论 著

全中枢多中心放疗中铅门固定与跟随技术的应用研究

苏坤普[1]，黄　霞[2]，周德力[1]，刘岩海[1]，马俊刚[1]，耿明英[1]
1.陆军军医大学特色医学中心 肿瘤科（重庆 400042）；2.重庆大学附属肿瘤医院 肿瘤科（重庆 400042）

【摘 要】目的 探讨全脑全脊髓多中心调强适形放射治疗（intensity modulated radiation therapy，IMRT）与容积弧形调强放射治疗（volumetric-modulated arcRadiotherapy，VMAT）计划中采用铅门固定与跟随技术的剂量学差异，为临床放疗技术选择提供指导与参考。**方法** 选取陆军军医大学特色医学中心肿瘤科全脑全脊髓放疗患者14例，采用Elekta公司Monaco 5.11计划系统，每例患者分别设计多中心铅门固定静态调强（IMRT-MISO-SJT）、多中心铅门跟随静态调强（IMRT-MISO-JTT）、多中心铅门固定弧形调强（VMAT-MISO-SJT）、多中心铅门跟随弧形调强（VMAT-MISO-JTT）4种计划，比较其靶区、危及器官、正常组织受照剂量、500 cGy低剂量体积及机器跳数差异。**结果** 四组计划均能满足临床要求，且靶区D_{mean}、$D_{2\%}$及$D_{98\%}$四组计划差异无统计学意义（$P > 0.05$）；VMAT-MISO-SJT计划中处方剂量覆盖靶区体积及靶区剂量适形度最好，与IMRT-MISO-SJT、IMRT-MISO-JTT差异均有统计学意义（$P < 0.05$），但与VMAT-MISO-JTT差异无统计学意义（$P > 0.05$）；VMAT-MISO-JTT靶区剂量均匀性最好，与IMRT-MISO-SJT差异有统计学意义（$P < 0.05$），但与IMRT-MISO-JTT及VMAT-MISO-SJT差异无统计学意义（$P > 0.05$）；IMRT-MISO-JTT计划中晶体最大剂量、心脏平均剂量最低，但与其他方案差异无统计学意义（$P > 0.05$）；IMRT-MISO-SJT左右肾脏平均剂量、机器跳数最低，与VMAT-MISO-SJT、VMAT-MISO-JTT差异有统计学意义（$P < 0.05$），但与IMRT-MISO-JTT差异无统计学意义（$P > 0.05$）。**结论** VMAT-MISO-SJT计划靶区剂量的HI、CI及V_{pre}优于IMRT-MISO-SJT及IMRT-MISO-JTT计划，但IMRT-MISO-SJT计划能更好降低左右肾脏平均剂量、500 cGy低剂量体积及机器跳数。全脑全脊髓的IMRT以及VMAT放疗计划中采用铅门跟随或者固定技术对靶区和危及器官的剂量分布及机器跳数无明显影响。

【关键词】全脑全脊髓；多中心放疗计划；铅门跟随技术；剂量学
【中图分类号】 R739.62；R815.2　　**文献标志码** A　　DOI：10.3969/j.issn.2096-3351.2022.03.009

Application research of Carniospinal Irradiation Using Multi-ISO with Jaw Track or Jaw Fixed Technique

SU Kunpu[1]，*HUANG Xia*[2]，*ZHOU Deli*[1]，*LIU Yanhai*[1]，*MA Jungang*[1]，*GENG Mingying*[1]
1.*Department of Oncology，Army Specialized Medical Center，Chongqing 400042，China*；2.*Chongqing University Cancer Hospital，Chongqing 400042，China*

