

剂量体积优化算法与光子优化算法在儿童全中枢调强放射治疗计划的剂量学比较

张平¹, 邓官华¹, 戴鹏¹, 罗日顺¹, 罗龙辉¹, 黄庆²

1. 广东三九脑科医院肿瘤综合治疗中心, 广东 广州 510510; 2. 广东三九脑科医院设备科, 广东 广州 510510

【摘要】目的:分析剂量体积优化(DVO)算法与光子优化(PO)算法在儿童全中枢调强放射治疗(IMRT)中的剂量学比较。**方法:**选择2018年7月~2020年1月于广东三九脑科医院行全中枢IMRT计划的15例儿童肿瘤患者作为研究对象,分别采用DVO算法和PO算法设计计划,比较两组计划的剂量学参数、优化效率及机器跳数。**结果:**与PO算法相比,DVO算法计划的靶区 $D_{50\%}$ 和适形度指数更佳,差异有统计学意义($P<0.05$),且颈段计划靶区(PTV)低于95%处方剂量的体积更低($P<0.05$),但在靶区 $D_{2\%}$ 、 $D_{98\%}$ 、均匀性指数和梯度跌落指数差异无统计学意义($P>0.05$)。与PO算法相比,DVO算法计划在双肺、右肾和心脏的受照剂量偏低,差异有统计学意义($P<0.05$),而在其它危及器官剂量学参数差异无统计学意义($P>0.05$)。与PO算法相比,DVO算法计划增加了较少的机器跳数(约63 MU),但算法优化时间翻倍,约224 s。**结论:**儿童全中枢IMRT计划采用DVO算法可提高靶区适形性,降低颈段PTV低于处方剂量的体积,有可能减少颈段靶区肿瘤复发率,因此建议在儿童全中枢IMRT计划中采用DVO算法优化。

【关键词】儿童肿瘤;调强放射治疗;剂量体积优化算法;光子优化算法;全中枢放疗

【中图分类号】R815.6;R312

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2022)12-1460-06

Dosimetric comparison of IMRT optimization with dose volume optimizer versus photon optimizer in pediatric craniospinal irradiation

ZHANG Ping¹, DENG Guanhua¹, DAI Peng¹, LUO Rishun¹, LUO Longhui¹, HUANG Qing²

1. Department of Oncology, Guangdong Sanjiu Brain Hospital, Guangzhou 510510, China; 2. Department of Equipment, Guangdong Sanjiu Brain Hospital, Guangzhou 510510, China

Abstract: Objective To investigate the dosimetric characteristics between dose volume optimizer (DVO) algorithm and photon optimizer (PO) algorithm in pediatric craniospinal irradiation using intensity-modulated radiotherapy (IMRT). **Methods** DVO algorithm and PO algorithm were used to generate DVO plans and PO plans for 15 patients who received craniospinal irradiation using IMRT in Guangdong Sanjiu Brain Hospital from July 2018 to January 2020. The dosimetric characteristics, optimization efficiency and monitor units of DVO plans and PO plans were evaluated. **Results** There was no significant difference between PO plans and DVO plans in $D_{2\%}$, $D_{98\%}$, homogeneity index and gradient index of PTV ($P>0.05$). However, compared with PO plans, DVO plans showed better $D_{50\%}$ and conformity index (CI) of PTV ($P<0.05$), and smaller volume of cervical PTV receiving lower than 95% of the prescription dose ($P<0.05$). The doses received by the lungs, right kidney and heart in DVO plans were lower than those in PO plans ($P<0.05$), whereas the doses received by the other organs-at-risk did not differ significantly between DVO plans and PO plans ($P>0.05$). Compared with those in PO plans, the monitor units in DVO plans was increased by an average of 63 MU, and the optimization time was increased by an average of 224 s. **Conclusion** The application of DVO algorithm in pediatric craniospinal irradiation using IMRT can improve the target conformity, reduce the volume of cervical PTV receiving lower than 95% of the prescription dose, and may lower the incidence of tumor recurrence. Therefore, DVO algorithm is recommended for IMRT optimization in pediatric craniospinal irradiation.

