

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2022.07.001

医学放射物理

无商业证书环境下的跨中心食管癌自动计划实现

陈艳¹, 刘宏嘉², 王海洋², 黄宇亮², 王佳琦², 田洪波², 吴昊², 陈晨³, 李全福⁴, 张艺宝²

1. 绵阳市第三人民医院肿瘤放疗中心/四川省精神卫生中心, 四川 绵阳 621000; 2. 北京大学肿瘤医院暨北京市肿瘤防治研究所放疗科/恶性肿瘤发病机制及转化研究教育部重点实验室, 北京 100142; 3. 北京大学电子学院, 北京 100871; 4. 鄂尔多斯市中心医院肿瘤科, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

【摘要】目的: RapidPlan 自动计划可以带来效率、质量和一致性的提升, 但对 Eclipse 计划系统版本和商业证书 (license) 的较高要求限制了其在资源相对匮乏的基层医院应用。本工作以食管癌为例, 探究在没有商业证书和较低版本计划系统环境下, 跨中心、跨技术远程应用 RapidPlan 模型进行自动优化的可行性和剂量学表现, 在不增加医院成本的情况下使更多患者受益。**方法:** (1) 选取绵阳市第三人民医院的 26 例不同分段食管癌固定野调强临床计划 (计划 A), 该组计划的设计条件为: 无 RapidPlan 商业证书且不支持光子优化算法的 Eclipse10.0 计划系统、6 MV 能量光子、Millennium 120 多叶准直器、Dose Volume Optimizer 优化算法和各向异性分析算法; (2) 将上述病例的勾画结构传输至北大肿瘤医院的 Eclipse 15.6 版计划系统, 保持 A 组计划布野、能量、多叶准直器等不变, 利用 RapidPlan 模型在光子优化算法和光子剂量算法条件下, 生成正常优化环境下的自动计划评估参考基准 (计划 C); (3) 作为无商业证书环境下的 RapidPlan 远程应用尝试, 将北大肿瘤医院 RapidPlan 模型预测的优化条件 (不包含计划结果) 传回至绵阳三院计划系统, 利用低版本 Dose Volume Optimizer 优化算法和各向异性分析算法, 在不进行人工干预的情况下获得 (计划 B); (4) 比较 A、B、C 计划之间的剂量学差异。**结果:** 无商业证书环境下跨中心应用自动计划模型具有可行性, 3 组计划均符合临床要求, 自动计划在设计效率和一致性方面具备优势。**结论:** RapidPlan 可以在无商业证书的低版本环境下实现跨治疗技术远程自动计划设计, 提高基层医院的临床工作效率, 缩小地域间医疗服务水平的差异。

【关键词】 食管癌; Rapidplan; 多中心; 自动计划; 远程诊疗

【中图分类号】 R811.1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1005-202X(2022)07-0793-06

Implementation of cross-institutional automated planning for esophageal cancer in the absence of commercial license

CHEN Yan¹, LIU Hongjia², WANG Haiyang², HUANG Yuliang², WANG Jiaqi², TIAN Hongbo², WU Hao², CHEN Chen³, LI Quanfu⁴, ZHANG Yibao²

1. Department of Radiotherapy, the Third Hospital of Mianyang/Sichuan Mental Health Center, Mianyang 621000, China; 2. Department of Radiation Oncology, Peking University Cancer Hospital & Institute, Key Laboratory of Carcinogenesis and Translational Research (Ministry of Education/Beijing), Beijing 100142, China; 3. School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Department of Oncology, Ordos Central Hospital, Ordos 017000, China

Abstract: Objective RapidPlan improves efficiency, quality and consistency of treatment planning. However, its application in local hospitals is limited by resources such as version and commercial license of Eclipse system. Taking esophageal cancer as an example, the feasibility and dosimetric performance of cross-institutional automated planning using RapidPlan based on different treatment techniques are investigated in cases of no commercial license and planning system of lower version, aiming to benefit more patients without extra cost for hospitals. **Methods** (1) Twenty-six clinical IMRT plans for esophageal cancer of various sections were selected from the Third Hospital of Mianyang (Plan A). These plans were created using Eclipse V10.0 system without

