肿瘤精准医学与转化研究 DOI:10.13406/j.cnki.cyxb.003842

3种分次立体定向放射治疗技术在颅内寡转移瘤中剂量学研究

冉凤伟[1],李纪伟[2],张 康[1],赵 祥[1],王 喆[1],李建军[1],王 鹏[1]
（1.陆军军医大学第一附属医院肿瘤科,重庆 400038;2.中核安科锐天津医疗科技有限责任公司,天津 300300）

【摘 要】目的:比较螺旋断层放射治疗(tomotherapy,TOMO)、容积旋转调强放射治疗(volumetric modulated arc therapy,VMAT)和射波刀(cyberKnife,CK)3种分次立体定向放射治疗技术在治疗颅内寡转移瘤中剂量学特性,评估其剂量分布、治疗效率及对危及器官受量差异。**方法:**采用回顾性分析方法,收集2021年至2023年在陆军军医大学第一附属医院接受分次立体定向放射治疗的54例颅内寡转移瘤患者的临床资料。在Varian Eclipse 16.1医生工作站中完成所有患者肿瘤靶区的勾画,在MANTEIA AccContour 3.2软件中完成危及器官(如脑干、脊髓、视神经等)勾画。将勾画好的结构和图像传输至TOMO、CK及Eclipse系统,并分别设计3种不同放射治疗技术治疗计划。为评估3种放射治疗技术剂量学特性,通过剂量体积直方图(dose-volume histogram,DVH)分析了以下关键参数:靶区适形度指数(conformity index,CI)、剂量均匀性指数(homogeneity index,HI)、出束时间(TIME)、机器跳数(monitor units,MU),以及危及器官的受照剂量。**结果:**TOMO、VMAT和CK计划均实现处方剂量要求。TOMO计划的CI为1.05,稍优于VMAT(1.09)和CK(1.17)(P<0.001)。VMAT计划的HI为1.15,优于CK(1.28)和TOMO(1.46)(P<0.001)。在计划执行效率上,VMAT计划出束时间(5 min,1 633 MU),小于TOMO计划出束时间(10 min,8 932MU)和CK计划出束时间(39 min,5 191 MU)(P<0.001)。在危及器官的受照剂量方面,CK对晶体保护最佳,右晶体和左晶体的最大剂量(D_{max})分别为15 cGy和17 cGy,TOMO在右耳蜗剂量控制上具有优势,平均剂量(D_{mean})为88 cGy,而VMAT在脊髓剂量限制方面表现最优,D_{max}为31 cGy(P<0.05)。**结论:**本研究表明,在治疗颅内寡转移瘤中,TOMO、VMAT和CK均能满足处方剂量要求并有效保护危及器官。临床应用中,可结合病灶特征和治疗目标,选择最适宜的技术以实现个性化治疗。

【关键词】立体定向放射治疗;颅内寡转移瘤;螺旋断层放射治疗;容积旋转调强放射治疗;射波刀;剂量学
【中图分类号】R739.41 **【文献标志码】**A **【收稿日期】**2025-01-05

Three fractionated stereotactic radiotherapy techniques in treatment of intracranial oligometastases: a dosimetric study

Ran Fengwei[1], Li Jiwei[2], Zhang Kang[1], Zhao Xiang[1], Wang Zhe[1], Li Jianjun[1], Wang Peng[1]
(1. Department of Oncology, The First Affiliated Hospital of Army Medical University;
2. CNNC Accuray Tianjin Medical Technology Co., Ltd.)

