不同类型准直器在食管癌放疗中的剂量学比较

张 秦[1] 郜玉兰[2] 李赛萌[1] 郭京京[1] 张彦军[1] 白文文[1] 张若辉[1]

[1]（河北医科大学第四医院，放射治疗科 石家庄 050011）

[2]（河北省人民医院，内镜诊疗科 石家庄 050051）

摘要 直线加速器机头结构和性能参数是影响患者治疗的重要因素，本研究主要比较MLCi2、MLCi2+Integrity与Agility三种准直器在治疗食管癌时的剂量学特点。选取2021~2025年河北医科大学第四医院接受放疗的食管癌患者20例，对所有患者分别进行MLCi2组、MLCi2+Integrity组、Agility-FF组与Agility-FFF组4组调强计划设计，食管癌放疗处方剂量为60 Gy/30次。研究评估靶区平均剂量、D_{50}、V_{110}、危及器官受量与机器跳数等参数。结果显示，4组计划均能满足临床剂量学要求。Agility-FF组的PTV D_{mean}（63.96 Gy *vs*. 64.22 Gy， 64.27 Gy， 64.35 Gy）、D_{50}（64.28 Gy *vs*. 64.69 Gy， 64.68 Gy， 64.69 Gy）、V_{110}（8.1% *vs*. 11.4%， 10.3%， 16.9%）、双肺 V_{20}（20.3% *vs*. 22%， 22.1%， 21.4%）均显著低于其他组别。Agility-FFF组在PTV D_{mean}（64.35 Gy）、D_{50}（64.69 Gy）、V_{110}（16.9%）中剂量最高，CI低于Agility-FF组（0.86 *vs*. 0.87）；在食管癌双肺 D_{mean}（11.5 Gy *vs*. 11.9 Gy， 11.8 Gy， 11.6 Gy）、V_5（43.8% *vs*. 46.5%， 46.4%， 44.4%）、心脏 V_5（27.2% *vs*. 30.4%， 30.7%， 30%）、V_{25}（14.2% *vs*. 15.8%， 15.6%， 15%）、V_{30}（12.1% *vs*. 13%， 13.6%， 12.9%）中剂量最低。MLCi2组MU最低（726.7±199.8）；Agility-FFF组MU最高（1 024.3±291.9）；出束时间Agility-FFF组最低（43.9±12.5）s，Agility-FF组最高（82.3±22.7）s（$p<0.001$）。综上所述，新型160叶准直器相较于传统80叶准直器在优化剂量分布方面更具优势；FFF模式可降低肺和心脏等危及器官的低剂量照射与出束时间，但会以增加靶区高剂量风险和机器跳数为代价，需在临床中权衡其效率与保护收益。

关键词 直线加速器，多叶准直器，调强放疗，剂量学

中图分类号 R815

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0120

CSTR:32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0120

引用该文：

张秦, 郜玉兰, 李赛萌, 等. 不同类型准直器在食管癌放疗中的剂量学比较[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, **XX**(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0120.

ZHANG Qin, GAO Yulan, LI Saimeng, *et al*. Dosimetric comparison of different types of collimators in radiotherapy for esophageal cancer[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, **XX**(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0120.

基金资助：中央引导地方科技发展资金项目（No.246Z7722G）

第一作者：张秦，女，1999年5月出生，2021年毕业于河北医科大学影像技术专业获得学士学位，现于河北医科大学第四医院放疗物理室，E-mail：a15632120532@163.com

通信作者：张若辉，主任技师，E-mail: 48301170 @hebmu.edu.cn；白文文，副主任医师，E-mail: baiwenwen2006@126.com

收稿日期：初稿 2025-12-05；修回 2026-08-20

Supported by the Central Guidance on Local Science and Technology Development Fund Project (No. 246Z7722G)

First author: ZHNAG Qin (female) was born in May 1999, and graduated from Hebei Medical University with a bachelor's degree in medical imaging technology in 2021. Currently she is pursuing postgraduate studies at the Radiation Therapy Physics Department of the Fourth Hospital of Hebei Medical University, E-mail: a15632120532@163.com

Corresponding author: ZHNAG Ruohui, professor, Email: 48301170 @hebmu.edu.cn; BAI Wenwen, associate chief physician, E-mail: baiwenwen2006@126.com

Received 05 December 2025; accepted 20 August 2026

Dosimetric comparison of different types of collimators in radiotherapy for esophageal cancer

ZHANG Qin[1] GAO Yulan[2] LI Saimeng[1] GUO Jingjing[1] ZHANG Yanjun[1] BAI Wenwen[1] ZHANG Ruohui[1]

[1](*Department of Radiation Oncology, The Fourth Hospital of Hebei Medical University, Shijiazhuang 050011, China*)

[2](*Department of Endoscopy, Hebei General Hospital, Shijiazhuang 050051*)

