

## Auto-planning在脑胶质瘤非共面容积调强放疗计划中的应用

张国前<sup>1</sup>, 张书旭<sup>1</sup>, 王锐濠<sup>1</sup>, 雷怀宇<sup>1</sup>, 李万桢<sup>2</sup>, 廖博玉<sup>2</sup>

1. 广州医科大学附属肿瘤医院放疗中心, 广东 广州 510095; 2. 广州医科大学研究生学院, 广东 广州 510182

**【摘要】目的:**通过比较基于Auto-planning的胶质瘤非共面自动容积旋转调强放疗(AP-VMAT)计划与常规手动非共面VMAT(M-VMAT)计划在靶区和危及器官(OAR)的剂量学差异,探讨自动优化在非共面胶质瘤VMAT计划中应用的可行性。**方法:**选取2016-02-15~2016-12-18在广州医科大学附属肿瘤医院放疗科接受治疗的8例胶质瘤患者,进行CT模拟定位及靶区和OAR的勾画,采用Pinnacle 9.10治疗计划系统基于同一CT图像分别设计M-VMAT计划和AP-VMAT计划,比较手动和自动两种调强计划的靶区覆盖、分析靶区均匀性指数、适形度指数及OAR受照剂量差异。**结果:**两种计划靶区覆盖率、平均剂量( $D_{mean}$ )、均匀性指数差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。AP-VMAT计划的适形度指数明显优于M-VMAT计划,差异有统计学意义 $[(0.890\pm0.046) \text{ vs } (0.750\pm0.046), P<0.001]$ ;两种计划OAR中脑干最大剂量、 $D_5$ ,同侧眼球、晶体、视神经最大剂量、 $D_{mean}$ 差异均无统计学意义( $P>0.05$ ),而AP-VMAT计划中脑干 $D_{mean}$ 及视交叉、对侧眼球、晶体、视神经和正常脑组织的剂量评价参数均优于M-VMAT计划,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。**结论:**相比M-VMAT计划,基于Auto-planning的自动优化方式能够简化调强计划设计过程,并一定程度上改善靶区的剂量分布,降低OAR的受照剂量。

**【关键词】**胶质瘤;Auto-planning;非共面容积调强放疗;手动容积调强放疗计划

**【中图分类号】**R737.33;R730.55

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2018)05-0514-05

## Application research on Auto-planning in non-coplanar VMAT plan for brain gliomas

ZHANG Guoqian<sup>1</sup>, ZHANG Shuxu<sup>1</sup>, WANG Ruihao<sup>1</sup>, LEI Huaiyu<sup>1</sup>, LI Wanzhen<sup>2</sup>, LIAO Boyu<sup>2</sup>

1. Department of Radiotherapy, Cancer Center of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510095, China; 2. Graduate School, Guangzhou Medical University, Guangzhou 510182, China

**Abstract: Objective** To discuss the feasibility of Auto-planning based non-coplanar volumetric modulated arc therapy (AP-VMAT) plan for glioma by comparing AP-VMAT plan and conventional manual volumetric modulated arc therapy (M-VMAT) plan in terms of the dosimetric differences of planning target volume (PTV) and organs-at-risk (OAR). **Methods** From February 15 to December 18, 2016, 8 glioma patients receiving treatment in Cancer Center of Guangzhou Medical University were selected for CT-simulation based localization and segmentation of PTV and OAR. Non-coplanar M-VMAT plan and AP-VMAT plan were designed for the same set of CT images with the use of Pinnacle 9.10 treatment planning system. The target coverage ( $D_{95}$ ), homogeneity index and conformity index of PTV, and OAR dose were compared between M-VMAT plan and AP-VMAT plan. **Results** The comparison between AP-VMAT plan and M-VMAT plan didn't showed any statistical differences in  $D_{95}$ , mean dose ( $D_{mean}$ ) and homogeneity index ( $P>0.05$ ). The conformity index in AP-VMAT plan was better than that in M-VMAT plan  $[(0.890\pm0.046) \text{ vs } (0.750\pm0.046), P<0.001]$ . No significant differences between the two plans was found in the maximum dose and  $D_5$  of brainstem, the maximum dose and  $D_{mean}$  of ipsilateral eyeball, lens and optic nerve ( $P>0.05$ ). However, the  $D_{mean}$  of brainstem and the dosimetric parameters of contralateral eyeball, lens, optic nerve and normal tissues were less in AP-VMAT plan as compared with M-VMAT plan ( $P<0.05$ ). **Conclusion** Compared with M-VMAT plan, non-coplanar AP-VMAT plan simplify the design process and improve the target conformity and OAR sparing.

