

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2020.01.004

医学放射物理

KylinRay-IMRT与Pinnacle³胸部肿瘤计划剂量学比较分析

刘小波^{1,2},汪冬¹,赵云¹,郑华庆¹,贾婧¹,宋婧¹

1. 中国科学院核能安全技术研究所,中子输运理论与辐射安全重点实验室,安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学,安徽 合肥 230026

【摘要】目的:分析两套不同放射治疗计划系统(TPS)之间的计划优化质量,验证并评价调强放射治疗计划KylinRay-IMRT 5.0的逆向计划优化功能。**方法:**从题库选取15例胸部例题并导入至调强放射治疗计划系统KylinRay-IMRT,在KylinRay-IMRT计划系统中进行优化计算并确认优化结果,从TPS提取剂量学指标值并记录,数据比较进行 t 检验。**结果:**两组TPS计划的靶区均匀性指数(HI)、适形度指数(CI)、剂量分布满足临床要求,KylinRay-IMRT计划在靶区HI上略优于对照TPS组($t=4.480$; $P=0.001$)。KylinRay-IMRT计划肺的 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} 、平均剂量($t=2.594$ 、 6.672 、 3.471 、 6.225 ; $P<0.05$)略优于对照TPS组,心脏的 V_{30} 、 V_{40} 、平均剂量($t=6.078$ 、 6.466 、 8.712 ; $P<0.05$)明显优于对照TPS组。两组靶区CI($t=-1.548$; $P=0.144$)、肺的 V_5 ($t=1.339$; $P=0.202$)、脊髓最大剂量($t=1.465$; $P=0.165$)无统计学意义。**结论:**对于胸部例题而言,由于TPS自身因素和人为因素导致两者计算结果存在差异,KylinRay-IMRT的计划质量在临床可接受的程度范围内,其逆向计划优化功能满足了临床应用的安全性和准确性要求。

【关键词】调强放射治疗;治疗计划系统;软件测试;剂量学;计划比较

【中图分类号】R811.1;R730.55

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2020)01-0017-05

Dosimetric comparison between KylinRay-IMRT and Pinnacle³ TPS in thoracic tumor plans

LIU Xiaobo^{1,2}, WANG Dong¹, ZHAO Yun¹, ZHENG Huaqing¹, JIA Jing¹, SONG Jing¹

1. Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract: Objective To verify and evaluate the capability of inverse planning optimization of KylinRay-IMRT 5.0 for intensity-modulated radiotherapy (IMRT) by analyzing the quality of planning optimizations with two different treatment planning systems (TPS). **Methods** Fifteen thoracic tumor plans selected from case database were imported into KylinRay-IMRT for optimization calculations, and the optimization results were confirmed with those of Pinnacle³ TPS. The dosimetric index values selected from TPS were obtained and compared with t test. **Results** The homogeneity index, conformity index and dose distribution of two kinds of TPS plans satisfied the clinical requirements. The homogeneity index of target areas in KylinRay-IMRT plan was slightly better than that in control TPS plan ($t=4.480$; $P=0.001$). The V_{10} , V_{20} , V_{30} and mean dose of lungs in KylinRay-IMRT plan were slightly better than those in control TPS plan ($t=2.594$, 6.672 , 3.471 , 6.225 ; $P<0.05$), and the V_{30} , V_{40} and mean dose of heart in KylinRay-IMRT plan were superior to those in control TPS plan ($t=6.078$, 6.466 , 8.712 ; $P<0.05$). No statistical significance was found in the conformity index of target areas ($t=-1.548$; $P=0.144$), lung- V_5 ($t=1.339$; $P=0.202$) and the maximum dose to spinal cord ($t=1.465$; $P=0.165$). **Conclusion** For cases of thoracic tumors, there are differences in the optimization outcomes of the two TPS due to TPS itself and human factors. The quality of KylinRay-IMRT plan is proved to be within the acceptable range, and its capability of inverse planning optimization satisfies the requirements of clinical safety and validity.