【收稿日期】 2022-02-26

【基金项目】 北京市自然科学基金 (Z210008); 北京大学肿瘤医院科学研究基金学科骨干项目 (2021-1); 北大百度基金资助项目 (2020BD029); 恶性肿瘤发病机制及转化研究教育部/北京市重点实验室开放基金 (2022 开放-2); 北京大学医学部教育教学研究项目 (2020YB34); 北京大学新工科交叉专项/中央高校基本科研业务费 (PKU2022XGK006); 国家自然科学基金 (11505012, 11905150, 82073333); 国家重点研发计划 (2019YFF01014405); 内蒙古自治区科技计划 (2022YFSH0064)

【作者简介】 陈艳, 主管技师, E-mail: chenyan200707@126.com

【通信作者】 张艺宝, 博士, 高级工程师, 研究方向: 医学物理, E-mail: zhangyibao@pku.edu.cn

RapidPlan commercial license and no support for photon optimization algorithm. All plans were optimized using 6 MV photon, Millennium 120 MLC, dose volume optimizer and anisotropic analytical algorithm. (2) The aforementioned cases were transferred to Peking University Cancer Hospital where RapidPlan model was used to re-optimize these plans without changing the beam, energy and MLC settings. Photon optimization and photon dose calculation algorithms were used for the re-optimization. The automated plans obtained in the normal optimization environment of RapidPlan were taken as the reference (Plan C). (3) As an attempt to apply RapidPlan remotely in the absence of commercial license, the optimization parameters (without including optimization results) predicted by RapidPlan model were transferred to the treatment planning system in the Third Hospital of Mianyang. The plans were reoptimized using dose volume optimizer and anisotropic analytical algorithm of Eclipse system of lower version, without human intervention (Plan B). (4) Dosimetric parameters were compared among plans A, B and C. **Results** The cross-institutional automated treatment planning in the absence of commercial license was technically feasible. All plans were clinically acceptable, but automated plan performed better in terms of efficiency and consistency. **Conclusion** Without commercial license, RapidPlan can be applied remotely using treatment planning system of lower version and different treatment techniques, which enhances clinical efficiency of local hospitals, and reduces the inter-regional variabilities of medical service.

Keywords: esophageal cancer; Rapidplan; multicenter; automated planning; remote diagnosis and treatment

前言

RapidPlan (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)作为一种基于先验知识的自动计划方法,利用机器学习技术从历史计划中提取剂量分布、解剖结构、布野条件等数据建立剂量体积直方图(Dose Volume Histogram, DVH)预测模型,该模型可根据新病例的解剖特征和射野设置等预测可能实现的剂量分布,并由此生成个体化优化参数以实现计划的自动优化。文献研究表明,RapidPlan不仅可以实现计划效率的提升^[1],而且可以减少因物理师主观差异造成的不一致性^[2],实现与人工计划相似甚至更好的质量^[3-9],具有良好的临床应用前景。

RapidPlan的应用对计划系统的运行环境有更高的要求,包括支持光子优化(Photon Optimizer, PO)算法的高版本Eclipse计划系统,以及RapidPlan商业证书等,升级费用较高。此外在技术层面,建立一个符合临床要求的RapidPlan模型非常耗时耗力,不仅需要准备充足的历史优质病例作为训练集数据,还要求物理师具备建模的理论基础及丰富的临床计划设计经验。而模型从初步建立到统计学分析和清洗^[10-11],再到模型参数调试、验证和迭代优化的试错,整个过程繁琐复杂^[12],也在一定程度上阻碍了该技术的临床推广,尤其是在资源相对缺乏的基层医院的应用。以绵阳市第三人民医院为例,应用RapidPlan技术的主要困难包括:(1)由于经费限制,本院Eclipse系统为较老的V10.0版本,不具备RapidPlan所需的PO算法,且未购买RapidPlan模块的商业证书;(2)人力资源限制,本院仅有2名物理师,均不具备RapidPlan建模所需的理论基础和实践经验,且大部分工作时间需应对临床计划设计和质

