

动态适形弧技术与容积调强技术在肺转移瘤立体定向放射治疗中的剂量学研究

郑芳,陈洪涛,陈伟思,史亚滨,高艳,梁晓敏,钟鹤立

深圳市人民医院/暨南大学第二临床医学院/南方科技大学第一附属医院肿瘤放疗科,广东 深圳 518020

【摘要】目的:比较动态适形弧(DCA)与容积调强(RA)两种放疗技术在肺部转移瘤立体定向放射治疗(SBRT)中的剂量学差异,评估各自的优势及在临床中的应用价值。**方法:**回顾性选择肺转移瘤患者20例,分别采用RA和DCA技术设计SBRT计划,基于RTOG0813报告标准,对比两种技术的PTV剂量学参数及危及器官受量。另外比较了计划设计时间、MU值及出束时间以评估两类计划的执行效率。**结果:**所有RA和DCA计划均能满足RTOG0813报告规定的靶区覆盖率要求,RA计划比DCA计划在靶区适形度CI(0.998 ± 0.039 vs 1.357 ± 0.138)、剂量跌落梯度指数 $R_{50\%}$ (4.90 ± 0.93 vs 6.04 ± 1.09)及 D_{2cm} ($47.3\%\pm6.7\%$ vs $54.5\%\pm10.8\%$)指标上表现更好($P<0.05$)。在肺部 $V_{12.5Gy}$ [(148.60 ± 114.24) cm^3 vs (176.25 ± 152.16) cm^3]、 $V_{13.5Gy}$ [(135.52 ± 107.25) cm^3 vs (162.10 ± 141.21) cm^3]、 V_{20Gy} ($2.83\%\pm3.38\%$ vs $3.52\%\pm4.29\%$)以及胸壁 D_{max} [($3\,734.42\pm1\,229.70$)cGy vs ($4\,230.31\pm1\,510.60$)cGy]、 V_{30Gy} [(0.51 ± 0.81) cm^3 vs (0.93 ± 1.25) cm^3]指标上RA计划比DCA计划受量更低($P<0.05$)。两类计划在心脏、脊髓、食管、血管及皮肤受量上无统计学差异($P>0.05$)。在执行效率方面,DCA计划设计耗时平均比RA计划节省81.1%,机器跳数平均降低41.1%,机器出束时间平均降低56.5%($P<0.05$)。**结论:**RA计划相对于DCA计划具有更好的适形度且能更好地控制靶区外剂量跌落梯度,在保护与靶区位置相近的危及器官上更有优势。而DCA相对RA计划可以显著提高计划设计速度和治疗效率,同时可以克服运动靶区与叶片间的交互效应。在两者剂量分布差异较小时,应注重提高治疗效率,DCA技术不失为一种可替代RA的有效治疗方案。

【关键词】动态适形弧;容积调强;立体定向放射治疗;肺转移瘤

【中图分类号】R734;R811

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)08-0929-07

Dosimetric evaluation of dynamical conformal arc and rapid arc in stereotactic body radiotherapy for lung metastases

ZHENG Fang, CHEN Hongtao, CHEN Weisi, SHI Yabin, GAO Yan, LIANG Xiaomin, ZHONG Heli

Department of Radiation Oncology, Shenzhen People's Hospital/the Second Clinical Medical College, Ji'nan University/the First Affiliated Hospital, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518020, China

Abstract: Objective To compare dosimetric differences between dynamic conformal arc (DCA) and rapid arc (RA) in stereotactic body radiotherapy (SBRT) for lung metastases, and to evaluate their advantages and clinical application value. **Methods** Twenty cases of lung metastases were selected retrospectively, and two kinds of SBRT plans were generated using RA and DCA techniques, separately. Based on the RTOG0813 protocol criteria, the plan metrics such as PTV dosimetric parameters and organs-at-risk doses were compared between two groups of SBRT plans. In addition, the execution efficiency was evaluated by planning time, MU and delivery time. **Results** All RA and DCA plans met the PTV coverage requirements in the RTOG0813 protocol. RA plans performed better than DCA plans in conformity index, intermediate dose spillage $R_{50\%}$ and D_{2cm} (0.998 ± 0.039 vs 1.357 ± 0.138 , 4.90 ± 0.93 vs 6.04 ± 1.09 , $47.3\%\pm6.7\%$ vs $54.5\%\pm10.8\%$; $P<0.05$). Compared with DCA plans, RA plans provided a lower $V_{12.5Gy}$, $V_{13.5Gy}$, V_{20Gy} to lungs, and less D_{max} , V_{30Gy} to the chest wall [(148.60 ± 114.24) cm^3 vs (176.25 ± 152.16) cm^3 , (135.52 ± 107.25) cm^3 vs (162.10 ± 141.21) cm^3 , $2.83\%\pm3.38\%$ vs $3.52\%\pm4.29\%$, ($3\,734.42\pm1\,229.7$)cGy vs ($4\,230.31\pm1\,510.60$)cGy, (0.51 ± 0.81) cm^3 vs (0.93 ± 1.25) cm^3 ; $P<0.05$]. There was no statistical difference between the two kindsof plans in the dosimetric parameters of the heart, spinal cord, esophagus, vessels and skin ($P>0.05$). The

