匀性较低的胸部肿瘤调强计划进行独立验证时,肿瘤靶区的剂量差异高于头颈部和腹部。相关性分析结果显示,PTV剂量差异与适形度负相关,与均匀性正相关,二者对剂

量差异的贡献相反,其中 $D_{98\%}$ 与 $D_{95\%}$ 的剂量差异与适形度、均匀性相关性偏低。在 $D_{98\%}$ 、 $D_{95\%}$ 剂量差异的回归分析中,复相关系数偏低,不适合建立回归模型。基于适形度、均匀性的回归模型可实现对PTV的 $D_{2\%}$ 、 $D_{\text{mean}}$ 及 $D_{50\%}$ 的剂量验算差异的初步预估。回归模型中,在适形度不变的情况下,均匀性越差的部位,剂量差异越正;在均匀性不变的情况下,适形度越高的部位,剂量差异越负。通过标准回归方程的回归系数发现,对于剂量验算差异,在 $D_{2\%}$ 及 $D_{\text{mean}}$ 中,适形度的贡献更大;在 $D_{50\%}$ 中,均匀性的贡献更大。

## 4 结论

独立验证可快速完成治疗前的计划验证,检验TPS剂量计算的准确性,为患者的计划实施提供更安全、有效的技术保障。基于MC算法的VERIQA软件显示出与TPS相当的剂量学一致性。基于剂量差异分布可筛选出明显错误的IMRT计划,提高计划QA的效率。根据本研究得出的回归方程可对各部位肿瘤靶区的剂量差异做出初步估计,在剂量学差异限值要求下,有助于放疗方案的进一步优化。

## 【参考文献】

- [1] Fraass B, Doppke K, Hunt M, et al. American Association of Physicists in Medicine Radiation Therapy Committee task group 53: quality assurance for clinical radiotherapy treatment planning[J]. Med Phys, 1998, 25(10): 1773-1829.
- [2] Ezzell GA, Burmeister JW, Dogan N, et al. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119[J]. Med Phys, 2009, 36(11): 5359-5373.
- [3] Takahashi R, Kamima T, Itano M, et al. A multi-institutional study of secondary check of treatment planning using Clarkson-based dose calculation for three-dimensional radiotherapy[J]. Phys Med, 2018, 49: 19-27.
- [4] 刘致滨, 石锦平, 李盈辉, 等. 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[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(11): 1359-1364.  
Liu ZB, Shi JP, Li YH, et al. Application of independent three-dimensional dose verification for volumetric modulated arc therapy of nasopharyngeal carcinoma[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(11): 1359-1364.
- [5] Jeong Y, Oh JG, Kang JK, 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.
- [6] 刘潇, 尹勇, 王莉, 等. 宫颈癌IMRT计划独立三维剂量验算的初步应用与探讨[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.
- [7] 赵涵钰, 昌胜, 王大奖, 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 HY, Chang S, Wang DJ, 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.
- [8] 曹午飞, 陈立新, 陈利, 等. 独立验算软件调强放疗质量控制可行性研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2011, 20(6): 521-524.  
Cao WF, Chen LX, Chen L, et al. The feasibility study of independent check for intensity-modulated radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2011, 20(6): 521-524.
- [9] Ono T, Mitsuyoshi T, Shintani T, et al. Independent calculation-based verification of volumetric-modulated arc therapy-stereotactic body radiotherapy plans for lung cancer[J]. J Appl Clin Med Phys, 2020, 21(7): 135-143.
- [10] Baeza JA, Zegers CM, de Groot NA, et al. Automatic dose verification system for breast radiotherapy: method validation, contour propagation and DVH parameters evaluation [J]. Phys Med, 2022, 97: 44-49.
- [11] Chendi A, Botti A, Orlandi M, et al. EPID-based 3D dosimetry for pre-treatment FFF VMAT stereotactic body radiotherapy plan verification using dosimetry CheckTM[J]. Phys Med, 2021, 81: 227-236.
- [12] Calvo-Ortega JF, Moragues-Femenia S, Laosa-Bello C, et al. Monte Carlo-based independent dose verification of radiosurgery HyperArc plans[J]. Phys Med, 2022, 102: 19-26.
- [13] Campos GF, Souto AC, Lencart JB, et al. Development of an independent MU calculation software for radiotherapy treatments with stereotactic cones[J]. J Appl Clin Med Phys, 2022, 23(4): e13542.
- [14] Kosaka T, Takatsu J, Inoue T, et al. Effective clinical applications of Monte Carlo-based independent secondary dose verification software for helical tomotherapy[J]. Phys Med, 2022, 104: 112-122.
- [15] Li YB, Ding SL, Wang B, et al. Extension and validation of a GPU-Monte Carlo dose engine gDPM for 1.5T MR-LINAC online independent dose verification[J]. Med Phys, 2021, 48(10): 6174-6183.
- [16] Tachibana H, Uchida Y, Miyakawa R, et al. Multi-institutional comparison of secondary check of treatment planning using computer-based independent dose calculation for non-C-arm linear accelerators [J]. Phys Med, 2018, 56: 58-65.
- [17] Kruse JJ, Mayo CS. Comment on "catching errors with patient-specific pretreatment machine log file analysis"[J]. Pract Radiat Oncol, 2013, 3(2): 91-92.
- [18] International Commission on Radiation Units and Measurements. Prescribing, recording, and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)[J]. J ICRU, 2010, 10(1): 1-3.
- [19] Nelms BE, Chan MF, Jarry G, et al. Evaluating IMRT and VMAT dose accuracy: practical examples of failure to detect systematic errors when applying a commonly used metric and action levels[J]. Med Phys, 2013, 40(11): 111722.
- [20] 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 ZP, Tian Y, Wang HZ, 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.
- [21] Zhu TC, Stathakis S, Clark JR, et al. Report of AAPM task group 219 on independent calculation-based dose/MU verification for IMRT[J]. Med Phys, 2021, 48(10): e808-e829.
- [22] Knös T, Wieslander E, Cozzi L, et al. Comparison of dose calculation algorithms for treatment planning in external photon beam therapy for clinical situations[J]. Phys Med Biol, 2006, 51(22): 5785-5807.
- [23] Han T, Mikell JK, Salehpour M, et al. Dosimetric comparison of Acuros XB deterministic radiation transport method with Monte Carlo and model-based convolution methods in heterogeneous media[J]. Med Phys, 2011, 38(5): 2651-2664.
- [24] 申正文, 谭霞, 李师, 等. 不同算法下鼻咽癌调强放射治疗计划中空腔和骨性结构对剂量评估的影响[J]. 中国生物医学工程学报, 2022, 41(2): 252-256.  
Shen ZW, Tan X, Li S, et al. The influence of cavity and bony structure on dosimetry evaluation in nasopharyngeal carcinoma IMRT plans using different algorithms [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2022, 41(2): 252-256.
- [25] 陈华, 徐义果, 庄志遛, 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 YG, Zhuang ZM, et al. Dose accuracy research on air cavity interface in treatment planning system[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, 26(1): 69-73.
- [26] 郭冉, 张艺宝, 李明辉, 等. 调强计划验证通过率的影响因素分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2018, 35(10): 1117-1121.  
Guo R, Zhang YB, Li MH, et al. Factors affecting the passing rate of intensity-modulated radiotherapy plans [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2018, 35(10): 1117-1121.

(编辑:谭斯允)