

胸中段食管癌共面不等分5野及铅门跟随调强放疗计划的剂量学研究

杨含, 钟明松, 吴府容, 李麒成, 靳富

重庆大学附属肿瘤医院/重庆市肿瘤研究所/重庆市肿瘤医院肿瘤放射治疗中心, 重庆 400030

【摘要】目的:比较4种调强放疗计划(IMRT)的剂量学差异,探讨不同布野方式和铅门跟随(JT)技术对胸中段食管癌靶区和危及器官的剂量影响。**方法:**选取10例鳞状细胞癌患者入组,并对每例患者设计4种放疗方案。3种铅门固定计划:IMRT1:0°、130°、160°、195°、220°,IMRT2:0°、130°、165°、200°、330°,IMRT3:0°、30°、130°、200°、330°;1种铅门跟随计划IMRT-JT:在IMRT2基础上使用铅门跟随技术对剂量重新计算评估。比较4种计划的靶区和危及器官的剂量体积参数、适形度指数(CI)、剂量均匀性指数(HI)及机器跳数(MU)。**结果:**4种计划的靶区剂量分布均达到临床处方的剂量要求。IMRT1、IMRT2、IMRT3计划比较,IMRT1、IMRT3计划PTV的CI略优于IMRT2计划;在心脏(V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 、 D_{mean})剂量方面,IMRT1<IMRT2<IMRT3($P<0.05$);在脊髓(D_{max} 、 $D_{1\%}$)方面,IMRT1<IMRT3<IMRT2($P<0.05$);IMRT2计划可显著降低肺(V_5 、 V_{20} 、 D_{mean})剂量,但MU相较于其它计划有增加($P<0.05$)。IMRT2与IMRT-JT相比,PTV的HI差异无统计学意义($P>0.05$),但IMRT-JT的CI优于IMRT2计划($P<0.05$);IMRT-JT计划的肺(V_5 、 V_{20} 、 V_{30} 、 D_{mean})、心脏(V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 、 D_{mean})、脊髓(D_{max} 、 $D_{1\%}$ 、 D_{mean})均低于IMRT2计划的相应值($P<0.05$);IMRT-JT的MU相较于IMRT2计划有增加($P<0.05$)。**结论:**IMRT1、IMRT2可分别降低心脏、肺的受量;而JT技术则可进一步降低危及器官的受量。

【关键词】食管癌;铅门跟随;铅门固定;调强计划;剂量学

【中图分类号】R735.1;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)07-0810-06

Dosimetric study on coplanar unequal 5-field *versus* jaw tracking intensity-modulated radiotherapy for middle thoracic esophageal cancer

YANG Han, ZHONG Mingsong, WU Furong, LI Qicheng, JIN Fu

Chongqing University Cancer Hospital/Chongqing Cancer Institute/Department of Radiation Oncology, Chongqing Cancer Hospital, Chongqing 400030, China

Abstract: Objective To compare the dosimetric different of 4 different intensity-modulated radiotherapy (IMRT) plans, and to explore the dosimetric effects of different field arrangements and jaw tracking (JT) technique on target areas and organs-at-risk in radiotherapy for middle thoracic esophageal cancer. **Methods** Ten patients with squamous cell carcinoma were enrolled in the study. Four kinds of radiotherapy plans, including 3 static jaw plans and 1 JT plan, were designed for each patient. The static jaw plans included IMRT1 (0°, 130°, 160°, 195°, 220°), IMRT2 (0°, 130°, 165°, 200°, 330°) and IMRT3 (0°, 30°, 130°, 200°, 330°), and there was only 1 JT plan (IMRT-JT) in which the dose was recalculated and assessed by JT technique based on IMRT2. The dose-volume parameters of target areas and organs-at-risk, conformity index (CI), homogeneity index (HI) and monitor units (MU) were compared among 4 different plans. **Results** The target dose distribution in 4 plans all met the prescribed dose requirements. The comparison among IMRT1, IMRT2 and IMRT3 showed that the CI of PTV in IMRT1 and IMRT3 was slightly higher than that in IMRT2, and that the V_{20} , V_{30} , V_{40} and D_{mean} of the heart were highest in IMRT3, followed by IMRT2 and IMRT1 ($P<0.05$), and that the D_{max} and $D_{1\%}$ of spinal cord were highest in IMRT2, followed by IMRT3 and IMRT1 ($P<0.05$), and that compared with the other two plans, IMRT2 plan significantly reduced the V_5 , V_{20} and D_{mean} of lungs, but increased MU ($P<0.05$). There was no statistically significant difference in the HI of PTV between IMRT2 and IMRT-JT, but the CI of IMRT-JT was higher than that in IMRT2 ($P<0.05$). IMRT-JT was superior to IMRT2 in decreasing the dosimetric parameters of lungs (V_5 , V_{20} , V_{30} , D_{mean}), the heart (V_{20} , V_{30} , V_{40} , D_{mean}), and spinal cord (D_{max} , $D_{1\%}$, D_{mean}), but MU in IMRT-JT was increased as compared with that in IMRT2 ($P<0.05$). **Conclusion** Although IMRT1 and IMRT2 can decrease the doses to the heart and lungs, respectively, JT technique can further decrease the doses to organs-at-risk.