【收稿日期】2022-03-15

【基金项目】广东省医学科研基金(B2021395)

【作者简介】郑芳,硕士研究生,工程师,研究方向:放射物理与剂量学,E-mail: 1095025681@qq.com

【通信作者】钟鹤立,高级工程师,研究方向:肿瘤放射物理,E-mail: zhongheli@tom.com

comparison of execution efficiency showed that DCA plans saved 81.1% planning time, reduced 41.1% MU and 56.5% delivery time than RA plans. **Conclusion** Compared with DCA plan, RA plan has better conformability and can better control the dose drop gradient outside the target area, and it is more beneficial in protecting organs-at-risk close to the target area. Compared with RA plan, DCA plan can significantly improve the planning and treatment efficiencies while overcoming the interaction effect between the moving target area and the blade. When the difference in dose distribution between them is trivial, attention should be paid to the improvement of treatment efficiency, and DCA technique can be regarded as an effective treatment alternative to RA.

Keywords: dynamical conformal arc; rapid arc; stereotactic body radiotherapy; lung metastasis

前言

肺转移瘤是最常见的转移性肿瘤之一,25%~30%的肿瘤会发生肺转移,但大部分患者不适合手术治疗。随着精准放疗技术的发展,体部立体定向放射治疗技术(Stereotactic Body Radiation Therapy, SBRT)对于肺转移瘤尤其是局限性转移能取得较好的疗效^[1-2]。三维适形(Three-Dimensional Conformal radiation Therapy, 3DCRT)和调强放疗(Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT)在过去是常用的SBRT放疗技术,随着容积调强技术(Rapid Arc, RA)的出现,因其能保持良好计划质量同时可以更好地提高治疗效率而成为了SBRT通用的治疗技术选择^[3-6]。动态适形弧技术(Dynamical Conformal Arc, DCA)是一种类似于RA的弧形照射技术,在机架旋转过程中,多叶准直器(Multileaf Collimator, MLC)始终动态适形于靶区,它不涉及逆向优化过程,在确定好照射弧的起始角度后,可以直接进行剂量计算,提供较好的适形剂量分布^[7-9]。

相比于DCA技术,RA是一种集子野形状,剂量率、机架速度一体优化的高度调制的复杂计划,计划的复杂性会增加相应的机器跳数,治疗时间也随之增加。Hoogeman等^[10]研究指出当病人的治疗时间超过15 min,病人的体位将会有所改变。另外对于肺这样的运动靶区,运动的叶片与运动靶区间的交互效应会导致靶区出现欠量或者超量的情况,计划越复杂,这种效应会越明显^[11],而DCA计划中叶片是对整个靶区动态适形,治疗速度快,交互效应影响很小。近些年来,DCA技术开始在放射外科手术(Stereotactic Radiosurgery, SRS)、立体定向放射治疗(Stereotactic Radiotherapy, SRT)中有较好应用,并且该应用已延伸到SBRT治疗中^[12-13]。

本文以肺部转移瘤为例,分别比较DCA计划与RA计划的剂量学特点及执行效率,希望能为两种技术在临床上的应用提供一些参考。

1 材料与方法

1.1 病例选择

回顾性选择深圳市人民医院2020年1月~9月收治的行SBRT治疗的肺单发转移瘤患者共20例。病人详细信息见表1。

表 1 病例基本信息资料(n=20)
Table 1 General information of enrolled patients (n=20)

参数	数值
性别	
男	8
女	12
肿瘤位置	
左肺上叶	6
左肺下叶	4
右肺上叶	3
右肺中叶	3
右肺下叶	4
年龄/岁	
平均值	53
范围	38~75
PTV 体积/cm ³	
平均值	25.91
范围	1.60~132.90
PTV 直径/cm	
平均值	3.02
范围	1.50~6.30
中位	2.45

1.2 CT模拟定位及靶区勾画

在CT定位扫描前,提前一周对病人进行呼吸训练,待呼吸平稳性和重复性满足治疗要求后,应用西门子Definition AS大孔径CT给患者做定位扫描。患者平卧于SBRT定位体架内的真空负压袋上,双手向

上举过头顶。待呼吸波形稳定后,进行4DCT扫描,扫描范围包括全胸廓的所有区域,扫描层厚为3 mm,图像采集完成后重建10个呼吸时相传输至Eclipse计划系统,然后由一名副高以上放疗医师在生成的最大强度投影(Maximum Intensity Projection, MIP)时相进行靶区(Gross Tumor Volume, GTV)勾画,勾画的GTV再均匀外放3~5 mm形成计划靶区(Planning Target Volume, PTV),危及器官的勾画包括心脏、脊髓、食管、双肺、胸壁等。