**Keywords:** gliomas; Auto-planning; non-coplanar volumetric modulated arc therapy; manual volumetric modulated arc therapy plan

**【收稿日期】**2017-11-08

**【基金项目】**广东省科技计划项目(2016A020215173)

**【作者简介】**张国前, 硕士, 主管技师, 研究方向: 放射物理, E-mail: zgqcc@126.com

**【通信作者】**张书旭, 博士, 主任技师, 博士生导师, E-mail: gthzxs@163.com

## 前言

目前, 由于调强放疗在靶区剂量的提高和危及器官(Organs-at-Risk, OAR)的保护方面的优势, 其应用已经得到广泛的认可<sup>[1]</sup>。对于一些复杂的病例, 生成一个调强计划依然是一个耗时的过程<sup>[2]</sup>。设计者

除了需要人工选择能量和射野方向,给出合理的优化目标和相应的权重,还要进行辅助靶区勾画以及计划再优化的过程。在不断寻找最优计划的过程中,设计者的经验对计划的质量起着重要的作用,经验的多少可能导致计划优劣的差异<sup>[3-5]</sup>。为了进一步提高调强计划的生成效率,减少由于设计者经验的差异对计划质量的影响,飞利浦公司推出了 Auto-planning 技术,其核心是计划系统模仿有经验的设计者完成计划的优化过程,比如作出剂量成形结构<sup>[6]</sup>来使得剂量成型、勾画出冷点和热点来自动优化目标函数使得剂量均匀等。一些学者对 Auto-planning 在头颈部以及盆腔肿瘤共面调强计划的应用进行了研究<sup>[7-8]</sup>,但在非共面容积旋转调强 (Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT) 计划中的报道仍不多见。为探讨自动优化在非共面 VMAT 计划设计中应用的可行性,本研究选取了 8 例胶质瘤患者,比较基于 Auto-planning 的胶质瘤非共面 VMAT (AP-VMAT) 计划与常规非共面 VMAT (M-VMAT) 计划在计划靶区 (Planning Target Volume, PTV) 和 OAR 的剂量学差异。

## 1 对象与方法

### 1.1 病例选择及一般资料

随机选取 2016-02-15~2016-12-18 在广州医科大学附属肿瘤医院放疗科接受治疗的胶质瘤患者 8 例,经术后病理确诊为胶质瘤并拟行非共面野放射治疗。不同病理分级的脑胶质瘤治疗方案和预后有很大的差异<sup>[9]</sup>。依据神经系统肿瘤的 WHO (2000) 分类,其中胶质母细胞瘤Ⅳ级 3 例、间变性少突胶质细胞瘤Ⅲ级 2 例、间变型性星形细胞瘤Ⅲ级 3 例。患者心、肺、肝和肾功能基本正常; ECOG 体能状态评分 0~2 级。男 5 例,女 3 例,年龄 32~58 岁,中位年龄 45 岁,靶体积为 144.5~485.8 cm<sup>3</sup>,中位靶体积 282.3 cm<sup>3</sup>。