【Abstract】Objective To investigate the dosimetric differences between IMRT and VMAT in CSI（Carniospinal irradiation）using multi-ISO with static jaw technique or jaw tracking technique，so as to provide guidance and reference for the selection of clinical radiotherapy techniques. **Methods** 14 CSI patients were selected and treated with Elekta´s Monaco 5.11 treatment planning system. Four plans were designed for each patient，including IMRT-MISO-SJT，IMRT-MISO-JTT，VMAT-MISO-SJT and VMAT-MISO-JTT.. The differences of target area，organ at risk，normal tissue dose，500cGy low dose volume and monitor units were compared. **Results** All the four groups of plans could meet the clinical requirements，and there was no significant difference in D_{mean} and $D_{98\%}$ of the target area among the four groups of plans（$P > 0.05$）. VMAT-MISO-SJT had the best prescription dose volume covering target area（V_{pre}）and dose conformity index（CI）of target area，and had significant difference with IMRT-MISO-SJT and IMRT-MISO-JTT（$P < 0.05$），but had no significant difference with VMAT-MISO-JTT（$P > 0.05$）. The target dose homogeneity index（HI）of VMAT-MISO- JTT was the best，which showed significant difference with IMRT-MISO-SJT（$P < 0.05$），but showed no significant difference with IMRT-MISO-JTT（$P > 0.05$）. IMRT-MISO-JTT plan had the lowest maximum irradiation dose of lens and mean dose of heart，but showed no significant difference with other plans（$P > 0.05$）. IMRT-MISO-SJT had the lowest average dose of kidney and monitor units（MU），and had significant difference with VMAT-MISO-SJT and VMAT-MISO-JTT（$P < 0.05$），but had no significant differ-

基金项目：国家科技部数字诊疗装备研发专项基金（2018YFC0114402）
第一作者简介：苏坤普，物理师，硕士。
通信作者：耿明英，副主任医师，博士。E-mail:380904661@qq.com
引用本文：苏坤普，黄霞，周德力，等. 全中枢多中心放疗中及铅门固定与跟随技术的应用研究[J]. 西南医科大学学报，2022，45（3）：227-231. DOI：10.3969/j.issn.2096-3351.2022.03.009

ence with IMRT-MISO-JTT ($P > 0.05$). **Conclusion** The HI, CI and V_{pre} of target dose of VMAT-MISO-SJT were better than that of IMRT-MISO-SJT and IMRT-MISO-JTT. However, IMRT-MISO-SJT plan could better reduce the mean dose of left and right kidneys, low-dose volume of 500cGy and monitor units. In craniospinal irradiation radiotherapy plans, static jaw technique and jaw tracking technique had no significant effect on the dose distribution and monitor units in IMRT and VMAT plans.

【**Key words**】Craniospinal irradiation; Multi-center radiotherapy plan; Jaw tracking technique; Dosimetry

由于全中枢神经系统肿瘤靶区较长，直线加速器最大40 cm × 40 cm的射野限制无法包全整个靶区，所以常把全中枢神经系统肿瘤分为2 ~ 3段靶区进行放射治疗，但在射野衔接无法避免剂量冷热点、靶区剂量分布不均匀的问题[1-2]。刘志杰等[3]报道了在全脑全脊髓的放射治疗中，全脑全脊髓多中心调强适形放射治疗（intensity modulated radiation therapy，IMRT）相对与常规二维计划可以获得更优的靶区剂量分布和更低的危及器官受量；鞠孟阳等[4]研究发现全脑全脊髓调强放疗时，射野重叠区大小设置在4 ~ 6 cm最佳；廖雄飞等[5]报道多中心容积弧形调强放射治疗（volumetric-modulated arcRadiotherapy，VMAT）很好的解决了全中枢神经肿瘤靶区衔接处剂量冷热点的现象。另外有研究[6-7]表明IMRT采用铅门跟随和铅门固定两种技术，靶区和危及器官受量均能满足临床治疗要求，而铅门跟随技术能更好地降低正常组织和危及器官的剂量照射。李成等[6]的研究显示在鼻咽癌的计划设计中，铅门跟随技术相较于铅门固定技术可以降低多个危及器官的限值剂量和低剂量区。王艳菊等[8]就髓母细胞瘤调强计划中AAA算法与PBC算法的对比研究，结果表明PBC算法比AAA算法能够更好地满足临床要求。但是对于多中心的IMRT、VMAT计划及铅门固定和跟随技术在临床上的应用鲜有人研究。本文就全脑全脊髓放疗的多中心IMRT、VMAT计划，分别采用铅门固定或者铅门跟随技术，评估靶区和危及器官受照剂量、机器执行效率进行探索与比较，以期为临床选择不同的治疗技术提供指导与参考。

