

• 临床研究 • doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2025.08.018

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250722.1312.004\(2025-07-22\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1097.R.20250722.1312.004(2025-07-22))

脑转移瘤患者 HyperArc 与非共面 VMAT 的剂量学和摆位误差分析*

谭 磊,梁广立,李春胤,谢朋哲

(天津医科大学肿瘤医院放射治疗科/国家肿瘤临床医学研究中心/天津市肿瘤防治重点实验室/天津市恶性肿瘤临床医学研究中心,天津 300202)

[摘要] **目的** 分析 HyperArc 与非共面容积调强放射治疗(VMAT)在脑转移瘤患者中的剂量学和摆位误差的差异,为临床提供参考。**方法** 选取 40 例脑转移瘤患者为研究对象,其中接受 HyperArc 治疗的 20 例患者为观察组,接受非共面 VMAT 治疗的 20 例患者为对照组。对比两组放疗计划的适形指数(CI)、梯度指数(GI)、均匀性指数(HI),以及在 X(头脚)、Y(左右)、Z(腹背)3 个方向和 Rx(绕 X 轴旋转)、Ry(绕 Y 轴旋转)、Rz(绕 Z 轴旋转)3 个旋转角度的摆位误差的差异。**结果** 观察组 CI、GI、HI 分别为 0.927(0.890, 0.950)、3.200(2.510, 3.730)、0.220(0.177, 0.280);对照组 CI、GI、HI 分别为 0.888(0.845, 0.928)、3.340(2.890, 4.220)、0.218(0.180, 0.300)。观察组与对照组患者的 CI 差异有统计学意义($P < 0.05$),GI、HI 差异无统计学意义($P > 0.05$);在摆位误差上,对照组 X、Y、Z、Rx、Ry、Rz 分别为 0.118 ± 0.084 、 0.133 ± 0.112 、 0.226 ± 0.142 、 0.930 ± 0.767 、 1.330 ± 0.869 、 0.910 ± 0.650 ;观察组分别为 0.149 ± 0.113 、 0.178 ± 0.120 、 0.172 ± 0.117 、 1.340 ± 0.758 、 1.610 ± 0.743 、 1.420 ± 0.832 ,所有方向上差异有统计学意义($P < 0.05$)。**结论** HyperArc 在靶区适形度上具有更好的表现,但摆位误差上在 Rx、Ry、Rz 3 个旋转角度上表现均略次于非共面 VMAT。

[关键词] HyperArc; 非共面 VMAT; 脑转移瘤; 摆位误差; 立体定向放射外科

[中图法分类号] R739.41 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2025)08-1866-04

Analysis of dosimetric and positioning error of HyperArc and non-coplanar VMAT in patients with brain metastases*

TAN Lei, LIANG Guangli, LI Chunyin, XIE Pengzhe

(Department of Radiation Therapy, Tianjin Medical University Cancer Hospital/National Clinical Research Center for Cancer/Tianjin Key Laboratory of Cancer Prevention and Treatment/Tianjin Clinical Research Center for Malignant Tumors, Tianjin 300202, China)

[Abstract] **Objective** To analyze the differences of dosimetry and positioning error between HyperArc and non-coplanar VMAT in patients with brain metastases, provide references for clinical practice. **Methods** Forty patients with brain metastases were selected. Among them, 20 patients who received HyperArc treatment were the observation group, and 20 patients who received non-coplanar VMAT treatment were the control group. Compared the differences in conformal index (CI), gradient index (GI), homogeneity index (HI) of the two groups, as well as the positioning error in the three directions of X (head to foot), Y (left to right), Z (abdomen to back), and the three rotation angles of Rx (rotation around the X-axis), Ry (rotation around the Y-axis), and Rz (rotation around the Z-axis). **Results** CI, GI and HI of the observation group were 0.927 (0.890, 0.950), 3.200 (2.510, 3.730) and 0.220 (0.177, 0.280), respectively. CI, GI and HI of the control group were 0.888 (0.845, 0.928), 3.340 (2.890, 4.220) and 0.218 (0.180, 0.300), respectively. There was statistically significant difference in CI between the two groups ($P < 0.05$), while there was no statistically significant difference in GI and HI ($P > 0.05$). The positioning error of X, Y, Z, Rx, Ry, and Rz in the control group were 0.118 ± 0.084 , 0.133 ± 0.112 , 0.226 ± 0.142 , 0.930 ± 0.767 , 1.330 ± 0.869 , and 0.910 ± 0.650 , respectively, while in the observation group were 0.149 ± 0.113 , 0.178 ± 0.120 , 0.172 ± 0.117 , 1.340 ± 0.758 , 1.610 ± 0.743 , and 1.420 ± 0.832 , respectively. There were statistically significant differences in all directions ($P < 0.05$). **Conclusion** HyperArc performs better in the conformal degree of the target area, but the positio-

* 基金项目:天津市医学重点学科(专科)建设项目(TJYZDXK-009A)。

ning error of Rx, Ry and Rz rotation angles is slightly inferior to that of non-coplanar VMAT.

