

照射野等中心的偏移对VMAT计划剂量准确性的影响

易海云,夏兵,姚雷,张硕

中国医科大学附属第一医院放射治疗科,辽宁 沈阳 110001

【摘要】目的:通过检测、分析、减小照射野等中心的偏移,研究照射野等中心的改变对容积旋转调强(VMAT)计划剂量准确性的影响。**方法:**①使用EBT3胶片连续测量9个长方形野的剂量分布,据各照射野中心线的交汇情况分析照射野等中心的偏移情况;②计算、测量26例VMAT计划在二维平面探测器阵列(MatriXX)中的剂量分布,采用 γ 指数标准评测剂量验证(DQA)的结果。调整Elekta Synergy的参数到各照射野中心线交点集中后,重复②中操作,得出直线加速器调整后的相应数据。**结果:**照射野等中心调整前后,各照射野中心线的交点由散乱到集中,VMAT计划DQA 3%/3 mm、2%/2 mm γ 通过率的平均值分别由98.02%和81.85%上升到99.68%和96.44%。**结论:**照射野等中心的偏移会明显降低VMAT计划DQA 2%/2 mm的 γ 通过率,因此,对应用VMAT技术(或者其他类似的对准准确性要求较高的技术,如复杂的IMRT技术、SBRT/SRS技术等)进行治疗的直线加速器,需要做对治疗有实际意义的照射野等中心的检测。

【关键词】照射野等中心;容积旋转调强;剂量验证; γ 通过率

【中图分类号】R815.6

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)08-0794-05

Impact of radiation isocenter deviation on the delivery quality assurance of volumetric modulated arc therapy plan

YI Haiyun, XIA Bing, YAO Lei, ZHANG Shuo

Department of Radiation Oncology, the First Hospital of China Medical University, Shenyang 110001, China

Abstract: Objective To investigate the impacts of the changes of radiation isocenter on the dose accuracy of volumetric modulated arc therapy (VMAT) plan by detecting, analyzing and reducing the deviation of radiation isocenter. **Methods** ① The dose distributions in 9 rectangular radiation fields were measured with the use of EBT3 films, and then the radiation isocenter deviation was analyzed based on the intersection of the center lines in radiation fields. ② The dose distributions of 26 VMAT plans in MatriXX were calculated and measured, and the gamma index analysis was used to evaluate the delivery quality assurance (DQA). Elekta Synergy parameters were adjusted until the intersection of center lines in 9 radiation fields became one point, and then step ② was repeated to obtain the corresponding data after the adjustment of the linear accelerator. **Results** Before and after the adjustment of radiation isocenter, the intersection of center lines in 9 radiation fields changed from scatter to concentration, and the average gamma pass rate of VMAT plan DQA increases from 98.02% to 99.68%, from 81.85% to 96.44%, for 3%/3 mm and 2%/2 mm gamma criteria, respectively. **Conclusion** The radiation isocenter deviation significantly reduces the gamma passing rate (2%/2 mm) of VMAT plan DQA, which means that it's necessary to check the radiation isocenter deviation for machines which are used for precise VMAT, complex IMRT, SBRT/SRS treatments and so on.

Keywords: radiation isocenter; volumetric modulated arc therapy; dosimetry verification; gamma passing rate

前言

随着放疗技术的发展,容积旋转调强(Volumet-

ric Modulated Arc Therapy, VMAT)^[1]技术以其高效的剂量传输(Delivery)、完美的剂量适形、较低的机器跳数(MU)等优势使得其在临床放疗中的应用越来越广泛^[2-4]。VMAT技术在出束过程中,机架(Gantry)角度,多叶准直器(Multi-diaphragm Collimator, MLC)位置和剂量率(Dose Rate)同时变化,导致其剂量传输的复杂性大幅度增加^[5-7],使得其在应用于临床之前需要做大量的质控验证^[8-16],因此,本放疗中心

【收稿日期】2017-01-13

【作者简介】易海云,硕士研究生,研究实习员,研究方向:放疗物理学与剂量学,E-mail: yihaiyun14@163.com

【通信作者】夏兵,研究方向:放疗物理学与剂量学,E-mail: xia6581@sohu.com

在广泛开展 VMAT 技术之前,在相关研究的经验基础之上,选用 GAFCHROMIC® EBT3 胶片^[10,17-20]、M-atirXX^[14-15](IBA Dosimetry GmbH, Schwarzenbruck, Germany)作为验证设备、用 γ 指数^[21-23]作为分析方法,详细研究了照射野等中心^[18-20,25-26]的偏移对 VMAT 计划剂量准确性的影响。

