

放射治疗剂量验证中常用剂量分布比较方法及分析

苗利 孙彦泽 李新民

(苏州大学医学部放射医学与防护学院 苏州 215123)

摘要 使用非晶硅平板探测器(Amorphous silicon electronic portal imaging device, a-Si EPID),在源-探测器距离100 cm处,用6 MV的光子束照射采集3个不同大小射野的剂量图,将该数据分割为4个区域,并对每个区域数据进行不同条件下的修改来构建模型,然后用放射治疗剂量验证中常用的3种剂量分布比较方法进行分析。结果表明:百分剂量差比较法对剂量梯度大的区域较敏感,微小的位置偏移会造成较大误差,其适用于剂量分布相对平缓的区域。DTA(Distance-to-agreement)分析法对剂量分布平缓的区域较为敏感,微小的剂量差异也会造成较大的误差,其适用于剂量梯度相对陡峭区域。 γ 分析法则结合了剂量差异分析法与DTA分析法的优点,不管对于剂量梯度较大区域还是平缓的区域,其计算值不会过大,误差较小,能更好地用于临床剂量验证。

关键词 放射治疗, 剂量验证, 百分剂量差分析法, DTA分析法, γ 分析法

中图分类号 R811.1, R815.2, R815.6

随着放射治疗技术的不断进步,从普通放疗到适形放疗,又发展到调强放疗,已经进入了“三精”阶段即精确定位、精确计划、精确治疗,目的是为了最大限度地杀死肿瘤细胞,同时最大限度地保护正常组织受到更少的损伤。然而在放疗技术不断进步的同时,伴随着一个重要问题的出现,那就是如何保证在计划执行时实际得到的剂量分布和计划中的一致。因此,就产生了剂量验证的理论和方法,特别是对于调强放射治疗技术,由于剂量率比较大,射野比较复杂,验证剂量的准确性就更为重要。

Van等^[1]首次提出了放射治疗中应用剂量比较方法的重要性。一种非常便捷直观的比较方法是等剂量线的叠加法^[2],缺点是不能进行定量分析。Mah等^[3]应用了百分剂量差法(Percentage dose difference, PDD)对二维和三维的电子束剂量分布进行了比较,但是在剂量梯度较大的区域,引起较大误差。为了能够较为准确地对剂量梯度较大区域进行比较,提出了DTA(Distance-to agreement)理论^[4]。但是此方法对于剂量分布平缓的区域计算值会偏大,同样引起较大误差。在Shiu等^[5]提出的概念基础上,Harms等^[4]提出了复合分析理论,Cheng等^[6]应用了复合分布分析理论,此方法涵盖了剂量分布陡峭和平缓的区域,分析结果只将剂量误差和DTA误差同时大于两者误差标准(3%, 3 mm)的区域以

某一颜色在图中标注出来,但是没有报道该区域的详细信息。1998年,Low等^[7]结合了剂量差异和DTA理论,提出了 γ 理论,因为它不仅涵盖了剂量分布陡峭和平缓的区域,而且解决了复合分析缺陷,逐渐成为国际普遍的剂量验证方法。文献[2], [8]对以上几种剂量比较理论进行了分析,但结果不够详尽。

本文基于文献[2], [8]并做了修改,讨论了放射治疗剂量验证中常用的百分剂量差法、DTA分析法和 γ 分析法。由于在进行剂量验证时,用EPID测量得到的剂量分布作参考剂量分布(Reference dose distribution),以放射治疗计划的剂量分布作为待比较剂量分布(Evaluated dose distribution),即要评估的对象。而在文中将采集到的未进行任何修改的数据作为参考剂量分布,将建立的模型数据作为待比较剂量分布。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

电子直线加速器(SIEMENS),非晶硅EPID探测器(PerkinElmer公司),有效探测面积20.5 cm×20.5 cm、1024×1024个像素,分辨率为0.2 mm,信号采集软件。

第一作者:苗利,男,1987年3月出生,2010年毕业于泰山医学院放射学院,应用物理学(医学物理学方向)专业,现为苏州大学生物医学工程专业2010级在读硕士研究生,研究方向为医学物理

通讯作者:李新民, Email: slixinmin@163.com

收稿日期:初稿 2012-02-09, 修回 2012-03-30

1.2 数据获得

用 6 MV 光子束分别对源皮距 100 cm 处 10 cm×10 cm、12 cm×12 cm、15 cm×15 cm 射野照射 100 MU, 用基于非晶硅 EPID 软件采集信号, 并根据灰度值与剂量的转换关系将灰度图转换为剂量图。

