

调强计划验证通过率的影响因素分析

郭冉¹, 张艺宝², 李明辉¹, 李云东³, 戴建荣¹

1. 国家癌症中心/国家肿瘤临床医学研究中心/中国医学科学院北京协和医学院肿瘤医院, 北京 100021; 2. 北京大学肿瘤医院暨北京市肿瘤防治研究所放疗科/恶性肿瘤发病机制及转化研究教育部重点实验室, 北京 100142; 3. 济宁市第一人民医院, 山东济宁 272011

【摘要】目的:探讨计划验证通过率的影响因素。**方法:**选取Pinnacle计划系统设计的68例静态调强计划。将所有射野归到机架0°后利用PTW 729电离室矩阵、固体水模体基于Synergy加速器测量剂量分布,并使用PTW VeriSoft软件分析其与理论值差异。分别以Local和Max方式分析在3 mm/3%标准下的Gamma通过率并比较,然后分析机器跳数、子野数目、子野平均面积、子野面积的变异系数与Local通过率的相关性;回归得到通过率与各影响因素间的线性关系。**结果:**所有计划Local通过率均低于Max($P<0.01$);头颈部通过率与其他部位通过率差异存在显著统计学意义($P<0.01$);Local通过率与治疗部位、子野数目、子野面积变异系数存在线性关系。**结论:**Local通过率显著低于Max;头颈部计划通过率低于其他部位;根据计划的子野数目、机器跳数可以初步判断计划通过率;治疗部位、子野数目、子野面积的变异系数是影响Local通过率的主要因素,多重线性回归方程能对计划设计及选择起一定的指导作用。

【关键词】计划验证;PTW 729矩阵;调强放疗

【中图分类号】R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2018)10-1117-05

Factors affecting the passing rate of intensity-modulated radiotherapy plans

GUO Ran¹, ZHANG Yibao², LI Minghui¹, LI Yundong³, DAI Jianrong¹

1. National Cancer Center/National Clinical Research Center for Cancer/Cancer Hospital, Chinese Academy of Medical Sciences and Peking Union Medical College, Beijing 100021, China; 2. Department of Radiation Oncology, Peking University Cancer Hospital & Institute/Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education/Beijing), Beijing 100142, China; 3. Jining NO.1 People's Hospital, Jining 272011, China

Abstract: Objective To investigate the factors which affects the passing rate of intensity-modulated radiotherapy (IMRT) plans. **Methods** A total of 68 static IMRT plans designed by Pinnacle treatment planning systems were selected. After all radiation fields were normalized to gantry angle 0°, the dose distributions were measured with PTW 729 chamber array and solid water phantom based on Synergy accelerator. Then PTW VeriSoft software was used to compare the differences between measured results and computed values. Using 3 mm/3% criteria, the Gamma passing rates of Local and Max were analyzed and compared. The correlations between the passing rate of Local and various factors, such as monitor unit, the number of segments, the mean area of segments and the coefficient of variation of segments area, were analyzed. Regression analysis was used to obtain the linear relationship between the passing rate and the affecting factors. **Results** The passing rates of Local were lower than those of Max for all plans ($P<0.01$). The passing rates of head and neck plans were significantly different from other sites, with statistical significances ($P<0.01$). The passing rates of Local had linear relationships with the treatment sites, the number of segments and the coefficient of variation of segments area. **Conclusion** The passing rate of Local is significantly lower than that of Max. Compared with plans for other sites, head and neck plan has a lower passing rate. The passing rates of Local can be preliminary estimated by monitor unit and the number of segment. Treatment sites, the number of segments and the coefficient of variation of segments area are the main factors that affect the passing rates of Local. Multiple linear regression equations can provide some

【收稿日期】2018-06-26

【基金项目】国家自然科学基金(11505012);首都卫生发展科研专项(首发2018-4-1027);北京市自然科学基金(7172048, 1174016, 1184014);北京大学医学科技创新平台发展基金—青年培育基金资助项目(BMU2017PY028);瓦里安科研合作基金(Strategies for RapidPlan Model Adaptation)

【作者简介】郭冉,主管技师,研究方向:医学物理,E-mail: guorann@126.com

【通信作者】戴建荣,博士,二级研究员,研究方向:治疗计划的优化算法、图像引导放疗等,E-mail: dai_jianrong@163.com

guidance for the design and selection of optimal plans.