1 材料与方法

1.1 仪器资料

GAFCHROMIC® EBT3 胶片, MEDTEC 头部有机玻璃模体, EPSAON Expression 11000XL 胶片扫描仪, IBA 的二维电离室矩阵平面探测器 MatriXX, IBA 的 MULTICube Lite 模体, Elekta 的直线加速器 Synergy, 瑞典的 Raystation 治疗计划系统, 东芝 Toshiba 的模拟定位 CT 机等。

1.2 计划资料

随机挑选 26 例行 VMAT 技术治疗的病例计划, 其中头颈部肿瘤 4 例, 乳腺部肿瘤 3 例, 胸段肿瘤 11 例, 盆腔部肿瘤 8 例。

1.3 方法

1.3.1 胶片法分析照射野等中心的偏移 用胶片验证照射野等中心的位置偏差是临床 QA 中常用的方法之一^[18], 关于胶片的使用、扫描、校准、分析等常规操作步骤及其相关注意事项已有很多报道^[10,17], 本文不再赘述, 在此只简述一下本文主要的操作过程和方法: 将夹有 GAFCHROMIC® EBT3 胶片的 MEDTEC 头部有机玻璃模体摆放在治疗床上, 然后在小机头 0°, SSD=100 cm, X 铅门=0.5 cm (加速器经过 Auto-Cal 校正), Y 铅门=10 cm 的条件下, 设置剂量 80/100 MU, 大机架角度分别取 160°、120°、80°、40°、0°、320°、280°、240°、200° 等中心旋转, 连续照射胶片^[18-20]。最后用 EPSAON Expression 11000XL 胶片扫描仪处理胶片, 用 Omni Pro I'm RT 软件分析扫描结果, 并按不同的等剂量线显示胶片的剂量分布情况, 打印出该剂量分布图, 画出每个照射野的中心线, 分析等中心的偏差情况。

1.3.2 MatriXX 及其配套软件测量、分析、得出等中心改变前后的 γ 通过率 鉴于已有专门文献详细探讨了 MatriXX 的参数、使用及使用过程中需要注意的事项等问题^[14-15,27], 本论文在此基础上重点叙述方法和过程。

第一步, 获取计算数据: 将夹有 MatriXX 的 MULTICube 模体水平摆放在 CT 模拟定位机的扫描床上, 按层厚 3 mm、扫描电压 120 kV 完成 CT 扫描后, 将重建后的图像传输至 Raystation 治疗计划系

统, 在 Raystation 的 QA 模块下将挑选的计划加到 MULTICube 模体上, 以 MatriXX 的测量中心为计划中心计算得到对应计划在 MatriXX 上的剂量分布图, 获取计算数据。

第二步, 获取测量数据: 将 MatriXX 夹在 MULTICube 中间, 同时装上角度探测装置, MatriXX 通过网线与装有 Omni Pro I'm RT 软件的电脑相连, 将激光灯对准 MatriXX 5.5 mm 深度处的平面, 通电预热 60 min, 再进行预照射直至预照射野的剂量分布曲线稳定为止^[27]。最后, 在 Mosaic 的 QA 模式下执行病人计划, 获得该计划剂量分布的测量数据。

第三步, 分析数据: 将 MatriXX 有效测量平面的计算数据导入到 Omni Pro I'm RT 软件中, 与相应的测量数据进行比对分析, 首先同步归一两组数据的剂量分布曲线; 然后在 Omni Pro I'm RT 软件中进行如下设置: Relevant Signals $\geq 10\%$, Invalid Result 为 -1, Search Distance 为 4 mm; 最后用 γ 指数分析法分析、得到该计划 3%/3 mm、2%/2 mm 的 γ 通过率。

联系 Elekta 工程师校准直线加速器, 直至 9 个照射野中心线的交点集中于同一点, 再在不改变其他条件的情况下, 重新测量 26 例病人计划的剂量分布图, 获取直线加速器照射野等中心调整后的数据, 并与照射野等中心调整前的相应数据进行对比, 分析总结得出结论。