ABSTRACT The head structure and performance parameters of linear accelerators are critical factors influencing patient treatment outcomes. This study primarily compared the dosimetric characteristics of three collimator types—MLCi2, MLCi2+Integrity, and Agility—in the treatment of esophageal cancer. Twenty esophageal cancer patients who received radiotherapy at the Fourth Hospital of Hebei Medical University from 2021 to 2025 were included. Four intensity-modulated radiotherapy plans were designed for each patient: MLCi2, MLCi2+Integrity, Agility-FF, and Agility-FFF. Prescription doses were 60 Gy in 30 fractions for esophageal cancer. The study evaluated parameters such as the EUD, D_{50}, V_{110}, doses to organs at risk and monitor units. All four plans met clinical dosimetric requirements. The Agility-FF group showed significantly lower PTV D_{mean} (63.96 Gy *vs*. 64.22 Gy, 64.27 Gy, 64.35 Gy), D_{50} (64.28 Gy *vs*. 64.69 Gy, 64.68 Gy, 64.69 Gy), V_{110} (8.1% *vs*. 11.4%, 10.3%, 16.9%), and V_{20} of both lungs (20.3% *vs*. 22%, 22.1%, 21.4%) compared to the other groups. The Agility-FFF group had the highest doses in PTV D_{mean} (64.35 Gy), D_{50} (64.69 Gy), and V_{110} (16.9%), and its conformity index (CI) was lower than that of the Agility-FF group (0.86 *vs.* 0.87). However, it showed the lowest doses in lung D_{mean} (11.5 Gy *vs*. 11.9 Gy, 11.8 Gy, 11.6 Gy), V_5 of both lungs (43.8% *vs*. 46.5%, 46.4%, 44.4%), heart V_5 (27.2% *vs*. 30.4%, 30.7%, 30%), V_{25} (14.2% *vs*. 15.8%, 15.6%, 15%), and V_{30} (12.1% *vs*. 13%, 13.6%, 12.9%) for esophageal cancer. The MLCi2 group had the lowest MU (726.7±199.8); the Agility-FFF group had the highest MU (1 024.3±291.9); The beam-on time was lowest in the Agility-FFF group (43.9±12.5) s and highest in the Agility-FF group (82.3±22.7) s ($p < 0.001$). The new 160-leaf collimator offers advantages over the conventional 80-leaf collimator in optimizing dose distribution. The FFF mode reduces low-dose exposure to organs at risk such as the lungs and heart as well as shorten beam-on time, but at the cost of an increased risk of high dose to the target and higher monitor units, requiring a clinical trade-off between efficiency and sparing benefits.

KEYWORDS Linear accelerator, Multileaf collimator, Intensity-modulated radiotherapy, Dosimetry

CLC R815

放射治疗是癌症治疗的主要手段之一，在食管癌的治疗中，调强放疗（Intensity modulated radiation therapy，IMRT）已成为应对晚期、无法手术或需术后辅助治疗等复杂情况的核心手段。该技术要实现其精准治疗的目标，关键在于对剂量分布进行高度精准的控制，而影响靶区剂量分布和投照准确性的因素主要包括直线加速器的机头散射、半影、漏射和透射等因素[1]，这些不同会直接影响放疗计划的适形性、效率与剂量分布[2-3]。本研究涉及的医科达（Elekta）直线加速器包括三种机头结构和多叶准直器（Multileaf collimator，MLC）配置，不同配置在叶片宽度、运动速度、备份铅门设计等方面存在差异，为清晰展示这些结构差异，表1介绍了各型号的机头结构与MLC类型。其次在光子束治疗模式方面，无均整器（Flattening filter free， FFF）技术近年来逐步应用于临床，与传统均整模式（Filter free，FF）相比，FFF模式能够显著提高剂量率，减少散射和辐射泄漏，降低正常组织受量[4]，从而在保证靶区剂量的同时有效保护危及器官（Organ at risk， OAR），并可能降低二次肿瘤发生风险，尤其适用于大分割患者。此外，FFF模式还可提升治疗效率，减少单次治疗时间[5]，特别适合与高精度MLC（如Agility）及调强放疗等技术联合使用。因此，系统评估不同MLC系统的物理特性及FFF模式在IMRT中的应用，对优化食管癌的放疗方案具有重要意义。本研究旨在通过评估医科达不同MLC机型和Agility光栅下有无均整器两种模式下的剂量特性，为临床设备选择与放疗计划优化提供参考依据。