Keywords: pediatric tumor; intensity-modulated radiotherapy; dose volume optimizer algorithm; photon optimizer algorithm; craniospinal irradiation

【收稿日期】2022-07-19

【基金项目】广东省自然科学基金(2019A1515011943)

【作者简介】张平,工程师,研究方向:神经肿瘤放射物理,E-mail: zhangping0406@126.com

【通信作者】黄庆,工程师,研究方向:直线加速器工作原理及应用维修,E-mail: huangqing@999brain.com

前言

中枢神经系统肿瘤是14岁以下儿童实体肿瘤常见病种,大约占儿童肿瘤的15%~20%^[1-3]。手术、化疗和放疗是中枢神经系统肿瘤的3种主要治疗手段^[4]。全中枢照射是儿童中枢神经系统肿瘤放疗的基础^[5-6]。目前儿童全中枢放疗常见技术手段包括调强放射治疗(IMRT)、容积旋转调强放射治疗(VMAT)和质子放疗等^[7-8]。随着科学技术的发展,已经开发了很多改善IMRT计划优化的算法,比如剂量体积优化(Dose Volume Optimizer, DVO)算法与光子优化(Photon Optimizer, PO)算法^[9-10]。PO算法的最大优点是缩短优化时间,使得采用PO算法优化IMRT计划的应用越来越广泛,但PO算法是否适合儿童全中枢IMRT计划优化,还没有相关研究。本研究基于加速器治疗的两种计划设计方式,采用DVO和PO算法分别设计儿童全中枢IMRT治疗计划,评价两种优化算法对剂量学参数、机器跳数和优化效率的影响,为临床治疗提供更有效率的技术参考。

1 资料与方法

1.1 病例资料

选取2018年7月~2020年1月于广东三九脑科医院就诊的15例全中枢IMRT儿童患者。其中男5例,女10例;年龄3~14岁,中位年龄8岁;全中枢计划靶区(Planning Target Volume, PTV)体积为1 515.3~2 031.2 cm³。

1.2 模拟定位

采用仰卧位,体板上放置真空袋,包裹范围由头顶至大腿,再辅以两套热塑体膜固定,分别为头颈肩面膜和体膜。定位采用20层大孔径螺旋CT(SOMATOM Definition AS, SIMENSE)扫描,层厚3.0 mm。图像经DICOM传输至放射治疗计划系统Brainlab iPlan RT image 4.1.1,进行靶区勾画及危及器官勾画,然后再通过DICOM传输至瓦里安Eclipse 13.6治疗计划系统,分别进行基于DVO和PO算法的IMRT计划设计,加速器数据模型为瓦里安Unique直线加速器[配置120对多叶准直器(Multileaf Collimator, MLC)叶片]。

1.3 IMRT计划布野设置

直线加速器最大射野为40 cm×40 cm,15例儿童全中枢PTV长度约为45~68 cm,因此计划设计及实际治疗时需分成2~3个等中心。本研究中IMRT计划的等中心相隔22~27 cm,头颈计划射野交界面为2~4 cm,上下两段脊髓计划的交界面长度为5~7 cm。

1.4 优化算法

IMRT具有高度适形性,全中枢计划具有较高的

调制能力,这主要得益于已经发展成熟的优化算法^[11-12]。目前已有很多优化算法,如瓦里安Eclipse计划系统中设计了用于优化IMRT和VMAT计划的DVO算法、PO算法和其它算法^[13-15]。

DVO算法采用点云模型先进行强度图优化,再进行MLC叶片序列优化,实现适形剂量分布,达到所期望的目标。DVO算法优化计算时根据结构体积来自定义网格大小,体积较大的结构如全中枢PTV,计算网格数量多;而体积小的结构,如晶体、视交叉等,计算网格数量少。在优化界面,可单独针对每一个结构设置不同的优化分辨率。DVO优化算法的特点是结构中间采样稀疏,边界采样密集,因此对体积小的结构计算更准确。

PO算法采用三维体素结构模型,在空间上使用图像的一个单一矩阵进行采样剂量和剂量体积直方图计算^[16]。根据给定优化目标参数集合,构建对应的优化目标函数,通过调整计划参数最小化目标函数,得到最终解^[17]。与DVO算法可以针对每一个结构设置任意不同分辨率不同,PO算法只允许对全局设置唯一的优化分辨率,且仅有3档可选,分别为1.25、2.50和5.00 mm^[18]。图1和图2分别为DVO算法和PO算法示意图。