[Key words] HyperArc; non-coplanar VMAT; brain metastases; positioning error; stereotactic radiosurgery

由身体其他部位的肿瘤细胞转移至颅内产生的肿瘤称为脑转移瘤,多由肺癌、乳腺癌、胃癌等引发,可单发也可多发^[1],病程伴随恶心、头痛、喷射性呕吐、癫痫等症状,严重影响生存质量。脑转移瘤患者神经系统会受到不同程度的损伤,病情往往进展迅速,生存周期短,预后并不可观^[2]。在以往的研究中,全脑放疗(whole brain radiotherapy, WBRT)是多发脑转移瘤的标准治疗方案^[3],WBRT 对整个脑组织进行照射,包括大脑组织、小脑组织、脑干、脑室、脑膜等,因此对正常脑组织也有一定的影响,通常在治疗 3 个月后患者会出现神经性认知能力的下降,生活质量降低^[4]。基于容积调强放射治疗(volumetric modulated arc therapy, VMAT) 进行的立体定向放射外科(stereotactic radiosurgery, SRS)技术,可利用立体定向技术对患者颅内靶区进行精确定位,再使用高能射线聚焦于靶组织给予单次大剂量照射^[5-6]。相较于全脑放疗,正常组织受照剂量小,在一定程度上减轻不良反应^[7]。本研究比较脑转移瘤患者中利用瓦里安 EDGE 医用直线加速器进行多发脑转移瘤超弧刀 HyperArc 与非共面 VMAT 两种治疗方式的剂量学和摆位误差的差异,为临床治疗提供参考。

1 资料与方法

1.1 一般资料

选取 2023 年 11 月至 2024 年 7 月在本院使用瓦里安 EDGE 医用直线加速器进行放疗的 40 例脑转移瘤患者为研究对象。纳入标准:(1)经组织学检查确诊为脑转移瘤;(2)具有较好的自控能力,能够配合完成放疗;(3)无特殊体位要求。排除标准:(1)临床资料不完整,缺失关键数据且无法补充;(2)CBCT 图像存在严重伪影;(3)患者存在颅骨缺损等情况导致骨性配准基准缺失。于患者每次治疗前进行锥形束 CT 获取摆位误差数据。其中 20 例患者治疗方式为 HyperArc(观察组),使用专用热塑膜固定。另外 20 例患者治疗方式为非共面 VMAT(对照组),使用头颈肩网加塑形垫固定。对比两组放疗计划的适形指数(conformity index, CI)、梯度指数(gradient index, GI)、均匀性指数(homogeneity index, HI) 及摆位误差在 X(头脚)、Y(左右)、Z(腹背)3 个方向与 Rx(绕 X 轴旋转)、Ry(绕 Y 轴旋转)、Rz(绕 Z 轴旋转)3 个旋转角度上的差异。本研究通过本院医学伦理委员会批准(审批号:bc20252249),患者均知情同意。

1.2 方法

1.2.1 材料

飞利浦大孔径 CT 模拟定位机,瓦里安 EDGE 医用直线加速器(6 MV X 射线,1 400 MU/min),E-

clipse 计划系统,HyperArc 专用热塑膜,面网热塑膜,B 枕。

1.2.2 定位与计划

观察组:将热熔好的 HyperArc 专用热塑膜的下模具放在特定床板卡扣上,患者平躺双手置于体侧,后脑勺置于模具里,再将热熔好的口鼻处镂空的上模具放至在卡扣处与下模具相互扣紧,及时按压热塑膜使之与头部轮廓吻合^[8]。将三维激光灯与模具自带的标记线对好,行 CT 扫描获取图像。HyperArc 计划选择 6 MV-FFF 能量,1 400 MU/min 剂量率,一条全弧与 3 条非共面半弧,全弧床角为 0°,半弧床角分别为 315°、45°、90°。