表1 医科达加速器各型号参数
Table 1 Specifications of various Elekta linac models

MLC型号 MLC model	准直器特点 Collimator features	优点 Advantages	缺点 Disadvantages
MLCi2	数量：40对 等中心宽度：10 mm 速度：20 mm/s 叶片厚度：82 mm 过等中心距离：125 mm 射野大小：40 cm×40 cm Quantity: 40 pairs Width at isocenter: 10 mm Speed: 20 mm/s Leaf thickness: 82 mm Distance past isocenter: 125 mm Field size: 40 cm×40 cm	临床使用经验丰富；可满足常规调强放疗的基本适形需求；治疗时备份铅门会跟随至每个子野，可以降低漏射和透射 Extensive clinical experience; can meet the basic conformal requirements of conventional IMRT; during treatment, the backup jaws follow each segment, which can reduce leakage and transmission	叶片宽度较大，在复杂靶区中适形度受限；叶片运动速度较慢，加上铅门跟随调强治疗时间较长；叶片之间不可以凹凸相接，且两对侧叶片之间距离在等中心距离需≥1 cm The leaf width is relatively large, which limits conformality in complex target volumes; the leaf speed is relatively slow, and with jaw tracking, the IMRT treatment time is relatively long; the leaves cannot be interlocked in a tongue-and-groove manner, and the distance between opposing leaves at the isocenter must be ≥1 cm
MLCi2+ Integrity	数量：40对 等中心宽度：10 mm 速度：20 mm/s 叶片厚度：82 mm 过等中心距离：125 mm 射野大小：40 cm×40 cm Quantity: 40 pairs Width at isocenter: 10 mm Speed: 20 mm/s Leaf thickness: 82 mm Distance past isocenter: 125 mm Field size: 40 cm×40 cm	通过缩小叶片间间隙降低了射线漏射率，备份光栅可在MLC故障时提供额外防护，安全性更高 By narrowing the gaps between leaves, the radiation leakage rate is reduced. The backup jaws can provide additional protection in the event of an MLC failure, resulting in enhanced safety	叶片宽度较大，在复杂靶区中适形度受限；叶片运动速度较慢，加上铅门跟随调强治疗时间偏长；叶片之间可以凹凸相接，且两对侧叶片之间距离在等中心距离无需≥1 cm The leaf width is relatively large, which limits conformality in complex target volumes; the leaf speed is relatively slow, and with jaw tracking, the IMRT treatment time is somewhat long; the leaves can be interlocked in a tongue-and-groove manner, and the distance between opposing leaves at the isocenter does not need to be ≥1 cm
Agility	数量：80对 等中心宽度：5 mm 速度：65 mm/s 叶片厚度：90 mm 过等中心距离：150 mm 射野大小：40 cm×40 cm Quantity: 80 pairs Width at isocenter: 5 mm Speed: 65 mm/s Leaf thickness: 90 mm Distance past isocenter: 150 mm Field size: 40 cm×40 cm	叶片更窄适形度更高；叶片运动速度显著提升；机头设计通过增加MLC叶片厚度移除了X方向备份铅门，提高了子野走位效率。剂量学优势明显 Narrower leaves provide higher conformality; leaf speed is significantly improved; the head design removes the X backup jaws by increasing the MLC leaf thickness, thereby improving segment delivery efficiency. The dosimetric advantages are significant	无备份光栅，射野外剂量完全依赖MLC闭合控制，对MLC定位精度、日常质控、设备及维护成本，以及物理师计划能力要求更高 Without backup jaws, the out-of-field dose depends entirely on MLC closure control, which places higher demands on MLC positioning accuracy, routine quality assurance, equipment and maintenance costs, and the physicist's treatment planning capability

1 材料与方法

1.1 病例选择

收集2021年1月至2025年5月河北医科大学第四医院放射治疗科食管癌患者行回顾性研究。本研究所纳入的全部计划均来源于已通过模体剂量验证的临床计划库，样本量参考既往同类型剂量学对比研究，共纳入20例患者。本研究已获河

北医科大学第四医院伦理审查委员会批准（伦理批号：2026KS062），所有数据均已作匿名化处理。治疗前准备流程如下：（1）体位固定与定位：患者取仰卧位，采用热塑体膜进行体位固定，借助大孔径CT模拟定位机以5 mm层厚实施扫描定位。（2）患者定位：食管癌患者行胸腹部增强CT或PET/CT。（3）靶区勾画：由放疗医师在Pinnacle治疗计划系统中完成全部靶区的勾画工作。

纳入标准为：（1）经病理学确诊为食管癌患者；（2）初始治疗计划的处方剂量符合本研究所设定的统一标准；（3）选择食管癌分期为III期，原发灶位于上、中、下段食管患者；（4）初次接受放射治疗。排除标准为：（1）患有严重心、肺、肝、肾功能不全或结缔组织病，可能影响放疗耐受性或计划执行者；（2）合并其他恶性肿瘤；（3）没有完整的模拟定位CT影像及治疗计划数据；（4）资料不全或无法用于计划分析。共20例患者符合入组标准。其中T3N0M0 7例、T3N1M0 8例、T3N2M0 5例。食管癌患者中位年龄70（61~82）岁，男性12例，女性8例，危及器官的勾画包括脊髓、双肺、心脏。

1.2 直线加速器选择

选用医科达Precise、Synergy和Axesse三款直线加速器。在MLC结构方面，Precise机型搭载MLCi2型多叶准直器，结构为以40对钨合金叶片替代上准直器，并增设一对随动薄片准直器以降低漏射，叶片之间不可以凹凸相接，其叶片在等中心处的宽度为1 cm。运动范围限制在16 cm×21 cm，运动速度为2 cm/s。Synergy机型采用MLCi2+Integrity1.1系统，与Precise区别为加速器叶片可以和对侧MLC凹凸相接[6-7]。Axesse机型则配置先进的Agility™ MLC系统，拥有80对叶片，每片在等中心处的投影宽度仅为5 mm，最大运动速度可达6.5 cm/s。相对于前两款设备，该设备减少了X方向备份铅门以提高治疗效率，同时为减少叶片间漏射和透射增加了MLC叶片厚度，由8.2 cm增大到9 cm，漏射率低于0.5%。其射野覆盖达40 cm×40 cm，叶片设计显著提升了运动精度和剂量分辨率，同时该设备还具有FFF模式，在6 MV能量下剂量率可达1 400 MU/min[8-9]。MLCi2与Agility机头结构如图1所示。

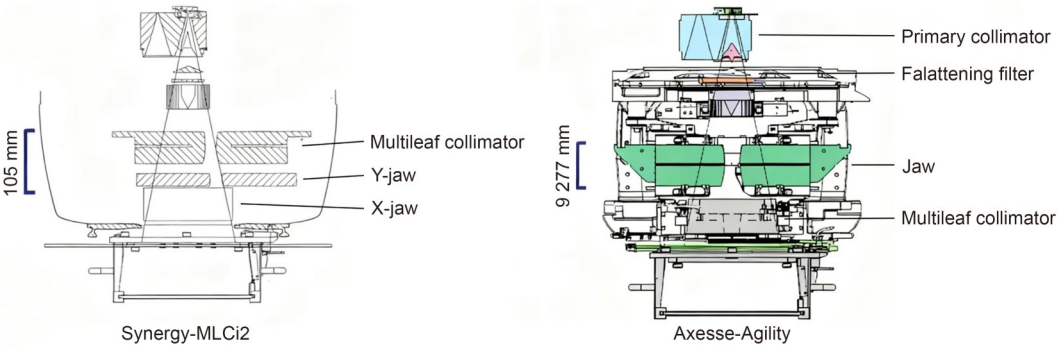


图1 Synergy与Axesse直线加速器MLC结构示意图
据吴皓楠（2020，p.1）和医科达用户手册改绘[7]，已获使用许可

Fig.1 MLC Structure of Axesse and Synergy Linear Accelerators
Adapted from Wu Haonan（2020，p.1）[7] and the Elekta user manual，used with permission