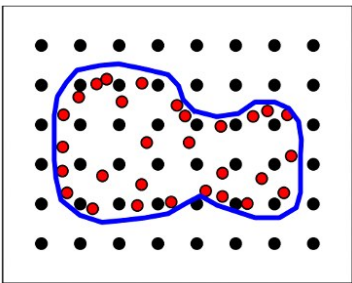


图1 采用点云模型优化的DVO算法示意图
Figure 1 Representation of point cloud structure model in DVO algorithm

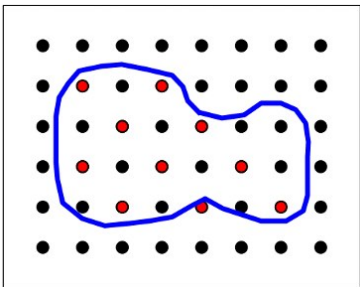


图2 采用体积模型优化的PO算法示意图
Figure 2 Representation of point cloud structure model in PO algorithm

1.5 治疗计划

对15例儿童全中枢IMRT计划采用Eclipse计划

系统 13.6 版本 AAA 算法, 计算时分别采用 DVO 和 PO 算法进行优化, 保持机架、准直器和治疗床等机器参数一致。15 例儿童患者 IMRT 计划处方剂量为 23.4~36.0 Gy, 其中 4 例为 23.4 Gy/13 次, 2 例为 30.6 Gy/17 次, 9 例为 36 Gy/20 次。处方要求 PTV 95% 体积覆盖 100% 处方剂量。

1.6 评价指标

计划比较基于剂量-体积直方图, 观察各项指标在两个计划中的差别。PTV 剂量参数包括近似最大剂量($D_{2\%}$)、中位剂量($D_{50\%}$)和近似最小剂量($D_{98\%}$)来评估靶区剂量分布, 以及颈段 PTV 低于处方剂量的体积。 V_5 表示接受照射剂量 5 Gy 的体积, V_{10} 表示接受照射剂量 10 Gy 的体积。引入适形度指数(CI, 越接近于 1, 剂量分布适形度越好)、剂量梯度跌落指数(GI, 越接近于 1, 剂量跌落越陡)和均匀性指数(HI, 越接近于 0, 表示靶区剂量分布越均匀)来评估计划质量。CI、GI 和 HI 计算公式^[19]为:

$$CI = TV_{PV}^2 / (TV \times PV) \tag{1}$$

$$GI = V_{50\%} / V_{100\%} \tag{2}$$

$$HI = (D_2 - D_{98}) \times 100\% / D_p \tag{3}$$

其中, TV_{PV} 为接受处方剂量的 PTV 体积, TV 为靶区体积, PV 为处方剂量的体积, $V_{50\%}$ 为处方剂量 50% 的体积, $V_{100\%}$ 为处方剂量 100% 的体积, D_p 为处方剂量。另外本研究也对两个计划危及器官的参数进行比较, 包括晶体、眼球、双肺、肝脏、心脏和双肾的相应剂量, 同时比较两个计划的机器跳数和优化时间。

1.7 统计学方法

采用 IBM SPSS 21.0 统计学软件进行分析, 计量资料不符合正态性分布, 采用 $M(Q1, Q3)$ 表示, 采用 Wilcoxon 带符号秩检验。 $P<0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量分布参数比较

靶区剂量分布参数如表 1 所示, 两种优化算法的治疗计划均能较好地满足 95% 等剂量曲线对 PTV 的覆盖。与 PO 算法相比, DVO 算法优化计划的 PTV 靶区的 $D_{2\%}$ 和 $D_{98\%}$ 相似, 差异没有统计学意义($P>0.05$); $D_{50\%}$ 稍有升高, 差异有统计学意义($P<0.05$)。

表 1 靶区剂量参数比较[M(Q1, Q3)]

Table 1 Comparison of target dose parameters [M(Q1, Q3)]