对照组:将头颈肩体架卡在 CT 模拟定位机的机床上,将在恒温水箱加热 15 min 的头颈肩塑形垫放置在体架上,患者仰卧至塑形垫上,根据患者体型对塑形垫进行个性化塑形,等待塑形垫冷却固定后,再用经过水浴加热后的头颈肩网覆盖在患者相应的体表进行塑形,及时按压热塑膜使之与头部轮廓吻合。使用定位床移动患者,让患者头部置于三维激光灯处,在模具上做好激光灯的标记,行 CT 扫描获取图像。非共面 VMAT 计划选择 6 MV-FFF 能量,1 400 MU/min 的剂量率,根据患者肿瘤情况选择床角的角度一般为 315°、270°、45°、90°。

1.2.3 剂量学分析

在所有放疗计划都符合要求的前提下,计算所有放疗计划的 CI、GI、HI。

$$CI = V_{T,ref}/V_T \times V_{T,ref}/V_{ref} \quad \text{式①}$$

其中, $V_{T,ref}$ 为接受剂量大于或等于参考剂量的靶区体积, V_T 为靶区体积, V_{ref} 为接受剂量大于或等于参考剂量的体积。该公式有效结合了正常组织过量和靶区剂量不足这两个因素,可以得出正确的 CI, 值越接近 1 说明适形性越好^[9]。

$$GI = V_{50}/V_{100} \quad \text{式②}$$

其中, V_{50} 是 50% 处方剂量线的体积, V_{100} 是 100% 处方剂量线的体积, GI 表示靶区外剂量线的跌落程度, 值越小代表靶区外剂量跌落得越快, 通常认为 GI 值为 3~6 相对较好, 对于头部放疗更期望接近 3。

$$HI = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_p} \quad \text{式③}$$

其中, $D_{2\%}$ 为 2% 靶区受到的最低剂量, $D_{98\%}$ 为 98% 靶区手袋的最低剂量, D_p 为靶区处方剂量, 理想值为 0, 随着计划不均匀性增大而增大, 也是目前使用最广泛的 HI 公式^[10]。

1.2.4 CBCT 数据采集

对所有患者采用瓦里安 EDGE 医用直线加速器进行放疗,每次治疗前行 CBCT 扫描,将扫描重建的 CT 图像与定位时的 CT 图像进行骨性匹配,观察横切面、矢状面、冠状面的兴趣区域与周围的解剖结构的重合度的情况,结合患者的靶区手动微调到治疗最佳的匹配位置。记录患者在 X、Y、Z 3 个方向和 Rx、Ry、Rz 3 个旋转角度上的摆位误差,共采集对照组 CBCT 图像 87 例,观察组 CBCT 图像 96 例。

1.3 统计学处理

采用 SPSS21.0 软件对数据进行统计学处理。对符合正态分布的计量资料以 $\bar{x} \pm s$ 表示,组间比较采用 *t* 检验;计数资料以例数或百分比表示,组间比较采用 χ^2 检验。对非正态分布的数据采用 $M(Q_1, Q_3)$

表示,进行组间比较采用非参数检验中 Mann-Whitney *U* 检验。以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结 果

2.1 剂量学分析

观察组与对照组 GI、HI 比较,差异无统计学意义 ($P > 0.05$),而观察组 CI 值略优于对照组 ($P < 0.05$),见表 1。

2.2 摆位误差

X、Y 方向上对照组摆位误差小于观察组,在 Z 方向上观察组摆位误差小于对照组 ($P < 0.05$),见表 2;在 Rx、Ry、Rz 3 个旋转角度上,对照组都摆位误差旋转角度小于观察组 ($P < 0.05$),见表 3。

表 1 两组患者的 CI、GI、HI 比较 [$M(Q_1, Q_3)$]

组别	<i>n</i>	CI	GI	HI
观察组	20	0.927(0.890, 0.950)	3.200(2.510, 3.730)	0.220(0.177, 0.280)
对照组	20	0.888(0.845, 0.928)	3.340(2.890, 4.220)	0.218(0.180, 0.300)
<i>Z</i>		-2.326	-1.028	-0.433
<i>P</i>		0.020	0.304	0.665

表 2 两组患者 X、Y、Z 轴摆位误差绝对值比较 ($\bar{x} \pm s$, cm)