Keywords: esophageal cancer; jaw tracking; static jaw; intensity-modulated radiotherapy; dosimetry

【收稿日期】2020-01-13

【基金项目】国家自然科学基金(11575038, 11805025, 81972857)

【作者简介】杨含, 放疗物理师, 研究方向: 放射物理技术, E-mail: yherge@163.com

【通信作者】靳富, 博士, 高级工程师, 研究方向: 肿瘤放射治疗, E-mail: jfzj@126.com

前言

食管癌作为全球发病率第8的肿瘤,在我国也是十分常见的消化道肿瘤,有着较高的发病率与死亡率^[1-2]。目前同步放化疗是常用的治疗手段,尤其对于无法手术的晚期食管癌患者^[3-5]。放射治疗作为食管癌主要或者综合治疗手段之一,由于其本身肿瘤结构特点(较长),导致危及器官受量偏高,因此怎样降低放射治疗的毒副反应(特别是放射性肺炎),是近年来的研究热点。放射性肺炎是食管癌最常见的并发症,临床发病率为10%~20%^[6]。国外有研究表明肺的多种剂量学参数(例如 V_5 、 V_{20} 和 D_{mean})与放射性肺炎有着很强的相关性^[7]。徐利明^[8]研究表明肺 V_5 与放射性肺炎的发生率呈正相关,肺的低剂量受照体积大小可能是放射性肺炎发生更为重要的原因之一。因此,在放射治疗中如何尽可能降低肺的受量,是预防放射性肺损伤的关键。

对于食管癌放射治疗,近年来适形调强放射治疗(Intensity Modulated Radiotherapy, IMRT)技术已发展得非常成熟。IMRT无论是靶区剂量均匀性指数(Homogeneity Index, HI)、适形度指数(Conformity Index, CI)还是正常组织的保护都优于三维适形放疗(3DCRT)^[9-10]。研究发现在胸上段食管癌的调强治疗中,当射野数由7野增加到9野时,剂量分布无明显改善,综合考虑5野和7野为优选治疗方案^[11-12]。陈丽等^[13]在胸中段食管调强放疗的研究中发现,5野非均分方案可以有效降低肺部的受照剂量。目前,铅门跟随(Jaw Tracking, JT)技术已经广泛应用于临床肿瘤放射治疗中。研究表明,相较于铅门固定技术, JT技术在放射治疗过程中,铅门实时跟随多叶光栅的位置变化进行运动,尽可能减小铅门的开放大小,减少叶片的透射和漏射,从而降低正常组织剂量^[14-16]。本研究在5野共面不等分的基础上探讨不同布野设计的剂量学差异及JT技术对剂量的影响,以期筛选出较优的治疗方案,为胸中段食管癌调强放疗提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