控等工作;(3)历史数据缺乏,尤其是建模所需的大量、一致性高的优质病例相对不足,这些也是基层医院使用RapidPlan技术所面临的普遍共性问题。

在无商业证书的环境下,对外院RapidPlan模型进行共享和拓展性应用,是解决上述问题的思路之一,使更多的医院和患者在有限资源条件下、以更低的成本尽快获益于人工智能放疗计划设计^[13],尤其是通过RapidPlan模型“移植”高水平医院的先进技术和治疗规范,提升计划效率和一致性的同时,减少物理师主观因素对放疗的影响,改进患者服务和医疗水平。

在复杂多变的跨中心应用环境下,尤其是在没有RapidPlan商用证书的平台,如何发挥自动计划的作用,以及RapidPlan在多中心不同技术条件下的应用效果等,国内外文献尚无相关报道,本工作对此问题进行探讨。

1 材料与方法

1.1 北京大学肿瘤医院RapidPlan食管癌模型

本工作拟移植的模型来自北京大学肿瘤医院放疗科(以下简称北京模型)已发表的食管癌RapidPlan模型^[14],该模型基于15.6版本Eclipse,由301例历史优质容积旋转调强(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)食管癌计划训练完成,并由40例未参与建模的本地病例独立验证和调参,最终模型可实现绝大部分本地病例的一次性自动优化,满足临床要求。

该模型的训练集包含了复杂的靶区部位解剖分段和多种处方形式。其中颈上段占比8.64%,胸中上段占比42.86%,胸中下段(含食管胃结合部)占比24.3%,全段占比21.3%,锁骨淋巴结或腹腔淋巴结转

移占比 3%; 训练集中既包含 60 Gy/50.4 Gy (40.86%)、60 Gy/54 Gy (11.96%)、50 Gy/45 Gy (5%)、46 Gy/41.4 Gy (9.3%)、56 Gy/50.4 Gy (6%)、54 Gy/50.4 Gy (3.3%) 等同步推量处方, 也包含 60、50.4、45、54 Gy 等其他单处方。所有训练集病例均由 PO 算法优化, 光子剂量算法 (Acuros External Beam, AXB) 算法完成剂量计算, 其中既有使用 Millennium 120 多叶准直器 (MMLC) 的计划 (占比 96.68%), 也有使用 High Definition 120 多叶准直器 (HDMLC) 的计划 (占比 3.32%), 使用 6 MV 光子的计划占比 20.60%, 6 MV-FFF 光子的计划占比 2.33%, 10 MV 光子的计划占比 66.45%, 10 MV-FFF 光子的计划占比 10.63%, 不同加速器之间已进行束流匹配。

1.2 模型跨中心应用环境和无商业证书“移植”方案

模型拟迁移应用的单位, 绵阳市第三人民医院放疗科 (以下简称绵阳三院) 的硬件条件和软件环境与北京模型的开发单位存在诸多不同, 主要包括: 绵阳三院仅有一台配置 MMLC 的 Trilogy 加速器, 仅使用 6 MV 单一光子能量 (未做束流匹配) 的固定野调强 (Intensity-Modulated Radiation Therapy, IMRT) 技术, 采用 Dose Volume Optimizer (DVO) 优化算法, 使用较低版本 Eclipse (V10.0) 系统且无 PO 算法和 RapidPlan 模块商业证书 (license), 剂量计算采用相对较老的各向异性分析算法 (Anisotropic Analytical Algorithm, AAA) 等, 如表 1 所示。