1.3 模型设计

针对前述对百分剂量差法、DTA 分析法和 γ 分析法的讨论, 以及计算与剂量、位置的关系, 利用采集并转化得到的剂量图, 设计与两者的关系模型 (待比较图像) 并进行验证分析 (见图 1、图 2 和图 3, 以 10 cm×10 cm 射野为例), 其它射野构建模型方法相同。

图 1 是经过测量和转换后的剂量图像, 作为参考图像, 为了便于描述, 将其剂量归一到最大剂量值, 以剂量水平 (Dose Level) 为标识, 在图 1 的剂量数据基础上按图 2 所示将其以 Cross-Plane 方向 (中心线横轴) 和 In-Plane 方向 (中心线纵轴) 等分为 4 个部分, 分别进行模型构建, 其剂量归一点与参考图像的一致。构建方法如下:

区域 1 的数据与参考图像相应区域数据完全一致, 未经任何改动。

区域 2 数据进行了剂量的偏移, 其偏移量的大小 Δdose 是距中心轴距离 x 的函数:

$$\Delta\text{dose}=0.001x \quad (1)$$

当离轴距离达到 30 mm 时, 最大剂量偏差可以达到 3%, 对 10 cm×10 cm 射野来说, 理论上在整个射野内, 最大剂量偏差可达到 7%。

对区域 3 数据进行位置偏移, 其偏移量的大小 Δlen 是沿着 Cross-Plane 负方向离开射野中心纵轴距离 x 的函数:

$$\Delta\text{len}=0.1x \quad (2)$$

当离开纵轴达 30 mm 时, 位置偏移可达到 3 mm, 对 10 cm×10 cm 射野来说, 理论上在整个射野内, 最大位置偏差可达到 5 mm。

对区域 4 数据同时进行剂量偏移和位置偏移, 其偏移函数与上述相同, 只是位置偏移变量 x 的方向是沿着 In-Plane 正方向。

经过处理后的模型图 2 中可看出参与位置偏移的区域 3、4 外围有较明显的剂量向外扩展现象, 根据 Dose Level, 可看出参与剂量偏移的区域 2、4 有较为明显的剂量增大现象, 剂量是以中心轴为原点, 以扇形方式向外逐渐变大, 而区域 1 则没有变化。通过两者的等剂量线叠加图 3, 可更为直观地观察

到参考剂量与待比较剂量的分布情况。

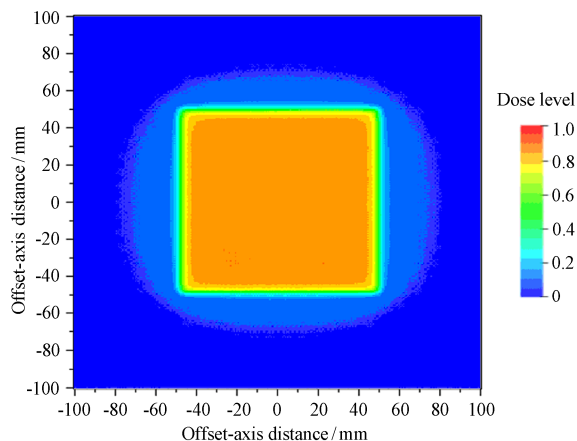


Fig.1 Reference image

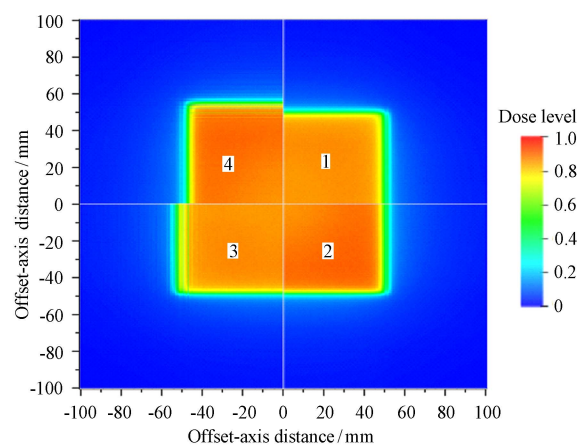


Fig.2 Evaluated image

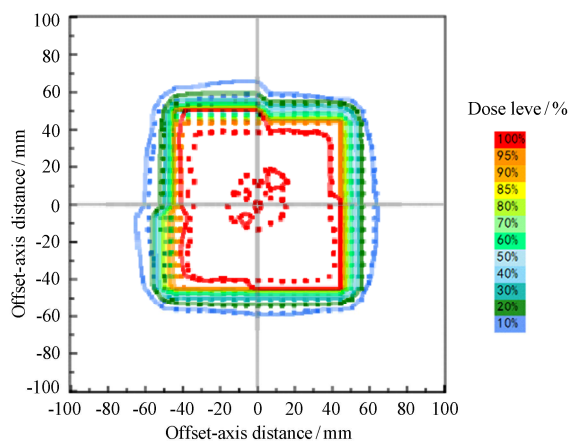


Fig.3 Overlaps of two isodose lines (solid lines-reference image, dot lines-evaluated Image)