### 1.2 体位固定和 CT 扫描方法

全部患者均取自然仰卧位,头部以热塑面罩固定,采用螺旋 CT 模拟定位机 (LightSpeed VCT, 美国通用电气公司) 行平扫和增强扫描。扫描范围由颅顶至第 2 颈椎下缘。将两套 CT 图像通过局域网传输到治疗计划系统。

### 1.3 靶区勾画和定义标准

靶区定义依据 ICRU 50 号和 62 号报告。肿瘤靶区 (Gross Target Volume, GTV) 为核磁共振 T<sub>1</sub> 加权图像所示术后残腔及增强病灶。临床靶区 (Clinical Target Volume, CTV) 为 GTV 外放 2~3 cm, 同时要求包括术前及术后核磁共振 T<sub>2</sub> 加权图像所显示的水肿

区。PTV 为 CTV 外放 5 mm 区域。OAR 包括双侧眼球、晶体、视神经、视交叉、脑干等。计划 OAR 体积定义为 OAR 外扩 0.3 cm<sup>[10]</sup>。

### 1.4 计划设计

采用 Pinnacle 9.10 计划设计系统,分别设计 M-VMAT 计划和 AP-VMAT 计划,治疗机器采用医科达公司的 Synergy 直线加速器,射线能量采用 6 MV,处方剂量为 60 Gy,分 30 次。剂量计算采用自适应卷积算法,剂量计算网格大小为 4 mm。两种计划均采用非共面双弧照射,床面、机架角度及光栏角度由物理师决定,尽量避开 OAR (晶体必须避开)。采用直接优化模式,手动勾画辅助靶区并设置靶区和 OAR 的约束条件,如靶区接受处方剂量照射的最小体积、OAR 的最大约束剂量等。通过不断调整优化条件以获得较好的结果。AP-VMAT 计划采用与 M-VMAT 计划完全一致的物理参数 (床面、机架及光栏角度),仅在自动优化模块添加靶区和 OAR 的剂量约束条件。剂量要求最低标准为:靶区 PTV 95% 的处方剂量覆盖 95% 的体积,CTV 95% 的处方剂量覆盖 99% 的体积,靶区最大剂量 ( $D_{\max}$ )  $\leq 107\%$  的处方剂量,脑干  $D_{\max} < 54$  Gy,眼球平均剂量 ( $D_{\text{mean}}$ )  $< 30$  Gy,晶体  $D_{\max} < 5$  Gy,视交叉  $D_{\max} < 50$  Gy,垂体  $D_{\max} < 45$  Gy,视神经  $D_{\max} < 50$  Gy<sup>[11]</sup>。

### 1.5 评价方法

评估参数包括: (1) 靶区覆盖率  $V_{95}$  (接受  $> 95\%$  处方剂量的 PTV 体积的百分数) 及靶区  $D_{\text{mean}}$ 。 (2) 靶区剂量适形度指数 (Conformity Index, CI) 及均匀度指数 (Homogeneity Index, HI)。 $CI = \frac{V_{PTV, \text{ref}}}{V_{\text{ref}}} \times \frac{V_{PTV, \text{ref}}}{V_{PTV}}$ , 其中,  $V_{PTV, \text{ref}}$  表示 95% 处方剂量线覆盖的 PTV 体积,  $V_{PTV}$  表示靶区 PTV 的体积,  $V_{\text{ref}}$  表示 95% 处方剂量线覆盖的总体积, CI 值范围是 0~1, 值越大表示适形度越好<sup>[12-14]</sup>;  $HI = \frac{D_{5\%}}{D_{95\%}}$ ,  $D_{5\%}$  和  $D_{95\%}$  分别表示 5% 和 95% 的 PTV 体积所接受的最低照射剂量, HI 理想值为 1<sup>[15]</sup>。 (3) 双侧视神经、眼球、晶体剂量评价参数采用  $D_{\max}$  和  $D_{\text{mean}}$ ; 脑干、双视交叉剂量评价参数采用  $D_{\max}$ 、 $D_{\text{mean}}$  和  $D_5$ 。 (4) 正常脑组织受照剂量评价参数采用  $V_{18}$ 、 $V_{24}$ 、 $V_{45}$ 、 $V_{60}$ , 即分别接受 18、24、45、60 Gy 照射剂量的正常脑组织的体积。