Keywords: intensity-modulated radiotherapy; treatment planning system; software test; dosimetry; plan comparison

【收稿日期】2019-06-14

【基金项目】国家自然科学基金(11605233);中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(YZJJ201618)

【作者简介】刘小波,主要研究方向:放射医学物理,E-mail: xiaobo.liu@fds.org.cn

【通信作者】贾婧,副研究员,主要研究方向:医学物理,E-mail: jing.jia@fds.org.cn;宋婧,副研究员,主要研究方向:医学物理,E-mail: jing.song@fds.org.cn

前言

癌症已成为中国居民主要的死亡原因,且发病率和死亡率不断攀升,已成为非常重要的公共健康问题^[1]。调强放射治疗技术不断发展出调强适形放射治疗(Intensity-Modulated Radiation Therapy,

IMRT)、旋转容积调强放射治疗、螺旋断层调强放射治疗等技术,IMRT目前在临床放射治疗中发挥重要的作用^[2]。IMRT采用逆向治疗方案设计治疗计划,使得肿瘤靶区有较高适形度的剂量分布,而正常组织和危及器官的剂量降低至比较低的范围内,已被我国大部分医院所采用。放射治疗计划系统(Treatment Plan System, TPS)是设计IMRT计划的前提和重要保证。目前我国三甲医院采用的TPS几乎被医科达、瓦里安等国外品牌垄断^[3]。中国科学院核能安全技术研究所·中科风麟团队长期对精准放射治疗关键物理与技术进行研究^[4-6],开发了具有自主知识产权的精准放射治疗系统“麒麟刀”KylinRay^[7],包括:调强精准放疗计划系统(KylinRay-IMRT)^[8]、图像引导精准定位跟踪系统(KylinRay-IGRT)^[9]、剂量在线引导放射治疗系统(KylinRay-DGRT)^[10]、质子调强放射治疗计划系统(KylinRay-IMPT)^[11]以及自适应精准放疗系统(KylinRay-ART)等。其中,KylinRay-IMRT将先进的可视化技术、用户交互技术、快速精准的剂量计算方法^[12]和有效的逆向优化方法整合成一个精准高效的调强放射治疗计划平台。为验证评价KylinRay-IMRT治疗计划系统逆向计划优化功能的安全性和准确性,本研究使用KylinRay-IMRT目前版本和医院广泛使用的飞利浦Pinnacle³治疗计划系统进行对比实验。

1 材料与方法

1.1 材料采集与处理

1.1.1 材料采集 目前,国内肺癌等胸部肿瘤发病率占据我国癌症发病率的前列,因此本次实验选择肺部病例作为本研究的对比病例^[1]。所有的对比病例均来源于已收集到的一系列已经完成治疗的患者计划。从病例题库选取15例肺部病例的治疗计划,这些计划由三甲医院富有经验的物理师在Pinnacle³ TPS上设计并经确认后实施,每个治疗计划均包含完整的信息:CT图像数据、已勾画的靶区(PTV)及感兴趣区域(ROI)轮廓、射野信息(子野形状、子野权重、能量、角度、等中心位置、钨门大小)、剂量分布、剂量-体积直方图(DVH)等信息。

1.1.2 材料处理 为保证Pinnacle³组计划和KylinRay-IMRT组计划的可比性,实验前将确认的加速器剂量学数据(机器参数:准直器输出因子、准直器透射系数、加速器几何参数,剂量学参数:百分深度剂量、射野离轴比、射野输出因子,其它参数等)输入至KylinRay-IMRT的机器数据管理模块中,确保实验计划系统使用的是与对照计划系统相同的加速器数

据。与此同时,将对照计划的例题通过DICOM格式导出为DICOM CT/DICOM RT Structure/DICOM RT Plan/DICOM RT Dose等文件,再通过DICOM导入模块导入至KylinRay-IMRT TPS中。在与对照计划相同的CT数据、ROI信息(靶区、危及器官等)、射野信息(照射野的个数、大小、形状、角度等,子野数量、最小子野面积、最小MU、等中心位置等)的基础上,根据每个计划的医生处方剂量要求,在KylinRay-IMRT TPS内对参考计划设置器官约束,根据优化结果调整权重等约束条件,筛选并确定出符合临床剂量处方要求的实验计划,最后比较相应的对照计划,即在两组均能满足临床要求的计划DVH曲线中获取选定的评价参数数据,以便用于后续的分析。