表 1 北京大学肿瘤医院建模环境和绵阳市第三人民医院移植应用环境比较
Table 1 Comparison of modeling environment in Peking University Cancer Hospital and application environment in the Third Hospital of Mianyang

条件	北京大学肿瘤医院建模条件	绵阳市第三人民医院应用环境
Eclipse	15.6 版, 有 RapidPlan 证书	10.0 版, 无 RapidPlan 证书
剂量算法	光子剂量算法	各向异性分析算法
优化算法	光子优化算法	Dose volume optimizer
加速器	TrueBeam、Edge、VitalBeam、Trilogy	Trilogy
多叶准直器	Millennium 120、High Definition 120	Millennium 120
能量/MV	6、10	6
处方	多处方	60 Gy/50.4 Gy
治疗技术	VMAT	IMRT
束流匹配	是	否

上述平台环境导致绵阳三院无法通过常规方法直接“移植”和使用北京模型进行食管癌放疗计划的剂量预测和自动优化。为了解决上述平台性问题, 本工作采取的移植技术方案包括: (1) 本组之前发表的研究提示基于 VMAT 计划训练的模型可以用于 IMRT 计划的预测和参数生成^[15], 因此本工作将绵阳三院完成勾画和 IMRT 布野的病例传输到北京大学肿瘤医院的 Eclipse 平台; (2) 基于上述勾画和布野条件, 在北京大学肿瘤医院 Eclipse 环境中选择与绵阳三院应用环境相符的 6 MV 光子和 MMLC, 采用 PO 算法进行 RapidPlan 预测并自动生成个体化优化条件; (3) 将生成的优化条件保存并导出, 其中 RapidPlan 独有的 DVH Line 条件被转化为一系列剂量-体积点; (4) 将上述图像文件、勾画结构、布野条件 (包括 IMRT 机架和准直器角度、MMLC 和 6 MV 光子能量) 和 RapidPlan 生成的优化参数传回并导入绵阳三院 Eclipse V10.0 环境; (5) 利用远程获得的

RapidPlan 个体优化条件, 在 DVO 优化算法和 AAA 等较低版本环境下, 完成本地病例 IMRT 计划的优化, 且优化过程不对优化条件进行人工干预, 以评估本方法的可行性和效果。

1.3 验证病例和参考计划

为评估移植计划与人工计划的质量水平, 参照 RTOG9405^[16]并结合绵阳三院实际情况, 选择 26 例食管癌患者作为验证病例, 处方剂量为本地最常见的 60 Gy/50.4 Gy, 并以其历史临床计划 (人工设计, A 计划) 作为参考标准。验证病例包含颈上段 3 例 (11.54%), 胸中上段 15 例 (57.70%), 胸中下段 5 例 (19.23%), 全段食管癌 3 例 (11.54%)。其中男性 21 例 (80.77%)、女性 5 例 (19.23%), 中位年龄 59.5 岁, 年龄范围 47~81 岁。靶区勾画标准以 ICRU50^[17]、ICRU62^[18] 号报告为依据, 计划评估参照《2019 NCCN 食管和食管胃结合部癌第 2 版》^[19]并结合本单位临床要求, 人工设计的临床计划根据病例难易程度选择 5~7 个

IMRT 射野,处方要求至少保证计划肿瘤靶区(Planning Gross Target Volume, PGTV)95%的体积在28次治疗中接受不低于60 Gy的剂量,计划靶区(Planning Target Volume, PTV)95%的体积在28次治疗中接受不低于50.4 Gy的剂量。

保持临床A计划布野条件不变,通过上节所述方法,采用RapidPlan远程生成个体化优化参数,在绵阳三院Eclipse平台利用DVO算法重新优化26例食管癌IMRT计划,并利用AAA计算剂量分布,获得B计划(即绵阳三院环境下远程移植RapidPlan计划)。