回顾性选取2017年2月~2018年11月于重庆大学附属肿瘤医院接受放射治疗的10例胸中段食管癌放疗患者,其中,男7例,女3例,病理类型均为鳞状细胞癌;年龄62~81岁,中位年龄71岁;其中 $T_2N_0M_0$ 2例, $T_3N_0M_0$ 2例, $T_3N_2M_0$ 2例, $T_4N_0M_0$ 4例。

1.2 放疗定位

患者采取仰卧位,双手上举,热塑体膜固定体

位。采用荷兰 Philips Brilliance™大孔径CT进行增强扫描。扫描上界至舌骨,下界至第5腰椎水平,层厚0.3 cm。CT图像经 Aria 网络传至瓦里安 Eclipses (Version 13.6)治疗计划系统。

1.3 靶区勾画

由同一医师参照胃镜及食管钡餐造影检查结果在CT图像上勾画大体肿瘤体积(GTV),并由高年资医师进行靶区审核。GTV定义为食管原发病灶和纵隔肿大淋巴结。临床靶区体积(CTV)为预防性照射区,包括食管旁及2、4、5、7区,需避开气管、肺和椎体等解剖结构。GTV外扩0.5~1.0 cm为大体肿瘤计划靶区(PGTV),CTV外扩0.5 cm为计划靶区体积(PTV)。双肺、心脏、脊髓等危及器官参照ICRU 83号报告进行定义及勾画。

1.4 计划设计

使用Eclipses治疗计划系统,在EDGE加速器上采用剂量率为400 MU/min的6 MV X射线对每例患者设计4种计划方案(射野角度如图1所示),IMRT1: 0°、130°、160°、195°、220°, IMRT2: 0°、130°、165°、200°、330°, IMRT3: 0°、30°、130°、200°、330°, IMRT-JT: 复制IMRT2计划并通过打开 Smart Leafs Motion Calculate(LMC)叶片运动的铅门跟随功能重新剂量计算得出。实际上, SIB (Simultaneous Integrated Boost)照射技术已在本科室得到开展,对于食管癌患者的照射剂量为PTV 51 Gy/30 f, PGTV 60 Gy/30 f。但在本次研究中,为了数据比对更加简洁合理,将所有计划的处方剂量统一为PTV 60 Gy/30 f,要求处方剂量至少覆盖95%靶区体积且靶区最大剂量点小于110%的处方剂量。危及器官剂量限制:脊髓 $D_{max}<45$ Gy; 双肺 $V_{20}<30\%$, $V_{30}<20\%$; 心脏 $V_{30}<40\%$, $V_{40}<30\%$ 。剂量计算采用 Anisotropic Analytical Algorithm (AAA) 算法,计算网格为0.25 cm。

1.5 评价指标

所有计划根据标准剂量体积直方图进行评估。靶区评价指标为HI和CI。其中, $HI=(D_{2\%}-D_{98\%})/D_{50\%}$, $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 和 $D_{50\%}$ 分别为2%、98%和50%靶区体积所受到的照射剂量, HI值越接近0,说明靶区剂量越均匀。 $CI=(V_{t,95\%}/V_t) \times (V_{t,95\%}/V_{95\%})$, $V_{t,95\%}$ 为95%剂量线所包绕的靶区体积, V_t 为靶区体积, $V_{95\%}$ 为95%等剂量曲线所包绕的总体积, CI值越接近1,表示靶区剂量适形越好。危及器官评价指标有肺百分体积剂量参数 V_5 、 V_{20} 、 V_{30} 和平均剂量 D_{mean} , 心脏百分体积剂量参数 V_{20} 、 V_{30} 、 V_{40} 和平均剂量 D_{mean} , 脊髓的最大点剂量 D_{max} 、1%体积剂量 $D_{1\%}$ 和平均剂量 D_{mean} 。相关比较指标: 机器跳数(MU)。