### 1.6 统计学分析

采用 SPSS 19.0 软件进行分析,数据结果用均值  $\pm$  标准差表示。各项剂量分布评价参数进行正态性检验,符合正态分布,采用配对  $t$  检验的方法分别比较。非正态分布则采用非参数检验。检验水准  $\alpha = 0.05$ ,  $P < 0.05$  表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区覆盖率、 $D_{mean}$ 、CI 和 HI

如表1所示,两种计划靶区覆盖率、 $D_{mean}$ 、HI 差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。AP-VMAT 计划 CI 明显优于 M-VMAT 计划,差异有统计学意义[(0.890±0.046) vs (0.750±0.046),  $P<0.001$ ]。图1为其中一例胶质瘤患者 CT 横断位靶区剂量分布。

表1 手动和自动计划靶区剂量分布比较( $\bar{x}\pm s$ )  
Tab.1 Comparison of target doses between M-VMAT and AP-VMAT plans (Mean±SD)

Parameter	M-VMAT	AP-VMAT	t/z value	P value
$V_{95}/\%$	98.24±1.97	98.03±1.47	0.70	0.484 <sup>a</sup>
$D_{mean}/cGy$	6 143.00±37.55	6 131.00±43.69	0.28	0.779 <sup>a</sup>
CI	0.750±0.046	0.890±0.046	6.81	<0.001
HI	1.070±0.024	1.070±0.021	0.84	0.430

M-VMAT: Conventional manual volumetric modulated arc therapy; AP-VMAT: Auto-planning based volumetric modulated arc therapy; CI: Conformity index; HI: Homogeneity index; <sup>a</sup>: The non-parametric test is applied for the data of abnormal distributions

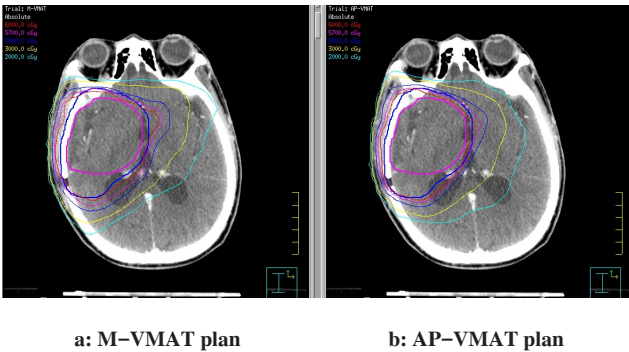


图1 靶区横断位剂量分布对比  
Fig.1 Target dose distribution in transverse view

2.2 OAR 受照剂量和体积

如表2所示,两种计划 OAR 中脑干  $D_{max}$ 、 $D_s$ , 同侧眼球、晶体、视神经  $D_{max}$ 、 $D_{mean}$  差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。而 AP-VMAT 计划中脑干  $D_{mean}$  及视交叉、对侧眼球、晶体、视神经的  $D_{mean}$  和  $D_{max}$  均明显低于 M-VMAT 计划,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。图2为其中一例胶质瘤患者两种计划剂量体积直方图(DVH)曲线。

2.3 正常脑组织受照剂量

如表3所示,AP-VMAT 计划靶区外正常脑组织受照剂量  $V_{18}$ 、 $V_{24}$ 、 $V_{45}$ 、 $V_{60}$  均低于 M-VMAT 计划,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

2.4 调强计划优化时间比较

AP-VMAT 计划的优化时间明显短于 M-VMAT 计划的优化时间。本组8例患者,M-VMAT 调强计划优化完成需2~3 h,AP-VMAT 调强计划仅需20~30 min 即可完成,且不需要人工干预。