参数	DVO 算法	PO 算法	Z 值	P 值
$D_{2\%}/cGy$	3 669(3 269, 3 870)	3 828(3 273, 3 864)	-0.114	0.910
$D_{98\%}/cGy$	3 553(3 010, 3 571)	3 828(3 010, 3 567)	-1.250	0.211
$D_{50\%}/cGy$	3 727(3 163, 3 749)	3 713(3 163, 3 740)	-2.385	0.017

图 3 显示了 15 例儿童全中枢 IMRT 计划两种算法优化的 CI、HI 和 GI 的小提琴图, 显示数据分布形状及其概率密度。其中中间黑色粗条表示四分位数范围, 从其延伸的幼细黑线代表 95% 置信区间, 而白点则为中位数。小提琴图展示了任意位置数据的密度, 形状越宽, 数据密度越高。其中 DVO 算法和 PO 算法优化的 CI 值为 0.91 ± 0.02 (范围: 0.88~0.93) 和 0.90 ± 0.17 (范围: 0.88~0.93), GI 值为 1.96 ± 0.34 (范围: 1.36~2.61) 和 1.95 ± 0.33 (范围: 1.37~2.56), HI 值为 8.11 ± 1.92 (范围: 3.20~11.82) 和 8.60 ± 1.79 (范围: 6.2~13.24)。与 PO 优化算法相比, DVO 算法中靶区 CI 更接近于 1, 差异有统计学意义($P<0.05$)。两种计划 PTV 的 GI 和 HI 差异没有统计学意义($P>0.05$)。

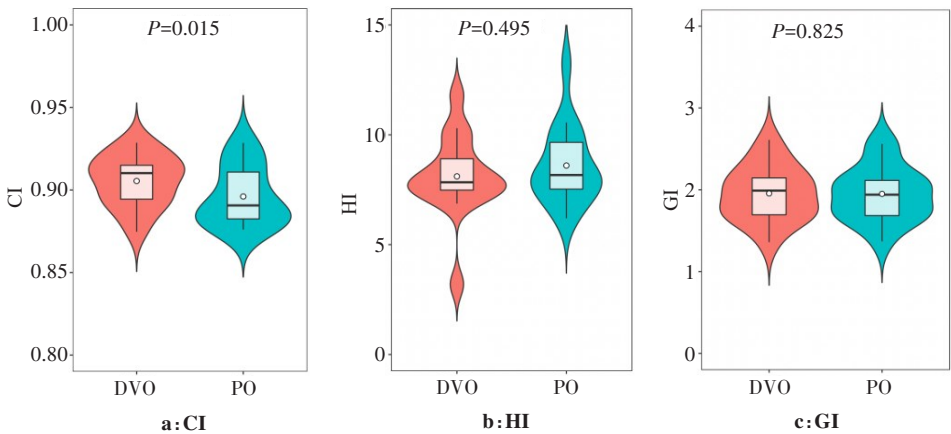


图 3 两种优化方式的 CI、HI 和 GI 的分布图
Figure 3 Violin plots of CI, HI and GI of DVO plans and PO plans

2.2 颈段 PTV 低于 95% 处方剂量体积 (VCPTV) 及优化效率参数比较

表 2 比较了两种算法中 VCPTV、总机器跳数 MU 和计划优化时间。与 PO 算法相比,DVO 算法中颈段 PTV 低于处方剂量的体积更小,增加了较少跳数(约 63 MU),但算法优化时间大大增加,中位数增加了约 224 s,差异均有统计学意义($P<0.05$)。表 2 结果显示 PO 算法提高了输出效率,降低了计划运算的复杂性,但颈段 PTV 低于处方 95% 剂量的体积增大,增加了颈段靶区冷点的概率,靶区容易在两段中心颈段衔接面形成低剂量区。

表 2 15 例计划两种算法的剂量参数和效率比较[M(Q1,Q3)]
Table 2 Comparison of dosimetric parameters and efficiency between DVO plans and PO plans in 15 cases [M(Q1,Q3)]

评估参数	DVO 算法	PO 算法	Z 值	P 值
VCPTV/cm ³	1.6(0.9, 2.5)	3.0(2.0, 6.1)	-3.180	0.001
跳数/MU	1404(1 147, 1457)	1341(1091, 1411)	-2.442	0.015
优化时间/s	429(345, 507)	205(158, 223)	-3.408	0.001