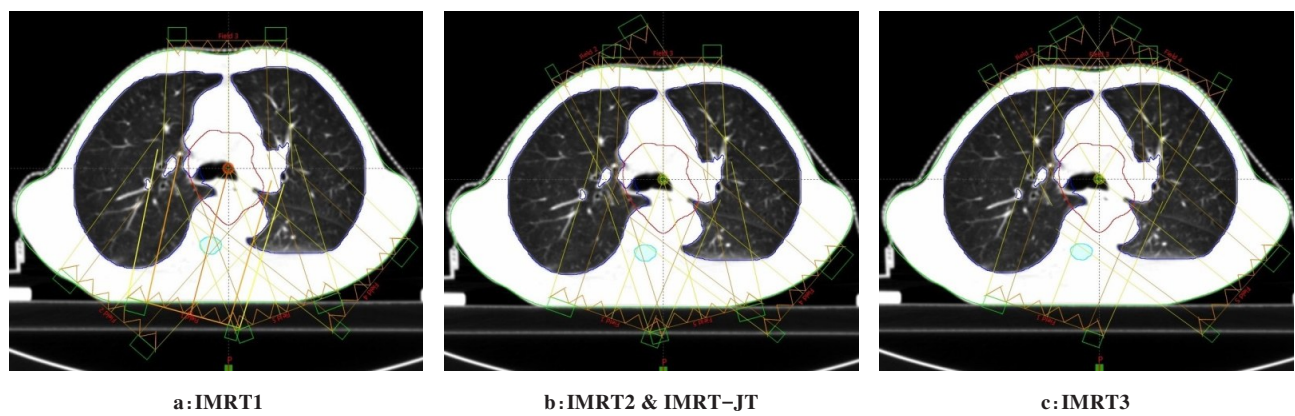


图1 4种计划射野角度示意图
Fig.1 Different incident angles in 4 plans

1.6 统计学方法

采用SPSS 19.0软件对4组放疗计划进行统计分析,计量资料用均数±标准差表示,对数据结果进行配对样本*t*检验,*P*<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量学参数比较

3种铅门固定计划IMRT1、IMRT2、IMRT3相互比较PTV的HI差异无统计学意义(*P*>0.05),其CI值IMRT1>IMRT3>IMRT2(*P*<0.05)。IMRT2与IMRT-JT两种计划PTV的HI差异无统计学意义(*P*>0.05),其CI值IMRT-JT优于IMRT2计划(*P*<0.05),IMRT-JT计划的*V*_{95%}相对于IMRT2计划低1%(*P*<0.05),如表1所示。

表1 4种计划的靶区剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)
Tab.1 Comparison of dosimetric parameters of target areas in 4 plans (Mean±SD)

参数	IMRT1	IMRT2	IMRT3	IMRT-JT	P值			
					IMRT1 vs IMRT2	IMRT1 vs IMRT3	IMRT2 vs IMRT3	IMRT2 vs IMRT-JT
<i>V</i> _{t,95%} /%	99.48±0.29	99.43±0.28	99.46±0.31	99.36±0.27	0.545	0.847	0.246	0.069
<i>V</i> _{95%} /%	136.50±4.42	143.66±6.05	141.66±8.32	142.37±6.08	0.001	0.043	0.098	0.007
HI	0.066±0.012	0.070±0.009	0.067±0.013	0.071±0.010	0.104	0.678	0.081	0.343
CI	0.726±0.022	0.688±0.027	0.702±0.037	0.694±0.027	0.000	0.030	0.034	0.024

2.2 危及器官受照剂量体积参数比较

4种计划的危及器官受量如表2所示。3种铅门固定计划比较,IMRT2计划的肺受量最低,IMRT1计划的^{心脏、脊髓}受量最低。其中IMRT2相较于IMRT1、IMRT3计划,肺*V*₅分别降低8.63%、4.56%,肺*V*₂₀分别降低1.49%、3.63%,肺*D*_{mean}均减少了1 Gy(*P*均<0.05)。IMRT1相较于IMRT2、IMRT3计划,^{心脏}*V*₂₀分别降低2.29%、8.48%,^{心脏}*V*₃₀分别降低5.23%、7.66%,^{心脏}*V*₄₀分别降低3.25%、6.13%,^{心脏}*D*_{mean}分别减少0.75、2.41 Gy(*P*均<0.05)。铅门跟随调强计划与铅门固定调强计划相比,IMRT-JT计划的肺(*V*₅、*V*₂₀、*V*₃₀、*D*_{mean})、^{心脏}(*V*₂₀、*V*₃₀、*V*₄₀、*D*_{mean})、^{脊髓}(*D*_{max}、*D*_{1%}、*D*_{mean})均低于IMRT2计划的相应值,差异有统计学意义(*P*<0.05)。图2为其中某个病例4种计划横断