组别	扫描次数(<i>n</i>)	X	Y	Z
观察组	96	0.149±0.113	0.178±0.120	0.172±0.117
对照组	87	0.118±0.084	0.133±0.112	0.226±0.142
<i>t</i>		-2.136	-2.612	2.764
<i>P</i>		0.034	0.010	0.006

表 3 两组患者 Rx、Ry、Rz 摆位误差旋转角度绝对值比较 ($\bar{x} \pm s$, °)

组别	扫描次数(<i>n</i>)	Rx	Ry	Rz
观察组	96	1.610±0.743	1.340±0.758	1.420±0.832
对照组	87	1.330±0.869	0.930±0.767	0.910±0.650
<i>t</i>		-2.381	-3.659	-4.638
<i>P</i>		0.018	<0.001	<0.001

3 讨 论

脑转移瘤往往是身体其他部位的恶性肿瘤转移至脑部形成,患者通常处于晚期状态,脑转移瘤的放疗一般为姑息治疗,旨在缓解症状,控制肿瘤生长,延长生存期,提高生活质量^[11]。作为高级神经中枢系统,脑内一些微小的损伤也可能带来不可逆的伤害^[12]。而 WBRT 治疗方案中所有脑组织均受到照射,因此,提高靶区剂量,减少正常组织的受照剂量成为近些年脑转移瘤放疗的目标^[13-14]。基于 EDGE 加速器的 HyperArc 与非共面 VMAT 都是单中心非共面 SRS 技术,区别在于 HyperArc 计划有专门的设计模块,可以进行准直器角度优化计算最优小机头角

度,SRS NTO 算法降低正常组织受量,治疗中一键启动,自动切换射野、床角等,无需过多手动操作,因此也称为一键式高解析度放射外科治疗技术,患者在治疗床上的时间相对较短,治疗体验优于非共面 VMAT^[15]。

本研究结果得出,无论是使用 HyperArc 还是非共面 VMAT,都可以实现符合要求的放疗计划。但由于 HyperArc 具有准直器角度优化功能,在靶区形状上取得的结果优于非共面 VMAT。以往对 HyperArc 与非共面 VMAT 的研究均是单独分析了放疗计划的可行性^[16-17],并没有结合实际摆位误差进行系统分析,而 HyperArc 作为一种新的技术,使用的也是不同以往的固定模具,所以除了对放疗计划进行分析外也应该结合实际摆位误差进行分析^[18]。摆位误差上,两种技术在 3 个方向上相差并不大,在 X、Y 方向上非共面 VMAT 技术略优,在 Z 方向上 HyperArc 则更优,但均符合摆位误差要求。而在旋转方向上,非共面 VMAT 均优于 HyperArc。作者在工作中发现,HyperArc 在旋转方向的摆位误差不如使用头颈肩网的非共面 VMAT。HyperArc 使用专用热塑膜固定体位,该模具采用面部镂空设计,上至眉骨,下至颏唇沟均为镂空设计,虽然很好地保证了患者呼吸畅通,但在摆位过程中却很难通过患者面部的凸起特征找到头部 3 个旋转角度的最佳位置。部分脑转移患者由于并发症,并不能很好地控制身体,不能保证头部完全躺正躺直,而失去包裹面部的热塑膜很难通过面部特征快速找到这些角度,只能通过放疗技师的摆

位经验和图像引导完成。而非共面 VMAT 使用的头颈肩热塑膜在定位时将患者的头部情况复制记录,在后续摆位中能够通过鼻子、嘴唇等面部特征快速找到患者与模具贴合的最佳位置,所以在旋转角度上非共面 VMAT 表现更好^[19]。因此进行 HyperArc 治疗时,应该多关注患者定位时的体位,尽量避免患者头部出现任何角度上的偏差,而对于自我控制能力较差的患者出现无法避免的角度偏差时,放疗技师在后续摆位治疗过程中也应多给予关注,标记好偏差方向及角度,在治疗中尽量提高治疗精度,降低摆位误差,保证放疗质量^[20]。

综上所述,HyperArc 与非共面 VMAT 均可以进行有效的放射治疗。但是在计划设计上,HyperArc 由于拥有专门的设计模块所以具有一定的优势,可以取得较好的靶区适形度。在治疗摆位过程中,由于 HyperArc 专用热塑膜面部镂空的设计,在旋转角度上的表现比非共面 VMAT 更好。而在治疗体验上,HyperArc 治疗时间更短,患者体验更好。