为评估跨中心模型移植应用的效果和准确性,并比较RapidPlan模型生成的相同优化参数在不同版本Eclipse和算法等环境下的剂量学差异,本工作还基于相同的病例和参数设置,在北京大学肿瘤医院Eclipse V15.6版本计划系统,采用PO算法优化并用(AXB)算法计算剂量分布,得到有RapidPlan商业证书的正常高版本Eclipse环境下的自动计划(正常RapidPlan环境下的自动计划,C计划)。将B、C计划的靶区剂量归一至与A计划相似的覆盖率,以便于比较危及器官剂量。

1.4 剂量学比较和统计学方法

本工作定量评估并比较了3组计划的剂量学指标:(1)靶区PGTV、PTV的均匀性指数(Heterogeneous Index, HI), $HI=(D_{2\%}-D_{98\%})/D_{50\%}$,HI越小表示靶区内的剂量分布越均匀,其中 $D_{x\%}$ 表示 $x\%$ 的体积对应的剂量;(2)靶区PTV的适形度指数(Conformal Index, CI), $CI=V_{100\%}/V_{\text{target}}$,CI越接近于1表示靶区的适形度越好,其中 $V_{100\%}$ 表示处方剂量所包括的体积, V_{target} 表示靶区的体积;(3)按照指南和临床要求对于危及器官的剂量要求,统计 $V_{x\text{Gy}}$ (最小接受剂量为 x Gy的体积), $D_{x\text{cc}}$ (x cm³体积接受的最小剂量),平均剂量 D_{mean} ,最大剂量 D_{max} 等。

利用SPSS 25.0软件对每组数据进行正态性检验(Kolmogorov-Smirnov),对于符合正态分布的数据($P>0.05$)采用ANOVA检验,反之采用非参数检验,设 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。将3组计划从Eclipse计划系统中导出的文本格式DVH数据传至自编Python程序中,提取剂量学参数并计算平均DVH数据,利用SigmaPlot软件绘制平均DVH图进行比较。

2 结果

实验表明虽然存在表1所展示的诸多差异,通过应用RapidPlan生成可移植的个体优化参数,在远程跨中心跨技术实现自动计划设计具有可行性。

通过表2和图1得知3组计划均符合临床要求,仅在靶区的均匀性(HI_{PGTV} 、 HI_{PTV})、脊髓外放5 mm及Body D_{max} 数据上有统计学意义。

3 讨论

表2和图1均提示,在无RapidPlan商业证书的环境下,远程利用模型生成的自动优化参数获得的B组计划可以满足临床质量要求,从表2统计的22个参数中,与人工计划A相比,B组优于A组计划的参数占12项(54.55%),提示即使是在无RapidPlan商用证书的环境下,通过远程应用RapidPlan生成的优化参数,仍能实现符合临床要求的自动计划且与人工水平相当,大部分参数还能更好,且自动计划避免了人工试错过程,效率大幅提高。

相比之下,在正常RapidPlan证书下使用更高版本Eclipse环境获得的自动计划(C组),表2统计的22项参数中有15项(63.64%)表现最好,提示正常环境下使用RapidPlan进行自动计划设计仍有一定优势,但3组间ANOVA或非参数分析提示绝大部分差异不具有统计学意义($P>0.05$)。

由于技术资源和资金条件有限,很多基层医院的计划系统版本较旧,不支持RapidPlan所需的PO算法,或没有购买RapidPlan商业证书,因而无法直接使用已开发模型完成自动计划设计。食管癌是我国西南地区的高发癌种之一,同时也是绵阳三院的常见放疗病例,计划设计难度相对较大,也耗费物理师很多时间^[20-22],因此对自动计划的应用具有迫切需求,包括通过人工智能技术缩小与大医院在放疗计划设计质量方面的差异,同时通过流程自动化提高设计效率和经济效益,从而为更多基层患者提供更好、更同质化的放疗服务。在复杂多变的环境下跨中心移植和应用RapidPlan模型也在更大的范围内具有良好的临床意义,满足临床试验同质化等科研需求。