3 讨论

由于不同医院和不同物理师(剂量师)之间的经验和水平不可避免地存在差异,导致对于同一病例设计出的放疗计划存在质量上的差异,进而可能降低部分患者肿瘤控制概率或增加不必要的正常组织并发症概率。为尽可能消除这种影响,近年来自动优化技术在调强计划设计中得到越来越多的关注。商售治疗计划系统中以瓦里安公司 Eclipse 系统的经验引导调强(Knowledge-based Intensity-Modulated Radiotherapy, K-IMRT)模块和飞利浦公司 Pinnacle 系统的 Auto-planning 模块为代表。

K-IMRT 自动优化是大数据的一个具体应用,基于先前大量患者的治疗计划生成模板库以进行新的患者计划的 DVH 预测,并以此 DVH 作为优化目标进行计划的生成,也就是说将过去获得的治疗经验融入到新计划的治疗决策中,在满足计划质量的同时,节省了调强计划优化的时间,提高了计划设计效率。近年来在头颈部肿瘤<sup>[16]</sup>、盆腔肿瘤<sup>[17]</sup>方面的应用都有相关报道。黄付静等<sup>[18]</sup>比较了宫颈癌 K-IMRT 与常规调强在 PTV 和 OAR 的剂量学差异,结果发现两种计划在靶区受照剂量、HI 和 CI 方面无统计学差异,而膀胱、股骨头 K-IMRT 计划明显优于常规 IMRT 计划。Fogliata 等<sup>[19]</sup>于 83 例头颈部肿瘤患者的放疗计划进行模型训练建立模板库,通过 20 例头颈部肿瘤放疗患者进行验证,结果发现与初始计划相比, K-IMRT 的快速计划中腮腺、口腔及喉的受照剂量分别减少了 2、5 和 10 Gy。Good 等<sup>[8]</sup>对 55 例前列腺癌患者利用 DVH 预测模型进行 K-IMRT 计划设计,发现在满足靶区受照剂量条件下,与手动优化计划相比,22 例患者的 K-IMRT 计划膀胱、直肠受照剂量明显降低,30 例相似,3 例较高。

而 Pinnacle 系统的 Auto-planning 智能自动化工具更类似一种高级脚本函数,该工具分别通过调强技术的自动选择、自动计划优化及基于评分卡的计划评估来减少物理师(剂量师)的人工计划参与时间,并缩小由于经验或技术差距导致的计划质量差异。相比 K-IMRT, Auto-planning 技术无需建立计划库,但仍需要计划者依据经验建立不同部位肿瘤的 plan 优化函数模板。Krayenbuehl 等<sup>[20]</sup>对 50 例头颈部肿瘤患者共面的 Auto-planning 和人工 VMAT 计划进行了比较,由高级放疗医



表2 两种计划OAR参考指标比较( $\bar{x} \pm s$ , cGy)Tab.2 Comparison of OAR dose between M-VMAT plan and AP-VMAT plan ( $Mean \pm SD$ , cGy)

