

## AAA和PDIP算法在非均整模式容积调强放射治疗剂量预测方面的差异

姚凯宁,王若曦,岳海振,王美娇,蒲亦晨,吴昊

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

**【摘要】目的:**探究各项异性算法(AAA)和射野剂量图像预测(PDIP)算法在非均整模式(FFF)容积调强放射治疗计划治疗前验证 $\gamma$ 分析中的差异以及计划复杂程度对这种差异的影响,为临床上基于电子射野影像系统(EPID)的剂量预测算法的选择提供依据。**方法:**选取能量为6 MV FFF的两种测试野和16例头颈部肿瘤治疗计划,利用PDIP和AAA两种算法分别生成预测数据并与EPID实测数据进行 $\gamma$ 分析,统计两种算法在不同 $\gamma$ 评判标准下的通过率并计算通过率差异(Delta  $\gamma$ )。计算上述病例每个射野的复杂系数,分析不同标准下两种算法的Delta  $\gamma$ 与复杂系数的相关性;利用 $\gamma_{\text{mean}}$ 、 $\gamma_{\text{sd}}$ 、 $\gamma_1$ 和 $\gamma$ 通过率共同描述 $\gamma$ 分布,并分析其与复杂系数间的相关性。**结果:**当评判标准为3%/3 mm或2%/2 mm时,不同算法下测试射野的Delta  $\gamma$ 较小。当评判标准为1%/1 mm,不同开野的Delta  $\gamma$ 变化明显:射野较小时,PDIP算法的通过率低于AAA;当射野增大到(10×10) cm<sup>2</sup>时,通过率基本一致;当射野继续增大时,PDIP算法的通过率逐渐高于AAA。全部射野的通过率与评判标准的关系类似:在3%/3 mm标准下,两种算法的结果基本一致;随着标准的提高,两种算法的通过率逐渐下降,二者之间的差异也逐渐明显。复杂系数与Delta  $\gamma$ 、 $\gamma_{\text{mean}}$ 、 $\gamma_{\text{sd}}$ 和 $\gamma_1$ 为正相关,与 $\gamma$ 通过率为负相关。**结论:**PDIP算法对于有机机械臂支撑的EPID的剂量预测更准确;AAA则适用于无机机械臂支撑的EPID或机械臂反散射影响较小的射野。当计划复杂程度或评判标准提高时,两种算法的差异也增大。计划复杂程度对FFF计划验证结果的影响是负面的。上述结果提示临床应针对性地选择计划验证工具来确保治疗的安全有效。

**【关键词】**容积调强放射治疗;非均整模式;射野剂量图像预测算法;各项异性算法;电子射野影像系统;复杂系数

**【中图分类号】**R811.1;R815

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2020)04-0419-07

## Differences between anisotropic analytical algorithm and portal dose image prediction algorithm in dose prediction in volumetric modulated arc therapy using flattening filter free beams

YAO Kaining, WANG Ruoxi, YUE Haizhen, WANG Meijiao, PU Yichen, WU Hao

Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education/Beijing), Department of Radiotherapy, Peking University Cancer Hospital & Institute, Beijing 100142, China

**Abstract: Objective** To explore the difference between anisotropic analytical algorithm (AAA) and portal dose image prediction (PDIP) algorithm in  $\gamma$  analysis for the pre-treatment verification of volumetric modulated arc therapy using flattening filter free (FFF) beams and to investigate the effects of plan complexity on the difference for providing a basis for the selection of dose prediction algorithm based on electronic portal imaging device (EPID). **Methods** Two test fields and 16 head and neck treatment plans using 6 MV FFF were selected. AAA and PDIP algorithm were used to generate predicted data, and a  $\gamma$  analysis between predicted data and the data measured by EPID was conducted. The Delta  $\gamma$  of the two algorithms under different  $\gamma$  criteria were analyzed. The complexity metric (CM) of each field in the above cases was calculated, and the correlation between Delta  $\gamma$  and CM under different  $\gamma$  criteria was investigated. Finally, the  $\gamma$  distribution was described by  $\gamma_{\text{mean}}$ ,  $\gamma_{\text{sd}}$ ,  $\gamma_1$  and  $\gamma$  passing rates, and their correlations with CM were discussed. **Results** For the test field under the criterion of 3%/3 mm or 2%/2 mm, the Delta  $\gamma$  of two algorithms was small. When the criterion was 1%/1 mm, there was significant difference in Delta  $\gamma$  for different open fields. The passing rate of PDIP algorithm was lower than that of AAA when the field was smaller than (10×10) cm<sup>2</sup>; and the passing rates

**【收稿日期】**2019-11-11

**【基金项目】**北京市自然科学基金(1202009);北京市属医院科研培育计划项目(PX2019042);中央高校基本科研业务费/北京大学临床医学+X青年专项(PKU2020LCXQ019)

**【作者简介】**姚凯宁,硕士研究生,研究方向:放射治疗物理学,E-mail: kainingyao@163.com

**【通信作者】**吴昊,高级工程师,研究方向:医学物理,E-mail: hao.wu@bjcancer.org

of two algorithms was basically the same when the field was  $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ ; with the further enlargement of field, the passing rate of PDIP algorithm was significantly higher than that of AAA. The relationship between the passing rates of all fields and evaluation criteria was similar. Under the criterion of  $3\%/3 \text{ mm}$ , there was trivial difference in the passing rate of two algorithms. As the criterion increases, the passing rates of two algorithms were gradually decreased and the difference between them become obvious. The CM was positively correlated with Delta  $\gamma$ ,  $\gamma_{\text{mean}}$ ,  $\gamma_{\text{sd}}$ ,  $\gamma_1$ , and negatively related with  $\gamma$  passing rate. **Conclusion** PDIP algorithm has a higher accuracy for dose prediction based on EPID with arm support, while AAA is suitable for dose prediction based on EPID without arm support or field with less backscattering effect. When plan complexity or evaluation criterion increases, the difference between two algorithms increases. The plan complexity has a negative effect on FFF plan verification. An appropriate plan verification tool should be adopted to ensure the safe and effective treatment in clinic.