Keywords: plan quality assurance; PTW 729 detector array; intensity-modulated radiotherapy

前言

由于调强放疗计划涉及复杂的机械和剂量学参数^[1],包括AAPM TG-53^[2]、TG-119^[3]等在内的国际报告均提及了针对具体计划进行质量保证(QA)的必要性。

现有的计划验证方法主要分为基于计算和基于测量两大类。例如,IBA的COMPASS系统可以根据加速器的射束模型、待验证计划的RT-plan等数据,在患者的计划CT上独立计算三维剂量分布(Collapsed Cone Convolution, CCC)算法,并统计出临床关心的剂量-体积参数等用于比较验证^[4]。同时,COMPASS也可以基于MatriXX^[5]或Dolphin^[6]探测器阵列实测的响应信号,结合角度探测器的数据记录重建出三维剂量用于分析比对。基于模体的测量重建,如PTW的OCTAVIUS 4D^[7],或Sun Nuclear的ArcCheck^[8]等均可以反映计划实际执行过程中的误差。利用加速器自带的射野影像系统(Electronic Portal Imaging Device, EPID)也可以方便地进行计划QA^[9]。此外,利用计划执行过程中加速器自动记录的多叶准直器运动日志文件(MLC log file)对剂量分布进行重建可以间接反映由MLC到位精度导致的剂量学误差^[10]。

文献提示,计划的复杂程度,如子野面积^[11]、通量平滑度(smoothed fluence)^[12]等因素均与计划通过率相关,也有学者提出调制复杂度评分(Modulation Complexity Score, MCS)的概念用于理论预测计划的复杂程度^[13]。本工作提取计划的几个参数,研究PTW 729矩阵在模体中实测的计划通过率及其与相关影响因素的关系,对计划设计及选择提供一定的帮助。

1 材料与方法

1.1 计划病例选取

在临床计划资料库中选取3个月内设计并执行的颅脑计划9例、头颈计划13例、胸部计划20例、腹部计划10例、盆部计划16例,合计68例固定野静态调强计划。所有计划均基于Pinnacle 9.6版本设计,由医师评估确认。记录各计划总射野数、总跳数、总子野数、每个子野的面积。

头颈部计划分为腮腺癌、舌癌、鼻咽癌、喉癌、下

咽癌;颅脑计划分为恶性胶质瘤和脑转移癌(全脑加病灶区的同步加量);胸部计划分为食管癌(颈段、中段、下段)、肺癌、胸腺癌;腹部计划分为胰腺癌、贲门癌、腹膜后转移肿物;盆部计划分为宫颈癌、直肠癌、子宫内膜癌。

1.2 基于测量的通过率验证

利用Standard imaging剂量仪和0.6 cc指型电离室在6 MV X射线、源皮距为100 cm、射野为10 cm×10 cm、固体水(红水)下5 cm、出束100 MU的条件下,记录测量结果;PTW 729矩阵上下各放置4.2 cm和5.0 cm厚的固体水,同样条件下出束,记录结果。根据两种剂量计的测量结果完成对矩阵的剂量校准。