1 资料与方法

1.1 一般临床资料

随机选择2020年接受全中枢放疗的患者14例，其中男性9例，女性5例，年龄4 ~ 25岁，中位年龄9岁。均首次治疗，且无放疗禁忌症。本研究患者均知情同意，并通过医院伦理委员会审核批准。

1.2 治疗计划

1.2.1 *定位图像采集*　所有患者均采取仰卧位，用头颈肩一体板和热塑膜做头颈及体部的固定，在Philips Bigbore 16排多层螺旋大孔径CT机上，进行3 mm层厚增强扫描，定位扫描范围自头顶至坐骨结节，CT图像经过DICOM传输至Elekta Monaco 5.11治疗计划系统。

1.2.2 *治疗计划制定*　由经验丰富的放疗主治医生确定全中枢神经肿瘤计划靶区：全脑PTV1、颈胸段脊髓PTV2、腹部段脊髓PTV3。各段靶区的处方剂量均为36 Gy/20次，危及器官参考ICRU 83号报告定义分别勾画了晶体、心脏、肺、肾脏等，其限制剂量参考常规照射正常组织耐受剂量[9]。采用Elekta Monaco 5.11治疗计划系统和Axesse加速器8 MV X射线模式分别制定多中心铅门固定IMRT技术（IMRT with multi-ISO centers and static jaw technique，IMRT-MISO-SJT）、多中心铅门跟随IMRT技术（IMRT with multi-ISO centers and jaw tracking technique，IMRT-MISO-JTT）、多中心铅门固定VMAT技术（VMAT with multi-ISO centers and Static jaw technique，VMAT-MISO-SJT）、多中心铅门跟随VMAT技术（VMAT with multi-ISO centers and jaw tracking technique，VMAT-MISO-JTT）这4种治疗计划。4组计划设置相同的优化目标和约束条件，要求处方剂量至少包绕95%的靶区体积，处方剂量的110%所包绕的体积不得超过靶区体积的1%。PTV1、PTV2、PTV3的计划等中心分别命名为ISO1、ISO2、ISO3，为减少治疗过程中的移床操作可能造成的摆位误差，三个中心的坐标只在头脚方向有差异，左右和腹背方向保持一致；4组计划靶区衔接处射野重叠4 ~ 5 cm。IMRT计划ISO1射野角度分别设置为268°、82°、180°，ISO2、ISO3射野角度[10]分别设置为215°、0°、145°；VMAT计划三个中心分别单独设置一个beam两个全弧。计划分别设置field，选择auto与fix field确定是否选择铅门跟随模式。

1.2.3 *计划比较评估*　比较4组计划的剂量-体积直方图（Dose-Volume Histogram，DVH）和等剂量分布，采用适形度指数（Conformity Index，*CI*）和均匀性指数（Homogeneity Index，*HI*）评估靶区的剂量分布。评估公式：$CI=(V_{T,ref}/V_T)\times(V_{T,ref}/V_{ref})$，其中，$V_{T,ref}$为参考等剂量所包绕的靶区体积[11]，$V_{ref}$为参考等剂量所包绕的体积，$V_T$为靶区体积，这里参考等剂量取处方剂量。参考Elekta Monaco 5.11治疗计划系统定义 $HI = D_{5\%}/D_{95\%}$，$D_{5\%}$为5%靶区体积对应高剂量，$D_{95\%}$表示95%的靶区体积受到的照射剂量。*CI*的值为0 ~ 1，越接近1，表明靶区处方剂量线适形度越好；*HI*值大于1，其值越接近1，靶区均匀性越好，*HI*为1是最佳理想情况。评估晶体最大剂量D_{max}、左右肺$V_{5\%}$和平均剂量D_{mean}、心脏D_{mean}、左右肾脏D_{mean}、Body的D_{mean}、500 cGy低剂量区域体积、机器跳数的差异。