1.3 计划制定

根据ICRU 83报告和RTOG指南[10]，所有对比计划均在Pinnacle计划系统平台上，使用完全相同的优化目标函数和优先级进行设计，Pinnacle TPS采用卷积（Collapsed cone convolution， CCC）算法完成。所有患者的靶区及危及器官勾画均由一名副主任及以上级别放疗医师完成，随后由物理师对20例入组患者在医科达MLCi2、MLCi2+Integrity和Agility（在FF和FFF两种模式下）三种不同型号准直器上设计IMRT计划，并经副主任技师及以上级别物理师和医师共同审核确认，每位患者可得到MLCi2组、MLCi2+Intergity组、Agility-FF组和Agility-FFF组共4组计划。对于食管癌，先勾画大体肿瘤体积（Gross tumor volume， GTV），在GTV基础上外扩5-10 mm获得临床靶体积（Clinical target volume， CTV），再在CTV基础上外扩5 mm获得计划靶区（Planning target volume， PTV）。

为保证四种计划的可比性，要求100%处方剂量包绕计划靶区（Planning target volume，PTV）体积均达到95%，使用相同的目标剂量限值和射野入射角度。食管癌放疗处方剂量为60 Gy分30次（2 Gy/次），危及器官要求脊髓D_{max}<45 Gy，双肺D_{mean}<15 Gy、V_5<55%、V_{30}<18%，心脏D_{mean}<30 Gy、V_{25}<50%[11]。

1.4 计划评估

用剂量体积直方图（Dose volume histogram，DVH）统计4个计划PTV的50%体积剂量（D_{50}）、110%处方剂量所对应的体积（V_{110}）[12]、MLD、机器治疗跳数（Monitor units，MU）和出束时间（Beam-on time），评价危及器官双肺D_{mean}、V_5、V_{20}、心脏V_5、V_{25}、V_{30}。

1.5 统计学方法

本研究采用SPSS 27.0软件进行统计分析，经正态性检验（Shapiro-Wilk检验）后，符合正态分布且方差齐的数据以均数±标准差（$x\pm s$）表示，并进行方差分析，需进行LSD事后两两比较；不符合正态分布的数据以中位数（四分位数）[M（P_{25}，P_{75}）]表示，并进行Friedman M检验。若LSD检验或Friedman M检验的p值> 0.05，则4组计划的整体差异无统计学意义，否则4组计划整体差异具有统计学意义。

本研究涉及4个独立组别，共进行6次两两比较。所有统计检验均为双尾检验，未校正的检验水准设定为α = 0.05。为控制多重比较导致的I类错误率，组间比较采用Bonferroni校正法。校正后的显著性水准设定为α'= 0.05/6 ≈ 0.008 3。因此，在进行两两比较（LSD检验或Friedman M检验）时，仅当p值< 0.008 3时，才认为两组间差异具有统计学意义。

2 结果

本研究样本量N=20。样本量估算采用G Power 3.1软件。设α=0.05（双侧），效能（1–β）= 0.8，检验效能均大于99%，这表明研究结果具有较高的统计可靠性。表2展示了四组计划靶区、危及器官剂量学参数与机器跳数的比较结果，图2为MLC叶片分布示意图与靶区二维剂量曲线，图3为食管癌四组计划的剂量体积直方图。

Agility-FF组的PTV D_{mean}（63.96 Gy *vs*. 64.22 Gy，64.27 Gy，64.35 Gy）、D_{50}（64.28 Gy *vs*. 64.69 Gy，64.68 Gy，64.69 Gy）、V_{110}（8.1% *vs*. 11.4%，10.3%，16.9%）、双肺V_{20}（20.3% *vs*. 22%，22.1%，21.4%）均显著低于其他组别（p< 0.001）。

Agility-FFF组在PTV D_{mean}（64.35 Gy）、D_{50}（64.69 Gy）、V_{110}（16.9%）中剂量最高，CI低于Agility-FF组（0.86 *vs*. 0.87）；在双肺D_{mean}（11.5 Gy *vs*. 11.9 Gy，11.8 Gy，11.6 Gy）、V_5（43.8% *vs*. 46.5%，46.4%，44.4%）、心脏V_5（27.2% *vs*. 30.4%，30.7%，30%）、V_{25}（14.2% *vs*. 15.8%，15.6%，15%）、V_{30}（12.1% *vs*. 13%，13.6%，12.9%）中剂量最低。

表2 剂量学参数在4种计划的分布与总体对比结果与p值([M(p_{25},p_{75})])

Table 2 Distribution and overall comparison of target dosimetric parameters among the four plans and p values([M(p_{25}, p_{75})])