【Abstract】*Objective*: To compare the dosimetric characteristics of three fractionated stereotactic radiotherapy techniques, i.e., tomotherapy (TOMO), volumetric-modulated arc therapy (VMAT), and CyberKnife (CK), in the treatment of intracranial oligometastases, and to assess their dose distribution, treatment efficiency, and difference in dose delivered to organs at risk (OARs). ***Methods*:** A retrospective analysis was performed for the clinical data of 54 patients with intracranial oligometastases who underwent fractionated stereotactic radiotherapy in The First Affiliated Hospital of Army Medical University in 2021-2023. Varian Eclipse 16.1 Physician Workstation was used to perform tumor target volume delineation, and MANTEIA AccContour 3.2 software was used to perform the delineation of OARs, such as brainstem, spinal cord, and optical nerves. The delineated structures and images were transmitted to TOMO, CK, and Eclipse treatment planning systems to design three different radiotherapy treatment plans. Related key parameters were analyzed using the dose-volume histogram to evaluate the dosimetric characteristics of these three radiotherapy techniques, including conformity index (CI) of the target, dose homogeneity index (HI), beam-on time, the number of monitor units (MU), and the exposure dose of OARs. ***Results*:** All three treatment plans (TOMO, VMAT, and CK) met the requirements for prescribed dose. TOMO had a slightly better CI than VMAT and CK (1.05 vs. 1.09 and 1.17, P<0.001). VMAT had a better HI than CK and TOMO (1.15 vs. 1.28 and 1.46, P<0.001). In terms of execution efficiency, VMAT had a significantly shorter beam-on time than TOMO and CK (5 minutes, 1 633 MU vs. 10 minutes, 8 932 MU and 39 minutes, 5 191 MU, P<0.001). In terms

作者介绍:冉凤伟,Email:ranfengwei@tmmu.edu.cn,研究方向:恶性肿瘤立体定向放射治疗。
通信作者:王 鹏,Email:wisdom-wp@tmmu.edu.cn。
基金项目:重庆市科卫联合医学科研面上资助项目(编号:2023MSXM040)。
优先出版:https://link.cnki.net/urlid/50.1046.R.20250418.1629.010(2025-04-21)

of the exposure dose of OARs, CK provided the best protection for the lens, with a maximum dose of 15 cGy for the right lens and 17 cGy for the left lens, and TOMO had an advantage in dose control for the right cochlea, with a mean dose of 88 cGy, while VMAT had the best performance in limiting the dose for the spinal cord, with a maximum dose of 31 cGy (P<0.05). ***Conclusion***: This study shows that TOMO, VMAT, and CK all meet the requirements for the prescribed dose and can effectively protect OARs in the treatment of intracranial oligometastases. In clinical practice, the most appropriate technique should be selected based on the features of lesions and treatment goals to achieve individualized treatment.

【Key words】stereotactic radiotherapy; intracranial oligometastases; tomotherapy; volumetric-modulated arc therapy; CyberKnife; dosimetry

脑转移瘤是癌症的一种常见并发症，也是最常见的脑肿瘤类型，约有 10%～26% 的癌症患者在病情终末期会发生脑转移，严重影响患者预后和生活质量[1]。尽管传统全脑放射治疗（whole brain radiation therapy，WBRT）在控制脑转移瘤方面表现出良好的疗效，但其对正常脑组织也会造成伤害，如导致认知功能障碍、记忆力减退等长期副作用[2-3]。这将促使临床治疗策略逐渐从全脑放疗转向更加精准和个性化的放射治疗方式。头部寡转移瘤作为一种特殊的转移形式，通常定义为数量不超过 5 个的颅内转移性病灶，其治疗目标是在最大限度减少正常组织损伤的同时，实现高效的局部控制[4-5]。

近年来，随着放射治疗技术的快速发展，立体定向放射外科（stereotactic radiosurgery，SRS）和分次立体定向放疗（stereotactic fractionated radiotherapy，SFRT）已成为头部寡转移瘤主要治疗选择[6]。这些技术通过高精度的影像引导实现肿瘤的精准定位，将高剂量辐射集中在靶区，同时减少正常组织的受照范围，从而在提高局部控制率的同时减少不良反应[7]。与 SRS 相比，SFRT 在处理体积较大的病灶或靠近重要功能区（如脑干、视神经）病灶时表现出更好的安全性和疗效[8]。在众多先进的放射治疗技术中，螺旋断层放射治疗（tomotherapy，TOMO）、容积旋转调强放疗（volumetric modulated arc therapy，VMAT）和射波刀（cyberknife，CK）是最常应用于临床实践的技术。TOMO 通过 360° 连续螺旋照射，实现靶区的高适形性和均匀性，同时最大限度减少正常组织受照剂量[9]。VMAT 则利用快速旋转的调强照射优化剂量分布，不仅能缩短治疗时间，还通过双弧技术进一步提高了治疗效率[10]。相比之下，CK 以其灵活的非共面照射路径和近乎实时的图像引导系统在复杂靶区治疗中占据优势，可实现高度适形剂量分布和陡峭的剂量梯度[11-12]。这些技术的不断优化，为头部寡转移瘤患者提供了更精准、更安全的治疗选择。