1.3 统计学分析

采用SPSS 19.0统计学软件进行数据处理，计量资料用均数 ± 标准差（$\bar{x} \pm s$）表示，采用配对 t 检验进行分析，$P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区剂量分布

对于所选取的14例病例，4组计划的靶区剂量分布均能满足临床使用要求，且靶区 D_{mean}、$D_{2\%}$及 $D_{98\%}$四组计划差异无统计学意义（$P > 0.05$）；VMAT-MISO-SJT靶区处方剂量覆盖率及靶区剂量适形度最好，与IMRT-MISO-SJT、IMRT-MISO-JTT差异均有统计学意义（$P < 0.05$），与VMAT-MISO-JTT差异无统计学意义（$P > 0.05$）；VMAT-MISO-JTT靶区剂量均匀性最好，与IMRT-MISO-SJT差异有统计学意义（$P < 0.05$），但与IMRT-MISO-JTT及VMAT-MISO-SJT差异无统计学意义（$P > 0.05$）。铅门固定与跟随技术对IMRT及VMAT计划的靶区剂量分布无明显影响，见表1。

表1 14例全脑全脊髓患者4种计划靶区剂量各评估参数比较

Table 1 Comparison of dosimetric parameters of target areas in 4 plans for 14 CSI patients

靶区参数	IMRT-MISO-SJT	IMRT-MISO-JTT	VMAT-MISO-SJT	VMAT-MISO-JTT	*P*					
					IMRT-MISO-SJT vs IMRT-MISO-JTT	IMRT-MISO-SJT vs VMAT-MISO-SJT	IMRT-MISO-SJT vs VMAT-MISO-JTT	IMRT-MISO-JTT vs VMAT-MISO-SJT	IMRT-MISO-JTT vs VMAT-MISO-JTT	VMAT-MISO-SJT vs VMAT-MISO-JTT
D_{mean}	3778.8 ± 24.1	3765.7 ± 24.2	3766.2 ± 11.4	3767.9 ± 13.7	0.1793	0.1012	0.1697	1	0.7782	0.6326
$D_{2\%}$	3904.7 ± 24.2	3882.9 ± 32.9	3884.1 ± 26.0	3886.7 ± 52.4	0.0656	0.0505	0.0769	0.9171	0.7698	0.8194
$D_{98\%}$	3532.8 ± 98.0	3530.5 ± 79.3	3597.3 ± 100.5	3582.9 ± 105.9	0.9484	0.1095	0.2216	0.0711	0.1651	0.7250
V_{pre}	96.5 ± 2.2	96.5 ± 1.6	98.3 ± 1.8	98.1 ± 1.8	0.9262	0.0296	0.0536	0.0156	0.0534	0.7662
HI	1.068 ± 0.014	1.061 ± 0.010	1.053 ± 0.014	1.051 ± 0.016	0.2087	0.0114	0.0082	0.0881	0.0569	0.7203
CI	0.864 ± 0.021	0.869 ± 0.026	0.899 ± 0.024	0.886 ± 0.023	0.5114	0.0006	0.0172	0.0074	0.1107	0.1851

注：V_{pre}为处方剂量覆盖率

2.2 危及器官剂量分布

四组计划的危及器官和正常组织剂量分布均达到临床基本要求。在危及器官的保护上，IMRT-MISO-SJT左、右肾脏平均剂量，与VMAT-MISO-SJT、VMAT-MISO-JTT差异有统计学意义（$P < 0.05$），但是与IMRT-MISO-JTT差异无统计学意义（$P > 0.05$）。IMRT左肺 D_{mean}、$V_{5\%}$与VMAT计划相当，且差异无统计学意义；IMRT右肺 D_{mean}、$V_{5\%}$与高于VMAT计划，且 D_{mean} 差异有统计学意义；其中左右晶体最大剂量、心脏平均剂量、body的平均剂量差异无统计学意义（$P > 0.05$）。铅门固定与跟随技术对IMRT及VMAT计划的危及器官受照剂量无明显影响，见表2。