1.4 分析工具

根据前述 3 种剂量比较方法理论^[4,7], 基于 C# 语言编写剂量分布比较软件 (DDCS)。对 3 种比较方法都以大于等于参考数据最大剂量 10% 的区域作为分析区域, 百分剂量差法采用的标准剂量误差在 $\pm 3\%$ 以内; DTA 分析法采用等剂量点最大寻找距离为 10 mm, 标准距离误差在 3 mm 以内; γ 分析法采

用剂量差标准 $\Delta D=\pm 3\%$ ，距离差标准 $\Delta d=3\text{mm}$ ，当 $\gamma\leq 1$ 时通过分析，当 $\gamma>1$ 时，则未通过。用开发的软件 DDCS 对两种剂量分布分别进行逐点分析。

2 结果和讨论

以下主要以 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 射野为例进行分析讨论，对于其它射野情况只给出相应分割区域采用不同分析方法的通过率，便于从总体上进行分析。

2.1 百分剂量差分析

分析结果见图 4 和表 1。对于区域 1，由于数据未进行任何改动，其结果为恒值 0。对于区域 2，随着离中心轴距离的增大以扇形方式值逐渐变大，其偏移值在 30 mm 处的剂量差异值为 3% ，最大值出现在对角线上 10% 等剂量线附近为 7.48% 。区域 3，左端的射野边缘，剂量差异非常大，高达 373.3% ，而在该区域下端射野边缘，由于位置的偏移方向与等剂量线平行，所以剂量差异值很小甚至为 0。在剂量分布梯度小的内部区域，剂量差异值非常小。

区域 4 是剂量偏移和位置偏移的叠加，仍然可以看到在剂量分布平缓区域，剂量差异随着离轴距离的增加缓慢变大，而在该区域上部射野边缘由于两种作用的影响，剂量梯度大引起较大误差，差异值高达 553.9% ，而在左端的射野边缘，同样由于位置偏移方向的原因，受位置偏移影响较小，相当于只受剂量差异的影响。

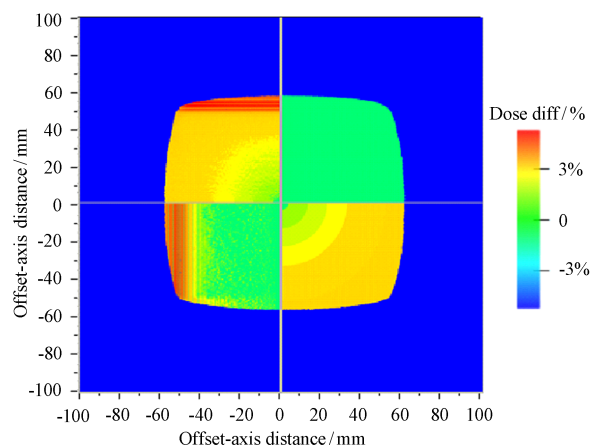


Fig.4 Percentage dose difference comparison for $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ field

Table 1 Results of percentage dose difference comparison for two data sets ($10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$)

Region	Total points	Evaluated points	Passed points	Failed points	Pass rate / %	Mean value	Max value
1	262656	86991	86991	0	100	0	0
2	262144	85475	17849	67626	20.88	4.42	7.48
3	262656	80164	62795	17369	78.33	25.21	373.3
4	263169	81384	20343	61041	25.0	33.1	553.9

2.2 DTA 分析

分析结果见图 5 和表 2。区域 1 的距离差异值为恒值 0。区域 2 中在靠近 Cross-Plane 线和 In-Plane 线位置处的值较小，这是由于在计算时各点的计算区域超出了边界，在较小的距离内仍然找到了等值点。在剂量分布平缓区域值较大，而在射野边缘区域（约为 10% — 90% 等剂量线附近）又逐渐减小，距离再远时又有增大趋势，这是因为 10% 等剂量线附近剂量梯度开始变小，该区域中最大距离差大于 10 mm 。区域 3 中值随着离开 Cross-Plane 线距离的增大而缓慢增大， 30 mm 位置差异为 3 mm ，而在该区域下端剂量梯度大的射野边缘值较小，这是由于位置偏移方向的影响。区域 4 中反映了两种作用的共同结果，在靠近 Cross-Plane 线和 In-Plane 线位置处的值较小，原因同上。剂量分布平缓区域值较大，在射野边缘值反而小，当距离再远时由于梯度变小