面剂量曲线分布示意图,由图2可见IMRT-JT计划的低剂量分布要明显优于其他3种计划。

2.3 计划相关指标

IMRT2计划的MU相较于IMRT1和IMRT3计划的MU增加了10%(*P*<0.05),IMRT-JT计划的MU比IMRT2计划的MU增加了4%,如表3所示。

3 讨论

本研究主要探讨不同的5野非均匀布野及铅门跟随技术对靶区剂量和危及器官受照剂量的影响。为了方便对比研究,本研究的所有计划处方统一为PTV 60 Gy/30 f,这使得所有危及器官的受量均高于平时的临床实施计划,但在剂量限值范围之内。

本研究中3种不同布野的固定铅门计划比较显

表 2 4种计划的危及器官剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.2 Comparison of dosimetric parameters of organs-at-risk in 4 plans (Mean±SD)

危及器官	参数	IMRT1	IMRT2	IMRT3	IMRT-JT	P 值			
						IMRT1 vs IMRT2	IMRT1 vs IMRT3	IMRT2 vs IMRT3	IMRT2 vs IMRT-JT
脊髓	D _{max} /Gy	39.73±0.91	41.38±0.69	40.52±0.95	41.06±0.73	0.000	0.000	0.003	0.000
	D _{1%} /Gy	35.86±1.08	37.61±0.98	36.67±1.31	37.06±0.95	0.000	0.005	0.001	0.000
	D _{mean} /Gy	14.17±1.64	15.60±1.94	15.46±1.95	14.90±1.84	0.000	0.000	0.243	0.000
心脏	V ₂₀ /%	46.37±10.31	48.66±12.02	54.85±13.44	47.37±11.57	0.028	0.000	0.000	0.003
	V ₃₀ /%	31.33±6.29	36.56±6.91	38.99±6.90	35.40±6.73	0.000	0.000	0.004	0.000
	V ₄₀ /%	19.84±5.11	23.09±4.62	25.97±5.31	22.29±4.50	0.001	0.000	0.009	0.000
	D _{mean} /Gy	23.01±4.43	23.76±4.52	25.42±4.53	23.08±4.46	0.002	0.000	0.000	0.000
肺	V ₅ /%	67.06±5.62	58.43±5.73	62.99±5.71	55.42±5.54	0.000	0.000	0.000	0.000
	V ₂₀ /%	27.04±3.28	25.55±3.69	29.18±3.99	24.66±3.58	0.006	0.000	0.000	0.000
	V ₃₀ /%	16.42±2.83	16.89±3.17	17.40±3.63	16.32±3.12	0.320	0.024	0.182	0.000
	D _{mean} /Gy	15.32±1.59	14.19±1.69	15.29±1.74	13.69±1.64	0.000	0.851	0.000	0.000