**Keywords:** volumetric modulated arc therapy; flattening filter free; portal dose image prediction algorithm; anisotropic analytical algorithm; electronic portal imaging device; complexity metric

## 前言

容积调强放射治疗 (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 通过对多叶光栅、剂量率和机架旋转速度进行调制, 使剂量递送更加准确、高效, 给予靶区足够的剂量并保护靶区周围的正常组织, 但同时增加了计划的复杂程度和执行难度<sup>[1-3]</sup>。非均整模式 (Flattening Filter Free, FFF) 束流的出现使剂量率的可调范围增大 (6 MV 能量可达 1 400 MU/min, 10 MV 能量可达 2 400 MU/min), 极大地缩短患者的治疗时间, 减少潜在的器官运动<sup>[4]</sup>, 有利于单次大剂量的大分割治疗技术 (Hypofraction) 的实施。同时由于 FFF 射束剂量率更高, 潜在放疗事故的后果更加严重, 因此对 FFF 射束计划的质控工作更加重要。计划质控包括位置验证和剂量验证, 本研究侧重剂量验证。

剂量验证的目的在于保证剂量传递精度, 主要通过工具获取实测剂量并以此为参考, 分析计划系统模拟剂量分布的准确性。临床用于计划剂量验证的工具较多, 有研究表明矩阵类探测器在 FFF 束流剂量预测方面具有较高的可信度, 如 ArcCheck (Sun Nuclear, 美国)<sup>[5]</sup>、Dolphin (IBA, 德国)<sup>[6]</sup>、MatriXX (IBA, 德国)<sup>[7-9]</sup> 和电子射野影像系统 (Electronic Portal Imaging Device, EPID)<sup>[10-11]</sup>。而 EPID 作为加速器的机载设备, 具有分辨率高、饱和阈值高、无角度响应、测量方便等特点<sup>[12]</sup>, 应用具备先天优势。相比上一代的成像装置 (IDU20, aSi1000), TrueBeam 系列最新的数字化兆伏探测器 (DMI, aSi1200) 的剂量响应和余晖效应有了改善<sup>[13]</sup>; DMI 的响应与剂量率的线性关系范围得到很大改善, 这些因素都使利用 EPID 验证 FFF 束流计划成为可能。

瓦里安公司的计划系统 (Eclipse, Version 15.5) 中, 对应 EPID 的预测算法主要包括各项异性算法 (Anisotropic Analytical Algorithm, AAA) 和射野剂量

图像预测 (Portal Dose Image Prediction, PDIP) 算法, 其中新增的 AAA 只能用于 FFF 射束的剂量预测, 多项研究已表明 AAA 在剂量计算方面的可信度<sup>[14-15]</sup>, 但是 AAA 在预测 EPID 数据准确性的研究较少, 仅 Pardo 等<sup>[16]</sup>证明 AAA 可以用于 FFF 束流的剂量预测。PDIP 则可用于 FFF 和常规射束。Van Esch 等<sup>[17]</sup>为 PDIP 算法的配置研发了一套通用数据, 经多中心验证后发现 PDIP 算法可以准确地预测剂量分布。Jomehzadeh 等<sup>[18]</sup>表明 PDIP 算法对均匀模体计划以及基于仿真模体 (Anthropomorphic Phantom) 的三维适形和调强计划剂量预测的准确性较高。还有研究发现 PDIP 算法验证 FFF 下的 VMAT 计划的准确性也较高<sup>[19]</sup>。

虽然影响剂量递送的因素很多, 如 Xu 等<sup>[13]</sup>发现随剂量率升高,  $\gamma$  通过率降低, 但是最主要的影响因素是计划的调制程度 (即复杂程度); Min Park 等<sup>[20]</sup>证明了计划调制程度会影响  $\gamma$  通过率; 为了量化计划复杂程度, McNiven 等<sup>[21]</sup>首先利用多叶光栅叶片间距和跳数得到了代表计划复杂性的系数 (Modulation Complexity Score, MCS), 并证明调强放射治疗计划的 MCS 与  $\gamma$  通过率之间为负相关关系; Roberts 等<sup>[22]</sup>和 Younge 等<sup>[23]</sup>设计可以通过 Eclipse 的脚本编程接口计算计划复杂系数 (Complexity Metric, CM) 的脚本, 分别评估每个射野和整个计划的复杂程度, 通过设定阈值评估计划的可执行度; Rajasekaran 等<sup>[24]</sup>将 MCS 应用到 VMAT 计划上评估计划复杂性, 证明利用 Octavius 4D 系统进行剂量测量时,  $\gamma$  分析结果与 MCS 有一定相关性; 又有研究综合多叶光栅的速度和加速度、机架速度变化以及剂量率变化设计了调制指数, 并且在头颈和前列腺患者中得到了调制指数和  $\gamma$  通过率显著相关的结果<sup>[20]</sup>。