Contents		MLCi2 group	MLCi2+Integrity group	Agility-FF group	Agility-FFF group	χ^2	p
计划靶区 Planning target volume	PTV D_{mean} / Gy	64.22(63.70, 64.73)	64.27(63.72, 64.73)^{d}	63.96(63.79, 64.64)^{df}	64.35(63.95, 65.28)^{f}	16.62	<0.001
	D_{50} / Gy	64.69(64.07, 65.20)^{c}	64.68(64.27, 65.30)^{e}	64.28(63.77, 64.82)^{f}	64.69(64.26, 65.77)^{cef}	17.47	<0.001
	V_{110} / %	11.4(4.2,29.8)	10.3(5.8,25.6)	8.1(4.4,25.1)^{f}	16.9(5.0,44.5)^{f}	10.39	0.016
危及器官 Organ at risk	双肺 Lung						
	D_{mean} / Gy	11.9(10.2,13.2)^{bc}	11.8(10.2,13.3)^{de}	11.6(9.6,12.6)^{bd}	11.5 (9.4,12.5)^{ce}	44.79	<0.001
	V_5 / %	46.5(42.3,52.9)^{bc}	46.4(42.6,51.3)^{de}	44.4(40.3,51.4)^{bdf}	43.8(39.8,49.9)^{cef}	42.78	<0.001
	V_{20} / %	22.0(20.7,24.6)^{bc}	22.1(19.6,23.7)^{de}	20.3(18.3,23.1)^{bd}	21.4(18.0,23.5)^{ce}	38.22	<0.001
	心脏 Heart						

续表

Contents		MLCi2 group	MLCi2+Integrity group	Agility-FF group	Agility-FFF group	χ^2	p
	V_5 / %	30.4(11.5,78.0)[c]	30.7(11.0,77.7)[e]	30.0(11.5,76.5)	27.2(11.2,76.3)[ce]	20.72	<0.001
	V_{25} / %	15.8(2.2,33.8)[bc]	15.6(1.6,32.8)[de]	15.0(1.9,29.8)[bd]	14.2(2.1,30.6)[ce]	32.22	<0.001
	V_{30} / %	13.0(1.6,27.5)[bc]	13.6(1.1,27.2)[de]	12.9(1.3,24.2)[bd]	12.1(1.5,24.6)[ce]	28.71	<0.001
机器跳数 Monitor units		726.7±199.8[bc]	747.7±193.9[de]	822.5±227.2[dbf]	1024.3±291.9[cef]	51.54	<0.001
出束时间 Beam-on time / s		72.7±20.0[c]	74.8±19.4[e]	82.3±22.7[f]	43.9±12.5[cef]	45.2	<0.001

Note: [a]: MLCi2 *vs.* MLCi2+Integrity, p< 0.008 3; [b]: MLCi2 *vs.* Agility-FF, p< 0.0083; [c]: MLCi2 *vs.* Agility-FFF, p < 0.0083; [d]: MLCi2+Integrity *vs.* Agility-FF, p< 0.008 3; [e]: MLCi2+Integrity *vs.* Agility-FFF, p < 0.008 3; [f]: Agility-FF *vs.* Agility-FFF, p < 0.008 3

MLCi2组MU最低（726.7±199.8），MLCi2组与MLCi2+Integrity组间无统计学差异；Agility-FFF组MU最高（1 024.3±291.9）。出束时间Agility-FFF组最低（43.9±12.5）s，Agility-FF组最高（82.3±22.7）s。

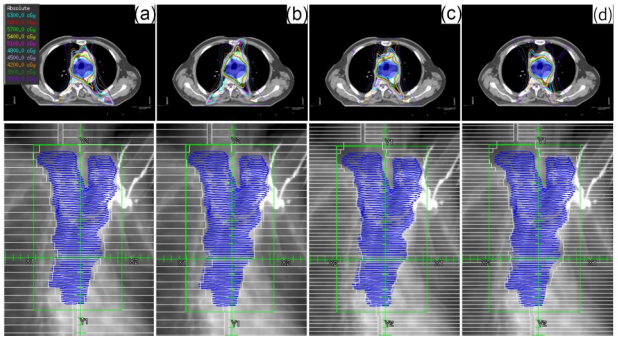


图2 MLC叶片及靶区二维剂量分布：(a)MLCi2组；(b)MLCi2+Integrity组；(c)Agility-FF组；(d)Agility-FFF组

Fig.2 MLC Leaf Distribution and Two-dimensional dose distribution of target volumes: (a) MLCi2 group; (b) MLCi2+Integrity group; (c) Agility -FF group; (d) Agility -FFF group