尽管这些技术已广泛应用于临床，但其在颅内寡转移瘤治疗中的剂量学差异尚缺乏系统性比较。本研究旨在通过剂量学评价，系统分析 TOMO、VMAT 和 CK3 种分次立体定向放射治疗技术在剂量分布、正常组织保护和治疗效率方面的差异。为临床医生在制定个性化治疗方案时提供科学依据和参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象

回顾性分析 2021 年 01 月 1 日至 2023 年 12 月 31 日，在陆军军医大学第一附属医院肿瘤科接受分次立体定向放射治疗（fractionated stereotactic radiotherapy，FSRT）的颅内寡转移瘤患者的临床资料。病例纳入标准：①已确诊原发病灶位于颅外恶性肿瘤患者，其临床表现和影像学诊断符合脑转移瘤特征；②脑部 CT 或 MRI 明确显示颅内存在单发或多发转移性病灶；③转移病灶直径<4 cm，且距离危及器官（如脑干、视觉器官）≥5 mm；④颅内多发转移病灶数量≤5 个；⑤病例资料完整，并完成放疗计划。排除标准：①原发病灶位于颅内；②转移病灶直径超过 4 cm；③多发转移病灶数量超过 6 个或出现粟粒样转移；④无完整临床资料或未完成治疗；⑤患者一般情况较差，无法配合或不愿意接受治疗。本研究经陆军军医大学第一附属医院伦理委员会批准并且符合《赫尔辛基宣言》的要求[伦理编号为：(B)KY2024194]。

1.2 样本量估算

为了确保本研究在检测 TOMO、VMAT 和 CK3 组间主要剂量学参数，如靶区适形度指数（CI），差异时具备足够的统计效能，进行了样本量估算。估算基于以下假设和参数：检验水准（α）：0.05（双侧检验）；统计效能（Power，1-β）：0.80；效应大小（Effect Size，f）：中等效应大小（f=0.25）；组数（k）：3（TOMO、VMAT、CK）。样本量计算采用单因素方差分析（One-way ANOVA）模型。根据样本量公式，在 α 为 0.05、效应大小为 0.25、统计效能为 0.80 的条件下，计算总样本量约为 159 例，每组需约 53 例患者。本研究最终共纳入 54 例患

者，符合样本量要求。

1.3 定位机器、计划系统和治疗机器

CT模拟定位使用Philips的Brilliance CT Big Bore大孔径模拟定位CT（荷兰飞利浦公司）。放疗计划设计和治疗设备分别如下：TOMO计划系统为Accuray HT Version 5.1.1.6（美国Accuray公司），治疗设备为Tomotherapy HD。VMAT计划系统为Varian Eclipse 16.1（美国Varian公司），治疗设备为EDGE直线加速器。CK：计划系统为Accuray Precision 3.3.1.2（美国Accuray公司），治疗设备为CyberKnife M6。

1.4 治疗计划设计

本研究共纳入54例经病理学或影像学确诊的颅内寡转移瘤患者。在Varian Eclipse 16.1医生工作站中完成肿瘤靶区的勾画，并在MANTEIA AccContour 3.2软件中勾画危及器官（organs at risk，OARs）。危及器官的定义包括脑干、脊髓、视神经、视交叉、垂体、眼球和晶体等。勾画完成的结构和图像随后被分别传输至TOMO、CK和Varian Eclipse物理师工作站，进行对应治疗技术的放射治疗计划设计。所有病灶的处方剂量统一设定为30 Gy/5次，分别设计基于TOMO、VMAT和CK3种技术的放疗计划，以便后续比较和分析（所有计划仅用于研究，不涉及临床治疗）。为了规避因调强参数设定差异对结果可比性造成的影响，所有计划的设计均由经验丰富且接受过规范培训的放射治疗物理师设计，遵循统一的临床处方剂量要求和危及器官保护标准，通过多次调整和优化调强参数（如优化算法、铅门宽度、调制因子等），确保三种技术在剂量学指标上达到一致优化程度，以减少技术特性差异对结果的干扰[13]。

1.4.1 TOMO计划 TOMO计划使用6 MV-FFF能量，具体参数为：剂量率为860 MU/min，铅门宽度为1 cm，螺距（Pitch）为0.211，计算网格设置为FINE（0.176 cm×0.176 cm），调制因子（modulation factor）为1.2，迭代次数为300次。