1.2 不同TPS之间的剂量学参数差异分析

1.2.1 评价指标选取 通过DVH评估靶区和ROI的剂量分布。同时参考国际辐射单位和测量委员会(ICRU)83号报告,分别确定靶区和其它危及器官的评价指标。靶区评价指标选取均匀性指数(Homogeneity Index, HI)^[13]和适形度指数(Conformity Index, CI)^[14]。HI=(D₂-D₉₈)/D₅₀,其中,D₂是2%靶区体积剂量,D₉₈是98%靶区体积剂量,D₅₀是50%靶区体积剂量,HI越小表明靶区的均匀性越好,HI值为0时最佳。CI=(V_{t,ref}/V_t)×(V_{t,ref}/V_{ref}),其中,V_{t,ref}是靶区内处方剂量线包绕的体积,V_t是靶区体积,V_{ref}是处方剂量线包绕区域的体积,CI值为0~1,CI值接近于1时,表明靶区处方剂量线适形度较好。由于选取的部位是胸部,关注的危及器官主要选取肺、心脏、脊髓等,主要评价指标分别是脊髓的最大剂量(D_{max}),全肺的5、10、20、30 Gy的剂量体积和平均剂量(V₅、V₁₀、V₂₀、V₃₀、D_{mean}),心脏的30、40 Gy剂量体积和平均剂量(V₃₀、V₄₀、D_{mean})。

1.2.2 统计学方法 以上所述的两组TPS计划数据用平均数±标准差表示,采用SPSS 25.0统计软件对两组数据进行配对t检验,P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

两组TPS的IMRT计划中处方剂量线均能覆盖要求的靶区(图1a和图1b,图1和图2以同一病例例题为例)。与Pinnacle³计划的剂量分布图相比,KylinRay-IMRT计划的靶区剂量覆盖完整性、适形度能达到临床处方要求。两组靶区等剂量线(图1c和图1d)吻合程度较好,KylinRay-IMRT组的靶区剂量梯度跌落更快,但存在一定剂量热点(图2)。Pinnacle³组计划的HI稍差于KylinRay-IMRT组计划的HI,分别为0.12±0.02和0.10±0.01,两组间差异具有统计学意义(t=4.480,

$P=0.001$)。KylinRay-IMRT 组计划的 CI 虽然优于 Pinnacle³ 组计划,但两组间差异无统计学意义($t=-1.548$, $P=0.144$)。靶区 HI、CI 统计结果如表 1 所示。