OAR	Parameter	M-VMAT	AP-VMAT	t/z value	P value
Brain stem	D <sub>max</sub>	4 635±1 931	4 312±2 241	1.260	0.208 <sup>a</sup>
	D <sub>mean</sub>	2 462±1 237	1 766±1 044	4.052	0.005
	D <sub>5</sub>	4 033±1 688	3 410±1 900	1.960	0.051 <sup>a</sup>
Optic chiasma	D <sub>max</sub>	3 737±2 038	3 120±2 196	2.100	0.036 <sup>a</sup>
	D <sub>mean</sub>	2 980±1 715	2 008±1 654	3.984	0.005
	D <sub>5</sub>	3 619±1 989	2 769±1 034	3.780	0.007
Ipsilateral eyeball	D <sub>max</sub>	1 229±1 014	1 178±1 054	0.253	0.807
	D <sub>mean</sub>	403±223	407±307	0.056	0.957
Contralateral eyeball	D <sub>max</sub>	681±366	420±324	4.398	0.003
	D <sub>mean</sub>	307±128	179±98	4.668	0.002
Ipsilateral lens	D <sub>max</sub>	288±141	295±164	0.177	0.864
	D <sub>mean</sub>	244±95	242±134	0.062	0.953
Contralateral lens	D <sub>max</sub>	258±98	158±81	4.450	0.003
	D <sub>mean</sub>	215±82	122±55	4.757	0.002
Ipsilateral optic nerve	D <sub>max</sub>	3 065±2 221	2 638±2 235	2.353	0.051
	D <sub>mean</sub>	1 508±1 026	1 400±1 139	0.477	0.648
Contralateral optic nerve	D <sub>max</sub>	1 487±1 146	668±546	3.151	0.016
	D <sub>mean</sub>	778±484	382±257	4.329	0.003

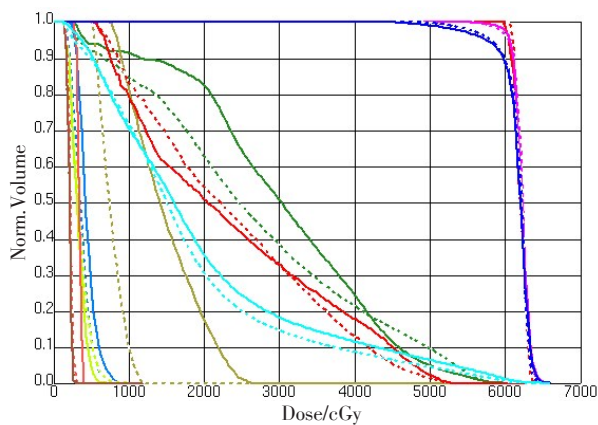
OAR: Organs-at-risk; <sup>a</sup>: The non-parametric test is applied for the data of abnormal distributions

图2 手动和自动计划DVH图比较

Fig.2 Comparison of dose-volume histogram between M-VMAT plan and AP-VMAT plan

solid line: M-VMAT plan; dotted line: AP-VMAT plan

师盲审并对计划质量进行分级,结果认为自动计划的靶区覆盖和剂量均匀性明显提高,在64%的患者中自动计划OAR的平均受照剂量降低了20%以上;而人工计划则有更好的靶区适形度。Hazell等<sup>[21]</sup>分别对26例头

表3 手动和自动计划正常脑组织参考指标比较(%,  $\bar{x} \pm s$ )Fig.3 Comparison of the dosimetric parameters of brain between M-VMAT plan and AP-VMAT plan (%,  $Mean \pm SD$ )

Parameter	M-VMAT	AP-VMAT	t/z value	P value
V <sub>18</sub>	43.55±12.76	34.53±12.32	2.640	0.033
V <sub>24</sub>	30.58±7.81	22.25±7.61	4.435	0.003
V <sub>45</sub>	12.49±5.76	6.47±3.11	5.406	0.001
V <sub>60</sub>	1.880±2.170	0.264±0.282	2.390	0.048

颈部肿瘤患者的自动计划与人工计划质量进行评分,94%的病例自动计划的质量等同或者优于人工计划。所有自动计划在没有人工介入(靶区和OAR勾画除外)的情况下均可满足临床要求。而Chang等<sup>[16]</sup>以10例共面鼻咽癌IMRT计划为研究对象,与人工计划相比,早期NPC患者Auto-planning能获得相似的DVH,但自动优化结束后仍需手动进行进一步调整。

另外有学者对两种不同自动优化技术进行了比较。Wu等<sup>[17]</sup>分析了35例口咽癌患者的K-IMRT计划与基

于Auto-planning的自动计划后发现,PTV<sub>68</sub>与PTV<sub>50.3</sub>的V<sub>95</sub>差异无统计学意义,除K-IMRT计划的脊髓D<sub>0.1cc</sub>减少5.1 Gy外其余OAR剂量无统计学差异,结论认为两种计划方式质量相当。