1.4.2 VMAT计划 VMAT计划使用6 MV-FFF能量，具体参数为：AXB（Acuros XB）算法，剂量率为1 400 MU/min，布野设计为自动布野，4个全弧（床角0°，小机头30°），计划一致性为所有计划的起始角度、床角和小机头角度都设置相同。

1.4.3 CK计划 使用6MV-FFF能量档，具体参数为：剂量率为1 000 MU/min。算法为FSPB（3D），计划设计使用Head MLC设计，优化目标为在满足100%处方剂量覆盖99%靶区的前提下，尽量减少出束时间。

1.5 剂量学分析方法

在确保3种治疗计划均满足100%处方剂量线覆盖99%的靶区体积、最大点剂量（D_{max}）小于处方剂量的130%条件的前提下进行剂量学分析。使用剂量体积直方图（dose-volume histogram，DVH）和SPSS统计分析软件评估靶区适形度指数（conformity index，CI）、剂量分布均匀性指数（homogeneity index，HI）、危及器官受量、机器总跳数（monitor units，MU）、出束时间等参数。靶区适形度指数（CI）：CI定义为处方剂量分布与靶区形状的适合程度，其取值范围越接近1，表示靶区适形度越好。计算公式如下：$CI=V_{RI}/TV$[13]，其中V_{RI}为规定剂量覆盖的靶区体积，TV为靶区体积。剂量均匀性指数（HI）：HI定义为最大剂量（D_{max}）与处方剂量（D_p）的比值。HI值越接近1，表示剂量分布越均匀，异质性越低。计算公式如下：$HI=D_{max}/D_P$[14]。

1.6 统计学方法

本研究使用SPSS 26.0统计软件（IBM Corp，Armonk，NY，USA）进行数据分析。首先，对各组数据进行正态性检验（Shapiro-Wilk检验）和方差齐性检验（Levene检验）。对于不符合正态分布的连续性变量以中位数/四分位间距[（M_d（P_{25}，P_{75}）]表示。对于不符合正态分布或方差不齐的变量，采用非参数检验方法（Kruskal-Wallis H检验）进行组间比较，并在总体有统计学差异时进行组间两两比较（如Mann-Whitney U检验）。计量资料的组间比较采用独立样本t检验或Mann-Whitney U检验，分类资料则采用卡方检验或Fisher精确概率法。所有检验均为双侧检验，检验水准水平α=0.05。

2 结 果

2.1 患者基线资料

2021年至2023年在陆军军医大学第一附属医院肿瘤科接受分次立体定向放射治疗的54例颅内寡转移瘤患者，年龄37～84岁，原发肿瘤为肺癌、乳腺癌和肾癌。其中单发脑转移28例，多发脑转移26例。肿瘤最大直径<2 cm有29例，≥2 cm有25例（表1）。

表1 54例颅内寡转移瘤患者基本临床特征

项目	例数（%）
性别	
男	37（68）
女	17（32）
年龄（岁）	
<60	27（50）
≥60	27（50）
原发肿瘤	
肺癌	48（89）
乳腺癌	5（9）
肾癌	1（2）
脑转移个数（个）	
1	28（52）
2	6（11）
3	8（15）
>3	12（22）
转移瘤最大直径（cm）	
<2.0	29（54）
≥2.0	25（46）
神经系统症状	
有	42（78）
无	12（22）

2.2　等剂量曲线评估

通过对等剂量曲线图的比较分析，TOMO、VMAT和CK 3种放疗技术均能够满足临床处方剂量要求。靶区剂量分布精确，靶区外的剂量衰减符合临床标准，且处方剂量能够精准覆盖靶区（图1）。