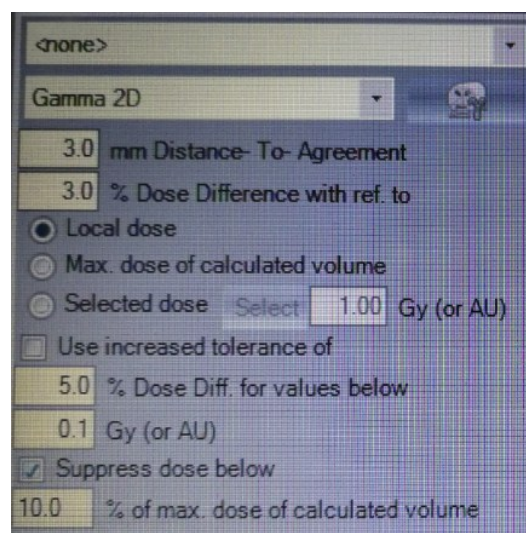
所有射野归至机架0°,升床使治疗室激光灯对准PTW seven29电离室矩阵两侧高度线,使实际测量剂量分布与计划计算剂量分布层面一致。全部68例计划在医科达Synergy加速器一天内完成出束。利用PTW VeriSoft 4.1版软件,比较基于计划计算的剂量分布与实际测量的二维剂量分布差异。按照国际惯例分析10%最大剂量点内的Gamma通过率^[14],标准是3 mm/3%,其中通过率用如下两种方式表示并作统计:Local和Max。Local dose指的是参考矩阵相应位置(即测量点当点)的剂量;Max dose指的是参考矩阵的最大剂量(矩阵所有测量点的最大剂量)(图1)。Local表示Gamma 2D评估中的剂量差异选择Local dose;Max表示Gamma 2D评估中的剂量差异选择Max dose。

1.3 通过率的各影响因素描述

跳数(MU)为计划的总跳数;射野数(Number of Beams)为计划的总射野数;子野数目(Number of segments)为计划的总子野数;平均子野面积(Mean area of segments)为计划子野面积的平均值;子野面积的变异系数(Coefficient of variation of segments area)为计划子野面积的标准差与其平均值之比。

1.4 统计学分析

采用SPSS V22软件,设 $P < 0.05$ 为结果有统计学意义。对Local与Max通过率进行配对样本 T 检验,对头颈部与其他部位(颅脑、胸腹盆部合在一起)Local通过率比较采用独立样本 t 检验,子野数等单因素与Local通过率的关系行Pearson法分析,并将有意义的因素纳入回归分析。



a: Different selections of dose difference

- % Dose Difference with ref. to:
accepted percentage dose deviation
- Reference value for the accepted percent
dose deviation:
- Local dose:
dose at the corresponding position of the
reference matrix
- Max. dose of measured data set:
maximum dose of the reference matrix
- Selected dose:
dose at an arbitrary point of the reference
matrix:
For this click the Select button and then
desired point in the compare window or enter
the desired dose value.

b: Explanation of dose difference in user manual

图1 PTW Verisoft软件中的Local dose与Max dose

Fig.1 Local dose and Max dose in PTW Verisoft software

Local means choosing % dose difference of Gamma 2D with local dose, which is at the corresponding position of the reference matrix; Max means choosing % dose difference of Gamma 2D with max dose, which is the max dose of the reference matrix

2 结果

实验一共统计和测量头颈计划 97 野、颅脑计划 62 野、胸部计划 126 野、腹部计划 58 野、盆部计划 108 野,共计 451 个静态调强野。

2.1 Local 与 Max 的比较、头颈部与其他部位 Local 通过率的比较

所有计划总的 Local 通过率是 $94.62\% \pm 2.40\%$, 95% 的置信区间是 $94.04\% \sim 95.20\%$; 所有计划总的 Max 通过率是 $98.57\% \pm 1.08\%$, 95% 的置信区间是 $98.31\% \sim 98.84\%$ 。

配对 t 检验显示 Local 通过率低于 Max, 差异有统计学意义 ($t = -20.59, P < 0.01$)。头颈部计划的 Local 通过率是 $92.35\% \pm 2.58\%$, 95% 的置信区间是 $90.79\% \sim 93.91\%$; 其余 4 个部位总的 Local 通过率是 $95.16\% \pm 2.03\%$, 95% 的置信区间是 $94.61\% \sim 95.71\%$ 。经独立样本的 t 检验显示 Local 通过率头颈部低于其他部位, 差异有统计学意义 ($t = -4.26, P < 0.01$)。

2.2 计划的各项参数描述

计划总的 MU 为 588.99 ± 179.10 ; 总射野数为 6.63 ± 1.29 ; 子野数目为 45.76 ± 12.11 ; 计划的子野平均面积为 $(61.74 \pm 20.88) \text{ cm}^2$; 子野面积的变异系数为 0.62 ± 0.17 。