本工作的创新性在于,将RapidPlan的应用拓展到无商业证书环境下、使用DVO算法的IMRT计划设计,并证明了其可行性和良好的剂量学表现。该结果的理论依据在于,虽然RapidPlan强制要求使用为其专门研发的PO算法,但该算法仅在模型的预测和优化参数生成阶段发挥作用,因此在无PO算法条件下,移植其他单位计算出的个体优化参数具有理论可行性,而以一系列剂量-体积点代替Line参数也被证明具有良好的效果。

值得一提的是,虽然危及器官之间存在相互竞争导致RapidPlan和人工计划的DVH存在交叉,但无论有无商业证书,RapidPlan自动计划的效率均大幅优于人工计划,且无需反复试错调整优化参数。表2的数据还提示,以B、C组为代表的自动计划15项剂量学参数的标准差也 \leq 人工计划,占比68.18%,说明自动计划的一致性更好,受到计划设计者主观因素

表 2 RapidPlan 跨中心应用 3 组计划剂量学参数比较($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Dosimetric comparison among 3 groups for assessing cross-institutional applications of RapidPlan (Mean±SD)

参数	A 计划	B 计划	C 计划	P 值
HI _{P_{GTV}}	0.08±0.01	0.08±0.01	0.07±0.01	<0.01
HI _{P_{TV}}	0.26±0.01	0.26±0.01	0.24±0.01	<0.01
CI _{P_{TV}}	0.94±0.02	0.94±0.01	0.93±0.02	0.17
双肺 V _{5 Gy} /%	49.29±13.74	48.38±12.49	45.31±10.86	0.18
双肺 V _{20 Gy} /%	20.26±6.62	21.94±6.72	21.70±6.66	0.29
双肺 V _{30 Gy} /%	11.20±3.93	10.85±4.04	10.56±3.96	0.85
双肺 D _{mean} /Gy	10.87±2.93	10.81±2.73	10.42±2.61	0.65
心脏 V _{30 Gy} /%	33.60±23.20	36.38±23.01	35.66±22.63	0.95
心脏 V _{40 Gy} /%	19.65±13.54	18.46±13.67	18.14±13.58	0.84
心脏 D _{mean} /Gy	21.89±12.23	21.92±12.14	21.71±12.06	0.97
脊髓 D _{max} /Gy	35.14±1.57	35.35±1.36	34.81±1.33	0.07
脊髓外放 5 mm D _{max} /Gy	40.57±2.19	39.26±1.91	38.54±1.85	<0.01
肝 V _{20 Gy} /%	25.99±5.65	23.13±6.27	22.89±6.27	0.68
肝 D _{mean} /Gy	12.12±2.39	11.24±2.17	11.03±2.15	0.72
胃 D _{max} /Gy	54.84±19.31	54.80±19.35	54.36±19.21	0.95
胃 D _{mean} /Gy	22.43±11.13	23.61±11.53	23.27±11.39	0.98
左肾 D _{mean} /Gy	9.01±5.06	7.67±3.54	7.55±3.57	0.61
右肾 D _{mean} /Gy	4.79±2.22	6.18±2.18	6.08±2.19	0.24
肠 D _{5 cc} /Gy	25.81±15.46	28.26±17.44	28.33±17.70	0.99
肠 D _{max} /Gy	52.56±6.96	53.48±5.14	53.95±5.98	0.97
Body D _{max} /%	111.51±1.85	111.05±2.19	109.77±1.94	0.01
跳数	1 190.35±167.31	1 238.19±139.04	1 241.04±139.75	0.83

