

论 著

CT-Sim定位技术确定的不同治疗等中心计划在脑胶质瘤术后VMAT中的剂量学研究*

崔刚¹ 杨丽娟^{2*} 施洋¹
王大恺¹ 张代辉³1.邢台医学院第二附属医院CT-MRI科
2.邢台医学院护理系
3.邢台市中心医院影像中心
(河北邢台 054000)

【摘要】目的 探究CT模拟(CT-Sim)定位技术确定的不同治疗等中心计划在脑胶质瘤术后容积旋转调强放射治疗(VMAT)中的剂量学分布特征。**方法** 选取医院2019年6月至2024年12月收治的102例术后行VMAT的脑胶质瘤患者为研究对象,所有患者分别使用CT-Sim定位技术确定术后靶区中心(CT-AUTO)和CT-Sim定位技术确定全脑中心(CT-RML)两种方式确定治疗等中心计划。根据确定的治疗等中心进行VMAT计划设计,比较不同计划靶区、危及器官(OAR)的剂量学指标和机器跳数。**结果** CT-AUTO、CT-RML两种计划均能满足临床剂量学要求,临床靶区计划肿瘤体积(PCTV)、计划靶区(PTV)的最大剂量(Dmax)、平均剂量(Dmean)、最小剂量(Dmin)、靶区适形指数(CI)、靶区均匀指数(HI)比较,均无明显差异($P>0.05$)。两种计划OAR受量和机器跳数比较,差异均无统计学意义($P>0.05$)。**结论** 脑胶质瘤术后VMAT中,CT-Sim定位技术确定的不同治疗等中心计划能够满足临床所需的靶区要求,且不会引起PCTV、PTV及OAR产生剂量学方面的差异。

【关键词】 脑胶质瘤;容积旋转调强放射治疗;治疗等中心计划;CT模拟定位技术;剂量学

【中图分类号】 R81; R73

【文献标识码】 A

【基金项目】 河北省卫生健康委科研基金项目(20241818)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2026.01.005

Dosimetric Study of Different Isocenter Treatment Plans Determined under CT-sim Localization in Postoperative VMAT for Glioma*

CUI Gang¹, YANG Li-juan^{2*}, SHI Yang¹, WANG Da-kai¹, ZHANG Dai-hui³.

1.Department of CT-MRI, The Second Affiliated Hospital of Xingtai Medical College, Xingtai 054000, Hebei Province, China

2.Department of Nursing, Xingtai Medical College, Xingtai 054000, Hebei Province, China

3.Medical Imaging Center, Xingtai Central Hospital, Xingtai 054000, Hebei Province, China

ABSTRACT

Objective To explore the dosimetric characteristics of different isocenter treatment plans determined under CT-Sim localization in postoperative volumetric modulated arc therapy (VMAT) for glioma.

Methods From June 2019 to December 2024, 102 patients with glioma who underwent VMAT after surgery were selected as the research subjects. All patients received isocenter treatment plans based on the postoperative target center (CT-AUTO) and the whole-brain center (CT-RML) determined by CT-Sim localization. VMAT plans were designed according to determined treatment isocenters. The dosimetric indicators and machine hop counts of different planning target areas and organs at risk (OAR) were compared. **Results** CT-AUTO and CT-RML plans both met the requirements of clinical dosimetry. There were no significant differences in the maximum dose (Dmax), mean dose (Dmean), minimum dose (Dmin), conformity index (CI) and homogeneity index (HI) of planning clinical target volume (PCTV) and planning target volume (PTV) in the clinical target area ($P>0.05$). Moreover, there was no statistically significant difference in OAR load and machine hop count between the two plans ($P>0.05$). **Conclusion** In postoperative VMAT for glioma, different isocenter treatment plans determined under CT-Sim localization can meet the requirements of clinical target area without causing dosimetric differences in PCTV, PTV, and OAR.

Keywords: Glioma; Volumetric Modulated Arc Therapy; Isocenter Treatment Plan; CT-simulation Localization; Dosimetry