表2 4种计划各危及器官受照剂量（cGy）、低剂量的组织体积（cm^3）及机器跳数（MU）比较

Table 2 Comparison of dose of organs-at-risk（cGy），low-dose volume（cm^3）and monitor units in 4 plans

危及器官	IMRT-MISO-SJT	IMRT-MISO-JTT	VMAT-MISO-SJT	VMAT-MISO-JTT	*P*					
					IMRT-MISO-SJT vs IMRT-MISO-JTT	IMRT-MISO-SJT vs VMAT-MISO-SJT	IMRT-MISO-SJT vs VMAT-MISO-JTT	IMRT-MISO-JTT vs VMAT-MISO-SJT	IMRT-MISO-JTT vs VMAT-MISO-JTT	VMAT-MISO-SJT vs VMAT-MISO-JTT
左晶体D_{ma}	655.8 ± 59.8	641.9 ± 52.1	656.7 ± 58.5	635.7±46.6	0.5358	0.9669	0.3495	0.5023	0.750	0.3203
右晶体D_{ma}	631.8 ± 59.3	616.5 ± 55.6	663.6 ± 76.4	651.3 ± 55.2	0.5038	0.2459	0.3936	0.0838	0.1217	0.6406
心脏D_{mean}	1266.5 ± 241.6	1264.1 ± 228.9	1323.5 ± 201.2	1286.1 ± 189.1	0.9794	0.5188	0.8192	0.4882	0.7909	0.6295
左肾D_{mean}	540.4 ± 176.6	609.6 ± 168.2	1013.1 ± 95.7	973.7 ± 100.9	0.3155	0	0	0	0	0.3161
右肾D_{mean}	632.8 ± 245.0	683.2 ± 216.5	991.6 ± 107.6	943.5 ± 102.3	0.5827	0	0	0	0	0.2529
左肺D_{mean}	768.4 ± 154.1	750.9 ± 125.7	710.1 ± 100.3	717.7 ± 104.2	0.7538	0.2636	0.3348	0.3688	0.4697	0.8516
$V_{5\%}$	54.6 ± 7.8	55.5 ± 8.1	57.7 ± 8.3	55.5 ± 8.6	0.7775	0.33295	0.78708	0.4959	0.9979	0.5084
右肺D_{mean}	906.6 ± 149.0	901.6 ± 135.0	759.4 ± 76.3	771.5 ± 84.2	0.9294	0.0039	0.0086	0.0028	0.0067	0.7034
$V_{5\%}$	62.0 ± 8.2	61.8 ± 6.7	57.7 ± 5.3	56.9 ± 4.8	0.9217	0.1191	0.0646	0.0979	0.0502	0.7160
BodyD_{mean}	779.9 ± 114.6	797.5 ± 118.9	816.3 ± 104.6	829.7 ± 115.1	0.7040	0.4057	0.2796	0.6723	0.5524	0.7589
V_5	11397.6 ± 5608.0	11404.9±5777.0	11695.0±4067.0	11406.0 ± 3988.0	0.8564	0.1862	0.1896	0.2403	0.2457	0.9741
机器跳数	829.9 ± 68.4	785.6 ± 72.6	1430.3 ± 122.2	1356.8 ± 151.4	0.121	0	0	0	0	0.185

注：V_5代表500 cGy低剂量曲面所包绕的患者组织的体积大小

其中四组计划在500 cGy低剂量覆盖体积，VMAT计划均高于IMRT计划，但差异无统计学意义（$P>0.05$）；由机器跳数比较可知，VMAT计划均高于IMRT计划，且差异具有统计学意义（$P<0.05$）。铅门固定与跟随技术对IMRT及VMAT计划的500 cGy低剂量覆盖体积及机器跳数无明显影响，结果见表2及图1、图2。