图 4 显示 1 例患者 DVO 和 PO 优化算法的矢状位和轴位剂量分布比较,橙色剂量显示代表剂量为处方剂量 36.0 Gy,绿色为 95% 处方剂量 34.2 Gy,该患者调强计划采用 7 野完成。采用 DVO 算法的靶区低于 95% 处方剂量体积明显小于 PO 算法(0.1 与 1.5 cm³)。如图中剂量覆盖彩虹图有明显缺失的部分代表颈段靶区低于 95% 的处方剂量,这就导致颈段靶区剂量覆盖出现冷点。

2.3 危及器官受照剂量比较

表 3 比较了两种算法优化计划中危及器官的受照剂量。DVO 计划在危及器官心脏(D_{2%})、左肺(V₅、V₁₀和D_{2%})、右肺(V₅、V₁₀和D_{2%})和右肾D_{2%}低于 PO 计划,差异有统计学意义($P<0.05$)。两种计划在左肾、肝脏、晶体和眼睛的 D_{2%} 差异无统计学意义($P>0.05$)。

3 讨论

全中枢放疗是生殖细胞肿瘤、髓母细胞瘤、室管膜瘤和原始神经外胚层瘤等中枢神经系统肿瘤的标

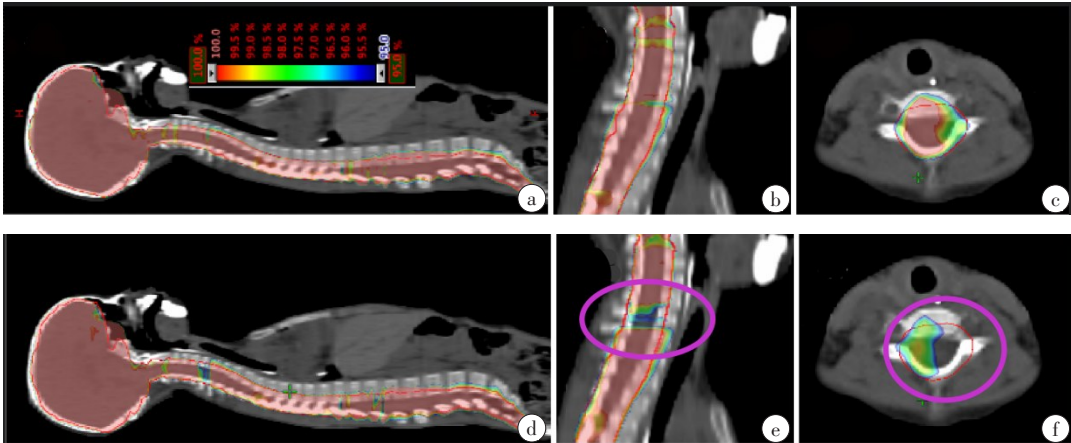


图 4 1 例患者采用 DVO 算法和 PO 算法比较的 IMRT 剂量分布图

Figure 4 Dose distributions of the DVO plan and PO plan of a patient

图 4a 和图 4d 分别为采用 DVO 算法和 PO 算法的靶区覆盖处方剂量的矢状图;图 4b 和图 4e 分别为采用 DVO 算法和 PO 算法的颈段靶区覆盖处方剂量的矢状图;图 4c 和图 4f 分别为采用 DVO 算法和 PO 算法的颈段靶区覆盖处方剂量的某一轴位图

准放疗步骤之一^[20-22]。中枢神经系统肿瘤全中枢放疗处方剂量一般为 23.4~36.0 Gy,单次为 1.8~2.0 Gy^[23-26]。由于全中枢靶区较长,超过加速器铅门 40 cm 的最大射野尺寸,全中枢计划设计必须采用多中心照射,这就会导致交界面剂量冷点或热点的产生^[27]。一直以来放疗工作者都在探索方法解决照射野衔接处靶区剂量分布不均匀和实际照射过程中形成的剂量冷热点问题^[28]。传统的全中枢三维适形计划是一个复杂的过程,包括射野调整、准直器旋转、治疗床旋转,当这些参数发生较小的误差时,就可能导致剂量冷点