1.3 放射治疗计划设计

使用美国Varian公司Eclipse13.6计划系统分别进行RA和DCA的计划设计,使用的治疗加速器为美国Varian公司EDGE,射线能量为6 MV,无均整器(Flatten-Filter Free, FFF)模式,剂量率1400 MU/min,剂量计算采用Acuros XB算法,计算网格为0.25 cm^[14-15]。对于所有RA计划,为保证计划质量,均使用双弧,布野角度范围根据病灶位置分别设定为0°~179°或181°~0°以避免床或机架的碰撞,所有RA计划均采用相同的优化参数和权重进行计算。对于所有DCA计划,采用双弧或者单弧对计划质量基本无影响^[14,16],故本文均采用单弧,起始角度与RA计划保持一致,使用“Fit MLC to Structure”工具,将叶片与靶区间距根据靶区大小设置为3~5 mm,使得MLC在机架旋转过程中始终适形于靶区。所有RA与DCA计划准直器角度选择尽量使MLC适形叶片端面与靶区长轴平行。治疗等中心均为每个病灶中心。靶区PTV放疗处方剂量均为50 Gy/5 f,计划优化完成后均按照95%的PTV接受100%处方剂量进行归一,计划设计限值遵照美国肿瘤放射协作组织RTOG0813报告要求。

1.4 计划评估指标

SBRT的最终目标是以极好的适形性给予靶区体积最高剂量同时使周围重要器官的受照剂量最小化,即SBRT计划需满足高剂量精准聚焦于靶区,同时靶区外剂量迅速跌落的要求^[17]。针对肺部SBRT计划,RTOG0813报告提出了一些重要计划评估参数。本文依据RTOG0813报告,比较RA计划和DCA计划的剂量学指标D_{2%}、D_{98%}、D_{50%}、V_{90%}、V_{105%}(D_{x%}表示x%体积的PTV所受的剂量,V_{x%}表示x%的处方剂量

线所占体积),靶区适形度指数CI(CI=TLV/TV,TLV为靶区剂量线所占体积,TV为靶区体积),靶区外剂量跌落梯度指数R_{50%}(50%处方剂量线所包含的体积与靶区体积TV的比值),D_{2cm}(PTV任何方向2 cm外的最大剂量与靶区剂量的百分比)及危及器官肺部、心脏、脊髓、食管、胸壁及皮肤受量,同时比较了两类计划设计时间、MU值、出束时间(指加速器从beamon到beamoff的出束时间)以评估两类计划的执行效率。本研究未讨论两类计划的均匀性指数,该指数在SBRT计划评估中参考意义不大^[18]。

1.5 计划剂量学验证

每个治疗计划都移植到Scandidos Delta4模体进行剂量测量^[14,19],分别采用3%/3 mm及2%/2 mm的标准来评估两类计划的Gamma通过率。所有测量点剂量阈值设置为全局最大剂量的10%,对于3%/3 mm标准,当Gamma通过率>95%,即实测剂量与计划剂量的一致性符合要求。对于2%/2 mm标准,通过率>90%即视其为合格计划。

1.6 统计学方法

采用SPSS19.0进行统计学分析,采用Shapiro-Wilk方法检验数据正态性,符合正态分布的数据用均数±标准差表示,行配对样本t检验,反之则行Wilcoxon符号秩检验法,P<0.05表示差异有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 等剂量曲线图及剂量分布图结果

图1、图2分别是采用RA及DCA两种技术得到的等剂量曲线图及剂量体积直方图(Dose-Volume Histogram, DVH)。图1显示两种计划的100%处方剂量线对靶区的覆盖均良好,但RA计划中50%处方剂量线覆盖范围显著小于DCA计划。图2显示RA计划对危及器官保护有优势。