尽管已有的评估计划复杂程度的方法很多, 但是还需要考虑计划系统预测算法、探测器类型、子野

面积与射野比值、钨门跟随对 $\gamma$ 分析结果的影响。本研究集中于剂量预测算法,经调研发现对FFF束流下不同类型算法剂量的预测能力进行对比的研究较少。由于FFF束流的不同特性,计划复杂程度与 $\gamma$ 分析的关系可能与常规束流不同。

本研究以EPID作为测量工具,以FFF束流模型为基础,探究PDIP和AAA两种算法剂量预测的差异以及计划复杂程度对这种差异的影响,为临床FFF束流计划验证算法的选择提供依据。在描述 $\gamma$ 分布差异过程中,本研究为避免使用单一的 $\gamma$ 通过率评价分布,尝试引入多种依据分布计算的指标,并调查各指标与计划CM的对应关系,以进一步证明本研究中使用的CM对FFF束流中剂量递送的描述是准确的。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

考虑到EPID剂量预测算法对微型多叶光栅的敏感性以及不同加速器束流之间的差异,本研究将数据采集平台限制于一台EDGE(瓦里安医疗系统,美国)加速器上。该加速器配备120HDMC型微型多叶光栅,对应机载EPID为DMI(aSi1200型),灵敏探测区域面积为 $(43 \times 43) \text{ cm}^2$ ;像素数为 $1280 \times 1280$ ,大小为 $0.34 \text{ mm}$ ;标称剂量率线性范围为 $50 \sim 2400 \text{ MU/min}$ ,支持FFF束流成像。有研究表明在最高剂量率下,该型号EPID响应未出现严重饱和的现象,因此适用于本研究所涉及的FFF束流监测。本研究中所有EPID数据均采用积分模式(Integrated Mode)获取。

本研究涉及两种不同EPID剂量预测算法:基于实测数据的算法(PDIP)和基于理论计算的算法(AAA)。PDIP算法首先利用EPID测量的数据计算基于影像板的笔形束剂量沉积核,再结合模体散射因子和修正后的通量预测跟跳数相关的剂量分布;AAA中射野的剂量分布由若干子束的剂量卷积形成,通过使用多个光子散射核的方式修正组织不均匀性,提高散射剂量沉积的准确性。

### 1.2 研究方法

为比较两种算法在FFF束流下剂量预测的差异,首先选取两种测试射野:“金字塔”野(AIDA)和不同开野 $[(3 \times 3)、(5 \times 5)、(10 \times 10)、(15 \times 15)、(20 \times 20)、(30 \times 20) \text{ cm}^2]$ ,对比分析两种算法在测试野下的预测剂量分布;之后再选取临床16例头颈患者,比较治疗前临床验证中两种算法的剂量预测差异。计划均采用VMAT技术,能量均为 $6 \text{ MV FFF}$ ,每个计划包含 $2 \sim 3$ 个射野,共计35个射野。每个计划都基于两种算法生成预测剂量分布,并在Portal Dosimetry模块中与EPID实测剂量进行 $\gamma$ 分

析,统计两种算法在评判标准为 $3\%/3 \text{ mm}$ 、 $2\%/2 \text{ mm}$ 和 $1\%/1 \text{ mm}$ (剂量阈值为 $10\%$ )下射野的 $\gamma$ 通过率,分析 $\gamma$ 通过率的均值、标准差及 $P$ 值。

本研究利用Eclipse计划系统,应用脚本编程接口(ESAPI)导入开源脚本,根据计划信息评估对应计划CM。VMAT计划的CM主要与各控制点的射野开口(Aperture)面积和周长有关,即与形成射野的多叶叶片位置相关;另外,CM也与射野权重直接相关<sup>[22]</sup>。该脚本计算每个控制点多叶光栅形成的射野的周长面积比值,结合跳数可获得对应射野/计划的CM<sup>[23]</sup>:

$$\text{CM} = \frac{1}{\text{MU}} \sum_{i=1}^N \text{MU}_i \times \frac{y_i}{A_i} \quad (1)$$

其中,CM代表射野复杂系数; $\text{MU}_i$ 代表每个控制点的跳数; $\sum_{i=1}^N \text{MU}_i$ 代表所有控制点的跳数之和; $A_i$ 代表各控制点射野的面积; $y_i$ 代表各控制点射野的周长。CM越大表示计划/射野的复杂性越高。

统计35个射野的CM以及不同评判标准下两种算法的通过率差异(Delta $\gamma$ )。分析随复杂系数变化,通过率差异的变化,Delta $\gamma$ 的计算公式如下:

$$\text{Delta } \gamma = \% \text{GP}_{\text{PDIP}} - \% \text{GP}_{\text{AAA}} \quad (2)$$