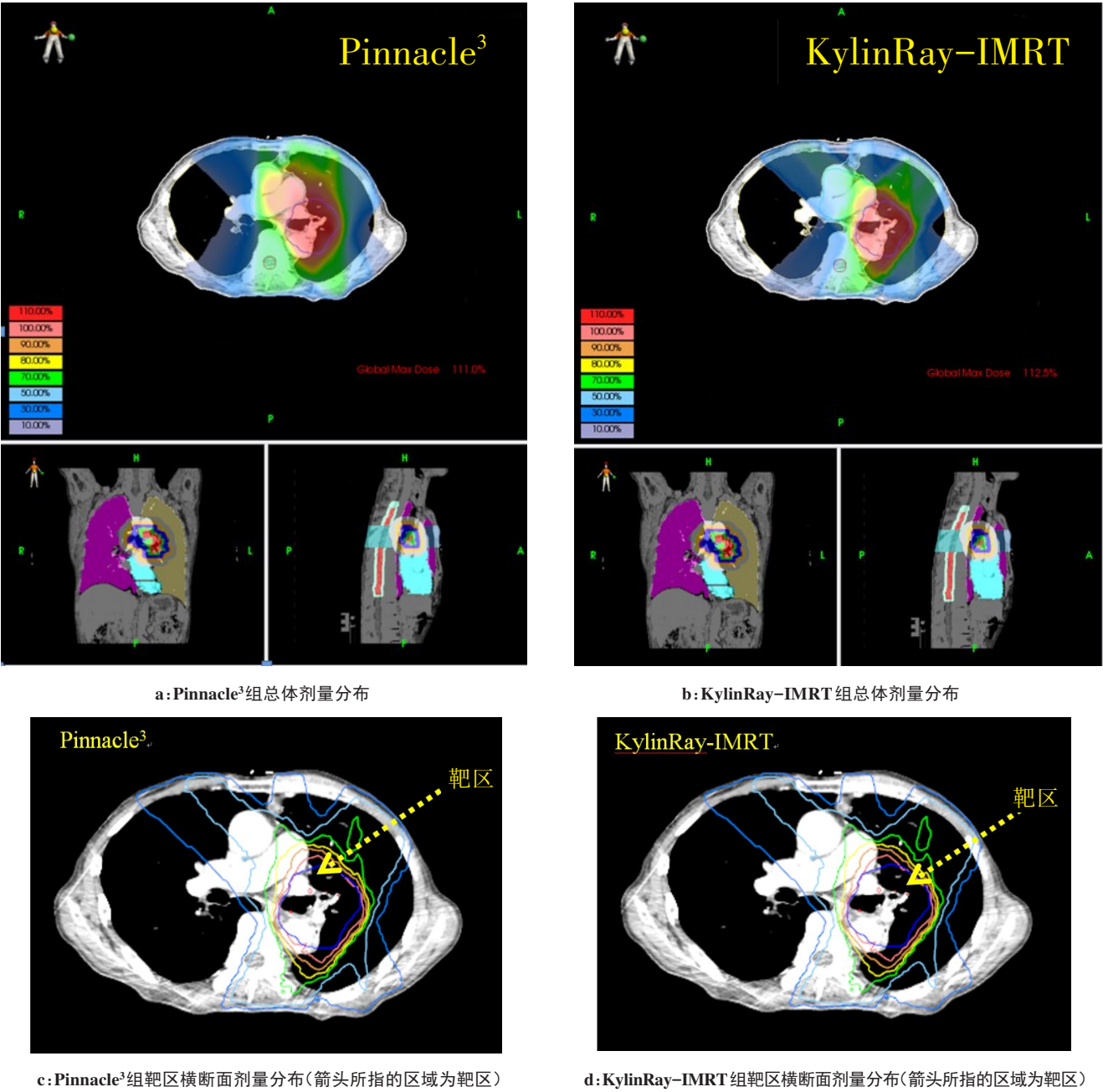


图1 两组计划剂量分布图

Fig.1 Dose distributions of Pinnacle³ plan and KylinRay-IMRT plan for the same patient

如表 2 所示,相比于 Pinnacle³ 组计划, KylinRay-IMRT 组计划的肺 V_5 、 V_{10} 、 V_{20} 、 V_{30} 以及 D_{mean} 分别下降 3.8%、5.2%、10.0%、11.8%、8.0%,除肺的 V_5 统计结果无统计学意义外,肺的其余指标统计结果具有统计学意义 ($t=1.339$ 、 2.594 、 6.672 、 3.471 、 6.225 , $P=0.202$ 、 0.021 、 0.000 、 0.004 、 0.000)。KylinRay-IMRT 组计划组心脏的 V_{30} 、 V_{40} 以及 D_{mean} 相较 Pinnacle³ 组计划而言均显著减少,分别为 35.2%、41.0%、20.6% ($t=6.078$ 、 6.466 、 8.712 , $P<0.05$), 具有统计学意义。虽然

KylinRay-IMRT 组的脊髓 D_{max} 相对 Pinnacle³ 组降低 3.7%,但无统计学意义($t=1.465$, $P>0.05$)。

3 讨论

本研究利用 KylinRay-IMRT 和 Pinnacle³ 两种计划系统分别设计胸部肿瘤调强放射治疗计划,实验结果表明两组计划的等剂量曲线均能较好地包绕靶区,靶区剂量均匀性和适形度均在可接受的范围内,危及器官都能得到较好的保护。