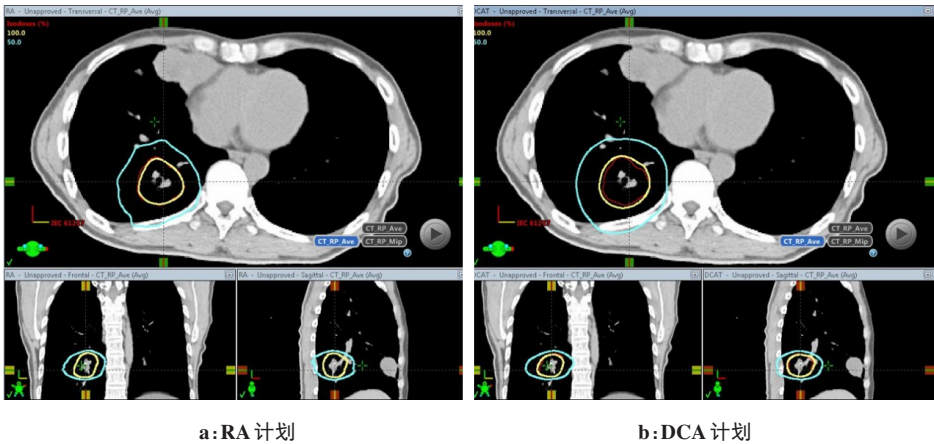


图1 RA与DCA计划等剂量曲线对比
Figure 1 Comparison of isodose curves of RA and DCA plans

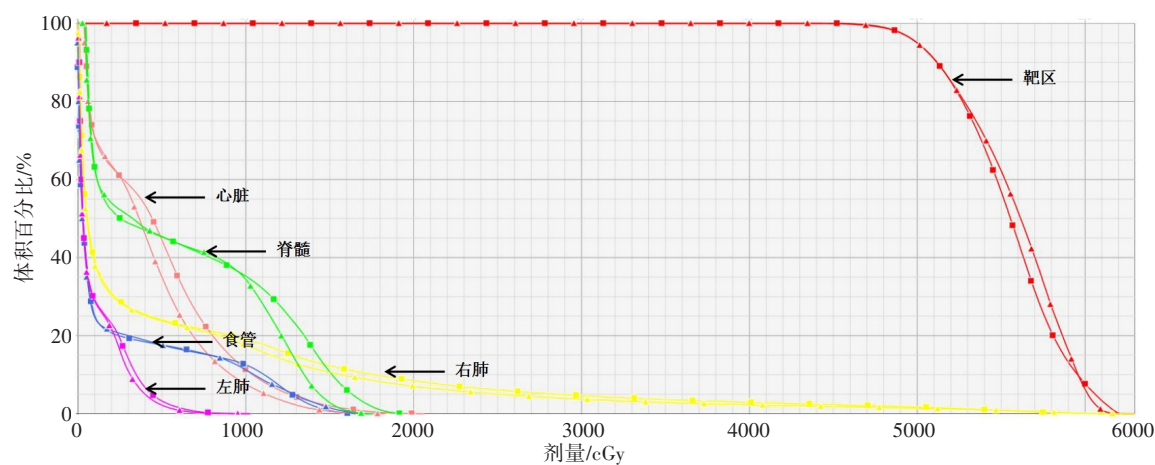


图2 RA计划与DCA计划DVH曲线
Figure 2 Dose-volume histogram of RA and DCA plans

▲为RA计划,■为DCA计划

2.2 靶区剂量比较

本文分析比较了两种计划的靶区 $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 、 $D_{50\%}$ 、 $V_{90\%}$ 、 $V_{105\%}$ 剂量学指标,表2结果显示,以上指标在两类计划对比中并没有显著性差异。在靶区覆盖率上,两类计划均同时满足100%处方剂量线覆盖95%的靶区体积,且满足90%的处方剂量线覆盖99%的靶区体积,两类计划均符合RTOG0813报告要求。

表2 RA与DCA计划的靶区剂量比较($\bar{x} \pm s$)
Table 2 Comparison of target dose distribution between RA and DCA plans (Mean±SD)

参数	RA计划	DCA计划	P值
$D_{2\%}/\text{cGy}$	5 826.4±263.8	5 860.5±206.4	0.672
$D_{98\%}/\text{cGy}$	4 895.8±32.7	4 879.7±44.6	0.208
$D_{50\%}/\text{cGy}$	5 438.3±152.3	5 465.9±100.3	0.408
$V_{90\%}/\%$	99.95±0.03	99.91±0.07	0.705
$V_{105\%}/\%$	58.93±6.45	64.35±8.45	0.058

2.3 CI、 $R_{50\%}$ 、 $D_{2\text{cm}}$ 比较

表3基于RTOG0813报告对CI、 $R_{50\%}$ 以及 $D_{2\text{cm}}$ 参数的评估,对于不同体积的靶区,CI的理想值应小于1.2,允许偏差为1.2~1.5,如表3所示,所有RA计划均满足RTOG0813报告中适形度要求,其CI值为 0.998 ± 0.039 ,而DCA计划的CI值为 1.357 ± 0.138 ,两者差异具有统计学意义($P<0.05$)。另外图3a显示,RA计划的CI值稳定分布于1附近,而DCA计划CI值则主要分布于1.24~1.48,分布相对比较离散,CI值最小值与最大值差异相对较大。综上,RA计划CI值比较稳定,适形度明显优于DCA计划。

从表3可知,在20个DCA计划中,有两个异常的

CI值,分别为1.67和1.58,超出了RTOG0813报告关于CI值的偏差范围,其靶区体积分别为 1.6 cm^3 和 46.03 cm^3 。对于体积为 1.6 cm^3 的靶区,如图4a所示,处于肺部横截面正下方靠近胸壁位置,靶区过于偏心,这会造成处方剂量线朝着入射路径近端处偏离于靶区,小体积靶区对其尤为敏感。另外对于体积为 46.03 cm^3 的靶区,如图4b所示,因该靶区形状不规则,导致该靶区适形度下降。综上,靶区小且过于偏心或者靶区形状不规则都会在一定程度上影响DCA计划的剂量适形性。