其中, $\% \text{GP}_{\text{PDIP}}$ 指PDIP算法的 $\gamma$ 通过率; $\% \text{GP}_{\text{AAA}}$ 指AAA算法的 $\gamma$ 通过率。一般 $\gamma$ 评估工具通过比较剂量差(Dose Difference, DD)和距离差(Distance-to-Agreement, DTA)来定量比较预测/实测的剂量分布<sup>[25]</sup>,临床上用于比较二维/三维剂量分布,根据一定评判标准(如 $3\%/3 \text{ mm}$ ,  $10\%$ )计算每个像素的 $\gamma$ 值并求得 $\gamma$ 通过率,以此作为 $\gamma$ 分析的结果。但单独应用 $\gamma$ 通过率来衡量剂量分布一致性可能会出现假阴/阳性结果<sup>[26]</sup>。故本研究基于ESAPI计算射野内全部像素的 $\gamma$ 值的平均值( $\gamma_{\text{mean}}$ )、 $\gamma$ 值的标准差( $\gamma_{\text{sd}}$ )以及 $\gamma > 1$ 的平均值( $\gamma_1$ ),使用 $\gamma$ 通过率加上以上3个参数共同描述 $\gamma$ 分布。与 $\gamma$ 通过率不同,这3个参数越小,说明预测和实测的剂量分布一致性越高。为研究FFF束流下CM与 $\gamma$ 分布之间的相关关系,本研究针对 $\gamma$ 分析的3个参数与CM之间进行相关性分析。

相关性分析工作在SPSS 24.0软件平台上进行。首先对各特征数据进行正态性检验。当两个对比参数均满足正态分布时, $\gamma$ 通过率分析采用配对样本 $T$ 检验,相关分析采用皮尔逊(Pearson)方法;反之, $\gamma$ 通过率采用相关样本非参数检验,采用卡德尔(Kendall)方法进行相关性分析。当各系数的 $P < 0.05$ 时,表示差异有统计学意义。为研究 $\gamma$ 相关的各参数对计划CM的敏感程度,对各参数以CM为自变量,使用statsmodel提供的广义线性模型进行回归分析。



2 结果

2.1 PDIP和AAA的差异

如表1所示,在3%/3 mm和2%/2 mm标准下,测试射野的 $\gamma$ 通过率差异较小;当标准为1%/1 mm时,不同方野的通过率差异明显:当射野小于 $(5\times 5)\text{ cm}^2$ 时,PDIP算法的通过率小于AAA;当射野增大到 $(10\times 10)\text{ cm}^2$ 时,两种算法的通过率基本一致;随着射野的继续增大,PDIP算法的通过率逐渐大于AAA。

测试和临床射野的通过率结果相似,如图1所示。在3%/3 mm的标准下,两种算法的结果基本一致;当标准提高到2%/2 mm时,通过率均有一定程度的下降,但两者差异尚不明显;当标准为1%/1 mm时,两种算法小于95%的通过率明显增多,两者差异十分明显。

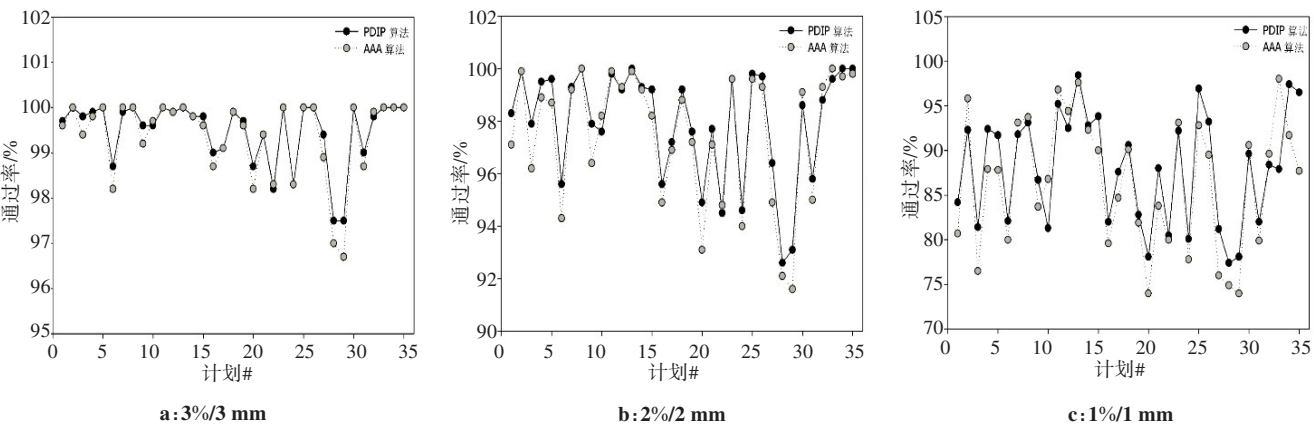


图1 不同剂量差/距离差评判标准下两类算法的 $\gamma$ 通过率(临床射野)  
Fig.1  $\gamma$  passing rates of two algorithms under different dose difference-to-agreement criteria (clinical fields)

经验证,不同评判标准下临床射野的 $\gamma$ 通过率均不符合正态分布,故采用两相关样本的非参数检验。由表2可知AAA和PDIP算法在剂量预测方面存在一定差异,随着评判标准的提高,PDIP算法的 $\gamma$ 分析结果略好于AAA。

表2 临床射野在两类算法下的 $\gamma$ 通过率(%)  
Tab.2  $\gamma$  passing rates of two algorithms for clinical fields (%)

算法	3%/3 mm	2%/2 mm	1%/1 mm
PDIP	99.491±0.711	97.954±2.130	88.006±6.266
AAA	99.368±0.863	97.491±2.482	86.480±7.271
P值	0.004	0.001	0.006