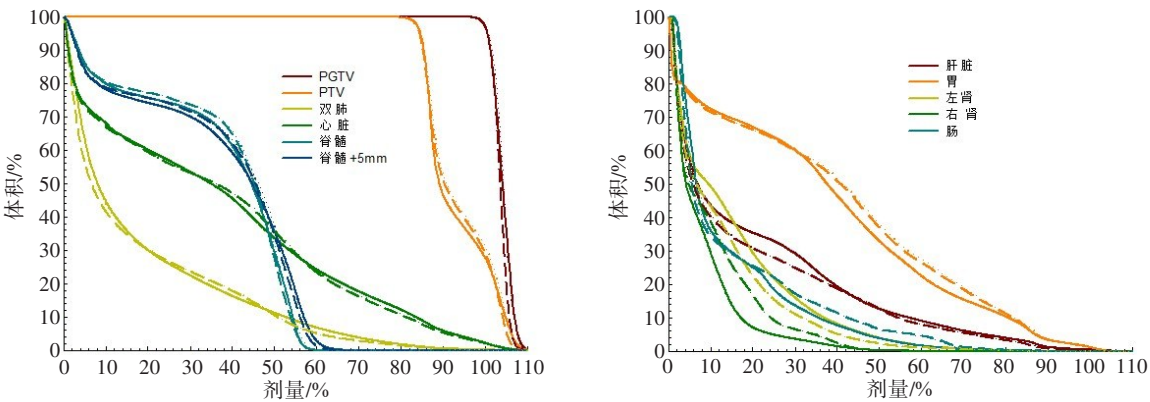


图 1 3 组计划的平均剂量体积直方图比较

Figure 1 Mean DVH comparison among 3 groups

实线代表人工计划 A, 点线代表绵阳三院移植 RapidPlan 自动计划 B, 虚线代表北京 RapidPlan 正常环境下的自动计划 C

的影响较小,能够满足基层医院对于提高临床效率和质量同质化的多元化需求。

4 结 论

本研究提出了在无 RapidPlan 商业证书的多中心

环境下,在较低版本的计划系统上采用不同的算法和治疗技术实现自动计划设计的方法,并在食管癌病例上验证了该方法的可行性和剂量学表现,该方法有利于 RapidPlan 自动计划技术的跨中心移植推广和应用,让更多基层医院以更低的经济成本和资源