本研究结果表明,两种非共面计划靶区覆盖率、D<sub>mean</sub>、HI差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。AP-VMAT计划CI明显优于M-VMAT计划,差异有统计学意义( $P<0.001$ ),提示AP-VMAT计划靶区覆盖略优于M-VMAT计划。OAR中脑干D<sub>max</sub>、D<sub>5</sub>,同侧眼球、晶体、视神经D<sub>max</sub>、D<sub>mean</sub>差异均无统计学意义( $P>0.05$ )。AP-VMAT计划中脑干D<sub>mean</sub>及视交叉、对侧眼球、晶体、视神经的D<sub>mean</sub>和D<sub>max</sub>均明显低于M-VMAT计划,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。值得一提的是,AP-VMAT计划靶区外正常脑组织受照剂量明显低于M-VMAT计划,差异有统计学意义( $P<0.05$ )。上述结果与前述文献中Auto-planning对头颈部GTV及OAR的作用类似。此外,与鼻咽癌等肿瘤相比,胶质瘤靶区和OAR空间位置关系相对简单,本研究中AP-VMAT计划自动优化结果均能满足临床要求,并无需人工辅助进一步调整,且整个AP-VMAT计划优化时间明显缩短。

相比传统的人工优化方式,以Auto-planning和经验引导的调强计划自动优化技术在计划质量和效率方面已经呈现出一定的优势,该技术有望缩小并改善物理师间计划水平的差异,从而提高部分患者肿瘤控制概率并降低不必要的正常组织并发症概率。物理师可将更多的时间关注疑难计划或放疗质控工作。综上所述,本研究验证了Auto-planning在非共面胶质瘤计划中的积极作用,值得在临床应用中进一步推广。