2.2 CM与通过率差异的相关关系

根据统计学规律,在3%/3 mm评判标准下,采用卡德尔(Kendall)分析法;其余标准都采用皮尔逊

表1 AIDA和不同开野在两种算法下的 $\gamma$ 通过率(%)  
Tab.1  $\gamma$  passing rates of two algorithms for AIDA and different open fields (%)

射野	3%/3 mm		2%/2 mm		1%/1 mm	
	PDIP	AAA	PDIP	AAA	PDIP	AAA
AIDA	100.0	100.0	99.6	99.8	97.2	96.4
$(3\times 3)\text{ cm}^2$	100.0	100.0	99.8	100.0	75.2	81.3
$(5\times 5)\text{ cm}^2$	100.0	100.0	99.2	100.0	65.0	80.1
$(10\times 10)\text{ cm}^2$	100.0	100.0	100.0	100.0	93.1	99.7
$(15\times 15)\text{ cm}^2$	100.0	100.0	100.0	100.0	99.0	84.2
$(20\times 20)\text{ cm}^2$	100.0	100.0	100.0	99.9	99.4	48.5
$(30\times 20)\text{ cm}^2$	100.0	100.0	100.0	99.9	98.3	55.6

(Pearson)分析法。统计CM和通过率差异的相关系数分别为0.40、0.61和0.39( $P<0.05$ )。如图2所示,3个评判标准下CM与通过率差异(Delta  $\gamma$ )都是正相关关系。从图3可以看出,CM相同的情况下,当评判标准从3%/3 mm提高到1%/1 mm时,通过率差异变大。

2.3 CM与 $\gamma$ 分析结果的相关关系

$\gamma_{\text{mean}}$ 、 $\gamma_{\text{sd}}$ 、 $\gamma_1$ 、 $\gamma$ 通过率与CM的相关性分析方法与Delta  $\gamma$ 相同,相关系数结果如表3所示。CM与 $\gamma_{\text{mean}}$ 、 $\gamma_{\text{sd}}$ 和 $\gamma_1$ 均为正相关,与 $\gamma$ 通过率为负相关。由于 $\gamma_{\text{mean}}$ 、 $\gamma_{\text{sd}}$ 和 $\gamma_1$ 代表的 $\gamma$ 分析结果正好与 $\gamma$ 通过率相反,因此4个参数代表的 $\gamma$ 分析结果一致:CM越大, $\gamma$ 分析结果越差,预测和实测剂量的一致性越差,且 $P<0.05$ 。随 $\gamma$ 评判标准的提高, $\gamma_{\text{mean}}$ 、 $\gamma_{\text{sd}}$ 、 $\gamma_1$ 与CM的相关性有增大趋势。由于不同评判标准下各参数与CM相关性类似,在此选取2%/2 mm标准下基于PDIP算法的具有代表性的结果呈现在图4。

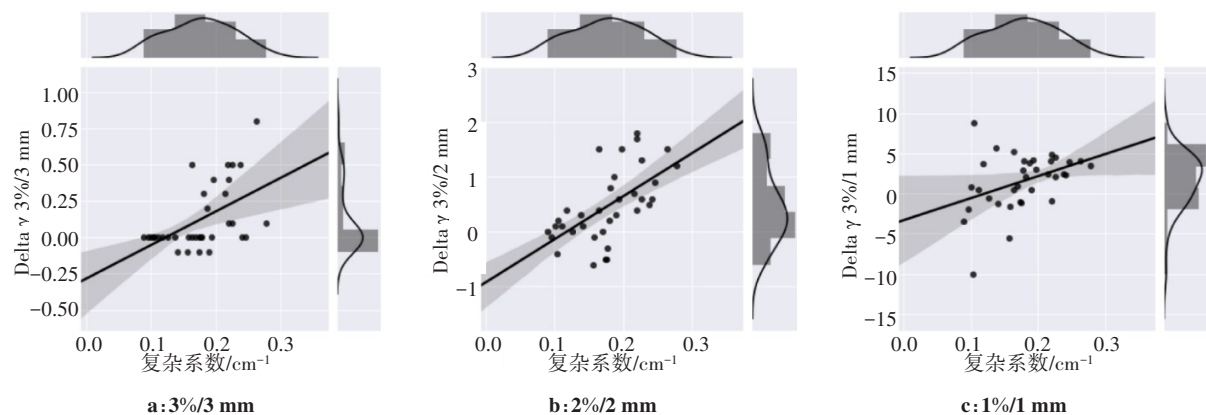


图2 根据不同剂量差/距离差标准得出的Delta  $\gamma$ 与CM的散点图与各参数对应分布

Fig.2 Scatter plot of Delta  $\gamma$  and complexity metric and the parameters according to different dose difference/distance-to-agreement criteria

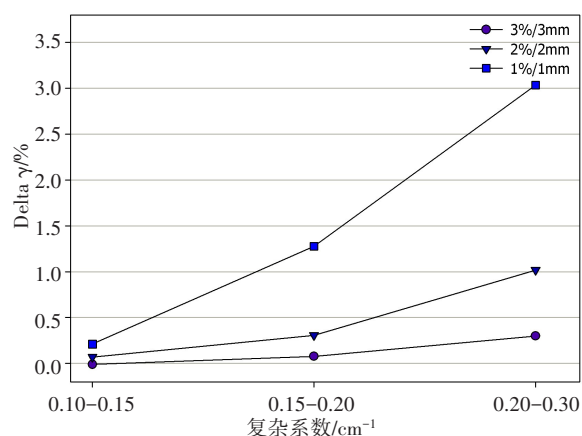


图3 CM和Delta  $\gamma$ 的相关性随 $\gamma$ 评判标准的改变

Fig.3 Correlation between complexity metric and Delta  $\gamma$  under different  $\gamma$  criteria