脑胶质瘤是中枢神经系统常见的恶性肿瘤,年发病率约为5~8/10万,仅通过外科手术手术治疗难以治愈,术后放疗是提高脑胶质瘤局部控制率、改善患者生存预后的重要手段^[1-2]。随着精确放疗技术的发展,容积旋转调强放疗(VMAT)逐渐成为脑胶质瘤术后放疗的主流技术。与常规调强放射治疗相比,VMAT具有高治疗效率、高适形性、执行时间短、低正常组织受量的特点,能在满足靶区剂量的同时降低正常组织受照,使患者获益^[3-4]。相关研究^[5]证实,VMAT正常脑组织受量较常规调强放疗更低。临床研究^[6-7]表明,VMAT效果依赖于射野数目、方向、准直器角度、治疗等中心位置的合理选择,其中治疗等中心是放射治疗计划中射线束交叉的几何中心点,其位置选择直接影响剂量分布的适形性、均匀性及靶区覆盖范围,位置的偏差会影响患者治疗质量。对于脑胶质瘤这类边界不清、浸润性强的肿瘤,术后放疗需在保护周围正常脑组织的同时,确保肿瘤残腔及潜在浸润区域接受足够的照射剂量。治疗计划系统、CT模拟(CT-Sim)定位软件可用于治疗等中心位置的确定,CT-Sim定位技术可有效避免放疗复位环节误差,在提升放疗剂量传递精度的同时,优化设备实际使用效率^[8]。然而,针对脑胶质瘤术后VMAT计划中不同等中心定位策略的系统性剂量学比较研究仍较为有限。本研究基于CT-Sim定位技术,探讨不同等中心计划在脑胶质瘤术后VMAT中的剂量学差异,重点分析其对靶区剂量分布的影响,以期临床优化等中心选择策略、平衡计划质量与执行效率提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 选取102例经术后病理证实为胶质瘤并行术后VMAT脑胶质瘤患者为对象,病例纳入时间为2019年6月至2024年12月。

纳入标准:(1)符合《脑胶质瘤诊疗规范(2018年版)》^[9]中相关诊断标准,经手术病理检查确诊;(2)世界卫生组织(WHO)中枢神经系统肿瘤分类为III~IV级;(3)Karnofsky功能状态(KPS)评分 ≥ 80 分;(4)一般临床资料完整;(5)患者知情同意。排除标准:(1)合并重要脏器严重功能障碍者;(2)合并意识不清醒者;(3)无法配合检查保持定位体位者;(4)存在放疗禁忌证者。患者男68例、女34例,年龄31~68岁,平均(52.76 \pm 8.83)岁;肿瘤位置:额叶42例、顶叶37例、颞叶23例;肿瘤组织学分类:胶质母细胞瘤36例、星形细胞瘤22例、少突胶质细胞瘤19例、间变性少突星形细胞瘤14例、间变性少突胶质细胞瘤11例;WHO分级:III级54例、IV级48例。

1.2 方法

1.2.1 体位固定及CT/MRI扫描 患者取仰卧位,双臂自然置于体侧,热塑面膜固定头

【第一作者】崔刚,男,副主任医师,主要研究方向:影像诊断。E-mail: cuigang11212@163.com

【通讯作者】杨丽娟,女,讲师,主要研究方向:神经病学。E-mail: lijuan1270902@126.com

部。采用CT模拟定位机(SOMATOM Confidence大孔径型,德国Simens公司)行常规平扫、双期增强扫描。扫描范围:颅顶至第2颈椎下缘;扫描参数:120 kV, 300 mAs, 层厚3.0 mm, 矩阵512×512。平扫后行增强扫描,经肘静脉注射对比剂(35 mg/100 mL碘海醇),剂量为80~100 mL。CT定结束后,移除热塑面膜,采用MRI模拟定位机(Skyra 3T大孔径型,德国Simens公司)进行MRI扫描。扫描范围:全脑;扫描参数:T1WI序列:层厚3 mm, TR 300~500 ms, TE 8~15 ms; T2WI序列:层厚3 mm, TR 2500~5000 ms, TE 100 ms, FOV 220~420 mm。分别将CT-Sim、MRI扫描图像传输至Varian Eclipse三维治疗计划系统,进行CT-MRI图像融合,融合精度误差<2 mm,在MRI图像上勾画靶区,经CT图像核对确认。

1.2.2 靶区、危及器官勾画 依据国际辐射单位与测量委员会(ICRU)50号和62号报告^[10]标准定义靶区及处方剂量。肿瘤靶区(GTV):MRI T1增强图像显示的术后残腔;临床靶区(CTV):GTV外扩2~3cm,同时包括瘤周水肿区;计划靶区(PTV):CTV外扩5mm。于CT-MRI融合图像上勾画包括双侧晶体、视神经,视交叉、垂体、脑干的危及器官(OAR),同时勾画靶区外正常脑组织,将OAR外扩0.3 cm定义为计划OAR体积。

1.2.3 处方剂量设定 给予靶区计划肿瘤体积(PGTV)64 Gy的处方剂量,临床靶区计划肿瘤体积(PCTV)58 Gy的处方剂量,PTV 46 Gy的处方剂量,分次剂量为2.0 Gy。