2.3 Local 通过率与各因素间的相关性

图 2 分别是 Local 通过率与计划 MU、总子野数、子野平均面积、子野面积的变异系数关系图, 从图 2 中我们可以得到 Local 通过率与计划 MU、子野数目、

子野面积的变异系数显著相关, 且为负相关关系; 而 Local 通过率与子野平均面积之间没有明显相关性。Local 通过率与各因素的相关性系数见表 1。

2.4 回归分析

对 MU (X_1)、射野数 (X_2)、子野数目 (X_3)、子野面积变异系数 (X_4)、部位 (X_5) (定义头颈部为 0, 其他部位为 1) 与 Local 通过率 (Y) 的关系行多重线性回归分析。

拟合的模型决定系数情况和模型检验情况: 其中复相关系数为 0.731, 决定系数为 0.535, 校正后的决定系数是 0.513。模型检验 $P < 0.001$, 在 0.05 的检验水准下, 认为使用此模型是合适的。

表 2 显示了最终使用的模型中的回归系数值及其标准误差和 P 值, 可以看出部位、总的子野数、子野面积的变异系数是影响 Local 通过率的主要因素。根据表中各影响因素及其偏回归系数得出回归方程: $Y = 99.652 - 0.072X_3 - 4.344X_4 + 1.18X_5$ 。

3 讨论与结论

调强计划验证的影响因素有很多, 本研究主要先从比较方式来对比通过率的结果, 然后探讨部位、射野相关参数与 Local 通过率的关系。岳海振等^[15]提到 Local dose 方式的 $\Delta D_{M1} = D_{A(r,A)} \times 3\%$, 而 Max dose 的 $\Delta D_{M2} = \min\{\Gamma(r_m, r_c)\} \times 3\%$, 对于任意测量点总有 $\Delta D_{M1} \leq \Delta D_{M2}$, 所以 Max dose 相对于 Local dose 通过率相对较高, 尤其是对于低剂量区。本研究对比分析发现, 所有计划的 Local 通过率显著低于