图3b、图3c直观显示了剂量跌落梯度指数 $R_{50\%}$ 及 $D_{2\text{cm}}$ 在两类计划中的数值差异。从表3可知, $R_{50\%}$ 及 $D_{2\text{cm}}$ 指标在两类计划中的差异具有统计学意义($P<0.05$),其差异平均大小分别为 1.14 ± 0.44 、 $7.15\%\pm8.12\%$ 。另外可看到RA计划中 $R_{50\%}$ 基本都满足RTOG0813标准,但DCA计划中近一半 $R_{50\%}$ 超出RTOG0813偏差范围。对于 $D_{2\text{cm}}$,两类计划数值基本在报告偏差范围内。综上所述,RA计划相对于DCA计划能更好地控制靶区外剂量跌落梯度。

2.4 危及器官剂量学比较

从表4可知,对于肺部 $V_{12.5\text{ Gy}}$ 、 $V_{13.5\text{ Gy}}$ 、 $V_{20\text{ Gy}}$ 及胸壁 D_{max} 、 $V_{30\text{ Gy}}$ 受量,RA计划比DCA计划平均分别降低 27.65 cm^3 、 26.58 cm^3 、 0.69% 、 496 cGy 、 0.42 cm^3 ,两类计划差异具有统计学意义($P<0.05$),但两者差异总体较小。对于心脏、脊髓、食管、大血管及皮肤受量,两类计划差异并无统计学意义($P>0.05$)。

2.5 执行效率比较

如表5所示,在计划设计上,DCA计划设计耗时平均比RA技术节省81.1%($P<0.05$),机器跳数平均降低41.1%($P<0.05$)。在机器出束时间上,DCA计划平均节省治疗时间56.5%($P<0.05$)。

表 3 基于 RTOG0813 报告对靶区适形度 CI、R_{50%} 以及 D_{2 cm} 参数的评估

Table 3 Evaluation of CI of target area, R_{50%}, D_{2 cm} using RTOG-0813 protocol criteria

病例标号	靶区体积/cm ³	CI		RTOG0813 允许 偏差范围	R _{50%}		RTOG0813 允许 偏差范围	D _{2 cm} /%		RTOG0813 允许 偏差范围
		RA	DCA		RA	DCA		RA	DCA	
1	1.60	1.04	1.67	1.2~1.5	5.81	7.90	5.9~7.5	50	48	50~57
2	1.89	0.93	1.34	1.2~1.5	5.51	7.00	5.9~7.5	38	43	50~57
3	2.04	0.98	1.34	1.2~1.5	6.01	7.90	5.9~7.5	40	40	50~57
4	2.65	0.95	1.21	1.2~1.5	6.32	7.33	5.9~7.5	40	42	50~57
5	4.26	1.05	1.48	1.2~1.5	5.14	6.79	5.6~6.3	40	45	50~57
6	5.33	1.07	1.35	1.2~1.5	5.15	6.75	5.1~6.0	58	52	50~57
7	5.36	1.03	1.27	1.2~1.5	6.36	6.88	5.5~6.3	48	45	50~57
8	5.54	0.97	1.21	1.2~1.5	5.31	6.26	5.5~6.3	46	50	50~57
9	6.26	0.99	1.32	1.2~1.5	5.77	6.99	5.3~6.0	40	45	50~57
10	7.68	0.95	1.48	1.2~1.5	5.31	6.38	5.1~6.0	45	58	50~58
11	8.60	0.99	1.23	1.2~1.5	4.96	5.38	5.0~5.9	44	46	50~58
12	9.23	1.04	1.34	1.2~1.5	4.85	5.44	5.1~5.9	42	52	50~58
13	11.79	0.96	1.28	1.2~1.5	4.20	5.24	4.9~5.9	47	60	50~58
14	19.81	1.03	1.39	1.2~1.5	4.45	5.39	4.5~5.5	63	68	52~61
15	24.15	1.00	1.48	1.2~1.5	4.55	5.25	4.5~5.5	45	60	54~63
16	34.29	0.98	1.19	1.2~1.5	3.71	4.70	4.3~5.3	52	59	58~68
17	46.03	1.00	1.58	1.2~1.5	4.03	5.24	4.3~5.3	50	80	60~74
18	60.42	0.97	1.12	1.2~1.5	3.53	4.48	4.0~5.0	50	65	64~83
19	128.48	1.05	1.46	1.2~1.5	3.78	5.09	3.1~4.0	54	65	73~91
20	132.97	0.98	1.48	1.2~1.5	3.28	4.53	3.1~4.0	55	67	73~91
平均值	-	0.998	1.357	-	4.90	6.04	-	47.3	54.5	-
标准差	-	0.039	0.138	-	0.93	1.09	-	6.7	10.8	-
P 值	-	<0.001		-	<0.001		-	<0.001		-