1.2.4 VMAT计划设计 每个病例完成靶区勾画后分别使用CT-Sim定位技术确定术后靶区中心(CT-AUTO)和全脑中心(CT-RML),采用Eclipse治疗计划系统(射线能量6 MV)对两个PTV靶区等中心分别进行VMAT计划设计。采用两弧计划,机架角度为179°~181°(逆时针)、181°~179°(顺时针),治疗床角度为0°。根

据靶区剂量要求(靶区PTV 95%的处方剂量覆盖95%的体积, OAR剂量为最小耐受剂量)设定优化条件^[11]。

1.3 观察指标

1.3.1 剂量体积直方图参数 PTV、PCTV的最大剂量(Dmax)、平均剂量(Dmean)、最小剂量(Dmin),靶区适形指数(CI),靶区均匀指数(HI)。其中, $CI = \left(\frac{PTV_{ref}}{V_{PTV}} \right) \times \left(\frac{PTV_{ref}}{V_{ref}} \right)$, PTV_{ref}为被参考等剂量线所包括

的体积, V_{PTV}为PTV体积, V_{ref}为处方剂量等剂量线所包括的总体积; $HI = \frac{D_5}{D_{95}}$, D₅、D₉₅分别为PTV 5%、95%体积受到的照射剂量,

D₅、D₉₅差值越小, HI值越接近于1,提示靶区内受照平均剂量越高,均匀性越好。

1.3.2 OAR受量和机器跳数 记录脑干、垂体、视交叉、双侧晶体、双侧视神经的所受到的最大剂量(Dmax)和平均剂量(Dmean),记录机器跳数。

1.4 统计学处理 采用SPSS 27.0软件进行数据分析。计量资料以($\bar{x} \pm s$)表示,组间比较行独立样本t检验;P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 不同治疗等中心计划PCTV靶区的剂量学比较 CT-AUTO、CT-RML两种计划PCTV靶区的Dmax、Dmean、Dmin、CI和HI比较,差异均无统计学意义(P>0.05),见表1。

2.2 不同治疗等中心计划PTV靶区的剂量学比较 CT-AUTO、CT-RML两种计划PTV靶区的Dmax、Dmean、Dmin、CI和HI比较,差异均无统计学意义(P>0.05),见表2。

表1 不同治疗等中心计划PCTV靶区的剂量学指标比较(n=102)

等中心计划	Dmax(cGy)	Dmean(cGy)	Dmin(cGy)	CI	HI
CT-AUTO	6330.81±80.61	6122.37±65.42	5920.33±35.79	0.90±0.05	1.04±0.05
CT-RML	6339.27±78.54	6113.75±60.83	5913.45±30.71	0.89±0.05	1.03±0.06
t	0.759	0.975	1.473	1.428	1.732
P	0.449	0.331	0.142	0.155	0.085

表2 不同治疗等中心计划PTV靶区的剂量学指标比较(n=102)

等中心计划	Dmax(cGy)	Dmean(cGy)	Dmin(cGy)	CI	HI
CT-AUTO	6303.59±75.48	6120.56±69.35	5436.21±47.59	0.93±0.04	1.07±0.03
CT-RML	6319.81±73.65	6113.24±65.82	5421.33±71.76	0.92±0.05	1.06±0.05
t	1.553	0.773	1.745	1.577	1.732
P	0.122	0.440	0.083	0.116	0.085

2.3 不同治疗等中心计划OAR受量比较 不同治疗等中心计划的脑干、垂体、视交叉、双侧晶体和视神经等OAR受量比较均无明显差异(P>0.05),见表3。

2.4 不同治疗等中心计划机器跳数比较 CT-AUTO机器跳数为(433.67±50.18)MU, CT-RML机器跳数为(429.35±61.36)MU,两组机器跳数比较无明显差异(t=0.550, P=0.583)。

表3 不同治疗等中心计划OAR受量比较(n=102, cGy)

靶区剂量评估指标	CT-AUTO	CT-RML	t	P
脑干-Dmax	1175.39±310.67	1189.36±302.71	0.325	0.745
脑干-Dmean	239.65±52.68	240.19±55.32	0.071	0.943
垂体-Dmax	958.72±265.49	963.27±378.16	0.106	0.916
垂体-Dmean	702.85±212.63	711.48±205.39	0.295	0.768
视交叉-Dmax	1413.59±601.38	1422.71±589.20	0.109	0.913
视交叉-Dmean	918.36±267.13	889.35±252.76	0.797	0.427