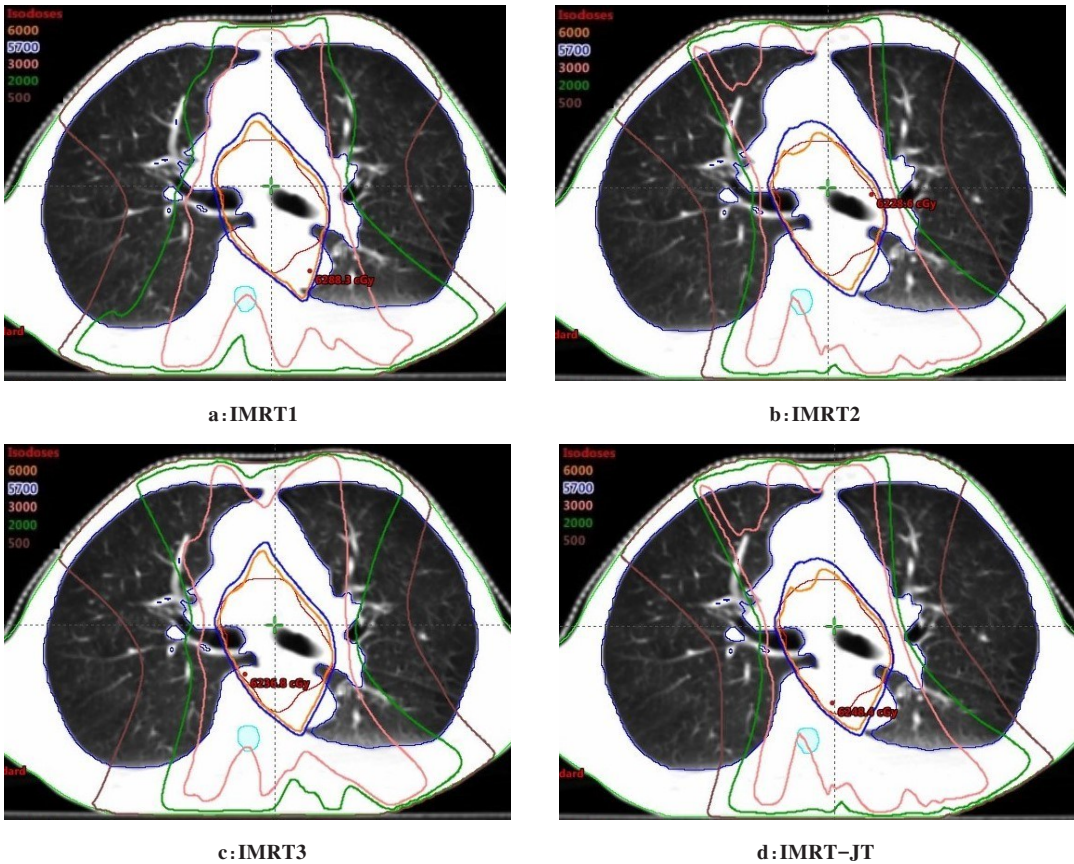


图 2 4种计划横断面等剂量曲线分布比较

Fig.2 Comparison of transverse isodose distributions in 4 plans

PTV用红色线表示,橙色、蓝色、粉色、绿色和棕色线分别是 60、57、30、20、5 Gy 的等剂量曲线

示,在相同的射野数目下不同角度的射野会对靶区剂量和危及器官受量造成不同的影响。由图 1 可知,从 IMRT1 到 IMRT3 再到 IMRT2,射野逐渐向纵隔收拢。就靶区而言,3 种计划均能满足临床剂量要求,其中均匀性无明显差异,适形度 IMRT1 最优,IMRT3 次之。该结果提示射野分布越往纵隔集中适形度越

表3 4种计划的MU比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.3 Comparison of monitor units in 4 plans (*Mean±SD*)

参数	IMRT1	IMRT2	IMRT3	IMRT-JT	P值			
					IMRT1 vs	IMRT1 vs	IMRT2 vs	IMRT2 vs
					IMRT2	IMRT3	IMRT3	IMRT-JT
MU	967.01±141.83	1 089.68±178.51	975.22±133.96	1 135.48±201.22	0.000	0.334	0.001	0.001