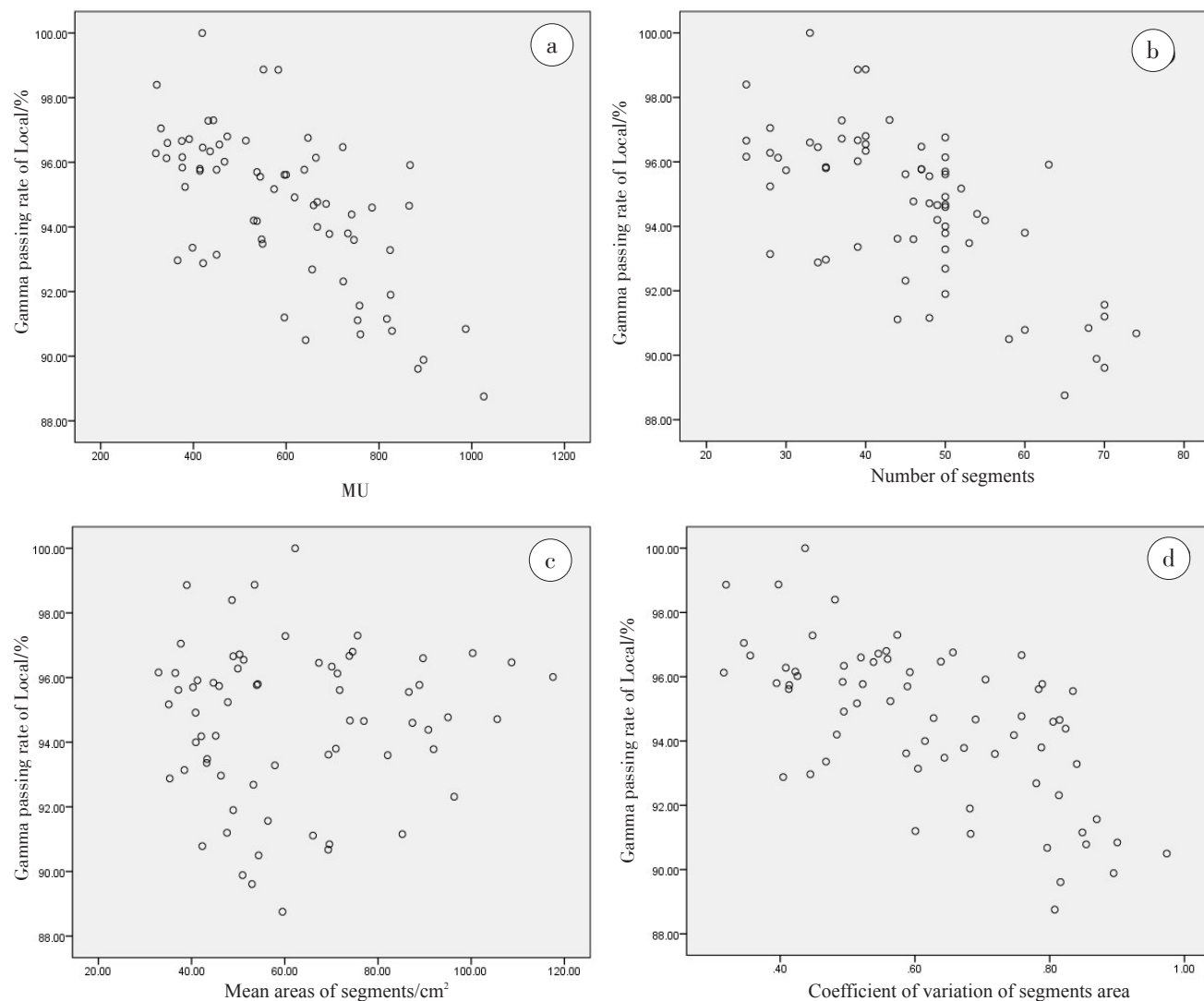


图2 Gamma通过率Local方式与总跳数(a)、总子野数(b)、子野平均面积(c)、子野面积的变异系数(d)关系图

Fig.2 Correlations between Gamma passing rate of Local and various factors, including monitor units (a), number of segments (b), mean area of segments (c) and coefficient of variation of segments area (d)

表1 Local通过率与各因素的相关性

Tab.1 Correlations between Gamma passing rate of Local and various factors

Factor	Pearson correlation coefficient	P value
Monitor unit	-0.655	<0.001
Number of segments	-0.671	<0.001
Mean area of segments	0.042	0.734
Coefficient of variation of segments area	-0.651	<0.001

Max ($P < 0.01$), Local dose 比对的是二维矩阵当点的剂量,而 Max dose 为二维矩阵的最大剂量,当计算的野内剂量差别比较大时,相对低剂量的区域的点比较容易满足剂量偏差小于 Max dose 的 3%,该测量点将容易通过。Local 较 Max 通过率的计划间一致性更

差,体现在 Local 有更高的标准差。这也说明 Local 较 Max 的敏感度更高,能够反映更细微的不确定性和差异,Local 通过率结合其在解剖结构上的具体分布是排查可疑计划的宝贵工具。

本文涵盖了多个部位的计划,头颈部计划相对其他计划来说相对复杂,同时在临床测量分析也发现头颈部通过率相对低些,杨瑞杰等^[16]研究发现不同部位计划验证通过率不同,本研究得到头颈部的 Local 通过率低于其他部位的通过率。

单因素进一步分析发现,当子野数 ≤ 60 时,60 个计划 Local 通过率高于 90%,其中有 55 个计划 Local 通过率高于 92%,另外 5 个计划在 90%~92% 之间。当 MU ≤ 870 时,全部 64 例计划通过率高于 90%,其中 8 个计划在 90%~92% 之间。子野面积的变异系数反映的是子野面积的变异程度,其值越大,表示子野面

