

TOMO 放疗计划中 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 与射野射线均匀性及适形度的相关性分析

但记文, 谷丹, 刘光贤

(昆明医科大学第一附属医院肿瘤放疗科, 云南昆明 650032)

[摘要] **目的** 对 Tomotherapy Hi Art System 中调制因子 (modulation factor, MF) 与射野剂量的适形指数 (conformal index, CI)、均匀指数 (heterogeneous index, HI) 3 者间的相关性做出研究分析. **方法** 在昆明医科大学第一附属医院肿瘤放疗科 2012 年 5 月至 11 月 TOMO 放射治疗患者中随机性抽取 30 例放疗计划, 读取相关数据, 并计算 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 、适形度指数 (CI)、均匀性指数 (HI), 以 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 为参照, 分别与 CI、HI 成两组对照分析组, 利用统计学软件 SPSS 分析 2 组对照数据各自之间的相关性, 从而判断 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 是否可以作为评估 TOMO 放疗计划射野射线水平的指标. **结果** $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 与 CI 呈正相关性 ($P < 0.05$), $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 与 HI 并无实际统计学意义. **结论** 对于 TOMO 放疗计划的放射物理学评估而言, $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 可以成为一定意义上评估射野射线水平的客观因素.

[关键词] Tomotherapy; $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$; 适形度指数; 均匀度指数

[中图分类号] R730.55 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 2095-610X (2014) 09-0113-04

Correlation Analysis of $MF_{(actual)}/MF_{(preset)}$ with Heterogeneous Index and Conformal Index of Radiation in Tomotherapy Plan

DAN Ji-wen, GU Dan, LIU Guang-xian

(Dept. of Radiation Oncology, The 1st Affiliated Hospital of Kunming Medical University, Kunming Yunnan 650032, China)

[Abstract] **Objective** To investigate the correlations between modulation factor (MF) of Tomotherapy Hi Art System, conformal index (CI) and heterogeneous index (HI) of radiotherapy treatment plan. **Methods** Thirty patients undergoing tomotherapy in our department from May 2012 to November 2012 were selected randomly. The data from the tomotherapy treatment planning system (TPS) including $MF_{(actual)}$, $MF_{(preset)}$, CI and HI were calculated. The ratio of $MF_{(actual)}$ and $MF_{(preset)}$ used as reference, two groups were set up which Group 1 and Group 2 were aimed to analyze the relationships of the ratio with CI and HI, respectively. **Results** There was a significant negative correlation between $MF_{(actual)}/MF_{(preset)}$ and CI ($P < 0.05$). The analysis showed no correlation between $MF_{(actual)}/MF_{(preset)}$ and HI, with no statistically significant difference ($P > 0.05$). **Conclusion** $MF_{(actual)}/MF_{(preset)}$ can be used as a factor to evaluate the X-ray delivery to some extent in a radiotherapy treatment plan.

[Key words] Tomotherapy; Modulation factor; $MF_{(actual)}/MF_{(preset)}$; Conformal index; Heterogeneous index

Tomotherapy 螺旋断层影像引导 (image guided radiation therapy, IGRT) 强调放疗系统, 是肿瘤强调放射治疗的一种, TOMO 相比常规强调放疗, 可以同时实现适形度和均匀性都高得多的射野剂量分布^[1,2], TOMO 螺旋断层成像和治疗均采用兆

伏级射线, 不会产生成像中心和治疗中发生变差的问题, 患者每次的受照剂量及分布可以通过 MVCT 扫描图像准确的计算出来^[3], 可在临床上对实际照射剂量和计划剂量进行定量分析^[4-6]. TOMO 采用的是气动二元多叶光栅 (multi-leaf collimator, MLC)

[作者简介] 但记文 (1985~), 男, 湖北武汉市人, 在读硕士研究生, 主要从事肿瘤放疗工作.

[通讯作者] 刘光贤. E-mail: bingxizhilian@126.com

设计, 64 片设计为凹凸状结构互锁的二元叶片调制照射野, 每个叶片只有开关两种状态^[7], 可以通过开关时间来调制每层照射野的照射强度. 对于 TOMO, 螺旋照射和独特的二元气动 MLC 共同决定了射野面积和剂量分布的灵活程度, 可以精细的调制剂量累计的最终结果^[8]. 在这样特定的照射方式下, 故而较好的解决了照射野的层与层衔接处剂量不均匀的问题. 在此基础上, 每层射野乃至全部射野的射线水平就会成为评估临床治疗效果的关键, 而射野内射线水平由靶区剂量的适形度指数和均匀性指数共同决定. 本文旨在通过研究 TOMO 放疗计划中调制因子与 CI、HI 的关系, 进而判断 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 是否对射野内射线水平产生直接影响.