2 结果

2.1 EBT3 胶片分析

图 1 是用胶片测量的、大机架角度分别取 160°、120°、80°、40°、0°、320°、280°、240°、200° 时 9 个照射野连续照射所形成的剂量分布图 (星状环^[19]) 和根据剂量分布图画出的照射野中心线 (黑色相交直线), 本文将该星状环和中心线统称为星状图, 该星状图是由实际的剂量分布图放大适当比例截取中间部分而得到的。图 1a、b 两图分别为直线加速器照射野等中心调整前后的星状图, a 图中照射野中心线的交点有多个, 这些交点有规律的散开, 并围绕着中心的空白区域旋转, 而不是相交于同一点, 由此可分析出照射野等中心有偏移; b 图中照射野中心线基本相交于同一点, 说明照射野等中心的偏移值很小, 鉴于 Elekta 工程师几次调整直线加速器之后, 照射野中心线的交点情况变化不大或者更差, 因此本文认为这是胶片法检测直线加速器照射野等中心的极限, 不再继续调整直线加速器。

对比图 1 中的 a、b 两图, 照射野中心线的交点由散乱到集中, 说明照射野等中心区域越来越小, 即在

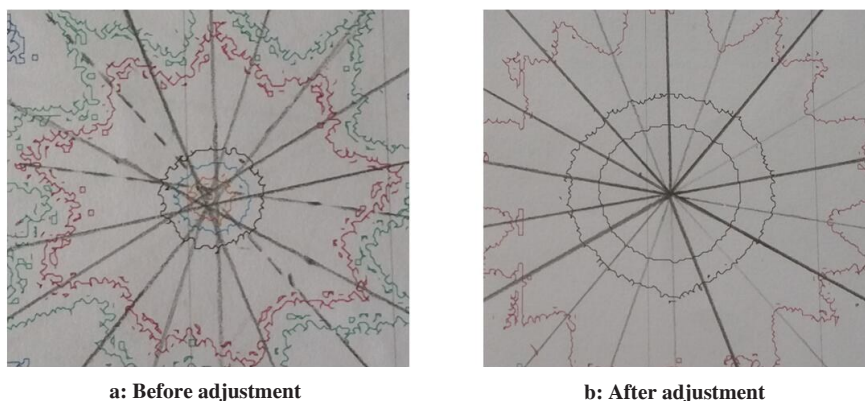


图1 EBT3胶片测量的照射野中心线相交情况

Fig.1 Intersection of center lines in radiation fields measured with the use of EBT3 film

胶片分析法的指导下调整直线加速器可以达到减小照射野等中心偏移值的目的。需要注明的是,第一次测量设置的处方剂量为80 MU,第二次设置的是100 MU,所以在第二次测量中,胶片中间部分的辐照剂量超过胶片的测量范围,故而胶片中间的圆圈比较大,因考虑到剂量的大小不影响照射野等中心的位置,所以没做特殊处理。

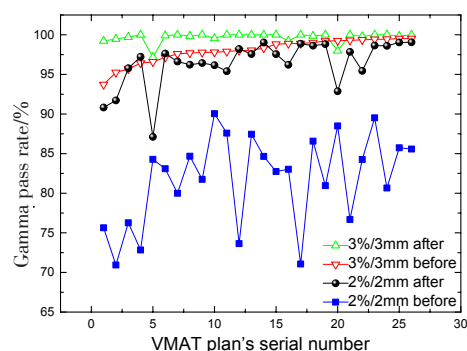
2.2 γ 指数分析

将直线加速器照射野等中心调整前3%/3 mm的 γ 通过率数值按照升序排列,然后将对应的VMAT计划从1依次编号到26,并按照编号顺序统计、记录照射野等中心调整后3%/3 mm的 γ 通过率;同理,按照以上编号顺序统计、记录照射野等中心调整前后2%/2 mm的 γ 通过率。将所有数据导入Origin画图软件,得到照射野等中心调整前后 γ 通过率数值随着VMAT计划编号的变化曲线,如图2所示,其中横坐标表示VMAT计划编号,纵坐标是 γ 通过率,蓝、黑(红、绿)色点线分别为照射野等中心调整前、后2%/2 mm(3%/3 mm) γ 通过率的变化曲线。

图2中红、绿色曲线分别为照射野等中心调整前、后3%/3 mm γ 通过率的变化曲线,除一点外,红色曲线始终在绿色曲线下方或与绿色曲线重合,且红、绿色曲线均集中在95%~100%之间,这说明调整照射野等中心前后,26例VMAT计划中有25例3%/3 mm的 γ 通过率都提高了或保持不变,且其值都大于95%。