表3 不同评判标准下 $\gamma$ 分析参数与CM的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient of  $\gamma$  analysis indicators and complexity metric under different evaluation criteria

评判标准	$\gamma_{\text{mean}}$ (P值)	$\gamma_{\text{sd}}$ (P值)	$\gamma_1$ (P值)	$\gamma$ 通过率(P值)
3%/3 mm	0.35(0.009)	0.31(0.023)	0.55(0.002)	-0.41(0.002)
2%/2 mm	0.57(0.000)	0.57(0.000)	0.56(0.000)	-0.49(0.000)
1%/1 mm	0.56(0.000)	0.58(0.000)	0.57(0.000)	-0.45(0.000)

$\gamma_{\text{mean}}$ 指图像中全部像素 $\gamma$ 值的平均值; $\gamma_{\text{sd}}$ 指图像中全部像素 $\gamma$ 值的标准差; $\gamma_1$ 指图像中全部像素 $\gamma$ 值大于1的平均值

3 讨论

AAA和PDIP算法在FFF束流计划剂量预测方面的准确性在相关研究中已经被证实<sup>[14-15,19]</sup>,目前缺乏两种算法预测的准确性和适用范围的对比研究。本研究利用两种算法分别计算测试射野和临床射野的剂量并与EPID实测剂量进行 $\gamma$ 分析,统计射野CM并分析其与 $\gamma$ 分析参数之间的相关性。结果显示当

评判标准较严格时,算法之间的通过率差异与射野大小有直接关系。当射野较小时,AAA的预测结果优于PDIP算法;当射野为(10×10) cm<sup>2</sup>时,算法间通过率差异很小;当射野大于(10×10) cm<sup>2</sup>时,PDIP算法的预测结果逐渐优于AAA。全部射野的结果均提示当评判标准提高到1%/1 mm时,AAA和PDIP算法的通过率差异显著大于其余两种标准。这种结果出现的原因是两类算法配置数据和原理不同:PDIP算法是基于实际采集数据,考虑并修正了机械臂的反散射作用;AAA则是利用计划系统的数据直接配置而成,数据来源于水模体测量,忽略了机械臂的反向散射。AAA在大射野下与实测数据差异较大,图5为(20×20) cm<sup>2</sup>下预测与实测剂量分布的差异,该现象说明机械臂的反散射效应存在作用区域,该区域随射野的增大而增大。因此通过率小于95%的区域出现的原因是EPID图像采集系统的特异性以及EPID中可能普遍存在的像素响应与反散问题并没有得到恰当的建模和修正。

通过对比两种算法的 $\gamma$ 通过率,本研究发现随CM的增加,通过率差异增大,尤其在2%/2 mm的标准下,相关系数可达0.61。CM相同时,当 $\gamma$ 评判标准提高后,通过率差异也增大,这可能是算法配置数据以及算法本身的差异造成的。从图3也可以看出, $\gamma$ 通过率差异始终为正值,说明在有机机械臂支撑的EPID中PDIP算法的预测准确性始终高于AAA。

为了避免使用 $\gamma$ 通过率作为描述 $\gamma$ 分布的唯一指标,本研究利用 $\gamma_{\text{mean}}$ 、 $\gamma_{\text{sd}}$ 、 $\gamma_1$ 和 $\gamma$ 通过率共同描述 $\gamma$ 分布,前3个参数与CM呈正相关, $\gamma$ 通过率与CM呈负相关。随CM的增大,预测和实测剂量分布一致性变差。Chun等<sup>[27]</sup>研究证明CM主要与多叶光栅的调制有关,是影响 $\gamma$ 通过率的主要因素。Park等<sup>[2]</sup>研究也表明射束面积对计划调制指数影响较大,从而影响 $\gamma$