差。陈丽等^[13]在胸中段食管调强放疗的研究中发现,5野非均分计划较5野均分计划射野更向纵隔集中,其脊髓受量增高,肺V₅减小,肺V₂₀、V₃₀增大。在本研究中,从表2可以看出,随着射野逐渐向纵隔收拢,脊髓和肺V₅的变化趋势与陈丽等^[13]研究结果一致,但其肺V₂₀、V₃₀的体积是先增大再减小。考虑其原因是由于IMRT可以对不同方向入射的照射野强度进行调节,从而以非均匀射野对靶区进行照射,以便达到最优化的剂量分布^[17]。在低剂量区域由于散射漏射的存在,射野的强度调节能力有限,射野穿过正常组织的体积越小导致低剂量区域也就越小,因此肺V₅随着射野的收拢而减小。随着剂量的增大,剂量分布开始受射野角度和强度调节的综合影响。虽然当射野逐渐往纵隔收拢,其射野穿过肺的体积在逐渐缩小,但计划调制能力也在逐渐减弱,计划的适形度变差,从而导致剂量体积(V₂₀、V₃₀)增大。随着射野继续收拢,虽然计划的调制能力更加弱化,但射野穿过肺的体积进一步缩小,射野分布对计划影响占主导,进而导致肺剂量体积(V₂₀、V₃₀)转而减小。由于陈丽等^[13]研究中仅有一组非均匀布野的方式,因此未能体现出肺V₂₀、V₃₀随着射野往纵隔收拢先增大再减小的变化趋势。关于心脏的受照剂量方面,3组计划心脏的V₂₀、V₃₀、V₄₀、D_{mean}相互比较,可见IMRT1心脏剂量最低,IMRT2心脏剂量较高,IMRT3心脏剂量最高,这主要是由于射野往纵隔方向靠拢,直接穿过心脏的射野数量增加,从而导致心脏受量增加。

尽管在调强计划中MLC的透射和漏射只占总射线不到3%,但这一现象不能被忽视。它可能导致在调强计划中,正常组织和危及器官受到更多的照射剂量。有研究表明,铅门与MLC结合能尽可能遮挡非照射区域,相比于仅用MLC遮挡,能降低0.9%~4.4%的射线(6 MV光子)^[18]。本研究中IMRT-JT与IMRT2计划对比发现,在胸中段食管癌调强治疗中,铅门跟随计划能进一步降低脊髓、肺、心脏的受量,特别对于低剂量区域(肺V₅)有明显的降低(3%),但MU平均增加4%。国内有学者对放射性肺炎的研究发现,当肺V₅>55%时,大于二级放射性肺炎的概率

会明显增加^[19]。而在本研究的4种计划中,仅有IMRT-JT能将肺V₅控制在55%以内。

综上所述,IMRT1的布野方式能更好地保护心脏,IMRT2的布野方式能更好地降低肺的受照剂量,而铅门跟随技术的应用能进一步降低危及器官受量。在放射治疗中,放射学家们越来越重视肺5 Gy的受照体积在放射性肺炎的发生中所扮演的角色^[20-22]。因此在本研究中IMRT2的布野方式与铅门跟随技术的结合能有效降低肺V₅,为临床计划设计提供参考。

【参考文献】

[1] LAGERGREN J, SMYTH E, CUNNINGHAM D, et al. Oesophageal cancer[J]. Br Med J, 2010, 341(7784): c6280.

[2] CHEN W, ZHENG R, BAADE P D, et al. Cancer statistics in China, 2015[J]. CA Cancer J Clin, 2016, 66(2): 115-132.

[3] KUMAR S, DIMRI K, KHURANA R, et al. A randomised trial of radiotherapy compared with cisplatin chemo-radiotherapy in patients with unresectable squamous cell cancer of the esophagus [J]. Radiother Oncol, 2007, 83(2): 139-147.

[4] TRAN V T, LE P E, VAULEON E, et al. Chemoradiotherapy for cancer of the esophagus: contribution of the leucovorin, 5-fluorouracil bolus, and infusion-cisplatin-radiotherapy schedule starting with two neoadjuvant chemotherapy cycles: results from a pilot study[J]. Dis Esophagus, 2010, 23(4): 324-328.

[5] COOPER J S, GUO M D, HERSKOVIC A, et al. Chemoradiotherapy of locally advanced esophageal cancer: long-term follow-up of a prospective randomized trial (RTOG 85-01)[J]. JAMA, 1999, 281(17): 1623-1627.

[6] ORTHOLAN C, MORNEX F. Normal tissue tolerance to external beam radiation therapy: lung[J]. Cancer Radiother, 2010, 14(4-5): 312-318.

[7] MARKS L B, BENTZEN S M, DEASY J O, et al. Radiation dose-volume effects in the lung[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 76(3): S70-S76.

[8] 徐利明. 低剂量照射区体积与放射性肺损伤关系前瞻性研究[D]. 天津: 天津医科大学, 2010.