图2中蓝、黑色曲线分别为照射野等中心调整前、后2%/2 mm γ 通过率的变化曲线,蓝色点线始终在黑色点线下面,蓝色曲线上的点集中在70%~90%之间,黑色曲线上大部分的点集中在95%~100%之间,这说明26例VMAT计划2%/2 mm的 γ 通过率在照射野等中心调整后都有了明显提高,且大部分计划的 γ 通过率由原来的90%以下提到到95%以上,由原来的不符合临床要求到满足临床质控标准,证明照射野等中心的偏移致使VMAT

计划DQA 2%/2 mm γ 通过率普遍降低以致不能达到临床标准。



VMAT: Volumetric modulated arc therapy

图2 26例VMAT计划在照射野等中心调整前后Gamma通过率的变化曲线图

Fig.2 Gamma passing rate of 26 VMAT plans before and after adjusting radiation isocenter

使用Origin软件对每组 γ 通过率数据进行统计分析,得到每组数据的标准差、最小值、平均值和最大值,见表1。由表1可以看出,直线加速器照射野等中心调整后,3%/3 mm和2%/2 mm γ 通过率的标准差均下降,最小值、平均值、最大值均有上升,说明调整照射野等中心之后,本文研究的26例VMAT计划DQA 3%/3 mm和2%/2 mm γ 通过率的数值都提高了,且数据的离散性减小了,直线加速器的精确性和稳定性提高了。

3 讨论

胶片具有较高的空间分辨率,胶片测量法是临床QA中用于验证照射野等中心偏移情况的常规方法、操作简单且有依据可循^[18],但是,本文使用的胶片分析法也有一些不足之处。首先,根据剂量分布图画照射野

中心线,再根据中心线的交点情况人为确定照射野等中心,这一方法具有较大的人为误差和随机性、偶然性误差,且所得数据的精确度因人眼的分辨率有限而难以提高,其次,关于等中心偏移值减小的结论,也只是根据图1中心线的交点由散乱到集中的现象间接分析得出的,而中心线的交点情况还有可能因为人为确定中心线位置的不准确、中心线粗细的不同和其他偶然性误差等而发生变化。不过,鉴于本文重在研究照射野等中心的改变这一现象(而不是具体数值)对VMAT计划剂量准确性的影响,因此,本文使用胶片分析法来检测照射野等中心的改变情况是完全可行的,假如下一步研究照射野等中心的改变值与VMAT计划剂量误差值间的关系,则需要使用专业的软件分析胶片照射野等中心的偏差值是多少,或者使用其他工具(如EPID)进行检查。

MatriXX是平面探测器,与三维探测器阵列(如ArcCHECK、Delta4等)相比,其在验证VMAT计划剂

量准确性的可行性上曾遭到一些研究者的质疑,如Neilson等^[28]认为平面探测器在日常DQA中太耗时、有很强的角度依耐性,因此建议使用三维探测器阵列进行VMAT计划的验证。但是,Hussein等^[10]和Vieilleveigne等^[11]通过研究对比PTW729、Delta4、ArcCHECK、EPID和film五种验证设备在VMAT计划DQA中的响应,得出如下结果:在操作得当的前提下,二维探测器和三维探测器的验证结果之间的差别不大,即这几种验证设备都可以用于VMAT计划DQA的验证。Wagner等^[14]和Boggula等^[15]详细探讨了MatriXX在验证VMAT计划中对不同射野方向和照射野大小、不同摆位方式等的依耐性,并在给出修正MatriXX角度依耐性方法的基础上,指出经过合理的角度修正,MatriXX完全可以用于VMAT计划的DQA工作中。综上,文中使用二维平面探测器MatriXX进行VMAT计划DQA的验证是可行的,即图2和表1的数据是可信的。

表1 26例VMAT计划在照射野等中心调整前、后 γ 通过率数据

Tab.1 Statistic of gamma passing rate of 26 VMAT plans before and after adjusting radiation isocenter

Gamma criterion		Standard deviation	Minimum value/%	Mean value/%	Maximum value/%
3%/3 mm	Before adjustment	1.49	93.72	98.02	99.53
	After adjustment	0.67	97.17	99.68	100.00
2%/2 mm	Before adjustment	5.67	70.94	81.85	90.04
	After adjustment	2.91	87.11	96.44	99.06