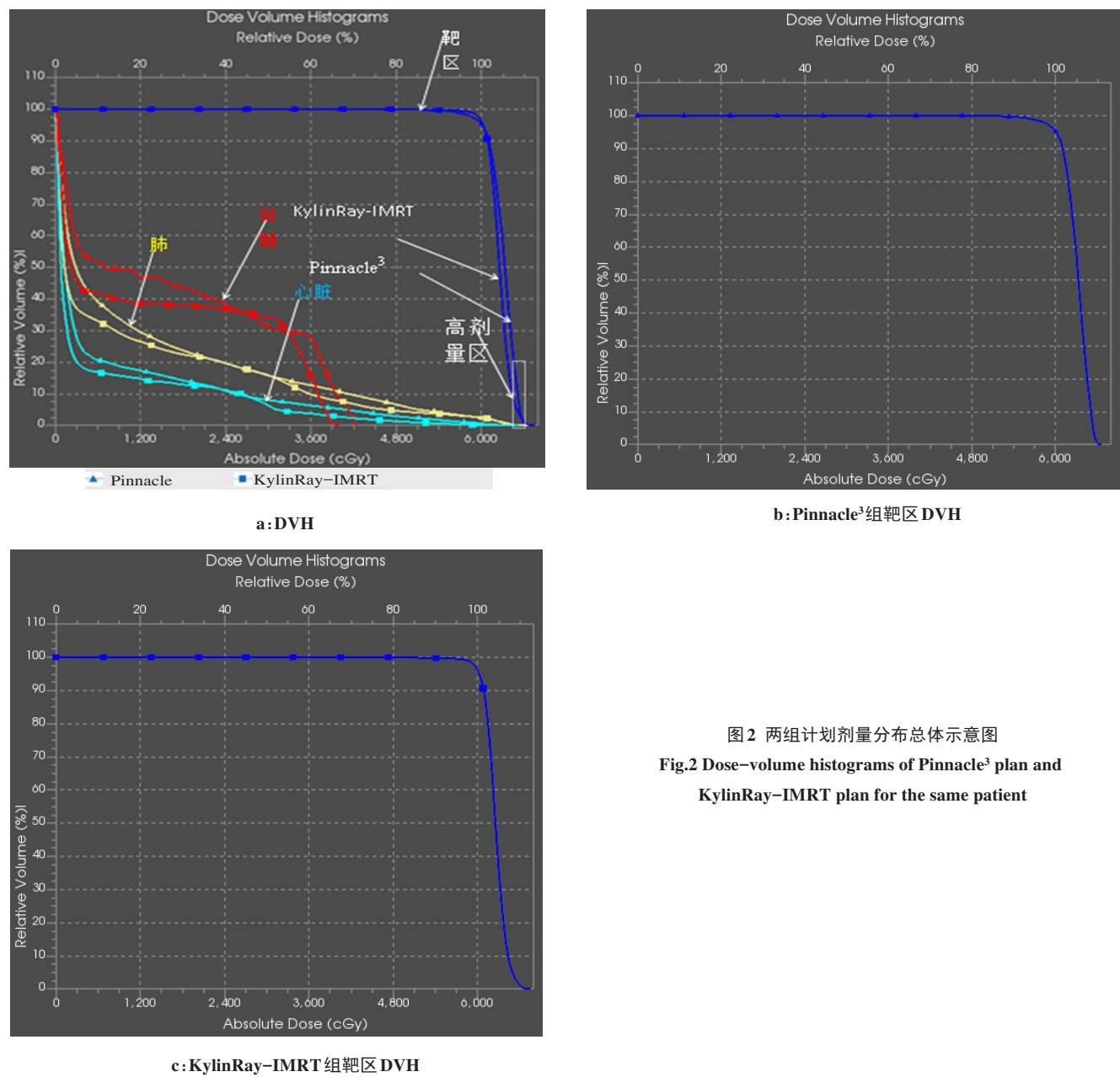


图2 两组计划剂量分布总体示意图
Fig.2 Dose-volume histograms of Pinnacle³ plan and KylinRay-IMRT plan for the same patient