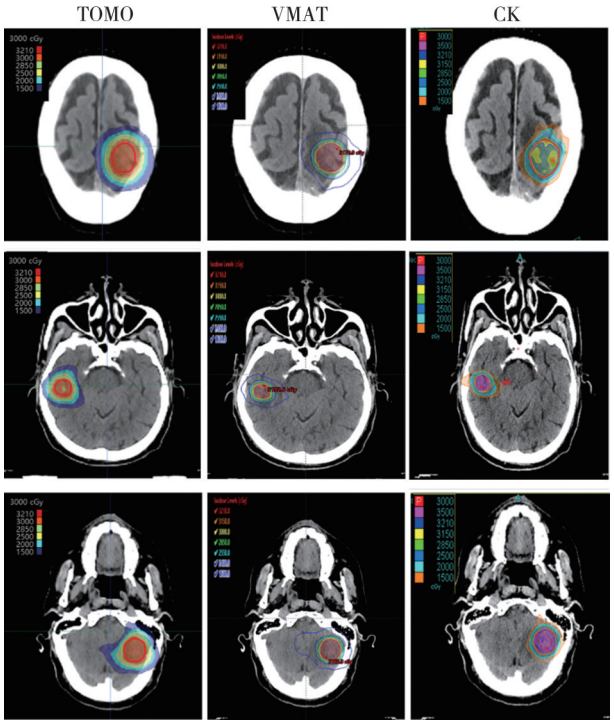


图1　TOMO、VMAT和CK计划在同一轴向平面的剂量分布

2.3　靶区剂量参数和计划执行效率分析

3种技术计划靶区在靶区剂量学参数和计划执行效率方面具有差异。TOMO计划的CI为1.05（1.04，1.07），稍优于VMAT 1.09（1.08，1.11）和CK 1.17（1.15，1.24）（P<0.001），表明TOMO在靶区形状的适配性上表现最佳。VMAT计划的HI为1.15（1.09，1.23），优于CK 1.28（1.21，1.33）和TOMO 1.46（1.36，1.59）（P<0.001），显示其剂量分布均匀性最佳。TOMO计划的MU最高，为8 932（6 165，13 846），CK计划次之，为5 191（2 922，8 361），VMAT计划最低，仅为1 633（1 456，1 855）（P<0.001），表明VMAT在机器剂量执行效率上具有显著优势。VMAT计划出束时间最短，为5 min（4，5），显著优于TOMO[10 min（7，16）]和CK[39 min（35，50）]（P<0.001），显示VMAT在治疗效率上表现最佳（表2~3和图2）。

2.4　危及器官剂量参数比较

3种治疗技术在保护危及器官剂量参数方面表现出不同的特点。CK在晶体保护方面表现最佳，右晶体和左晶体的最大剂量（D_{max}）分别为15（10，26）cGy和17（8，38）cGy，显著低于TOMO和VMAT（P<0.001）。CK在右眼球和左眼球的保护效果优于TOMO，但与VMAT相比差异无统计学意义（右眼球：P=0.163，左眼球：P=0.058）。TOMO在右耳蜗的保护效果最佳，D_{mean}为88（23，526）cGy，明显低于CK（P=0.019）；左耳蜗的保护效果在3种技术间差异无统计学意义（P=0.185）。3种技术在脑干保护方面差异无统计学意义（P=0.282），但TOMO的最大剂量较低，显示出一定优势。VMAT对脊髓的保护效果最佳，D_{max}为31（12，263）cGy，明显低于TOMO和CK（P=0.002）。总体来看，CK在晶体和眼球的保护方面表现突出，TOMO在右耳蜗和脑干保护上具有一定优势，而VMAT在脊髓保护效果上最优。见表4。

表2　3种技术计划靶区剂量参数和计划执行效率比较[M_d（P_{25}，P_{75}）]