或热点的形成^[29]。IMRT 计划因采用 DVO、PO 或 PRO 等各种优化算法可以克服这些问题。IMRT/ARC 技术有可能减少治疗引起的相关副作用,甚至使气道(气管、支气管)受照剂量更低^[30]。

DVO 算法不考虑空腔影响,全中枢靶区由全脑全脊髓组成,因此空腔影响较小,可忽略不计。全中枢 IMRT/VMAT 计划一般采用射野重叠,这就使得靶区剂量分布对机械误差或摆位误差的敏感性降低^[31]。本研究中靶区头颈处射野重叠区长约 3 cm,宽约 2 cm,高约 2.54~4.98 cm,对于体积约为 1 655 cm³

表 3 15 例患者 DVO 和 PO 算法的危及器官受量比较[$M(Q1, Q3)$]
Table 3 Comparison of organs at risk doses in 15 patients [$M(Q1, Q3)$]

危及器官	参数	DVO 算法	PO 算法	Z 值	P 值
心脏	D _{2%} /cGy	1 491(1 329, 1 686)	1 516(1 329, 2 706)	-3.124	0.002
肝脏	D _{2%} /cGy	1 620(1 262, 1 695)	1 652(1 262, 1 691)	-1.874	0.061
左肺	D _{2%} /cGy	1 666(1 438, 1 910)	1 713(1 448, 1 903)	-2.329	0.020
	V ₅ /%	40.15(33.36, 49.72)	44.97(34.35, 50.75)	-3.107	0.002
	V ₁₀ /%	26.83(18.03, 36.48)	31.32(19.45, 38.59)	-3.140	0.002
右肺	D _{2%} /cGy	1 784(1 506, 1 871)	1 836(1 477, 1 958)	-2.840	0.005
	V ₅ /%	46.85(43.29, 48.97)	48.66(46.28, 50.43)	-3.153	0.002
	V ₁₀ /%	33.45(25.96, 37.28)	36.10(25.96, 38.64)	-2.480	0.013
左肾	D _{2%} /cGy	1 729(1 404, 1 962)	1 806(1 404, 1 897)	-0.625	0.532
右肾	D _{2%} /cGy	1 703(1 376, 1 970)	1 763(1 377, 2 126)	-2.329	0.020
晶体	D _{2%} /cGy	409(348, 447)	408(351, 438)	-1.341	0.180
眼睛	D _{2%} /cGy	1 603(1 462, 1 907)	1 669(1 515, 1 967)	-1.409	0.109

的靶区来说,体积非常小。DVO 算法采用点云模型,采样点更多,因此对窄小的头颈交界面采样更准确,优化结果更好,对两段中心交界面的冷热点控制更好,交界面靶区剂量分布更佳。因此采用 DVO 算法降低了颈段靶区低于 95% 处方剂量的低剂量区体积,降低了两段射野衔接面颈段靶区冷点的体积,从而减少了颈段靶区衔接处剂量欠量风险。DVO 算法因为优化时采样点更多,内存使用较大。因此与 PO 算法相比,本研究中全中枢 IMRT 计划采用 DVO 算法优化增加了优化时间,约为 PO 算法的 2 倍。

本研究还存在以下几个不足之处:(1)所有的优化条件均是基于 DVO 算法所设置的,PO 算法优化时直接采用;(2)本研究未比较其他技术方法,如 VMAT、TOMO 和质子技术等;(3)考虑到 IMRT 射野越多,治疗时间越长,患儿在治疗中可能会发生移动,导致分次内照射误差增大,因此本研究中 IMRT 计划均采用满足临床要求的最少射野,为降低眼球和晶体受照剂量,头部采用 3 个射野(机架 110°床角 0°,机架 250°床角 0°,以及机架 40°床角 270°)。脊髓按长度分为 1~2 个治疗中心,采用共面野(机架 230°和 130°),射野数量较少也有可能是 IMRT 计划调制能力欠缺的原因;(4)本研究中头颈交界面长度仅为 2~4 cm,增加两段射野计划的交界面长度,可能会提高 PO 算法在颈段靶区的优化质量。