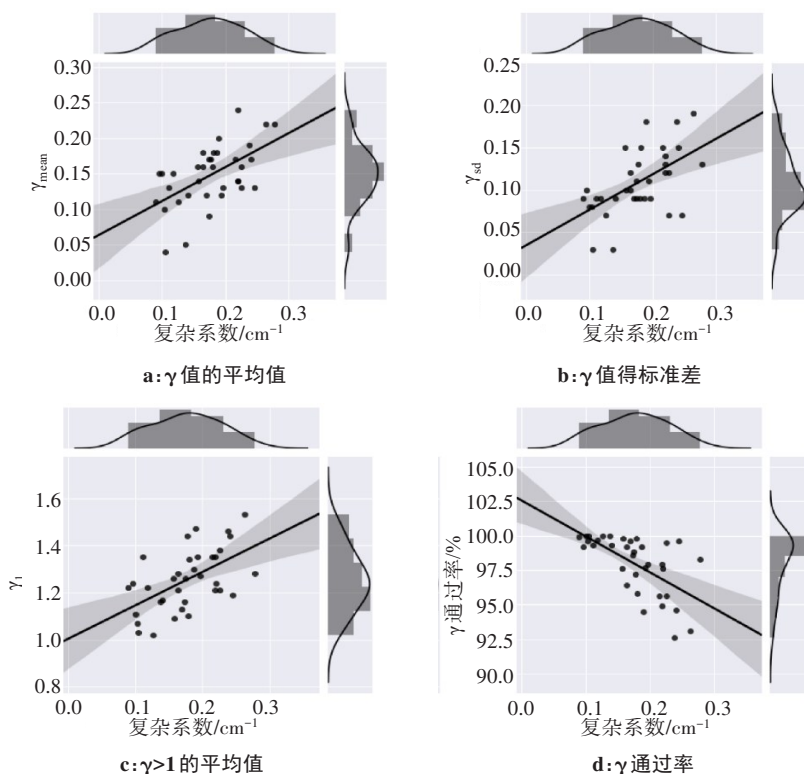


图4 2%/2 mm 标准下CM与 $\gamma$ 分析结果参数间的相关性趋势

Fig.4 Trend of correlation between complexity metric and  $\gamma$  analysis results under 2%/2 mm criterion

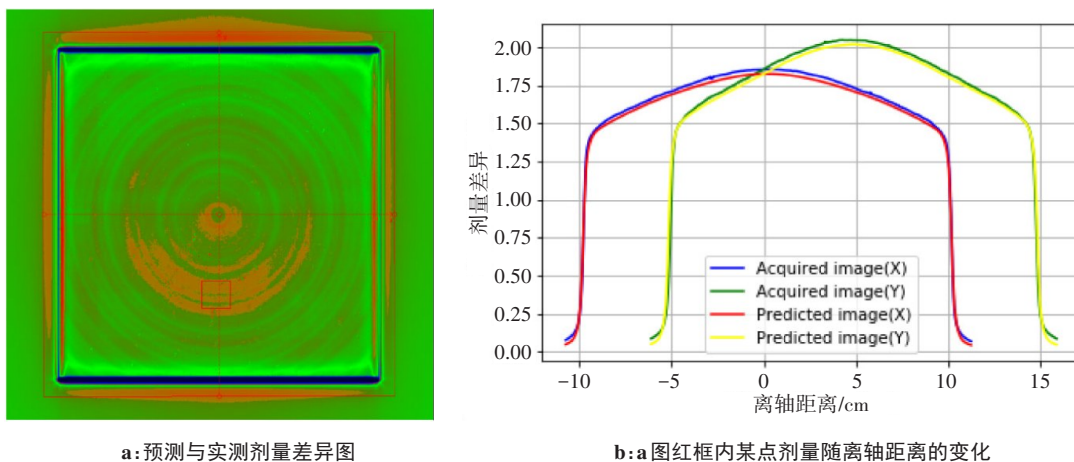


图5 (20×20) cm<sup>2</sup>射野下AAA 预测与EPID 实测剂量分布的差异

Fig.5 Difference between dose distributions predicted by AAA and measured by EPID in (20×20) cm<sup>2</sup> field

图5a 绿色区域代表通过率大于95%, 橘色区域代表通过率小于95%; 图5b 为图5a 中红框内点的剂量随离轴距离的变化, 蓝、绿线分别代表实测数据的X和Y方向, 红、黄线分别代表预测数据的X和Y方向

分析。本研究的结论与上述研究一致:CM与 $\gamma$ 通过率呈负相关。随 $\gamma$ 评判标准的提高, $\gamma_{\text{mean}}$ 、 $\gamma_{\text{sd}}$ 、 $\gamma_1$ 与CM的相关性有增强的趋势。

VMAT计划的复杂性与射野强度分布变化的幅度和频率有关。其特征为子野数量多、子野面积小、子野形状复杂以及剂量率变化大等特点。计划复杂性的计算方法较多,本研究参考Younge等<sup>[23]</sup>的研究,利用ESAPI直接计算每个射野的CM。Younge等<sup>[23]</sup>

还表明CM与处方剂量无关,这与本研究的结果吻合。本研究中计划复杂性的评估并未考虑靶区大小、靶区与危及器官的位置关系等因素,未来的研究将会涉及这部分内容。

## 4 结论

基于FFF束流,本研究比较了两种算法剂量预测的差异,发现PDIP算法略高于AAA,并且随计划CM

和评判标准的增加而变得明显。通过计算 $\gamma$ 分析结果参数与计划CM的相关系数,发现随CM的增加,预测和实测剂量分布的一致性降低。上述结果表明由于存在修正机械臂反散射的作用,在EDGE加速器上PDIP算法的剂量预测更准确,但并不能说明基于理论计算的算法存在剂量预测准确性的问题,AAA更适合用于无机械臂支撑或机械臂反散射影响较小的射野的计划验证;计划复杂程度对计划验证结果( $\gamma$ 分析)的影响是负面的。现有治疗计划验证的常用算法均有其优势和局限,应针对性地选择计划验证工具,从而确保治疗的安全有效。