XU L M. Prospective study of the relationship between low dose irradiated volume and radiation induced lung injury[D]. Tianjin: Tianjin Medical University, 2010.

[9] CHANDRA A, GUERRERO T M, LIU H H, et al. Feasibility of using intensity-modulated radiotherapy to improve lung sparing in treatment planning for distal esophageal cancer[J]. Radiother Oncol, 2005, 77(3): 247-253.

[10] FENKELL L, KAMINSKY I, BREEN S, et al. Dosimetric comparison of IMRT vs. 3D conformal radiotherapy in the treatment of cancer of

- the cervical esophagus[J]. *Radiother Oncol*, 2008, 89(3): 287-291.
- [11] 傅卫华, 王绿化, 周宗玫, 等. 上段食管癌SIB-IMRT治疗计划比较[J]. *中国医学科学院学报*, 2003, 25(3): 337-342.
- FU W H, WANG L H, ZHOU Z M, et al. Comparison of SIB-IMRT treatment plans for upper esophageal carcinoma[J]. *Acta Academiae Medicinae Sinicae*, 2003, 25(3): 337-342.
- [12] 王军, 祝淑钗, 韩春, 等. 胸上段食管癌三维适形和调强放疗剂量学对比研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2008, 17(4): 275-279.
- WANG J, ZHU S C, HAN C, et al. Comparison of dose distributions between conformal and intensity-modulated radiotherapy for the upper esophageal carcinoma [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2008, 17(4): 275-279.
- [13] 陈丽, 谭飞, 武文娟, 等. 胸中段食管癌调强放疗照射野设计探讨与分析[J]. *现代肿瘤医学*, 2017, 25(6): 942-944.
- CHEN L, TAN F, WU W J, et al. Discussion and analysis of the radiation field design in the treatment of the middle-thoracic esophageal cancer [J]. *Journal of Modern Oncology*, 2017, 25(6): 942-944.
- [14] FENG Z, WU H, ZHANG Y, et al. Dosimetric comparison between jaw tracking and static jaw techniques in intensity-modulated radiotherapy[J]. *Radiat Oncol*, 2015, 10(1): 28.
- [15] KIM J I, PARK J M, PARK S Y, et al. Assessment of potential jaw-tracking advantage using control point sequences of VMAT planning [J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2014, 15(2): 160-168.
- [16] WU H, JIANG F, YUE H, et al. A comparative study of identical VMAT plans with and without jaw tracking technique[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2016, 17(5): 133-141.
- [17] FAIZ M, KHAN F M. The physics of radiation therapy[M]. 4th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2011: 338.
- [18] MOHAN R, JAYESH K, JOSHI R C, et al. Dosimetric evaluation of 120-leaf multileaf collimator in a Varian linear accelerator with 6-MV and 18-MV photon beams[J]. *J Med Phys*, 2008, 33(3): 114-118.
- [19] 王澜, 李晓宁, 吕东婕, 等. 肺低剂量区体积预测急性放射性肺炎价值探讨[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2010, 19(4): 296-300.
- WANG L, LI X N, LÜ D J, et al. Low dose volume of the lung in prediction of acute radiation pneumonitis [J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2010, 19(4): 296-300.
- [20] WANG S L, LIAO Z, VAPORCIYAN A A, et al. Investigation of clinical and dosimetric factors associated with postoperative pulmonary complications in esophageal cancer patients treated with concurrent chemoradiotherapy followed by surgery[J]. *Int J Radiat Oncol*, 2006, 64(3): 692-699.
- [21] HARDER E M, PARK H S, CHEN Z, et al. Pulmonary dose-volume predictors of radiation pneumonitis following stereotactic body radiation therapy[J]. *Pract Radiat Oncol*, 2016, 6(6): e353-e359.
- [22] YAO B, WANG Y D, LIU Q Z. Radiation pneumonitis in non-small-cell lung cancer patients treated with helical tomotherapy[J]. *Niger J Clin Pract*, 2016, 19(1): 25-29.

(编辑:陈丽霞)