左侧晶体-Dmax	245.33±58.12	235.64±46.79	1.312	0.191
左侧晶体-Dmean	180.35±42.26	172.31±39.27	1.408	0.161
右侧晶体-Dmax	212.33±40.49	203.76±42.65	1.472	0.143
右侧晶体-Dmean	163.78±34.85	155.33±37.22	1.674	0.096
左侧视神经-Dmax	1658.32±641.39	1671.39±622.84	0.148	0.883
左侧视神经-Dmean	870.35±218.74	883.52±201.28	0.447	0.655
右侧视神经-Dmax	1328.71±553.84	1375.25±526.43	0.615	0.539
右侧视神经-Dmean	569.61±133.46	537.41±176.22	1.471	0.143

3 讨论

VMAT是一种新型调强放疗技术，通过不断变化的机架旋转速度、加速器出束剂量率、多叶光栅形状等实现靶区剂量的适形分布，减少正常组织受照剂量，提高等效生物学剂量^[12]。等中心位置确定是影响VMAT计划实施质量的重要参数之一，尤其在脑胶质瘤等复杂解剖结构的肿瘤治疗中，等中心的选择直接影响VMAT计划的适形性和执行效率。脑胶质瘤的高度异质性要求等中心定位策略需个体化调整，传统治疗计划系统(TPS)自动生成的治疗计划等中心点虽操作便捷，但在放疗复位过程中可能产生误差^[13]。近年来，CT-Sim在放射治疗中的应用逐渐成为精准放疗的重要支撑。CT-Sim技术的软组织对比度较传统X线模拟定位提升10倍以上，克服了常规模拟定位机平片拍摄的不足，通过结合高分辨率影像与三维重建技术，能够生成患者个体化体模，支持多方向靶区勾画，提供更多的横截面内的解剖结构细节，精确勾画靶区并确定治疗等中心，避免因摆位或靶区偏移引起的误差，优化剂量分布并减少正常组织受量，简化放疗流程。

本研究对比分析了基于CT-Sim定位技术确定的两种治疗等中心计划在脑胶质瘤术后VMAT中的可行性研究，研究结果显示，两种治疗等中心计划(CT-AUTO与CT-RML)在PGTV和PTV靶区的剂量学参数比较中，差异均无统计学意义。提示基于CT-Sim定位技术确定的等中心无论是在术后靶区中心，还是在全脑层面，VMAT计划在Dmax、Dmean、Dmin方面均能满足临床需求，同时具有较好的靶区均匀性和适形度。分析原因可能是CT-Sim通过高分辨率影像直接定位靶区解剖中心，可能更贴合实际肿瘤形态^[14]。孙博等^[15]的研究也证实，通过CT-Sim定位技术确定的VMAT治疗等中心计划能够满足临床所需的靶区要求，同时可以使高剂量靶区的低剂量区更少，适形度更好，选择靶区几何中心为射野等中心时则可以进一步降低正常组织低剂量区。

胶质瘤术后放疗涉及到的OAR较多，需重点保护脑干、视神经、垂体等OARs，等中心位置的偏移可能使这些敏感结构暴露于高剂量区域，发生急性放射损伤反应，增加患者晚期并发症发生风险^[16]。相关研究^[17-18]表明，对于胶质瘤术后放疗计划，通过减少靶区周围OAR受照，可降低患者放射损伤反应发生率。目前OAR对于不同治疗等中心计划位置确定方法的改变是否存在高度敏感性，尚未有明确结论。本研究结果显示，在OAR保护方面，CT-AUTO、CT-RML对脑干、垂体、视交叉、双侧晶体和视神经的受照(Dmax、Dmean)比较均无明显差异。这一结果表明，等中心位置的选择对OAR剂量分布的影响较小，不同等中心计划在保护OAR方面均能满足临床需求，可能与VMAT技术的动态多叶光栅调制和剂量优化算法的高适应性有关^[19]。进一步研究发现，两组机器跳数相当，差异比较无统计学意义，表明通过CT-Sim技术确定的不同治疗等中心计划具有相同的效应，进一步证实了在CT模拟定位阶段确定治疗中心的临床可行性。现代VMAT系统通过优化机架旋转速度和多叶光栅运动，能够高效平衡剂量适形性与执行效率，从而减小因机架角度调整导致的机器跳数改变^[20]。

综上所述，本研究通过对比CT-Sim技术确定的不同治疗等中心计划，证实了CT-Sim在脑胶质瘤术后VMAT中的临床应用价值，同治疗等中心计划位置的确定能在满足临床所需靶区要求的同时，不引起PCTV、PTV及OAR剂量学差异。然而，本研究存在以下局限性：本研究纳入样本量较小，可能影响统计学效力；