## 【参考文献】

- [1] PARK J M, KIM K, CHIE E K, et al. RapidArc® vs intensity-modulated radiation therapy for hepatocellular carcinoma: a comparative planning study[J]. *Brit J Radiol*, 2012, 85(1015): 323-329.
- [2] PARK J M, KIM J, PARK S Y. Modulation indices and plan delivery accuracy of volumetric modulated arc therapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2019, 20(1): 1-11.
- [3] ZHANG P, HAPPERSETT L, HUNT M, et al. Volumetric modulated arc therapy: planning and evaluation for prostate cancer cases[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(5): 1456-1462.
- [4] PRENDERGAST B M, FIVEASH J B, POPPLE R A, et al. Flattening filter-free linac improves treatment delivery efficiency in stereotactic body radiation therapy[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2013, 14(3): 64-71.
- [5] 朱煜星, 单东勇, 宾石珍, 等. ArcCheck 系统在 TrueBeam 加速器非均整模式下剂量验证中的应用[J]. *中南大学学报(医学版)*, 2018 (8): 864-868.  
ZHU Y X, SHAN D Y, BIN S Z, et al. Dosimetric verification of flattening filter free model based on TrueBeam accelerator using ArcCheck system[J]. *Journal of Central South University (Medical Sciences)*, 2018, 43(8): 864-868.
- [6] PARK S Y, PARK J M, KIM J, et al. Validation of new transmission detector transmission factors for online dosimetry: an experimental study[J]. *Radiat Oncol*, 2018, 13(1): 1-9.
- [7] SEKAR Y, THOELKING J, ECKL M, et al. Characterization and clinical evaluation of a novel 2D detector array for conventional and flattening filter free (FFF) IMRT pre-treatment verification [J]. *Zeitschrift Fur Medizinische Physik*, 2018, 28(2): 134-141.
- [8] ZHANG J, WU V W, LU J, et al. Dosimetric verification of stereotactic body radiation therapy for lung cancer treatment plans using flattening filter-free beams[J]. *Tumori*, 2015, 101(6): 631-636.
- [9] SHARMA D S, MHATRE V, HEIGRUJAM M, et al. Portal dosimetry for pretreatment verification of IMRT plan: a comparison with 2D ion chamber array[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 11(4): 1-10.
- [10] MIN S, CHOI Y E, KWAK J, et al. Practical approach for pretreatment verification of IMRT with flattening filter-free (FFF) beams using varian portal dosimetry[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2015, 16(1): 40-50.
- [11] ALHARTHI T, ARUMUGAM S, VIAL P, et al. EPID sensitivity to delivery errors for pre-treatment verification of lung SBRT VMAT plans[J]. *Phys Med*, 2019, 59: 37-46.
- [12] VAN ELMPT W, MCDERMOTT L, NIJSTEN S, et al. A literature review of electronic portal imaging for radiotherapy dosimetry[J]. *Radiother Oncol*, 2008, 88(3): 289-309.
- [13] XU Z, KIM J, HAN J, et al. Dose rate response of digital megavolt imager detector for flattening filter-free beams[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2018, 19(4): 141-147.
- [14] GRAMS M P, FONG DE LOS SANTOS L E, ANTOLAK J A, et al. Cadaveric verification of the Eclipse AAA algorithm for spine SBRT treatments with titanium hardware[J]. *Pract Radiat Oncol*, 2016, 6(2): 131-141.
- [15] SHIRAIISHI S, FONG DE LOS SANTOS L E, ANTOLAK J A, et al. Phantom verification of AAA and Acuros dose calculations for lung cancer: do tumor size and regression matter?[J]. *Pract Radiat Oncol*, 2019, 9(1): 29-37.
- [16] PARDO E, NOVAIS J C, LÓPEZ M Y, et al. On flattening filter-free portal dosimetry[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(4): 132-145.
- [17] VAN ESCH A, SCHEIB S, BALTES C, et al. Optimized Varian aSi portal dosimetry: development of datasets for collective use[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2017, 14(6): 82-99.
- [18] JOMEHZADEH A, SHOKRANI P, MOHAMMADI M, et al. Assessment of a 2D electronic portal imaging devices-based dosimetry algorithm for pretreatment and *in-vivo* midplane dose verification[J]. *Adv Biomed Res*, 2016, 5(1): 171.
- [19] FU Z, ZHANG R, LI P, et al. Translational epidemiology: the powerful tool for precision cancer medicine[J]. *J Cancer Res Ther*, 2019, 15: 269-271.
- [20] MIN PARK J, PARK S Y, KIM H, et al. Modulation indices for volumetric modulated arc therapy[J]. *Phys Med Biol*, 2014, 59(23): 7315-7340.
- [21] MCNIVEN A, PURDIE T. SU-FF-T-203: evaluation of a new metric for assessing IMRT modulation complexity and plan deliverability[J]. *Med Phys*, 2009, 36(6): 2567.
- [22] ROBERTS D A, FRAASS B A, YOUNGE K C, et al. Penalization of aperture complexity in inversely planned volumetric modulated arc therapy[J]. *Med Phys*, 2012, 39(11): 7160-7170.
- [23] 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): 6241.
- [24] RAJASEKARAN D, JEEVANANDAM P, SUKUMAR P, et al. A study on the correlation between plan complexity and gamma index analysis in patient specific quality assurance of volumetric modulated arc therapy [J]. *Rep Pract Oncol Radiother*, 2015, 20 (1): 57-65.
- [25] LOW D A, HARMS W B, MUTIC S, et al. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions[J]. *Med Phys*, 1998, 25 (5): 656-661.
- [26] SUNJIC S, CEBERG C, BOKULIC T. Statistical analysis of the gamma evaluation acceptance criteria: a simulation study of 2D dose distributions under error free conditions[J]. *Phys Med*, 2018, 52: 42-47.
- [27] CHUN M, JOON AN H, KWON O, et al. Impact of plan parameters and modulation indices on patient-specific QA results for standard and stereotactic VMAT[J]. *Phys Med*, 2019, 62: 83-94.

(编辑:谭斯允)