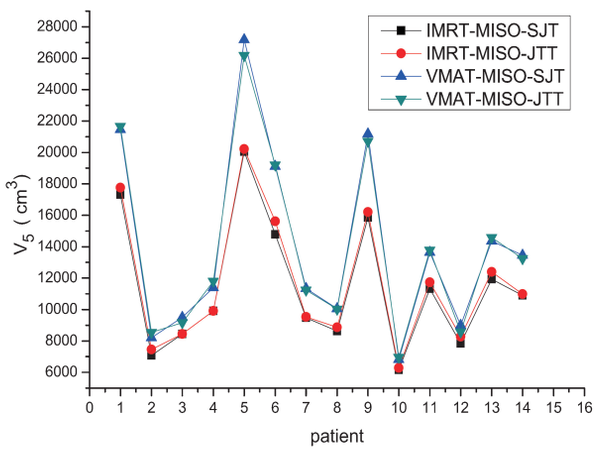


图1　14例全脑全脊髓患者4种计划的500cGy低剂量覆盖的体积比较

Figure 1　Volume comparison of low-dose coverage of 500cGy in 4 plans for 14 CSI patients

注：V_5代表500cGy低剂量曲面所包绕的患者组织的体积大小

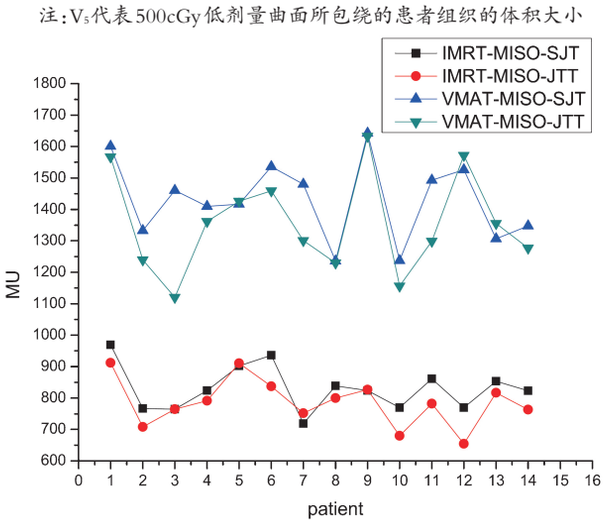


图2　14例全脑全脊髓患者4种治疗计划的机器跳数比较

Figure 2　Comparison of monitor units in 4 plans for 14 CSI patients

注：MU表示加速器输出的机器跳数

3　讨论

全中枢神经肿瘤的靶区包括全脑和全部脊髓，其治疗照射范围远远超过加速器最大照射射野。早期的射野相切技术、非共面射野衔接技术、半野照射技术、正向子野添加技术、通过辅助结构限定照射区域等技术，有效的缓解或避免了衔接处剂量冷热点[11-17]。但是放疗实施复杂、临床广泛开展具有一定的难度，比如转床等也可能引入新的治疗误差。本研究主要探讨了多中心的IMRT、VMAT计划结合铅门固定与跟随技术在全中枢神经肿瘤放疗中的应用，研究结果表明四组计划均能满足临床要求，整个靶区无剂量冷热点存在。而且治疗计划设计与治疗实施都比较便捷，与常规的射野拼接技术比较具有明显优势。

本研究中四组计划靶区D_{mean}、$D_{2\%}$及$D_{98\%}$无显著性差异，VMAT相对于IMRT可以获得更好的靶区适形度和均匀性。这是因为VMAT技术在出束角度更多，靶区剂量更容易满足，因而适形度较好；而IMRT的射野方向固定，为了最大限度的同时满足靶区和危及器官的剂量分布，在子野的生成上有一定的限制，很容易在靶区内外产生高量、热点区域，从而影响靶区均匀性。在贺先桃等[18]的研究中也表明在乳腺癌术后根治放疗中，VMAT相比于IMRT有更好的*CI*和*HI*。总体上来说，在危及器官的保护上IMRT计划优于VMAT计划，该结论与朱俐颖等[19]研究结果不相同。分析其原因，IMRT固定角度调强射野可以有效的、更多的避开各危及器官，比如晶体、肾脏、心脏等，故而这些危及器官受照剂量低于360°全弧的VMAT计划。有研究报道Tomo、VMAT计划患者身体受照的整体剂量及低剂量体积较多，这可能增加二次致癌的风险[20-23]。同时SERAVALLI等[24]指出在全脑全脊髓放疗中，总的处方剂量小于等于36 Gy，大多数危及器官耐受剂量比较宽泛，很难推荐一种放疗技术而不使用另外一种放疗技术。