其次缺乏长期随访数据，无法评估剂量学差异对患者生存率或放射性损伤的影响。未来研究方向拟聚焦于开展多中心随机对照研究，验证CT-Sim定位技术在不同病理类型或分期脑胶质瘤中的普适性，推动个体化治疗模式的进一步发展。

参考文献

- [1]王沛沛,李金凯,李彩虹,等.脑胶质瘤放疗计划设计的探索和评价[J].现代肿瘤医学,2023,31(18):3442-3446.
- [2]胡雪琴,张华.高级别脑胶质瘤治疗的研究进展[J].癌症进展,2024,22(9):944-948.
- [3]Miyata J,Tominaga Y,Kondo K,et al.Dosimetric comparison of pencil beam scanning proton therapy with or without multi-leaf collimator versus volumetric-modulated arc therapy for treatment of malignant glioma[J].Med Dosim,2023,48(2):105-112.
- [4]Xie R,Huang H,Cai Q,et al.Hippocampus-sparing volume-modulated arc therapy in patients with World Health Organization grade II glioma:a feasibility study[J].Front Oncol,2025,14(1):1445558.
- [5]刘晓,王凯,陈嘉炜,等.伽玛刀、IMRT、VMAT治疗复发高级别胶质瘤剂量学分析[J].中国医疗设备,2024,39(8):49-54.
- [6]Seppälä J,Heikkilä J,Myllyoja K,et al.Volumetric modulated arc therapy for synchronous bilateral whole breast irradiation - a case study[J].Rep Pract Oncol Radiother,2015,20(5):398-402.
- [7]冯会玉,王伟,何晨曦,等.多模态MRI对脑胶质瘤的诊断价值及术后同步放化疗疗效的评估价值研究[J].中国CT和MRI杂志,2023,21(7):12-14.
- [8]邓滨,程宇文,刘家豪,等.调强适形放射治疗同期化疗与计算机断层扫描模拟同期放化疗对局部晚期鼻咽癌的影响[J].中国医刊,2021,56(3):336-340.
- [9]国家卫生健康委员会医政医管局.脑胶质瘤诊疗规范(2018年版)[J].中华神经外科杂志,2019,35(3):217-239.
- [10]ICRU.International Commission on Radiation Units and Measurements.Prescribing,recording and reporting photon beam therapy.ICRU Report 50[R].Oxford,United Kingdom:Oxford University Press,1993.
- [11]Tan AC,Ashley DM,López GY,et al.Management of glioblastoma:state of the art and future directions[J].CA Cancer J Clin,2020,70(4):299-312.
- [12]徐云,李自康,王奇峰,等.基于PlanIQ的智能引导放射治疗计划设计在食管癌容积旋转调强中的可行性研究[J].中华肿瘤防治杂志,2024,31(23):1451-1458.
- [13]Zhang L,Cheng H,Du F,et al.Single isocenter versus dual isocenter treatment using flattening filter-free and jaw-tracking volumetrically modulated arc therapy for boot-shaped lung cancer:Evaluation of dosimetric and feasibility[J].J Appl Clin Med Phys,2024,25(6):e14292.
- [14]陈仁金,杨波,孙小杨,等.脊柱转移瘤调强放射治疗发泡剂泡沫垫和热塑体膜固定技术临床应用比较[J].中华肿瘤防治杂志,2020,27(16):1335-1339.
- [15]孙博,陈星宇,庞得全.脑胶质瘤术后容积旋转调强放射治疗计划中CT模拟定位技术确定治疗等中心可行性研究[J].中国医学装备,2023,20(2):13-18.
- [16]刘艳玲,付星卉,潘奇,等.合成MRI在高级别脑胶质瘤术后复发与放射性损伤鉴别中的应用[J].国际神经病学神经外科学杂志,2023,50(6):40-46.
- [17]王沛沛,李金凯,李彩虹,等.脑胶质瘤放疗计划设计的探索和评价[J].现代肿瘤医学,2023,31(18):3442-3446.
- [18]游文良,郑婷婷.11C-MET-PET/CT联合MRI在脑胶质瘤放疗靶区勾画中的应用价值[J].中国CT和MRI杂志,2024,22(12):3-5.
- [19]庄雅婧,王宁,郭燕陶,等.乳腺癌根治术后VMAT大分割放疗的剂量学分析及疗效研究[J].重庆医学,2024,53(16):2448-2452.
- [20]顾宵寰,李金凯,李彩虹,等.官颈瘤VMAT放疗计划中实际射野角度与射野角度归零的剂量验证比较[J].中国CT和MRI杂志,2025,23(2):140-143.

(收稿日期:2025-05-27)

(校对编辑:翁佳鸿)