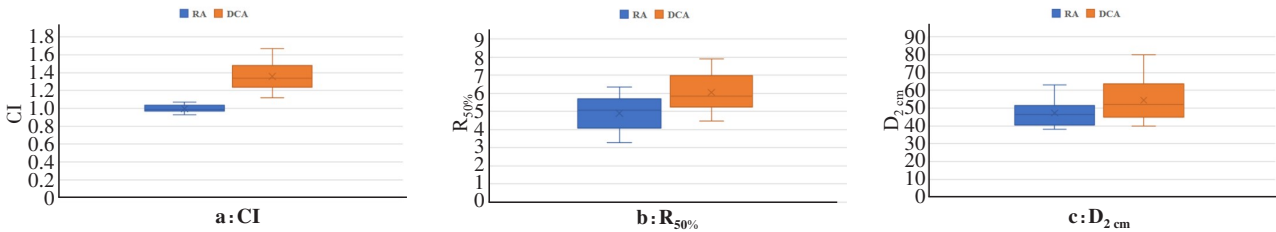


图 3 RA 与 DCA 计划的靶区适形度 CI、R_{50%} 以及 D_{2 cm} 的比较

Figure 3 Comparison of target conformity index, R_{50%} and D_{2 cm} between RA and DCA plans

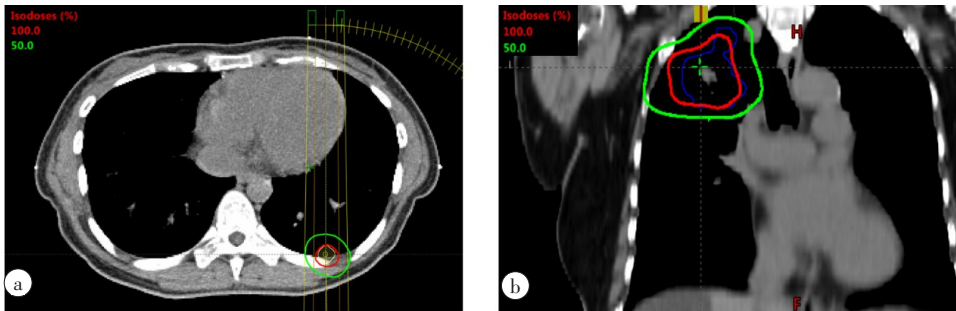


图 4 体积为 1.6 cm³(a)和 46.03 cm³(b)的靶区剂量分布

Figure 4 Dose distributions in target areas with a volume of 1.6 cm³ (a) and 46.03 cm³ (b)

表 4 RA 与 DCA 计划中危及器官剂量学分布
Table 4 Dosimetric distribution in organs-at-risk between RA and DCA plans

危及器官	RA 计划	DCA 计划	P 值
双肺			
$V_{12.5\text{ Gy}}/\text{cm}^3$	148.60±114.24	176.25±152.16	0.010
$V_{13.5\text{ Gy}}/\text{cm}^3$	135.52±107.25	162.10±141.21	0.030
$V_{20\text{ Gy}}/\%$	2.83±3.38	3.52±4.29	0.010
心脏			
$D_{\text{max}}/\text{cGy}$	1 470.84±1555.78	1 490.42±1 643.93	0.778
$V_{32\text{ Gy}}/\text{cm}^3$	0.92±1.87	0.51±1.81	0.109
脊髓			
$D_{\text{max}}/\text{cGy}$	925.18±686.80	928.31±693.26	0.260
$V_{13.5\text{ Gy}}/\text{cm}^3$	0.60±1.58	1.00±3.03	0.249
胸壁			
$D_{\text{max}}/\text{cGy}$	3 734.42±1 229.70	4 230.31±1 510.60	0.001
$V_{30\text{ Gy}}/\text{cm}^3$	0.51±0.81	0.93±1.25	0.028
食管			
$D_{\text{max}}/\text{cGy}$	799.34±691.28	841.62±741.74	0.193
大血管			
$D_{\text{max}}/\text{cGy}$	1 673.66±1959.98	1 705.32±1 944.63	0.747
$V_{47\text{ Gy}}/\text{cm}^3$	0.43±1.62	0.85±2.80	0.180
皮肤			
$D_{\text{max}}/\text{cGy}$	1 843.29±535.42	1 935.71±684.03	0.481
$V_{30\text{ Gy}}/\text{cm}^3$	0.19±0.26	1.55±2.01	0.180

$V_{x\text{ Gy}}$ 表示 $x\text{ Gy}$ 所占体积,其绝对量用 cm^3 表示,相对量用%表示

表 5 RA 与 DCA 计划执行效率比较
Table 5 Comparison of treatment efficiency between RA and DCA plans

参数	RA 计划	DCA 计划	P 值
计划设计/min	55.17±6.81	10.44±3.71	<0.001
MU	2 741.97±442.43	1 627.38±165.63	<0.001
出束时间/min	2.65±0.79	1.14±0.20	<0.001

2.6 计划验证通过率

采用 Delta4 模体对所有计划进行 QA 验证,验证结果如表 6 所示,在 3%/3 mm 及 2%/2 mm 的标准范围内,RA 计划与 DCA 计划的计划验证通过率均满足临床使用要求,数值差异无统计学意义。