另外，本研究发现对于同种IMRT或者VMAT技术而言，采用铅门跟随或者铅门固定的方式造成靶区和危及器官的差异基本无统计学意义。其原因在于全中枢神经肿瘤靶区，第一段全脑PTV1，靶区较大但靶区形状简单，铅门开放的位置相对较大且比较固定；第二段、第三段靶区PTV2、PTV3，其靶区形状呈长条形，相对比较规则。因而铅门固定与铅门跟随情况下铅门的位置变化差异不大，所以MLC的漏射和透射对靶区和危及器官受照剂量影响较小，进而SJT与JTT在全中枢多中心计划中剂量学差异不明显。刘乐乐等[25]的分析也显示，在靶区相对简单规则的计划中，SJT和JTT技术对靶区的*CI*和*HI*值的差异无统计学意义。冯仲苏等[26]报道，铅门跟随技术可以更好的降低直肠癌治疗的危及器官和正常组织受照的剂量，其原因在于直肠癌靶区形状不规则且体积大，铅门开放的位置相对较大，MLC的漏射与透射会对靶区和危及器官的剂量产生较大的影响。

4　结论

在全中枢神经肿瘤放射治疗计划设计中，如果重点强调靶区处方剂量的覆盖率、剂量均匀性，处方剂量

适形度，优先选择VMAT-MISO-SJT或VMAT-MISO-JTT的计划设计方法；如果重点强调限制晶体、肾脏，心脏受照剂量及500 cGy低剂量体积区域、机器跳数等，则优先选择IMRT-MISO-SJT或IMRT-MISO-JTT的计划设计方法。全脑全脊髓放疗计划中，铅门固定与跟随技术对IMRT及VMAT计划的剂量分布及机器跳数无明显影响，在其他病种放疗计划中的影响有待进一步探索。

（利益冲突：无）

参 考 文 献

[1] 傅玉川，李光俊，林大全，等. 通过多种技术方法的综合使用优化全脑全脊髓照射技术[J]. 生物医学工程学杂志，2010，27(1)：193-197.

[2] 杨波，杨伟强，孔旭东，等. 全脑全脊髓转床半野照射技术的临床应用[J]. 中国医学物理学杂志，2012，29(6)：3752-3754.

[3] 刘志杰，朱小东，杨海明，等. 不同全脑全脊髓放疗方式的剂量学比较及摆位误差对靶区的影响[J]. 中华放射医学与防护杂志，2014，34(7)：526-529，558.

[4] 鞠孟阳，史玉静，田甜，等. 全脑全脊髓放疗过程中射野重叠区对计划的影响[J]. 中国医学物理学杂志，2018，35(2)：131-134.

[5] 廖雄飞，李厨荣，黎杰，等. 两种全中枢神经系统放疗技术患者有效剂量的比较[J]. 中华放射医学与防护杂志，2017，37(1)：45-49.

[6] 李成，胡睿，吴锦昌，等. Jaw tracking技术对鼻咽癌调强放疗靶区和危及器官受照剂量影响的研究[J]. 国际生物医学工程杂志，2015，38(2)：95-98.

[7] 常浩，于得全，余宗艳，等. 调强放射治疗技术用于全脑全脊髓放射治疗的可行性研究[J]. 生物医学工程与临床，2021，25(2)：184-189.

[8] 王艳菊，崔震，高峰，等. 髓母细胞瘤调强放疗计划中AAA算法与PBC算法的对比研究[J]. 中国医学工程，2019，27(9)：24-27.

[9] EMAMI B，LYMAN J，BROWN A，*et al*. Tolerance of normal tissue to therapeutic irradiation[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys，1991，21(1)：109-122.