值又有变大的趋势。在左端的区域由于位置偏移方向缘故，值要小一些，但趋势是一致的。该区域中最大距离差大于 10 mm 。

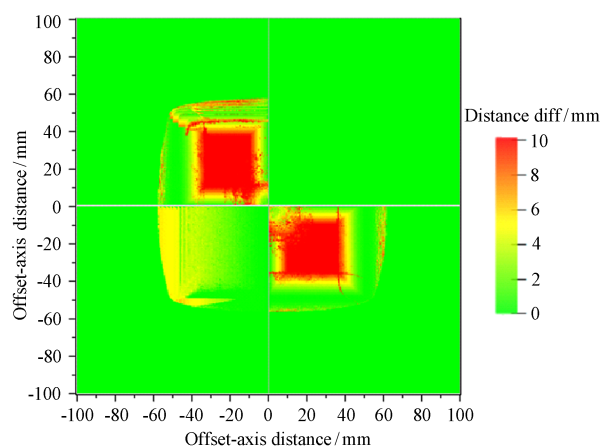


Fig.5 DTA comparison for $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ field

Table 2 Results of DTA comparison for two data sets (10 cm×10 cm)

Region	Total points	Evaluated points	Passed points	Failed points	Pass rate / %	Mean value	Max value
1	262656	86991	86991	0	100	0	0
2	262144	85475	39016	46459	45.65	4.63	13.72
3	262656	80164	61070	19094	76.18	1.81	>10
4	263169	81384	29995	51389	36.84	6.36	>10

2.3 γ 分析

分析结果见图 6 和表 3。区域 1 的剂量差和距离差异为恒值 0，所以 $\gamma=0$ 。区域 2 中 γ 值随离开中心轴距离的增加沿对角线方向逐渐增大，最大值 1.85，在射野边缘（90%—70%等剂量线之间）值非常小，最小值为 0.2 左右，随后（70%—20%等剂量线之间）值又逐渐增大。区域 3 中在剂量分布较缓的区域 γ 值较小约为 0.07—0.3，在左端的半影区（80%—20%等剂量线之间） γ 值非常大，最大可达到 11.62，距离再远时，值又逐渐变小，在下端的半影区受位置偏移方向的影响，值较小。区域 4 中结果为区域 2、区域 3 结果的叠加，剂量平缓区内 γ 值逐渐增大，而且沿着位置偏移方向值要偏大，在上端 95%—90%等剂量线范围值较小，半影范围值变大，最大可达到 13.72，而在左端受位置偏移方向

的影响值很小。对其它射野有着相似的分析结果，不再进行详细讨论，详见于表 3。

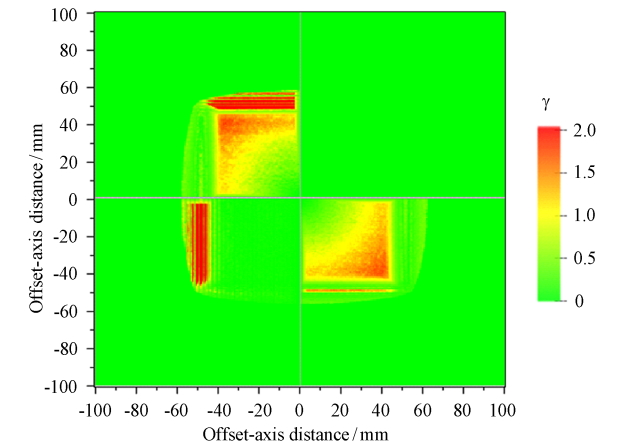


Fig. 6 γ comparison for 10 cm×10 cm field

Table 3 Results of γ comparison for two data sets(10cm×10cm)

Region	Total points	Evaluated points	Passed points	Failed points	Pass rate / %	Mean value	Max value
1	262656	86991	86991	0	100	0	0
2	262144	85475	61494	23981	71.94	0.68	1.85
3	262656	80164	70680	9484	88.17	0.54	11.62
4	263169	81384	53496	27888	65.73	1.06	13.72

2.4 3 种射野分析结果的比较

表 4 中在不同射野大小条件下，除了区域 1，在其它 3 个区域内， γ 分析法的通过率比百分剂量差法和 DTA 分析法的通过率都要高。3 大比较方法中，对于 γ 分析法和 DTA 分析法来说，除了区域 1，区域 3 的通过率最高，区域 2 的次之，区域 4 的值最小。而对于百分剂量差分析法，除了区域