门槛, 获益于人工智能技术带来的效率提升和放疗计划同质化, 也为未来放疗计划的集中化、规模化远程设计提供了可能。

【参考文献】

- [1] Zarepisheh M, Long T, Li N, et al. A DVH-guided IMRT optimization algorithm for automatic treatment planning and adaptive radiotherapy replanning[J]. *Med Phys*, 2014, 41(6): 061711.
- [2] Moore KL, Brame RS, Low DA, et al. Experience-based quality control of clinical intensity-modulated radiotherapy planning[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2011, 81(2): 545-551.
- [3] Bolan C. Expediting the treatment planning process[J]. *Appl Radiat Oncol*, 2013: 19-23.
- [4] Yang YD, Ford EC, Wu BB, et al. An overlap-volume-histogram based method for rectal dose prediction and automated treatment planning in the external beam prostate radiotherapy following hydrogel injection[J]. *Med Phys*, 2013, 40(1): 011709.
- [5] Chanyavanich V, Das SK, Lee WR, et al. Knowledgebased IMRT treatment planning for prostate cancer[J]. *Med Phys*, 2011, 38(5): 2515-2522.
- [6] Zhu XF, Ge YR, Li TR, et al. A planning quality evaluation tool for prostate adaptive IMRT based on machine learning[J]. *Med Phys*, 2011, 38(2): 719-726.
- [7] Wu BB, Pang DL, Simari P, et al. Using overlap volume histogram and IMRT plan data to guide and automate VMAT planning: a head-and-neck case study[J]. *Med Phys*, 2013, 40(2): 021714.
- [8] Lian J, Yuan LL, Ge YR, et al. Modeling the dosimetry of organ-at-risk in head and neck IMRT planning: an intertechnique and interinstitutional study[J]. *Med Phys*, 2013, 40(12): 121704.
- [9] Wu BB, McNutt T, Zahurak M, et al. Fully automated simultaneous integrated boosted-intensity modulated radiation therapy treatment planning is feasible for head-and-neck cancer: a prospective clinical study[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2012, 84(5): e647-e653.
- [10] 王美娇, 李莎, 岳海振, 等. Model Analytics辅助的智能放疗计划建模[J]. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(9): 870-873.
Wang MJ, Li S, Yue HZ, et al. Modeling for knowledge-based plan assisted with model analytics[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2017, 34(9): 870-873.
- [11] Varian Medical Systems. Application quick tip: verification of a custom RapidPlan model[Z]. EC13.5-QTS-02-A, 2015: 1-12.
- [12] Varian Medical Systems. Treatment planning 13.5 new features RapidPlan[Z]. EC13.5-WBK-01-B, 2014: 80-108.
- [13] Sharpe MB, Moore KL, Orton CG. Within the next ten years treatment planning will become fully automated without the need for human intervention[J]. *Med Phys*, 2014, 41(12): 120601.
- [14] 陈艳, 王海洋, 刘宏嘉, 等. 复杂处方和解剖分段的食管癌自动计划建模[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2020, 40(12): 932-937.
Chen Y, Wang HY, Liu HJ, et al. Modeling of automated planning for esophageal cancer under complex dose prescription and anatomical sections[J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2020, 40(12): 932-937.
- [15] Wu H, Jiang F, Yue H, et al. Applying a RapidPlan model trained on a technique and orientation to another: a feasibility and dosimetric evaluation[J]. *Radiat Oncol*, 2016, 11(1): 108.
- [16] Minsky BD, Pajak TF, Ginsberg RJ. INT 0123 (Radiation Therapy Oncology Group 94-05) phase III trial of combined-modality therapy for esophageal cancer: high-dose versus standard-dose radiation therapy[J]. *J Clin Oncol*, 2002, 20(5): 1167-1174.
- [17] International Commission Radiological Units. ICRU Report 62- Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy[R]. ICRU, 1993.
- [18] International Commission Radiological Units. ICRU Report 50- Recording and reporting photon beam therapy[R]. ICRU, 1999.
- [19] Ajani JA, D'Amico TA, Bentrem DJ, et al. Esophageal and esophagogastric junction cancers, Version 2.2019, NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology[J]. *J Natl Compr Canc Netw*, 2019, 17(7): 855-883.
- [20] 任江平, 周瑛瑛, 戴许豪, 等. 自动计划 RapidPlan 优化模块在鼻咽癌调强计划中的可行性应用[J]. *中国医学物理学杂志*, 2017, 34(8): 783-789.
Ren JP, Zhou YY, Dai XH, et al. Feasibility of automatic plan using RapidPlan model in intensity-modulated radiotherapy plan for nasopharyngeal carcinoma[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2017, 34(8): 783-789.
- [21] 陈济鸿, 柏朋刚, 陈文娟, 等. 基于数据库的宫颈癌自动调强计划设计可行性研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2020, 29(2): 141-145.
Chen JH, Bai PG, Chen WJ, et al. Feasibility of automatic IMRT planning for cervical cancer based on a database of previously-treated patients[J]. *Chinese Journal of Radiation Oncology*, 2020, 29(2): 141-145.
- [22] 陈旒, 曾彪, 张骥. RapidPlan 优化模块在宫颈癌容积调强计划中的可行性应用研究[J]. *中国医疗设备*, 2020, 35(5): 83-87.
Chen N, Zeng B, Zhang J. Application of RapidPlan optimization module in cervical cancer volume modulation arc plan[J]. *China Medical Devices*, 2020, 35(5): 83-87.

(编辑: 薛泽玲)