图2中照射野等中心调整前后, γ 通过率3%/3 mm变化曲线的差别很小,且有一部分曲线是完全重合的;表1中照射野等中心调整前后,3%/3 mm γ 通过率平均值的差别不到2%,再结合照射野等中心调整前、后,26例VMAT计划中已有25例计划3%/3 mm的 γ 通过率都大于95%,符合AAPM TG119报告^[24]中推荐的用“ γ 3%/3 mm $\geq 95\%$ 的通过率”评估临床调强(IMRT)计划通过验证的标准,这一方面说明本放疗中心QA的验证结果完全符合AAPM TG119号报告的要求,即本文所使用直线加速器的精度很高、没有造成较大剂量偏差的误差,另一方面也说明照射野等中心的偏移对VMAT计划DQA结果3%/3 mm γ 通过率的影响很小,或者这种影响可以忽略不计,即 γ 指数3%/3 mm的标准不能够体现照射野等中心的偏差对VMAT计划剂量准确性的影响。鉴于AAPM TG119号报告是2009年的报告,且该报告是针对IMRT技术的,并不一定适用于对精度要求更高的VMAT技术,因此,本文认为不能由 γ 指数3%/

3 mm的通过率几乎不受照射野等中心影响的结果,得出照射野等中心的偏移对VMAT计划剂量准确性的影响不大的结论,而应该采用更严格的标准进一步评价照射野等中心的偏移对VMAT计划剂量准确性的影响。另外,在临床QA工作中, γ 指数3%/3 mm标准并不能准确反映一些明显的系统误差^[10-11,29-31],一些研究者通过对比3DVH分析法与 γ 指数分析法对剂量偏差的响应,得出用DVH替代 γ 通过率评估剂量准确性的结论^[30-31],但是,考虑到3DVH软件分析法的复杂性随着评价器官和评价点数的增多而增大、越严格的 γ 指数标准与3DVH的分析结果越接近;迫于繁重的临床工作压力、高额的医疗成本^[32]和 γ 指数分析法的大众认可性、高效便捷性及其广泛植入各种验证设备的分析软件中,很多研究者在不改变评价方法、沿用 γ 指数分析法时,使用2%/2 mm甚至1%/1 mm γ 通过率这种更严格的标准来评测临床QA的中的误差。综上所述,在 γ 指数3%/3 mm的标准无法证明照射野等中心的偏差对VMAT计划剂量

准确性影响情况下,综合考虑 γ 指数3%/3 mm标准的适用性、替代标准的复杂性和临床工作的成本等问题,本文使用 γ 指数2%/2 mm的标准进一步评价照射野等中心的偏移对VMAT计划剂量准确性的影响是更合理、更可信、更可取的一种方法。

对比本文图2中等中心调整前3%/3 mm与2%/2 mm γ 通过率变化曲线上的点(红色与蓝色曲线)可以看出,当红色曲线(3%/3 mm)上的点处于缓慢地上升状态时,蓝色曲线(2%/2 mm)上的点则有升有降,对于那些下降的点而言,当3%/3 mm γ 通过率上升时,2%/2 mm γ 通过率却在下降,这说明当用3%/3 mm的标准评价得出QA的剂量偏差越来越小时,用2%/2 mm的标准得到的评价结果却显示剂量偏差变大了,即 γ 指数3%/3 mm的标准掩盖了VMAT计划剂量偏差变大的事实。此外,等中心调整后,图2中3%/3 mm与2%/2 mm γ 通过率变化曲线(绿色和黑色曲线)上点的变化规律完全相同,再结合表1数据,可以得出如下结论:当照射野等中心的偏移值比较大(如图1a所示)时, γ 指数3%/3 mm的标准更容易在高通过率的情况出现较大的剂量偏差,这与Jin^[31]的研究结果是一致的。因此, γ 指数3%/3 mm的标准过于宽松,不能准确体现照射野等中心的偏移对VMAT计划剂量准确性的影响,所以,建议使用2%/2 mm的 γ 指数标准来评测照射野等中心的偏移对高精度计划影响的误差。

综上所述,在检测、分析、减小照射野等中心的偏移这一问题上,胶片分析法是一种很好的方法,建议使用 γ 指数2%/2 mm的标准分析照射野等中心的偏移对VMAT计划剂量准确性的影响。本文数据显示照射野等中心的偏移使26例VMAT计划DQA 2%/2 mm γ 通过率的平均值降低12.59%,即照射野等中心的偏移对VMAT计划DQA的结果有较大的影响,所以,建议对应用VMAT技术(或者其他类似的对准确性要求较高的技术,如复杂的IMRT技术、SBRT/SRS技术等)进行治疗的直线加速器,做对治疗有实际意义的照射野等中心的检测,且对照射野等中心的检测应该使用直线加速器直接出束的方式来检测,而不建议使用光野十字线、前指针等替代出束法进行检测。

致谢:医科达工程师王立东、宋建国、安新在本研究调整直线加速器等中心过程中给予帮助,国家卫计委合作与交流中心医学物理师高端培训班老师和同学给予指导。

【参考文献】

[1] OTTO K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry

arc[J]. Med Phys, 2008, 35(1): 310-317.