1 资料与方法

1.1 研究对象

1.1.1 研究系统 Tomotherapy Hi Art System 是 TOMO 放疗计划制作系统, 用逆向计划的方式实现临床目标. 系统将临床处方剂量建模为数字目标函数, 变量是每个子野的权重, 治疗计划系统最速下降梯度优化算法寻找目标函数的最优值, 除非在操作中中断优化, 否则系统对 TOMO 放疗计划的优化不会停止. 就 Tomotherapy Hi Art System 的性质简单来说, 其工作是对 TOMO 放疗计划的处方剂量进行计算, 并基于临床 CT 采集和射野结构定义, 对 TOMO 放疗计划的射野中的射线水平作出最优化的处理.

1.1.2 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 比值的计算方式与意义 Modulation Factor 即 $MF = \frac{\text{最长子野打开时间}}{\text{子野平均打开时间}}$ (公式 1)^[9].

$$MF_{(实际)}/MF_{(预设)} = \frac{\text{子野平均打开时间}_{(预设)}}{\text{子野平均打开时间}_{(实际)}} \quad (\text{公式 2})$$

综上所述, $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 的值必然是小于 1 的, 其意义在于从子野平均打开时间的角度, 直接反映了在 Final dose 之后, TOMO 放疗计划中的全部射野对于小野数量的放弃程度. 也就是说 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 越接近 1, 代表全部射野对小野放弃的程度越大.

1.1.3 射野剂量的适形度指数和均匀性指数 对射野射线水平起决定性作用的评估指标为适形度指数 (CI) 及均匀性指数 (HI). 理论上对于任何一个 TOMO 计划而言, 全部射野的总的 CI、HI^[10] 越好, 说明射野内射线剂量越集中, 分布越均匀, 放射治疗效果自然越好.

由于 TOMO 是通过控制 MLC 的叶片开关时间来调制每层照射野的照射强度, 在每层照射野上, 对于不同的子野有不同的受照剂量, 因此, MLC 的叶片的开关时间必然是不全相同的. 在此基础上, 对于 TOMO 放疗计划, 调制因子 (即 MF) 的设定即显现得尤为重要.

在临床上, 对于一个 TOMO 放疗计划的实际调制中, 会预先设定一个 MF, 将之称为 $MF_{(预设)}$, 在此基础上, 综合了肿瘤射野处方剂量和不同的危及器官受照剂量等多个照射要求后, Tomotherapy Hi Art System 会给与优化, 并通过 Final dose 最终得出一个临床上能够实际实施的放疗计划, 最终的放疗计划所产生的 MF, 为区别将之称为 $MF_{(实际)}$.

在临床的实际运用中, 子野是照射野的基本组成元素. 一个子野就是指通过 MLC 的一个叶片在特定的机架角度调制的射线的面积, 每个子野相应的 MLC 叶片打开的最短时间为 20 ms. 每个射野区域内的所有子野所受射线水平并无法全部达到 TOMO 放疗计划 Final dose 前的设定要求, 而无法达到最低叶片完全开关时间要求 (即 20 ms) 的子野被称为小野.

在 TOMO 放疗计划的 Final dose 过程中, 必然有一部分数量的小野被放弃, 因此与 Final dose 之前 TOMO 放疗计划相比, Final dose 之后放疗计划中全部射野的子野最短打开时间增长, 从而客观上子野平均打开时间变长, 而最长子野打开时间在 Final dose 前后并没有发生改变, 这也就是 $MF_{(实际)}$ 与 $MF_{(预设)}$ 相互区别的原因所在. 那么, 根据公式 1 可以得出:

在放射物理学中.

$$CI = (V_{tref}/V_t) \times (V_{tref}/V_{ref}) \quad (\text{公式 3})$$

该计算公式中 V_{tref} 表示参考等剂量线面所包绕的射野体积, V_t 表示射野体积, V_{ref} 表示参考等剂量线面所包绕的所有区域体积, CI 越接近 1, 说明射野的适形度越好.

综上所述, 射野内 CI 与 HI 越接近 1, 说明射野内射线水平越好, 其剂量的分布越合理, 临床治疗效果也越好.

$MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 所表现出来的 TOMO 放疗计划中全部射野对于小野的放弃程度是否对该射野中的 CI、HI 产生影响. 换言之, 全部射野内小野放弃

的程度所带来的剂量丢失是否会使该射野内的剂量分布的适形度和均匀性发生改变.