3 讨论

从本研究结果看,RA 与 DCA 计划均能满足靶区覆盖率要求,两者处方剂量线均良好包绕靶区,在适形度上,RA 计划相较于 DCA 计划靶区适形度更优。

表 6 Gamma 通过率比较(%)
Table 6 Comparison of Gamma passing rate (%)

Gamma 标准	RA 计划	DCA 计划	P 值
3%/3 mm	96.95±1.36	97.31±1.28	0.127
2%/2 mm	94.75±1.75	95.21±1.54	0.079

Bree 等^[20]以及 Dickey 等^[21]的研究均证明 RA 计划相较于 IMRT 或 DCA 计划,具有更好的靶区适形性,本文的研究结果与其观点相符合。对于 DCA 计划,靶区小且过于偏心或者靶区形状不规则都会在一定程度上影响 DCA 计划的靶区剂量适形性。Morales-Paliza 等^[12]研究指出多个非共面弧及全弧照射下对于一些体积大或者形状不规则的靶区,DCA 计划在靶区适形度和危及器官保护方面能达到与调强计划相似的效果。但本次研究病灶位置多为偏中心,考虑到机架碰撞等实际治疗情况仅采用了共面部分弧照射。使用非共面照射理论上可以帮助提高计划质量,但也应考虑由于实际治疗时间的增加和床位置变化而可能引入的误差^[16]。

从靶区外剂量参数指标 $R_{50\%}$ 及 $D_{2\text{ cm}}$ 可知,RA 计划能更好地控制靶区外剂量跌落梯度。对危及器官肺部以及胸壁保护方面,RA 计划优于 DCA 计划,差异具有统计学意义,但平均数值差异较小。其他危及器官如心脏、食管、脊髓、血管、皮肤,两类计划差异并无统计学意义。对于肺转移瘤病人,其危及器官接受剂量与转移瘤的出现位置相关,离靶区越近,相应危及器官受量增加。在 Liu 等^[22]研究中未发现胸壁 D_{max} 值在 RA 与 DCA 计划中有统计学差异,因为其研究病灶大多为中央型病灶。而本次研究病灶位置多为偏中心,与胸壁位置较邻近,RA 在控制邻近器官受量方面显然优于 DCA 计划。

从剂量学角度来看,RA 计划总体要优于 DCA 计划。在实际治疗应用中,不应该仅仅只关注剂量学的优势。SBRT 是一种高精度放射治疗,器官运动对靶区的精准照射带来巨大挑战。RA 是一种集子野形状、剂量率、机架速度于一体优化的高度调制的复杂计划,计划越复杂,叶片与运动靶区间交互效应会越显著,且对机器的性能要求也越高,而 DCA 计划在整个治疗过程中叶片始终对靶区适形,可以显著减少交互效应,计划设计中不涉及大量复杂的小野计算,计算快速准确。

在 SBRT 计划中,病人摆位准确性至关重要,Morales-Paliza 等^[12]研究指出 RA 计划虽能更好地控制靶区与正常危及器官间的剂量跌落梯度,但任意的治疗摆位误差造成的剂量偏差可能是显著的,而 DCA 计划的靶区覆盖率受摆位误差而发生偏差的可

能性更小。等中心偏移 2 mm 对 RA 计划的靶区剂量覆盖率影响更大。

在 SBRT 计划中,由于分次少,单次剂量大,机器跳数大幅增加,治疗时间相应延长,而 DCA 计划相对 RA 计划节约近一半机器跳数,显著减少了治疗时间,这可以减轻患者不适感,减少病人在整个治疗过程中体位改变的不确定性,对于耗时长的呼吸门控治疗、呼吸困难或者配合性差的病人更有适用性。

综上所述,临床上选择 SBRT 治疗技术时应综合了解该技术的优缺点。DCA 计划质量受肿瘤大小、形状及与周围器官位置影响较大。当靶区形状较不规则或者靶区与危及器官位置特别临近,临床上需严格控制其毒性时,采用 RA 计划更为合适。DCA 计划在靶区覆盖率、适形度及危及器官保护上均能满足 RTOG 报告要求,剂量学分布与 RA 计划差异总体较小,且执行效率高,DCA 技术不失为一种可替代 RA 技术的有效治疗方式。