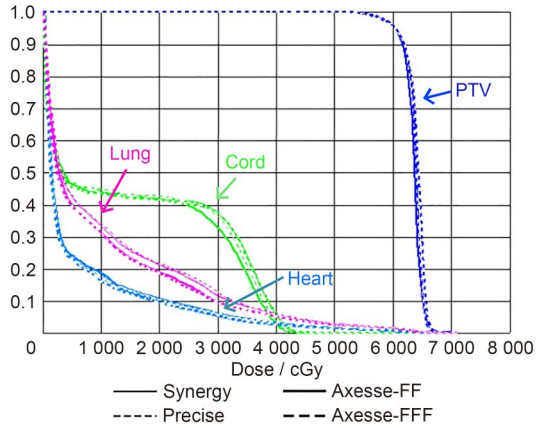


图3 食管癌剂量体积直方图

Fig.3 Esophageal cancer dose-volume histogram

3 讨论

作为国际主流放疗设备的直线加速器多叶准直器不断更新迭代，从早期的中低端MLCi2到高端Agility准直器系统，MLC的性能特点随着更新发生了极大改变。关于准直器迭代及Agility MLC多模式剂量效应的对比研究国内外已有诸多报道[13-14]，Sarkar B等[14]对比了不同MLC及射线束轮廓对应的立体定向治疗计划在剂量学结果与MU方面的差异；Lin等[1]的研究表明，在剂量学分析中，采用58~64 Gy辐射剂量的调强放射治疗效果优于三维适形放射治疗或二维放射治疗；Fathy等[16]评估了多叶准直器宽度（10 mm和5 mm）对前列腺癌治疗计划质量的影响，并探讨MLC能量模式对Agility有均整器、无均整器及MLCi2的影响；熊绮丽等[17]比较了食管癌患者应用螺旋断层、径照断层、容积旋转调强和固定野动态调强4种放疗计划的剂量学差异。这些研究虽具价值，但大多围绕特定技术参数或单一病种展开，对于医科不同类型准直器设备及不同治疗模式下性能在食管癌中的优势与不足，目前还未见报道。

为此，本研究聚焦于食管癌的调强放疗，系统分析了不同MLC在设计同一食管癌放疗计划时的表现，旨在为临床的精准化设备选择提供依据。通过4组计划的剂量学比较显示，在靶区剂量学性能方面，与杨鑫等[18]、练炼等[19]的研究结果类似，配备Agility机头的Agility-FF组在食管癌中展现出最优的靶区剂量均匀性、靶区高量以及对肺V_{20}的控制能力，表明其精细的束流调控能力在复杂解剖结构中能够生成更高质量计划，其技术优势使其适用于大多数治疗计划，尤其是食管癌这类靶区形态复杂的肿瘤计划设计，有研究指出，更小的叶片宽度有助于提升靶区剂量均匀性并改

善对邻近器官的保护[20-22]。在本研究中，与叶片宽度为10 mm的MLCi2多叶准直器相比，Agility MLC的5 mm超薄叶片在高复杂度病例中实现了更优的靶区覆盖度、更低的剂量热点与更好的部分危及器官保护，其适形指数也更佳，这一结果与Marrazzo等[23]的研究结论相吻合。Agility-FFF组在靶区参数中呈现的一致性偏高趋势体现了无均整器技术特有的剂量分布特性，其在提升剂量投照效率的同时，也提示临床应用中需密切关注可能伴随的高剂量区域风险。在危及器官保护方面，Agility-FFF组在限制低至中等剂量照射体积方面优势较为显著（如肺的D_{mean}与V_5；心脏V_5~V_{30}等），这对于降低放射性肺炎、心包炎等远期并发症风险具有重要意义[24]。

本研究中治疗MU的比较结果在一定程度上反映了不同准直器设计对治疗效率的影响。虽然MLC系统是影响照射剂量的因素之一，但照射剂量的最终确定还受到其他关键技术参数的影响，包括照射技术选择（如静态调强与旋转调强）[25]、计划复杂程度以及设备运行参数等[26-27]。MLCi2准直器系统展现出了较低的机器跳数特性，主要得益于其机械结构与束流调制模式在应对常规照射技术时的优化，从放射物理与辐射防护角度分析，MLCi2系统产生的低MU意味着由机头散射产生的辐射剂量相应降低，这不仅符合放射防护最优化原则，还可能降低辐射诱发第二原发肿瘤的长期风险。相比之下，Agility准直器基于超薄叶片结构和高速电磁驱动的技术为实现剂量适形和复杂强度调制提供了技术基础。然而，这种精准的剂量分布是通过增加子野数量和复杂束流序列实现的，自然导致MU的上升。特别是Agility-FFF模式通过移除均整器并采用超高剂量率照射模式，在维持剂量投照效率的同时，在中低剂量区的快速跌落方面表现出独特优势，使其在危及器官保护方面具有显著价值，但相应地需要更高的MU来实现同等的靶区剂量覆盖。

研究中观察到Agility-FF组的出束时间最长，但总治疗时间由出束时间与叶片走位时间共同决定，MLCi2与Agility准直器之间的剂量差异源于新型Agility准直器减少了X方向备份铅门以提高治疗效率，其叶片运动速度由MLCi2的2 cm/s提升到了6.5 cm/s，这直接转化为更短的叶片走位时间。Agility-FFF组的出束时间仅为（43.9±12.5）s，显著短于三组FF模式，揭示了无均整器模式在出束效率上的绝对优势，出束时间由机器跳数与剂量率共同决定，移除均整器后，尽管Agility-FFF组的MU显著高于其余三组，但FFF模式剂量率高达1 400 MU/min，是FF模式（600 MU/min）的2.33倍，这一剂量率优势完全覆盖了MU的增加，使得出束时间非但没有延长，反而实现了质的缩短。对于无法长时间保持固定体位的患者，治疗时间的缩短能有效限制因不自主运动导致的靶区位移，从而保障治疗的几何精度。

本研究为单中心回顾性分析，存在一定局限性：样本量有限，可能影响结果稳定性，病例选择过程中也可能存在潜在偏倚，此外，本研究未充分考虑治疗过程中的实时变量。因此，本结论的普适性尚需多中心、大样本量的前瞻性研究进一步验证，以便为临床决策提供更可靠的依据。

4 结论

传统80叶准直器是追求低MU值的首选；新一代高端160叶准直器系列在靶区剂量优化及心肺低剂量区控制方面优势显著，不足的是机器跳数有所增加；FFF模式在多个危及器官中体积剂量最低且出束时间缩短，但靶区热点增加、适形性略降。不同MLC在癌症放疗中呈现差异化，治疗时应根据其特点选择机型。