表2 回归系数
Tab.2 Regression coefficient

Model	Unstandardized coefficient		<i>t</i> value	<i>P</i> value
	<i>B</i>	<i>SE</i>		
Constant	99.652	1.197	83.256	<0.001
Number of segments	-0.072	0.026	-2.812	0.007
Coefficient of variation of segments area	-4.344	1.798	-2.417	0.019
Regions	1.180	0.573	2.061	0.043

B: Partial regression coefficient; SE: Standard error

积离散程度越大。回归分析的模型中可以得出 Local 通过率的主要影响因素有部位、总子野数、子野面积的变异系数;在其他自变量保持不变的情况下,头颈部的 Local 通过率低于其他部位;其他自变量不变,子野数高的 Local 通过率较低;其他自变量不变,子野面积的变异系数较高的 Local 通过率低。

综上所述,根据计划 MU 可以初步判断计划的通过率,考虑到计划通过率的情况,在当前计划系统建模情况下,子野数尽量控制在 60 以内,临床计划设计时可以参考本研究得出的回归方程选择相对合适的计划。

【参考文献】

- [1] KLEIN E E, HANLEY J, BAYOUTH J, et al. Task group 142 report: quality assurance of medical accelerators[J]. Med Phys, 2009, 36(9): 4197-4212.
- [2] 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.
- [3] EZZELL G A, BURMEISTER J W, 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.
- [4] VISSER R, WAUBEN D J, GROOT M D, et al. Efficient and reliable 3D dose quality assurance for IMRT by combining independent dose calculations with measurements[J]. Med Phys, 2013, 40(2): 021710.
- [5] GODART J, KOREVAAR E W, VISSER R, et al. Reconstruction of high-resolution 3D dose from matrix measurements: error detection capability of the COMPASS correction kernel method[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(15): 5029-5043.
- [6] THOELKING J, YUVARAJ S, JENS F, et al. SU-E-T-602: patient-specific online dose verification based on transmission detector measurements[J]. Radiother Oncol, 2016, 42(6): 3474.
- [7] AGNEW C E, IRVINE D M, MCGARRY C K. Correlation of phantom-based and log file patient-specific QA with complexity scores for VMAT[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(6): 4994.
- [8] VIEILLEVIGNE L, MOLINIER J, BRUN T, et al. Gamma index comparison of three VMAT QA systems and evaluation of their sensitivity to delivery errors[J]. Phys Med, 2015, 31(7): 720-725.
- [9] FOGLIATA A, CLIVIO A, FENOGLIETTO P, et al. Quality assurance of RapidArc in clinical practice using portal dosimetry[J]. Br J Radiol, 2011, 84(1002): 534-545.
- [10] 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.
- [11] YOUNGE K C, ROBERTS D, JANES L A, et al. Predicting deliverability of volumetric-modulated arc therapy (VMAT) plans using aperture complexity analysis[J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(4): 124-131.
- [12] GIORGIA N, ANTONELLA F, EUGENIO V, et al. What is an acceptably smoothed fluence? Dosimetric and delivery considerations for dynamic sliding window IMRT[J]. Radiat Oncol, 2007, 2(1): 42.
- [13] MCNIVEN A L, SHARPE M B, PURDIE T G. A new metric for assessing IMRT modulation complexity and plan deliverability[J]. Med Phys, 2010, 37(2): 505-515.
- [14] CLEMENTE-GUTIÉRREZ F, PÉREZ-VARA C. 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): 5190.
- [15] 岳海振, 贾飞, 张健, 等. 鼻咽癌容积调强放射治疗剂量验证比较研究[J]. 北京生物医学工程, 2013, 32(4): 375-379.
YUE H Z, JIA F, ZHANG J, et al. Comparison of dose verification in volumetric modulated arc therapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Beijing Biomedical Engineering, 2013, 32(4): 375-379.
- [16] 杨瑞杰, 张喜乐, 刘路, 等. 2 010 例调强放疗患者计划剂量验证结果分析[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2016, 36(12): 917-921.
YANG R J, ZHANG X L, LIU L, et al. Analysis of 2 010 patient-specific intensity-modulated radiation therapy dosimetric verification results[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2016, 36(12): 917-921.

(编辑:薛泽玲)