儿童全中枢 IMRT 计划采用 DVO 算法可降低颈段 PTV 低于处方剂量的体积,仅增加较少的机器跳数,有可能减少颈段靶区肿瘤复发率。为了减少射野头颈交界面的靶区剂量分布误差,在不同版本的计划系统里采用不同的方法解决。对于 Eclipse13.6

版本及以下,建议在儿童全中枢 IMRT 计划中采用 DVO 算法进行优化。而对于 15.0 版本及以上,建议采用具有自动羽化功能的 PO 算法进行优化^[32]。

4 结 论

儿童全中枢 IMRT 计划采用 DVO 算法可提高靶区适形性,仅增加较少的机器跳数,但是会增加较长的优化时间,优化效率下降;可降低大部分危及器官受照剂量,更好地保护危及器官;可大大降低颈段 PTV 低于 95% 处方剂量的体积,有可能减少颈段靶区肿瘤复发率。因此,建议在儿童全中枢 IMRT 计划中采用 DVO 算法进行优化治疗。

【参考文献】

[1] Parkin DM, Stiller CA, Draper G. International incidence of childhood cancer[J]. IARC Sci Publ, 1988(87): 122-126.

[2] Lai JS, Cella D, Tomita T, et al. Developing a health-related quality of life instrument for childhood brain tumor survivors[J]. Childs Nerv Syst, 2007, 23(1): 47-57.

[3] Jemal A, Siegel R, Ward E, et al. Cancer statistics, 2007[J]. CA Cancer J Clin, 2007, 57(1): 43-66.

[4] Galloway TJ, Indelicato DJ, Amdur RJ, et al. Second tumors in pediatric patients treated with radiotherapy to the central nervous system[J]. Am J Clin Oncol, 2012, 35(3): 279-283.

[5] MacDonald SM, Trofimov A, Safai S, et al. Proton radiotherapy for pediatric central nervous system germ cell tumors: early clinical outcomes[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2011, 79(1): 121-129.

[6] Lee YK, Brooks CJ, Bedford JL, et al. Development and evaluation of multiple isocentric volumetric modulated arc therapy technique for craniospinal axis radiotherapy planning[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 82(2): 1006-1012.

[7] Pichandi A, Ganesh KM, Jerrin A, et al. Cranio spinal irradiation of medulloblastoma using high precision techniques: a dosimetric comparison[J]. Technol Cancer Res Treat, 2015, 14(4): 491-496.

[8] Jalali R, Goda JS. Proton beam therapy in pediatric brain tumor patients: improved radiation delivery techniques improve neurocognitive outcomes[J]. Neuro Oncol, 2019, 21(7): 830-831.