作者贡献声明 张秦完成本研究实验设计、数据分析、论文初稿的写作和参考文献分析；郭京京和张彦军指导计划系统的理论原理与实践操作，确保了计划设计流程的规范与高效；李赛萌和郜玉兰参与实验方案的实施与结果讨论，协助完成论文的修订与润色；张若辉和白文文指导了研究思路和实验方案的设计，对论文进行了最后的审阅和定稿。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

1 Lin C Y, Huang W Y, Jen Y M, *et al*. Dosimetric and efficiency comparison of high-dose radiotherapy for esophageal cancer: volumetric modulated arc therapy versus fixed-field intensity-modulated radiotherapy: VMAT versus IMRT for esophageal cancer[J]. Diseases of the Esophagus, 2014, **27**(6): 585-590. DOI: 10.1111/dote.12144.

2 Giakoumettis G, Gkantaifi A, Giakoumettis D, *et al*.

Sparing the hippocampus in prophylactic cranial irradiation using three different linear accelerators: a comparative study[J]. Cureus, 2024, **16**(6): e63137. DOI: 10.7759/cureus.63137.

3 张遵浩, 贾臻, 田博, 等. 多叶准直器与固定准直器在射波刀治疗胰腺癌中的剂量学特性比较[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2025, **43**(4): 040302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0037.
ZHANG Zunhao, JIA Zhen, TIAN Bo, *et al*. Dosimetric comparison of multileaf collimator and fixed collimator for the treatment of pancreatic cancer with the CyberKnife[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, **43**(4): 040302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0037.

4 Sun W Z, Chen L, Yang X, *et al*. Comparison of treatment plan quality of VMAT for esophageal carcinoma with flattening filter beam versus flattening filter free beam[J]. Journal of Cancer, 2018, **9**(18): 3263-3268. DOI: 10.7150/jca.26044.

5 Ghemiş D M, Marcu L G. Progress and prospects of flattening filter free beam technology in radiosurgery and stereotactic body radiotherapy[J]. Critical Reviews in Oncology/Hematology, 2021, **163**: 103396. DOI: 10.1016/j.critrevonc.2021.103396.

6 张若辉, 白文文, 李润霄, 等. 食管癌不同直线加速器静态调强放疗的剂量学比较[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2017, **24**(1): 38-43. DOI: 10.16073/j. cnki.cjcpt.2017.01.008.
ZHANG Ruohui, BAI Wenwen, LI Runxiao, *et al*. Comparison of IMRT treatment of esophageal carcinoma in different linac vendor[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2017, **24**(1): 38-43. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcpt.2017.01.008.

7 吴皓楠, 胡彧. 医科达Synergy直线加速器多叶准直器工作原理和故障分析[J]. 中国医疗设备, 2020, **35**(1): 163-165. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2020.01.044.
WU Haonan, HU Yu. Operation principle and fault analysis of multi-leaf collimator in Elekta Synergy linear accelerator[J]. China Medical Devices, 2020, **35**(1): 163-165. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1633.2020.01.044.

8 雷伟杰, 陆启勇. Axesse加速器系统配置原理及应用[J]. 医疗装备, 2014, **27**(10): 22-24. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2376.2014.10.009.
LEI Weijie, LU Qiyong. Investigation for configuration and application of Axesse accelerator system[J]. Medical Equipment, 2014, **27**(10): 22-24. DOI: 10.3969/j.issn.1002-2376.2014.10.009.

9 Zhang K, Tian Y, Li M H, *et al*. Performance of a multileaf collimator system for a 1.5T MR-linac[J]. Medical Physics, 2021, **48**(2): 546-555. DOI: 10.1002/mp.14608.

10 成媛, 李政欢, 陈宥霖, 等. 发泡胶固定的乳腺癌放疗摆位误差和计划靶区体积范围[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(5): 050302. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2022-0027.
CHENG Yuan, LI Zhenghuan, CHEN Youlin, *et al*. Setup error and planning target volume boundary in foam-immobilized radiotherapy for breast cancer[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2022, **40**(5): 050302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0027.

11 郭兴照, 刘静, 王刚, 等. 基于EBCT皮肤剂量在均整和非均整模式头颈部肿瘤放疗中的剂量学研究[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2024, **31**(18): 1131-1136. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcpt.2024.18.05.
GUO Xingzhao, LIU Jing, WANG Gang, *et al*. Dosimetric study of skin dose in flattened and flattening filter-free radiotherapy based on EBCT in head and neck neoplasms patients[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2024, **31**(18): 1131-1136. DOI: 10.16073/j.cnki.cjcpt.2024.18.05.

12 Tamihardja J, Razinskas G, Exner F, *et al*. Comparison of treatment plans for hypofractionated high-dose prostate cancer radiotherapy using the Varian Halcyon and the Elekta Synergy platforms[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2021, **22**(9): 262-270. DOI: 10.1002/acm2.13380.

13 苟亮倩, 吴书裕, 廖华英, 等. 螺旋断层放疗、静态调强放疗和容积旋转调强放疗技术在宫颈癌放疗的剂量学对比分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2025, **42**(4): 429-434. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2025.04.002.
GOU Liangqian, WU Shuyu, LIAO Huaying, *et al*. Dosimetric comparison of tomotherapy, static IMRT and VMAT techniques in radiotherapy for cervical cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2025, **42**(4): 429-434. DOI: 10.3969/j.issn.1005-202X.2025.04.002.