1，区域 3 的通过率最高，区域 4 的次之，区域 2 的值最小。可见在误差水平相当的情况下，只有距离偏移误差对通过率的影响要比只有剂量误差的通过率要小。由于区域 4 为两种误差同时存在，如果位置偏移方向相反，则区域 4 的通过率可能会大大降低，有待于对剂量误差与位置误差的相关性作进一步研究。

Table 4 Pass rate for three fields using different dose comparison methods

Region	10 cm×10 cm			12 cm×12 cm			15 cm×15 cm		
	PDD	DTA	γ	PDD	DTA	γ	PDD	DTA	γ
1	100	100	100	100	100	100	100	100	100
2	20.88	45.65	71.94	14.43	38.2	61.65	9.5	29.43	53.39
3	78.33	76.18	88.17	79.1	66.54	89.99	80.31	56.4	91.99
4	25.0	36.84	65.73	18.35	32.35	54.34	11.63	25.9	44.23

3 结论

综合以上分析,可清晰得到百分剂量差异、DTA和 γ 分析法的优缺点及其对结果的影响。剂量差异分析法在剂量分布梯度大的区域对位置偏移敏感,计算值过高,引起很大误差,而对于剂量分布平缓的区域计算结果较好。DTA分析法在剂量分布平缓区域会造成较大误差,为了寻找等值点,小的剂量差异可能要跨越较大的距离,计算结果偏高,该方法适用于剂量分布梯度较大的区域。 γ 分析法使得剂量差异法和DTA法相互弥补不足,解决其在不同剂量梯度上计算的缺陷,最终在剂量梯度大的区域和小的区域都不至于得到过高的计算结果。但是该方法也有缺陷,其分析的结果对剂量梯度和空间分辨率也有依赖性。另外,该方法属于不对称分析法,分析结果还与参考剂量分布的选择有关,即如果以待比较剂量分布作为参考剂量分布,以参考剂量分布作为待比较剂量分布进行分析,结果会有差异,这将有待于进一步研究,希望不久会有更好的分析方法得以提出。

参考文献

- 1 Van Dyk J, Barnett R B, Cygler J E, *et al*, Commissioning and quality assurance of treatment planning computers [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1993, **26**(2): 261-273
- 2 Low D A, Moran J M, Lei Dong, *et al*, Dosimetry tools and techniques for IMRT [J]. Med Phys, 2011, **38**(3): 1313-1338
- 3 Mah E, Antolak J, Battista J J. Experimental evaluation of a 2D and 3D electron pencil beam algorithm [J]. Phys Med Biol, 1989, **34**(9): 1179-1194
- 4 Harms W B, Low D A, Wong J W, *et al*. A software tool for the quantitative evaluation of 3D dose calculation algorithms [J]. Med Phys, 1998, **25**(10): 1830-1836
- 5 Shiu A S, Tung S, Hogstrom K R, *et al*. Verification data for electron beam dose algorithms [J]. Med Phys, 1992, **19**(3): 623-636
- 6 Cheng A, Harms W B, Gerber R L, *et al*. Systematic verification of a three-dimensional electron beam dose calculation algorithm [J]. Med Phys, 1996, **23**(5): 685-693
- 7 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
- 8 Low D A, Dempsey J F. Evaluation of the γ dose distribution comparison method [J]. Med Phys, 2003, **30**(9): 2455-2464

Analysis of the most commonly used dose distribution comparison methods in radiotherapy dosimetric verification

MIAO Li SUN Yanze LI Xinmin

(School of Radiation Medicine and Protection, Medical College of Soochow University, Suzhou 215123, China)

ABSTRACT Three fields were captured with 6 MV photon beam, using a-Si EPID(SDD 100cm). Then the derived dose images were split into four regions and every region could be modified by using different methods to build models. The three dose comparison methods most commonly used in radiotherapy were used to analyze the absorbed doses in four regions. The result shows that the percentage dose difference comparison method is sensitive in steep dose gradient regions where small spatial offsets between two distributions may present large dose difference, while it works well in regions of relatively shallow dose gradients. In contrary, the DTA (distance-to-agreement) method is sensitive in shallow dose gradient regions where a large DTA value may be calculated for small dose differences, while it performs well in steep dose gradient regions. However, as the gamma method has referenced the merits of percentage dose difference and DTA, it performs well both in steep and shallow dose gradients and produces the lowest error. So the gamma comparison method can be performed better in clinical dosimetric verification.

KEYWORDS Radiotherapy, Dosimetric verification, Dose difference comparison method, DTA method, γ method

CLC R811.1, R815.2, R815.6