[10] 王若峥，尹勇. 肿瘤精确放射治疗计划设计学[M]. 北京：科学出版社，2014：82-92.

[11] PADDICK I. A simple scoring ratio to index the conformity of radiosurgical treatment plans. Technical note[J]. J Neurosurg，2000，93 Suppl 3：219-222.

[12] WANG Z，JIANG W，FENG YM，*et al*. A simple approach of three-isocenter IMRT planning for craniospinal irradiation[J]. Radiat Oncol，2013，8：217.

[13] CAO F，RAMASESHAN R，CORNS R，*et al*. A three-isocenter jagged-junction IMRT approach for craniospinal irradiation without beam edge matching for field junctions[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys，2012，84(3)：648-654.

[14] SARKAR B，MUNSHI A，MANIKANDAN A，*et al*. A low gradient junction technique of craniospinal irradiation using volumetric-modulated arc therapy and its advantages over the conventional therapy[J]. Cancer Radiother，2018，22(1)：62-72.

[15] FELLIN F，FRACCHIOLLA F，ROMBI B，*et al*. An advanced junction concept in pediatric craniospinal irradiation by proton pencil beam scanning[J]. Phys Med，2019，60：168-173.

[16] 程晓龙，陈祥，刘吉平，等. 全脑全脊髓螺旋断层放疗体位固定技术的优化及应用研究[J]. 实用肿瘤杂志，2019，34(4)：348-352.

[17] 江楠，解传滨，丛小虎，等. 基于两种旋转调强全中枢放射治疗技术的剂量学研究[J]. 中国医学装备，2018，15(7)：13-17.

[18] 贺先桃，王占宇，谭军文，等. 固定铅门模式下容积旋转调强放疗与动态调强放疗在乳腺癌根治术后放疗中的比较[J]. 中国医学物理学杂志，2018，35(8)：889-894.

[19] 朱俐颖，胡小洋，孙磊，等. 全脑全脊髓放疗中静态调强和容积调强的剂量学对比[J]. 辐射防护通讯，2020，40(3)：15-18.

[20] SHARMA DS，GUPTA T，JALALI R，*et al*. High-precision radiotherapy for craniospinal irradiation：evaluation of three-dimensional conformal radiotherapy，intensity-modulated radiation therapy and helical TomoTherapy[J]. Br J Radiol，2009，82(984)：1000-1009.

[21] SUN YQ，LIU G，CHEN W，*et al*. Dosimetric comparisons of craniospinal axis irradiation using helical tomotherapy，volume-modulated arc therapy and intensity-modulated radiotherapy for medulloblastoma[J]. Transl Cancer Res，2019，8(1)：191-202.

[22] SAKTHIVEL V，GANESH KM，MCKENZIE C，*et al*. Second malignant neoplasm risk after craniospinal irradiation in X-ray-based techniques compared to proton therapy[J]. Australas Phys Eng Sci Med，2019，42(1)：201-209.

[23] MYERS PA，MAVROIDIS P，KOMISOPOULOS G，*et al*. Pediatric cranio-spinal axis irradiation：comparison of radiation-induced secondary malignancy estimations based on three methods of analysis for three different treatment modalities[J]. Technol Cancer Res Treat，2015，14(2)：169-180.

[24] SERAVALLI E，BOSMAN M，LASSEN-RAMSHAD Y，*et al*. Dosimetric comparison of five different techniques for craniospinal irradiation across 15 European centers：analysis on behalf of the SIOP-E-BTG（radiotherapy working group）[J]. Acta Oncol，2018，57(9)：1240-1249.

[25] 刘乐乐，胡金炎，王芳娜，等. 多发脑转移瘤铅门跟随VMAT-SRS计划与固定技术剂量学对比分析[J]. 中华肿瘤防治杂志，2019，26(20)：1542-1546.

[26] 冯仲苏，吴昊，蒋璠，等. 铅门跟随技术与铅门固定技术在直肠癌术前调强放疗中的剂量学比较[J]. 中华放射医学与防护杂志，2014，34(12)：938-941.

（2021-09-06 收稿，2022-03-07 修回）