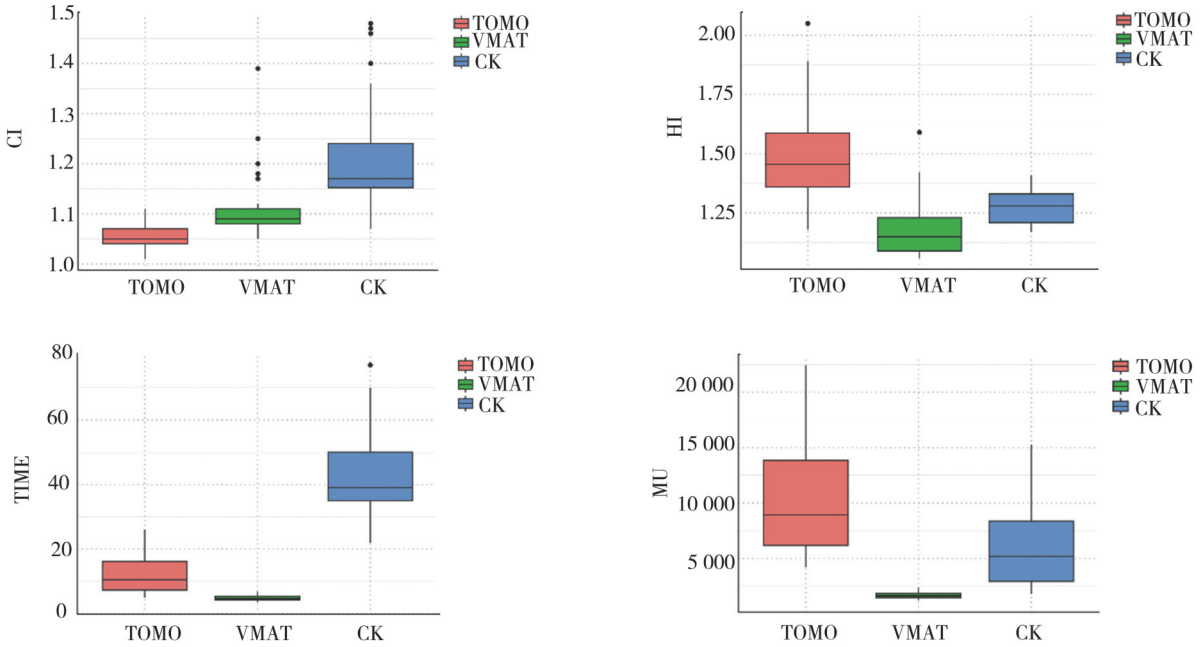
参数	TOMO组（n=54）	VMAT组（n=54）	CK组（n=54）	H值	P值
CI	1.05（1.04，1.07）	1.09（1.08，1.11）	1.17（1.15，1.24）	109.840	<0.001
HI	1.46（1.36，1.59）	1.15（1.09，1.23）	1.28（1.21，1.33）	84.740	<0.001
TIME（min）	10（7，16）	5（4，5）	39（35，50）	138.000	<0.001
MU	8，932（6 165，13 846）	1，633（1 456，1 855）	5，191（2 922，8 361）	113.870	<0.001

注：TOMO，螺旋断层放射治疗；VMAT，容积旋转调强放射治疗；CK，射波刀；CI，适形指数；HI，均匀性指数；TIME，出束时间；MU，机器跳数

表3　3种技术计划靶区剂量参数和计划执行效率比较

参数	P值		
	TOMO vs. VMAT[a]	TOMO vs. CK[b]	VMAT vs. CK[c]
CI	<0.001	<0.001	<0.001
HI	<0.001	<0.001	<0.001
TIME（min）	<0.001	<0.001	<0.001
MU	<0.001	<0.001	<0.001

注：a，TOMO vs. VMAT，P<0.001；b，TOMO vs. CK，P<0.001；c，VMAT vs. CK，P<0.001



注：CI，靶区适形度指数；HI，剂量分布均匀性指数；TIME，出束时间；MU，机器跳数

图2　3种技术计划CI、HI、TIME、MU比较

表4　3种治疗技术计划危及器官剂量参数比较[$M_d(P_{25},P_{75})$]

剂量参数（cGy）	TOMO	VMAT	CK	H值	P值
右晶体 D_{max}	96（30，176）	106（27，211）	15（10，26）	45.11	<0.001
左晶体 D_{max}	98（31，181）	94（31，196）	17（8，38）	40.72	<0.001
右眼 D_{mean}	112（36，191）	93（28，236）	63（27，121）	3.63	0.163
左眼 D_{mean}	130（43，204）	85（32，218）	68（37，115）	5.71	0.058
右耳蜗 D_{mean}	88（23，526）	98（18，476）	253（87，961）	7.92	0.019
左耳蜗 D_{mean}	93（25，537）	81（19，697）	256（42，706）	3.38	0.185
脑干 D_{max}	553（231，1 256）	811（117，1 478）	858（565，1 232）	2.53	0.282
脊髓 D_{max}	55（16，400）	31（12，263）	188（74，494）	12.95	0.002
垂体 D_{max}	303（89，538）	289（53，570）	320（145，638）	0.74	0.691
视交叉 D_{max}	317（68，533）	300（64，468）	368（146，779）	3.06	0.216
右视神经 D_{max}	193（43，404）	139（45，313）	183（50，405）	0.55	0.760
左视神经 D_{max}	214（46，413）	154（45，345）	117（32，295）	1.62	0.445
右海马 D_{50}	255（57，607）	160（44，440）	298（156，485）	4.09	0.129
左海马 D_{50}	282（81，758）	195（55，517）	322（139，483）	2.21	0.331