【参考文献】

- [1] Cuccia F, Mazzola R, Pastorello E, et al. SBRT for elderly oligometastatic patients as a feasible, safe and effective treatment opportunity[J]. Clin Exp Metastasis, 2021, 38(5): 475-481.
- [2] Kessel KA, Grosser RC, Kraus KM, et al. Stereotactic body radiotherapy (SBRT) in patients with lung metastases - prognostic factors and long-term survival using patient self-reported outcome (PRO)[J]. BMC Cancer, 2020, 20(1): 442.
- [3] Navaria P, Ascolese AM, Mancosu P, et al. Volumetric modulated arc therapy with flattening filter free (FFF) beams for stereotactic body radiation therapy (SBRT) in patients with medically inoperable early stage non small cell lung cancer (NSCLC)[J]. Radiother Oncol, 2013, 107(3): 414-418.
- [4] Holt A, Van Vliet-Vroegindeweij C, Mans A, et al. Volumetric-modulated arc therapy for stereotactic body radiotherapy of lung tumors: a comparison with intensity-modulated radiotherapy techniques[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 81(5): 1560-1567.
- [5] Mcgrath SD, Matuszak MM, Yan D, et al. Volumetric modulated arc therapy for delivery of hypofractionated stereotactic lung radiotherapy: a dosimetric and treatment efficiency analysis[J]. Radiother Oncol, 2010, 95(2): 153-157.
- [6] Jiang XX, Li T, Liu Y, et al. Planning analysis for locally advanced lung cancer: dosimetric and efficiency comparisons between intensity-modulated radiotherapy (IMRT), single-arc/partial-arc volumetric modulated arc therapy (SA/PA-VMAT)[J]. Radiat Oncol, 2011, 6: 140.
- [7] Parj JY, Kim SY, Park HJ, et al. Optimal set of grid size and angular increment for practical dose calculation using the dynamic conformal arc technique: a systematic evaluation of the dosimetric effects in lung stereotactic body radiation therapy[J]. Radiat Oncol, 2014, 9(52): 5.
- [8] Takeda A, Kunieda E, Sanuki N, et al. Dose distribution analysis in stereotactic body radiotherapy using dynamic conformal multiple arc therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 74(2): 363-369.
- [9] Bokrantz R, Wedenberg M, Sandwall P. Dynamic conformal arcs for lung stereotactic body radiation therapy: a comparison with volumetric-modulated arc therapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2020, 21(1): 103-109.
- [10] Hoogeman MS, Nuytens JJ, Levendag PC, et al. Time dependence of intrafraction patient motion assessed by repeat stereoscopic imaging [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 70(2): 609-618.
- [11] Court L, Wagar M, Berbeco R, et al. Evaluation of the interplay effect when using RapidArc to treat targets moving in the craniocaudal or right-left direction[J]. Med Phys, 2010, 37(1): 4-11.
- [12] Morales-Paliza MA, Coffey CW, Ding GX. Evaluation of the dynamic conformal arc therapy in comparison to intensity-modulated radiation therapy in prostate, brain, head-and-neck and spine tumors[J]. J Appl Clin Med Phys, 2011, 12(2): 5-19.
- [13] Rauschenbach BM, Mackowiak L, Malhotra HK. A dosimetric comparison of three-dimensional conformal radiotherapy, volumetric-modulated arc therapy, and dynamic conformal arc therapy in the treatment of nonsmall cell lung cancer using stereotactic body radiotherapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(5): 4898.
- [14] Zhang JY, Lu JY, Wu LL, et al. A dosimetric and treatment efficiency evaluation of stereotactic body radiation therapy for peripheral lung cancer using flattening filter free beams[J]. Oncotarget, 2016, 7(45): 73792-73799.
- [15] Pokhrel D, Halfman M, Sanford L. A simple, yet novel hybrid-dynamic conformal arc therapy planning via flattening filter-free beam for lung stereotactic body radiotherapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2020, 21(6): 83-92.
- [16] Moon YM, Jeon W, Yu T, et al. Which is better for liver SBRT: dosimetric comparison between DCAT and VMAT for liver tumors[J]. Front Oncol, 2020, 10: 1170.
- [17] Song DY, Kavanagh BD, Benedict SH, et al. Stereotactic body radiation therapy. Rationale, techniques, applications, and optimization [J]. Oncology (Williston Park), 2004, 18(11): 1419-1430.
- [18] Patel G, Mandal A, Choudhary S, et al. Plan evaluation indices: a journey of evolution[J]. Rep Pract Oncol Radiother, 2020, 25(3): 336-344.
- [19] Stathakis S, Narayanasamy G, Licon AL, et al. A dosimetric comparison between volumetric-modulated arc therapy and dynamic conformal arc therapy in SBRT [J]. J BUON, 2019, 24 (2): 838-843.
- [20] Bree I, Van Hinsberg MG, Van Veelen LR. High-dose radiotherapy in inoperable nonsmall cell lung cancer: comparison of volumetric modulated arc therapy, dynamic IMRT and 3D conformal radiotherapy [J]. Med Dosim, 2012, 37(4): 353-357.
- [21] Dickey M, Roa W, Drodge S, et al. A planning comparison of 3-dimensional conformal multiple static field, conformal arc, and volumetric modulated arc therapy for the delivery of stereotactic body radiotherapy for early stage lung cancer[J]. Med Dosim, 2015, 40(4): 347-351.
- [22] Liu H, Ye J, Kim JJ, et al. Dosimetric comparison of two arc-based stereotactic body radiotherapy techniques for early-stage lung cancer [J]. Med Dosim, 2015, 40(1): 76-81.

(编辑:薛泽玲)