- [2] PALMA D, VOLLANS E, JAMES K, et al. Volumetric modulated arc therapy for delivery of prostate radiotherapy: comparison with intensity-modulated radiotherapy and three-dimensional conformal radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 72(4): 996-1001.
- [3] CLEMENTE S, WU B, SANGUINETI G, et al. SmartArc-based volumetric modulated arc therapy for oropharyngeal cancer: a dosimetric comparison with both intensity-modulated radiation therapy and helical tomotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 80(4): 1248-1255.
- [4] QUAN E M, LI X, LI Y, et al. A comprehensive comparison of IMRT and VMAT plan quality for prostate cancer treatment[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 83(4): 1169-1178.
- [5] BEDFORD J L, WARRINGTON A P. Commissioning of volumetric modulated arc therapy (VMAT)[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2009, 73(2): 537-545.
- [6] WEBB S, MCQUAID D. Some considerations concerning volume-modulated arc therapy: a stepping stone towards a general theory[J]. Phys Med Biol, 2009, 54(14): 4345-4360.
- [7] BUSH K, TOWNSON R, ZAVGORODNI S. Monte Carlo simulation of Rapid Arc radiotherapy delivery[J]. Phys Med Biol, 2008, 53(19): 359-370.
- [8] EKAMBARAM V, VELAYUDHAM R. Commissioning and acceptance testing of the existing linear accelerator upgraded to volumetric modulated arc therapy [J]. Rep Pract Oncol Radiother, 2013, 18(5): 286-297.
- [9] WANG J Z, HU W G, PENG J Y, et al. Identical quality assurance for volumetric modulated arc therapy in Elekta and Varian machines[J]. Technol Cancer Res Treat, 2014, 14(4): 483-490.
- [10] HUSSEIN M, ROWSHANFARZAD P, EBERT M A, et al. A comparison of the gamma index analysis in various commercial IMRT/VMAT QA systems[J]. Radiother Oncol, 2013, 109(3): 370-376.
- [11] VIEILLEVIGNE L, MOLINIER J, BRUN T, et al. Gamma index comparison of three VMAT QA systems and evaluation of their sensitivity to delivery errors[J]. Phys Med, 2015, 31(7): 720-725.
- [12] LI G J, BAI S, CHEN N Y, et al. Evaluation of the sensitivity of two 3D diode array dosimetry systems to setup error for quality assurance (QA) of volumetric-modulated arc therapy (VMAT)[J]. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(5): 13-24.
- [13] BOUTEVIN F, FEUILLADE J, GAUTIER M, et al. Influence of the collimator rotation and the position of the isocenter on quality controls of treatment plans in dynamic arc therapy[J]. Phys Med, 2013, 29 (Suppl 1): e36.
- [14] WAGNER D, VORWERK. Two years experience with quality assurance protocol for patient related Rapid Arc treatment plan verification using a two dimensional ionization chamber array [J]. Radiat Oncol, 2011, 6(21): 1-8.
- [15] BOGGULA R, BIRKNER M, LOHR F, et al. Evaluation of a 2D detector array for patient-specific VMAT QA with different setups[J]. Phys Med Biol, 2011, 56(22): 7163-7177.
- [16] MASI L, DORO R, FAVUZZA V, et al. Impact of plan parameters on the dosimetric accuracy of volumetric modulated arc therapy[J]. Phys Med, 2013, 40(7): 071718.
- [17] BLANCK O, MASI L, DAMME M C, et al. Film-based delivery quality assurance for robotic radiosurgery: commissioning and validation[J]. Phys Med, 2015, 31(5): 476-483.
- [18] KHAN F M, GIBBONS J P. The Physics of Radiation Therapy[M]. 5th ed. Baltimore: Lippincott Williams & Wilkins, 2014: 381-384.

(下转 805 页)