参考文献

- [1] 中国医师协会放射肿瘤治疗医师分会. 脑转移瘤立体定向放射治疗临床指南[J]. 国际肿瘤学杂志, 2021, 48(8): 456-462.
- [2] 王晓敏, 郑晓娜, 邢国臣, 等. 全脑放疗同步瘤床推量治疗肺癌脑转移瘤的临床研究[J]. 实用中西医结合临床, 2024, 24(5): 83-86.
- [3] BROWN P D, AHLUWALIA M S, KHAN O H, et al. Whole-brain radiotherapy for brain metastases: evolution or revolution? [J]. J Clin Oncol, 2018, 36(5): 483-491.
- [4] UPADHYAY R, PALMER J D, KLAMER B G, et al. Safety and feasibility of stereotactic radiosurgery for patients with 15 or more brain metastases[J]. Adv Radiat Oncol, 2024, 9 (7): 101509.
- [5] RUGGIERI R, NACCARATO S, MAZZOLA R, et al. Linac-based radiosurgery for multiple brain metastases: comparison between two mono-isocenter techniques with multiple non-coplanar arcs[J]. Radiother Oncol, 2019, 132: 70-78.
- [6] 代嘉鑫, 段琳, 范仁财, 等. 立体定向放疗在脑转移瘤中的研究进展[J]. 中国辐射卫生, 2025, 34 (3): 463-470.
- [7] 徐中标, 黄唯. 不同体积脑转移瘤对容积旋转调强计划摆位误差的敏感性[J]. 中国医学物理学杂志, 2024, 41(5): 529-533.
- [8] 李楠, 于浪, 孙显松, 等. HyperArc 立体定向放疗治疗颅内肿瘤分次内及分次间摆位误差分析[J]. 中国医学装备, 2025, 22(2): 15-19.
- [9] 邵琰, 王昊, 陈华, 等. 适形指数和均匀性指数的临床应用[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2017, 37(9): 717-721.
- [10] ANDREVSKA A, KNIGHT K A, SALE C A. The feasibility and benefits of using volumetric arc therapy in patients with brain metastases: a systematic review[J]. J Med Radiat Sci, 2014, 61(4): 267-276.
- [11] GARSA A, JANG JK, BAXI S, et al. Radiation therapy for brain metastases: a systematic review[J]. Pract Radiat Oncol, 2021, 11(5): 354-365.
- [12] TRIFILETTI D M, RUIZ-GARCIA H, QUINONES-HINOJOSA A, et al. The evolution of stereotactic radiosurgery in neurosurgical practice[J]. J Neurooncol, 2021, 151(3): 451-459.
- [13] VELTEN C, KABARRITI R, GARG M, et al. Single isocenter treatment planning techniques for stereotactic radiosurgery of multiple cranial metastases[J]. Phys Imaging Radiat Oncol, 2021, 17: 47-52.
- [14] 曾华驱, 陈宗友, 汤树奎, 等. 非共面容积调强和非共面固定野调强在脑转移瘤脑海马体保护全脑放射治疗联合同步推量的剂量学研究[J]. 中国医学装备, 2024, 21(12): 25-31.
- [15] 徐振华, 伍鑫, 国滨, 等. 一键式高解析度放射外科技术在多发脑转移放射治疗中的临床应用[J]. 慢性病学杂志, 2022, 23(5): 668-670.
- [16] 王涛, 刘晓男, 程秀艳, 等. HyperArc、非共面 VMAT 和共面 VMAT 在脑部寡转移瘤立体定向放射治疗中的剂量学比较[J]. 河南医学研究, 2025, 34(9): 1562-1568.
- [17] 张卫恒, 邹炳, 赵学会, 等. 不同放疗方案治疗多发脑转移瘤的剂量学和效果差异分析[J]. 国际医学放射学杂志, 2025, 48(2): 159-163, 202.
- [18] 张超, 杨健. 调强放疗摆位误差的研究进展[J]. 重庆医学, 2021, 50(4): 684-688.
- [19] 魏夏平, 苏洁洪, 林楚婕, 等. 3 种立体定向放射外科技术在不同脑转移瘤个数下的比较[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(11): 1329-1333.
- [20] 徐雄健, 程祖胜, 王亮, 等. 不同放射治疗分割方式对脑转移瘤患者放疗后的影响[J]. 重庆医学, 2019, 48(22): 3862-3865.