14 Sarkar B, Pradhan A, Munshi A. Do technological advances in linear accelerators improve dosimetric outcomes in stereotaxy? A head-on comparison of seven linear accelerators using volumetric modulated arc therapy-based stereotactic planning[J]. Indian Journal of Cancer, 2016, **53**(1): 166. DOI: 10.4103/0019-509x. 180815.

15 崔芹玲, 孙岩, 钟文, 等. Meta分析保乳术后三维适形与调强技术剂量学比较[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2016, **34**(3): 030201. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2016.rrj.34.030201.
CUI Qinling, SUN Yan, ZHONG Wen, *et al*. Meta-analysis of dosimetric comparison between three-dimensional conformal radiotherapy and intensity-modulated radiotherapy for breast cancer with conserving surgery[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2016, **34**(3): 030201. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2016.rrj.34.030201.

16 Fathy M M, Hassan B Z, El-Gebaly R H, *et al*. Dosimetric evaluation study of IMRT and VMAT techniques for prostate cancer based on different multileaf collimator designs[J]. Radiation and Environmental Biophysics, 2023, **62**(1): 97-106. DOI: 10.1007/s00411-022-01011-2.

17 熊绮丽, 徐刚, 石勇, 等. 食管癌放射治疗计划的剂量学比较[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2016, **34**(5): 050201-7. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2016.rrj.34.050201.
XIONG Qili, XU Gang, SHI Yong, *et al*. Dosimetric comparing four kinds of radiation treatment planning for esophagus cancer[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2016, **34**(5): 050201-7. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2016.rrj.34.050201.

18 杨鑫, 孙文钊, 陈利, 等. 新型双能医用直线加速器非均整剂量学特性研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2017, **26**(2): 203-209. DOI: 10.3760/cma. j. issn. 1004-4221.2017.02.017.
YANG Xin, SUN Wenzhao, CHEN Li, *et al*. Dosimetric characterization of a novel dual-energy medical linear accelerator without a flattening filter[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2017, **26**(2): 203-209. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.02.017.

19 练炼, 周冲, 慎晓明, 等. 左侧乳腺癌保乳术后全乳腺有无均整器模式下容积旋转调强放疗计划的剂量学比较[J]. 肿瘤研究与临床, 2021, **33**(12): 913-916. DOI: 10.3760/cma.j.cn115355-20210724-00319.
LIAN Lian, ZHOU Chong, SHEN Xiaoming, *et al*. Dosimetric comparison of volumetric modulated arc therapy plans with flattening filter and flattening filter-free for whole-breast radiation therapy after breast conserving surgery for left breast cancer[J]. Cancer Research and Clinic, 2021, **33**(12): 913-916. DOI: 10.3760/cma.j.cn115355-20210724-00319.

20 Wang S C, Gong Y L, Xu Q F, *et al*. Impacts of multileaf collimators leaf width on intensity-modulated radiotherapy planning for nasopharyngeal carcinoma: analysis of two commercial Elekta devices[J]. Medical Dosimetry, 2011, **36**(2): 153-159. DOI: 10.1016/j. meddos.2010.02.007.

21 Gong Y L, Wang S C, Zhou L, *et al*. Dosimetric comparison using different multileaf collimeters in intensity-modulated radiotherapy for upper thoracic esophageal cancer[J]. Radiation Oncology, 2010, **5**: 65. DOI: 10.1186/1748-717x-5-65.

22 Wu Q J, Wang Z H, Kirkpatrick J P, *et al*. Impact of collimator leaf width and treatment technique on stereotactic radiosurgery and radiotherapy plans for intra- and extracranial lesions[J]. Radiation Oncology, 2009, **4**: 3. DOI: 10.1186/1748-717x-4-3.

23 Oie Y, Saito Y, Kato M, *et al*. Relationship between radiation pneumonitis and organizing pneumonia after radiotherapy for breast cancer[J]. Radiation Oncology, 2013, **8**(1): 56. DOI:10.1186/1748-717X-8-56.

24 Marrazzo L, Zani M, Pallotta S, *et al*. Comparison of stereotactic plans for brain tumors with two different multileaf collimating systems[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2014, **15**(1): 27-37. DOI: 10.1120/jacmp.v15i1.4100.

25 张若辉, 郜玉兰, 白文文, 等. 蒙特卡罗模拟机架和多叶准直器误差对旋转放疗剂量的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(2): 020302. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0068.
ZHANG Ruohui, GAO Yulan, BAI Wenwen, *et al*. Monte Carlo simulation of errors in gantry angle and multi-leaf collimators on intensity modulated arc therapy radiation dose[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(2): 020302. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2023-0068.

26 符贵山, 戴建荣. 容积弧形调强放疗计划执行时间与加速器参数的关系分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2024, **33**(9): 840-844. DOI: 10.3760/cma.j.cn113030-20231010-00123.
FU Guishan, DAI Jianrong. Analysis of relationship between VMAT plan delivery time and machine parameters[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2024, **33**(9): 840-844. DOI: 10.3760/cma. j. cn113030-20231010-00123.

27 陈华, 邵琰, 王昊, 等. 基于肺癌患者真实呼吸运动参数的调强放射治疗剂量验证[J]. 辐射研究与辐射工艺学

报 , 2023, **41**(3): 030302. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2022-0111.

CHEN Hua, SHAO Yan, WANG Hao, *et al*. Intensity-modulated radiotherapy dose validation based on real respiratory motion parameters in lung cancer patients[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, **41**(3): 030302. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2022-0111.