[9] Bortfeld T. Optimized planning using physical objectives and

- constraints[J]. *Semin Radiat Oncol*, 1999, 9(1): 20-34.
- [10] Webb S. The physical basis of IMRT and inverse planning[J]. *Br J Radiol*, 2003, 76(910): 678-689.
- [11] Shende R, Gupta G, Patel G, et al. Assessment and performance evaluation of photon optimizer (PO) vs dose volume optimizer (DVO) for IMRT and progressive resolution optimizer (PRO) for RapidArc planning using a virtual phantom[J]. *Int J Cancer Ther Oncol*, 2016, 4(3): 1-12.
- [12] Vanetti E, Nicolini G, Nord J, et al. On the role of the optimization algorithm of RapidArc(R) volumetric modulated arc therapy on plan quality and efficiency[J]. *Med Phys*, 2011, 38(11): 5844-5856.
- [13] Cho B. Intensity-modulated radiation therapy: a review with a physics perspective[J]. *Radiat Oncol J*, 2018, 36(1): 1-10.
- [14] Cassioli A, Unkelbach J. Aperture shape optimization for IMRT treatment planning[J]. *Phys Med Biol*, 2013, 58(2): 301-318.
- [15] Choi KH, Kim J, Lee SW, et al. Dosimetric comparison between modulated arc therapy and static intensity modulated radiotherapy in thoracic esophageal cancer: a single institutional experience[J]. *Radiat Oncol J*, 2018, 36(1): 63-70.
- [16] Jiang F, Wu H, Yue H, et al. Photon optimizer (PO) prevails over progressive resolution optimizer (PRO) for VMAT planning with or without knowledge-based solution[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2017, 18(2): 9-14.
- [17] 王翰林, 刘嘉城, 王清莹, 等. 深度强化学习在直肠癌IMRT自动计划的应用[J]. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(1): 1-8.
Wang HL, Liu JC, Wang QY, et al. Application of deep reinforcement learning in automatic IMRT planning for rectal cancer[J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2022, 39(1): 1-8.
- [18] Cozzi L, Dinshaw KA, Shrivastava SK, et al. A treatment planning study comparing volumetric arc modulation with RapidArc and fixed field IMRT for cervix uteri radiotherapy[J]. *Radiother Oncol*, 2008, 89(2): 180-191.
- [19] Feuvret L, Noël G, Mazon JJ, et al. Conformity index: a review[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2006, 64(2): 333-342.
- [20] Wang K, Meng H, Chen J, et al. Plan quality and robustness in field junction region for craniospinal irradiation with VMAT[J]. *Phys Med*, 2018, 48: 21-26.
- [21] Chi SN, Zimmerman MA, Yao X, et al. Intensive multimodality treatment for children with newly diagnosed CNS atypical teratoid rhabdoid tumor[J]. *J Clin Oncol*, 2009, 27(3): 385-389.
- [22] Wong K, Opimo AB, Olch AJ, et al. Re-irradiation of recurrent pineal germ cell tumors with radiosurgery: report of two cases and review of literature[J]. *Cureus*, 2016, 8(4): e585.
- [23] Murray MJ, Bailey S, Heinemann K, et al. Treatment and outcomes of UK and German patients with relapsed intracranial germ cell tumors following uniform first-line therapy[J]. *Int J Cancer*, 2017, 141(3): 621-635.
- [24] De B, Cahlon O, Dunkel IJ, et al. Reduced-volume radiotherapy for patients with localized intracranial nongerminoma germ cell tumors[J]. *J Neurooncol*, 2017, 134(2): 349-356.
- [25] Hansen AT, Lukacova S, Lassen-Ramshad Y, et al. Comparison of a new noncoplanar intensity-modulated radiation therapy technique for craniospinal irradiation with 3 coplanar techniques[J]. *Med Dosim*, 2015, 40(4): 296-303.
- [26] Tsang DS, Murray L, Ramaswamy V, et al. Craniospinal irradiation as part of re-irradiation for children with recurrent intracranial ependymoma[J]. *Neuro Oncol*, 2019, 21(4): 547-557.
- [27] Farace P, Bizzocchi N, Righetto R, et al. Supine craniospinal irradiation in pediatric patients by proton pencil beam scanning[J]. *Radiother Oncol*, 2017, 123(1): 112-118.
- [28] 马天斌, 蒋振东, 俞海东, 等. 通过有规则的布置子野解决全中枢放疗野衔接和剂量冷热点[J]. *中华放射医学与防护杂志*, 2020, 40(11): 846-850.
Ma TB, Jiang ZD, Yu HD, et al. To solve beam junctions and eliminate dose cold and hot spots in craniospinal irradiation by regular arrangement of segments [J]. *Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection*, 2020, 40(11): 846-850.
- [29] Yom SS, Frija EK, Mahajan A, et al. Field-in-field technique with intrafractionally modulated junction shifts for craniospinal irradiation [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2007, 69(4): 1193-1198.
- [30] Locsei Z, Farkas R, Borbasne FK, et al. Assessment of the results and hematological side effects of 3D conformal and IMRT/ARC therapies delivered during craniospinal irradiation of childhood tumors with a follow-up period of five years[J]. *BMC Cancer*, 2020, 20(1): 702.
- [31] Pollul G, Bostel T, Grossmann S, et al. Pediatric craniospinal irradiation with a short partial-arc VMAT technique for medulloblastoma tumors in dosimetric comparison [J]. *Radiat Oncol*, 2020, 15(1): 256.
- [32] Maddalo M, Benecchi G, Altabella L, et al. Automatic feathering algorithm for VMAT craniospinal irradiation: a comprehensive comparison with other VMAT planning strategies[J]. *Med Dosim*, 2021, 46(2): 103-110.

(编辑:陈丽霞)