1.2 研究方法

本文随机抽取了昆明医科大学第一附属医院肿瘤放疗科 2012 年 5 月至 11 月所有治疗的 TOMO 患者中的 30 例放疗计划, 所抽取放疗计划为本科室 2 名物理师调制, 按照科室常规设置初算参数并进行计算. 全部病例经过本科室 1 位主任医师的评估、确认并最后在临床上对患者进行实施. 统计每 1 例放疗计划的 MF_(实际)、MF_(预设)、CI、HI, 并对这 30 例放疗计划的上述参数做出比较, 以此来分析 TOMO 放疗计划中 MF_(实际)/MF_(预设)与射野剂量分布优劣是否存在相关性.

1.3 统计学方法

本文通过 SPSS 对 MF_(实际)/MF_(预设)、CI、HI 等各项数据进行统计分析 (表 1). 通过构建 30 例 TOMO 放疗计划的 MF_(实际)、MF_(预设)、CI 和 HI 之间的 SPSS 散点图、相关性图表来对其作相互比较的两组数据间的关联性做出数字相关性的分析.

2 结果

30 名被抽选患者经 1 a 随访, 全部生存, 见表 1. 经统计分析后可以明确发现: (1) 对于所抽取的 30 例用于对比的 TOMO 放疗计划中的 MF_(实际)/MF_(预设)与 CI 的相关性分析中, r 为 0.559, 表示有正相关性; P 为 0.01, 表示两者间有统计学差异. (2) MF_(实际)/MF_(预设)与 HI 的相关性分析中, r 为 -0.323, 表示有微小负相关性; P 为 0.81, 表示两者间并无实际统计学差异 (表 2、图 1、图 2).

3 讨论

通常在一个 TOMO 放疗计划中会有几百个射野, 故而, 一个 TOMO 放疗计划的全部射野会有几万个子野, 不能达到最低射野受照要求的小野的数量相对于全部射野的子野的数量毕竟是少数, 无法对射野的总的射线水平产生决定性影响. 但是, Final dose 前后的 TOMO 放疗计划中的射野因为小野的丢失, 还是有一定程度上射野内射线的损失. 故而, 根据上文的结果可以分析出: 因为小野所对应的 MLC 叶片完全开闭时间太短, 故而其所受照剂量也很小, 丢弃的小野数量所致的流失的照射剂量, 不能对射野的均匀性产生影响, 这一点可以从 HI 与 MF_(实际)/MF_(预设)的散点图 (图 1) 中可以看出, 两者间的数据分布散乱, 不构成任何联系. 因而

表 1 30 例 TOMO 放疗计划 MF_(实际)/MF_(预设)与相应适形度和均匀性的统计

Tab. 1 The statistical results of MF_(actual)/MF_(preset), CI and HI in 30 TOMO radiotherapy planning

患者编号	MF _(实际) /MF _(预设)	HI	CI
1	0.62	1.06	0.85
2	0.52	1.07	0.28
3	0.93	1.06	0.94
4	0.88	1.06	0.93
5	0.97	1.03	0.88
6	0.97	1.03	0.82
7	0.82	1.04	0.79
8	0.72	1.07	0.52
9	0.98	1.04	0.81
10	0.72	1.08	0.34
11	0.81	1.16	0.39
12	0.94	1.06	0.92
13	0.88	1.05	0.75
14	0.96	1.04	0.92
15	0.75	1.12	0.84
16	0.98	1.07	0.89
17	0.77	1.06	0.78
18	0.77	1.08	0.69
19	0.92	1.05	0.91
20	0.78	1.07	0.67
21	0.83	1.15	0.52
22	0.83	1.05	0.82
23	0.88	1.06	0.89
24	0.86	1.14	0.79
25	0.90	1.04	0.31
26	0.98	1.06	0.80
27	0.96	1.04	0.85
28	0.79	1.08	0.78
29	0.88	1.08	0.84
30	0.85	1.05	0.76
平均值 ± 标准差	0.85 ± 0.11	1.07 ± 0.03	0.74 ± 0.19

表 2 MF_(实际)/MF_(预设)与适形指数 |CI| 均匀指数 |HI| 的相关性分析

Tab. 2 Correlations between MF_(actual)/MF_(preset) and both CI and HI

参 数	CI	HI
相关系数 (r)	0.559	-0.323
P	0.01	0.81

注: 当 $P < 0.05$ 时则表示有统计学差异; $r < -0.5$ 时有显著负相关性; $r > 0.5$ 时有显著正相关性.