致谢:本项目受到广州市医学重点学科(2017-2019年):肿瘤治疗学及实验肿瘤学项目资助。

## 【参考文献】

- [1] 戴建荣, 胡逸民. 调强放疗的计划设计[J]. 中国医疗器械信息, 2005, 11(2): 9-12.  
DAI J R, HU Y M. Treatment planning for intensity-modulated radiation therapy[J]. China Medical Device Information, 2005, 11(2): 9-12.
- [2] 何琅波, 张隆彬, 肖江洪, 等. 鼻咽癌自动调强放疗计划设计的可行性[J]. 生物医学工程学杂志, 2015, 18(6): 1288-1293.  
HE Y B, ZHANG L B, XIAO J H, et al. Feasibility of automatic treatment planning in intensity-modulated radiotherapy of nasopharyngeal carcinoma[J]. Journal of Biomedical Engineering, 2015, 18(6): 1288-1293.
- [3] BREEDVELD S, STORCHI P, KEIJZER M A, et al. A novel approach to multi-criteria inverse planning for IMRT[J]. Phys Med Biol, 2007, 52(20): 6339-6353.
- [4] VOET P W, DIRKX M L, BREEDVELD S, et al. Toward fully automated multi-criterial plan generation: a prospective clinical study[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2013, 85(3): 866.
- [5] BOHSUNG J, GILLIS S, ARRANS R, et al. IMRT treatment planning: a comparative inter-system and inter-centre planning exercise of the ESTRO QUASIMODO group[J]. Radiother Oncol, 2005, 76(3): 354-361.
- [6] 顾科, 李成, 吴锦昌, 等. 鼻咽癌调强放疗计划设计中自动勾画剂量限制结构的初步应用[J]. 国际生物医学工程杂志, 2016, 39(5): 299-302.  
GU K, LI C, WU J C, et al. Application of automatic generation of dose limited structures in intensity modulated radiation therapy planning for nasopharyngeal carcinoma[J]. International Journal of Biomedical Engineering, 2016, 39(5): 299-302.
- [7] TOL J P, DELANEY A R, DAHELE M, et al. Evaluation of a knowledge-based planning solution for head and neck cancer[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2015, 91(3): 612-620.
- [8] GOOD D, LO J, LEE W R, et al. A knowledge-based approach to improving and homogenizing intensity modulated radiation therapy planning quality among treatment centers: an example application to prostate cancer planning[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2013, 87(1): 176.
- [9] 彭令荣, 孔庆聪, 江婷, 等. 脑胶质瘤的表观扩散系数值与其病理分级的相关性研究[J]. 中华神经医学杂志, 2017, 16(10): 1041-1045.  
PENG L R, KONG Q C, JIANG T, et al. Correlation between apparent diffusion coefficient values and histopathological grading of cerebral gliomas[J]. Chinese Journal of Neuromedicine, 2017, 16(10): 1041-1045.
- [10] RASSIAH S P, SZEDEDI M, SARKAR V, et al. Dosimetric impact of the 160 MLC on head and neck IMRT treatments[J]. J Appl Clin Med Phys, 2014, 15(6): 4770.
- [11] 苏琼菲, 王希成. 顶枕叶胶质瘤非共面三维适形放疗与调强放疗的剂量学对比研究[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2015, 22(8): 614-617.  
SU Q F, WANG X C. Dosimetric comparison of IMRT and non-coplanar beam in 3D-CRT for parietal-occipital lobe of brain gliomas[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2015, 22(8): 614-617.
- [12] OZDEMIR S, COBAN Y, AKIN M, et al. Dosimetric evaluation of nasopharyngeal carcinomas irradiated with different IMRT techniques[J]. Journal of B.U.O.N., 2014, 19(4): 953.
- [13] NI L, LIANG X. Feasibility of simultaneous integrated boost with forward intensity-modulated radiation therapy for multiple brain metastases[J]. Contemp Oncol, 2014, 18(3): 187.
- [14] TARO M, YUTA S, YOSHIHIKO M, et al. Intensity-modulated radiation therapy using static ports of tomotherapy (TomoDirect): comparison with the TomoHelical mode[J]. Radiat Oncol, 2013, 8(1): 68.
- [15] DING M, NEWMAN F, KAVANAGH B D, et al. Comparative dosimetric study of three-dimensional conformal, dynamic conformal arc, and intensity-modulated radiotherapy for brain tumor treatment using Novalis system[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2006, 66(4): 82-86.
- [16] CHANG X, LI K, HU W. SU-F-T-357: dosimetric comparison of automatic IMRT planning and manual IMRT plan for head and neck cancer[J]. Med Phys, 2016, 43(6Part18): 3545.
- [17] WU B B, KUSTERS M, KUNZE-BUSCH M, et al. Cross-institutional knowledge-based planning (KBP) implementation and its performance comparison to auto-planning engine (APE)[J]. Radiother Oncol, 2017, 123(1): 57.
- [18] 黄付静, 马长升, 祝爱峰, 等. 基于先验知识的宫颈癌调强计划自动优化的可行性研究[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2015, 22(23): 1833-1836.  
HUANG F J, MA C S, ZHU A F, et al. Feasibility of knowledge-based IMRT planning automatic optimization for cervical cancer[J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2015, 22(23): 1833-1836.
- [19] FOGLIATA A, REGGIORI G, STRAVATO A, et al. RapidPlan head and neck model: the objectives and possible clinical benefit[J]. Radiat Oncol, 2017, 12(1): 73.
- [20] KRAYENBUEHL J, NORTON I, STUDER G, et al. Evaluation of an automated knowledge based treatment planning system for head and neck[J]. Radiat Oncol, 2015, 10(1): 226.
- [21] HAZELL I, BZDUSEK K, KUMAR P, et al. Automatic planning of head and neck treatment plans[J]. J Appl Clin Med Phys, 2016, 17(1): 5901.

(编辑:谭斯允)