表1 15例Pinnacle³和KylinRay-IMRT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 Pinnacle³ plans and KylinRay-IMRT plans for 15 cases (Mean±SD)

| 参数 | Pinnacle ³ | KylinRay-IMRT | t值 | P值 |
|----|-----------------------|---------------|--------|-------|
| HI | 0.12±0.02 | 0.10±0.01 | 4.480 | 0.001 |
| CI | 0.77±0.05 | 0.80±0.06 | -1.548 | 0.144 |

IMRT 治疗计划的优化过程是一个自动计算的过程,需要将CT图像数据分割成不同单元和密度的体素,然后TPS调用自身的剂量计算和优化算法不断寻找接近目标函数的最佳优化参数配置。在整个过程中,材料和方法部分已经阐述了已勾画轮廓的同一病人CT影像数据、同一建模后的加速器剂量学参

数、同一照射野设置等,但是仍存在不同的治疗计划系统自身因素和人为设置因素,即CT图像体素的分割、优化标准的详细阐述(目标函数和约束条件)、治疗计划系统采用的优化算法和剂量计算算法等,这造成了KylinRay-IMRT和Pinnacle³的优化结果存在差异。其中,Pinnacle³调强优化算法通常使用的是直接机器参数优化方法^[15],该算法属于单目标优化算法。KylinRay-IMRT优化算法使用直接机器参数优化方法^[16],将子野形状的优化和子野权重的优化分成独立的优化问题,交替进行迭代优化,子野权重的优化采用速度较快的共轭梯度法,建立叶片位置与笔形束强度转换关系,代入到目标函数中进行优化。Pinnacle³剂量计算算法使用的是剂量/卷积算法^[17],KylinRay-IMRT剂量计算算法采用基于蒙特卡罗的

表2 15例 Pinnacle³和 KylinRay-IMRT 计划的危及器官
剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)

Tab.2 Comparison of OAR parameters in Pinnacle³ plans and
KylinRay-IMRT plans for 15 cases (*Mean±SD*)

| 危及器官 | 参数 | Pinnacle ³ | KylinRay-IMRT | t值 | P值 |
|------|------------------------|-----------------------|-----------------|-------|-------|
| 肺 | V ₅ /% | 51.57±7.97 | 49.63±9.22 | 1.339 | 0.202 |
| | V ₁₀ /% | 37.59±7.32 | 35.63±8.27 | 2.594 | 0.021 |
| | V ₂₀ /% | 21.66±3.92 | 19.49±3.89 | 6.672 | 0.000 |
| | V ₃₀ /% | 13.61±3.46 | 12.01±3.58 | 3.471 | 0.004 |
| | D _{mean} /cGy | 1 193.65±170.31 | 1 097.88±162.09 | 6.225 | 0.000 |
| 心脏 | V ₃₀ /% | 17.67±10.15 | 11.45±7.02 | 6.078 | 0.000 |
| | V ₄₀ /% | 9.96±5.62 | 5.88±3.79 | 6.466 | 0.000 |
| | D _{mean} /cGy | 1 348.91±568.54 | 1 070.88±508.30 | 8.712 | 0.000 |
| 脊髓 | D _{max} /cGy | 3 641.67±816.90 | 3 505.64±852.32 | 1.465 | 0.165 |

快速笔形束剂量计算方法,结合 Batho 组织非均匀修正方法^[8]。由于两套 TPS 采用不同的剂量计算、优化算法,导致两者计算结果存在差异,但两套 TPS 的计划优化质量均在临床可接受的范围内。

4 结 论

由于 TPS 的自身因素和人的经验因素,两组 TPS 计划在统计分析结果上存在一定的差异,但计划质量均在临床上合理可接受的范围内。因此, KylinRay-IMRT 的胸部肿瘤优化质量在临床可接受的范围内,其逆向计划优化功能满足了临床安全性和准确性要求,达到了主流产品的水平。本次实验选择了代表性的胸部部位例题,未来可选择其他部位的例题开展进一步研究,也为其他使用者提供参考。

致谢:本文工作是在中科院核能安全技术研究所·中科凤麟团队进行的,感谢中科凤麟团队其他成员提供的各项帮助和支持。

【参考文献】

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

[2] 胡逸民. 肿瘤放射物理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.