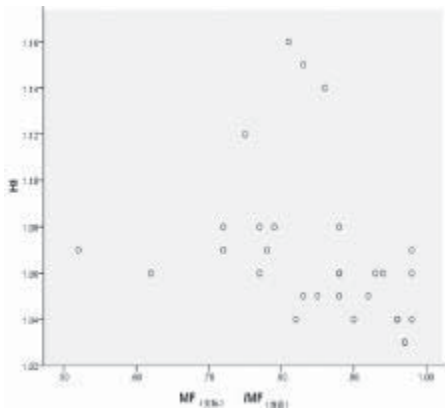


图 1 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 与 HI 相关关系散值

Fig. 1 The correlation scatter of $MF_{(actual)}/MF_{(preset)}$ and HI

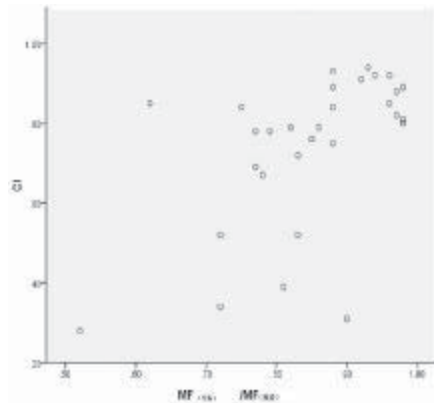


图 2 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 与 CI 相关关系散值

Fig. 2 The correlation scatter of $MF_{(actual)}/MF_{(default)}$ and CI

HI 与 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 没有相关性；如前文结果中 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 与 CI 的相关性散点图（图 2）可以看出， $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 虽然与 CI 有显著的正相关性，但两者间的正相关分布比较混乱随意，并未呈现出明确的几何性比例关系。故而 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 与 CI 未有较为规律的正相关性，两者间虽然相互影响，却只是存在相对松散的联系， $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 对于 CI 只是一个评估性因素，对于 CI 的好坏没有决定性的影响。故而 $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 的大小并不对 TOMO 放疗计划中射野射线水平产生直接干预。

在此基础上，本文得出以下结果：（1）在 TOMO 放疗计划中， $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 可以成为放疗计

划的射野剂量的适形度的评估因素，但是， $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 不能成为射野剂量的均匀性的评估因素，从这个角度能够说明，小野的丢弃可以在一定程度上对射野剂量的分布产生影响；（2）对于 TOMO 放疗计划的放射物理学评估而言， $MF_{(实际)}/MF_{(预设)}$ 可以成为一定意义上评估射野射线水平的客观因素。

[参考文献

- [1] Intensity Modulated Radiation therapy Collaborative Working Group, Intensity-modulated Radiotherapy :current status and issue of interest[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2001, 51(4):880 - 914.
- [2] JAMES H V, SCRASE C D, POYNTER A J. Practical experience with intensity--modulated radiotherapy[J]. Br J Radiol, 2004, 77(913):3 - 14.
- [3] MACKIE T R, HOMES T, SWERDLOFF S, et al. TomoTherapy: a new concept for the delivery of dynamic conformal radiotherapy [J]. Med Phys, 1993, 20(6): 1 709 - 1 719.
- [4] KAPATOES J M, OLIVERA G H, RECWERDT P J, et al. Delivery VERification in sequential and helical Tomotherapy[J]. Phys Med Bio, 1999, 44(7):1 815 - 1 841.
- [5] KAPATOES J M, OLIVERA G H, RUCHALA K J, et al. A feasibal method for clinical delivery verification and dose reconstruction in TomoTherapy [J]. Med Phys, 2001, 28(4):528 - 542.
- [6] KAPATOES J M, OLIVERA G H, BALOG J P, et al. On the accuracy and effectiveness of dose reconstruction in TomoTherapy [J]. Phys Med Biol, 2001, 46(4):943 - 966.
- [7] 马林, 王连元, 周桂霞. 肿瘤断层放射治疗[M]. 四川科学技术出版社, 2010: 36 - 37, 60 - 61.
- [8] BALOG J, MACKIE TR, PEARSON D, et al. Benchmarking beam alignment for a clinical helical TomoTherapy device[J]. Med Phys, 2003, 30(6):1 118 - 1 127.
- [9] 马林, 王连元, 周桂霞. 肿瘤断层放射治疗[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2010: 60 - 61.
- [10] 陈开强, 胡彩容, 陈俊强, 等. 不同能量在胸中上段食管癌调强放疗中的剂量学对比研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2013, 30(3):4 093 - 4 096.

(2014 - 06 - 04 收稿)