HU Y M. Radiation oncology physics[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1999.

[3] 徐永祥, 李祥勇, 孙凯. 两种放射治疗系统的对比验证研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2011, 31(4): 465-467.

XU Y X, LI X Y, SUN K. Clinical verification of neptune 3D-RTPS-a treatment planning system compared to prowess TPS[J]. Chinese

Journal of Radiological Medicine and Protection, 2011, 31(4): 465-467.

[4] WU Y. CAD-based interface programs for fusion neutron transport simulation[J]. Fusion Eng Des, 2009, 84(7): 1987-1992.

[5] WU Y, SONG J, ZHENG H, et al. CAD-based Monte Carlo program for integrated simulation of nuclear system SuperMC[J]. Ann Nucl Energy, 2014, 82(2): 161-168.

[6] WU Y. Multifunctional neutronics calculation methodology and program for nuclear design and radiation safety evaluation[J]. Fusion Sci Technol, 2018, 74(4): 1-9.

[7] WU Y, HU L, LONG P, et al. Development and validation of an adaptive accurate radiotherapy system KylinRay[J]. J Med Biol Eng, 2018, 5(4): 287.

[8] 吴宜灿, 曹瑞芬, 胡丽琴, 等. 动态调强精准放射治疗计划系统 KylinRay-IMRT 的研发及验证[J]. 中国医疗器械杂志, 2018(1): 7-10.

WU Y C, CAO R F, HU L Q, et al. Development and validation of dynamic intensity modulated accurate radiotherapy system KylinRay-IMRT[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2018(1): 7-10.

[9] 吴宜灿, 贾婧, 曹瑞芬, 等. 图像引导精准定位跟踪系统 KylinRay-IGRT[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(3): 225-229.

WU Y C, JIA J, CAO R F, et al. Image-guided accurate positioning and tracking system KylinRay-IGRT[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2017, 34(3): 225-229.

[10] 吴宜灿, 郑华庆, 曹瑞芬, 等. 剂量引导实时验证系统 KylinRay-DGRT [J]. 现代仪器与医疗, 2017, 23(6): 13-17.

WU Y C, ZHENG H Q, CAO R F, et al. Design and implementation of a dose-guided accurate radiotherapy system KylinRay-DGRT[J]. Modern Instruments & Medical Treatment, 2017, 23(6): 13-17.

[11] 吴宜灿, 贾婧, 曹瑞芬, 等. 质子调强放射治疗计划系统 KylinRay-IMPT[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(6): 541-545.

WU Y C, JIA J, CAO R F, et al. Proton intensity modulated accurate radiotherapy system KylinRay-IMPT[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2017, 34(6): 541-545.

[12] WU Y, CHENG M, WANG W, et al. Development of Chinese female computational phantom rad-human and its application in radiation dosimetry assessment[J]. Nucl Technol, 2018, 201(2): 155-164.

[13] GREGOIRE V, MACKIE T R, NEVE W D. Prescribing, recording, and reporting photon-beam intensity-modulated radiation therapy (IMRT)[J]. J ICRU, 2010, 10(1): 1-112.

[14] FEUVRET L, NOËL G, MAZERON J J, et al. Conformity index: a review[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 64(2): 333-342.

[15] HÄRDENMARK B, LIANDER A, REHBINDER H, et al. P3IMRT: direct machine parameter optimization[J]. Pinnacle White Paper, 2003 (4535): 983.

[16] 王捷. 调强放射治疗中多目标优化方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

WANG J. Multi-objective optimization methods research in intensity modulated radiotherapy[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

[17] MCNUTT T. Dose calculations: collapsed cone convolution superposition and delta pixel beam[R]. Pinnacle White Paper, 2007 (4535): 983.

(编辑:陈丽霞)