3　讨　论

立体定向放疗作为脑转移瘤治疗主要手段，在提高患者生存质量和延长生存期方面扮演着至关重要的角色[15]。随着放疗技术不断进步，如何在确保安全性同时提高疗效成为颅内肿瘤放疗首要目标[16]。传统的全脑放射治疗因可能导致严重神经认知功能障碍而受到质疑，尽管放弃全脑放射治疗可以避免这些不良反应，但也可能增加远处脑转移发生风险，从而降低立体定向放疗局部控制效果。在此背景下，如何在不增加毒性的情况下优化立体定向放疗局部疗效，尤其是针对多病灶患者，提高长期生存率，具有重要意义[17-18]。特别是在处理体积较大或邻近关键结构（如脑干、视神经）脑转移瘤时，FSRT表现出更高安全性和疗效，进一步强化了其在临床应用中的价值[19]。

本研究对TOMO、VMAT和CK3种分次立体定向放射治疗技术在颅内寡转移瘤治疗中的剂量学特性和计划执行效率进行了比较分析，旨在为临床

选择最优治疗方案提供科学依据。研究结果显示，3种技术在靶区剂量覆盖、正常组织保护和治疗效率方面各具优势，但也存在明显差异。在靶区剂量覆盖方面，TOMO表现出最佳的适形指数，表明其剂量分布能够更精确地匹配靶区形状，从而在保护周围正常组织的同时实现理想的剂量覆盖。TOMO的高适形性得益于其螺旋式照射模式和精确的调制技术，这与既往研究一致[20-21]。然而，TOMO的均匀性指数较高，提示其剂量分布的均匀性相对较差，这可能与其复杂的调制方式相关[22]。相比之下，VMAT在HI方面表现最优，显示其剂量分布更均匀，可能更适合对剂量均匀性要求较高的病例，如脑转移瘤靠近功能区时的治疗[23]。

正常组织保护结果显示，3种技术在不同危及器官的剂量分布上各有特点。CK因其高度适形多方向非共面照射技术，在保护晶体和眼球等敏感器官方面表现最佳[24-25]。此外，TOMO在脑干和右耳蜗保护上占优，而VMAT则在保护脊髓、视交叉和海马等组织方面效果显著。这与其他研究结果相符，提示在选择治疗技术时，应根据转移病灶的位置及其与危及器官的关系综合考虑，以优化治疗效果并减少不良反应[26]。

在计划执行效率方面，VMAT显示出明显优势，其机器跳数最低，治疗时间最短。这主要归因于VMAT采用的快速旋转弧形调强照射技术，使治疗效率显著提高[27-28]。相比之下，TOMO和CK出束时间较长，特别是CK，可能增加患者不适和治疗中位移风险[29]。然而，CK的高剂量适形性和敏感器官保护能力使其在某些特殊病例中仍具有不可替代的优势[30]。尽管治疗效率是选择放射治疗技术的重要因素，但还需深入探讨其对临床治疗效果和相关并发症的具体影响。如较长治疗时间可能导致患者体位稳定性下降，从而影响剂量分布的准确性，增加正常组织受量的风险。此外，敏感器官的剂量控制在减少并发症（如放射性脑损伤、认知功能障碍）方面可能具有重要意义[31]。因此，通过优化CK出束时间，或结合先进的患者体位管理技术，可在维持其高剂量适形性的同时改善患者体验。对于VMAT技术，其较短的治疗时间虽然提升了治疗效率，但在高复杂性病例中，如何确保敏感器官的剂量分布仍然是一个需要关注的问题。研究表明，通过精确优化照射参数，如旋转弧形的速度和叶片运动的同步性，可以在提高治疗效率的同时保持对靶区的高剂量覆盖和对敏感器官的有效保护[32]。

尽管本研究为3种放疗技术在颅内寡转移瘤治疗中的应用提供了重要参考，但仍存在一些局限性。首先，本研究为单中心回顾性分析，样本量相对有限，可能导致结果不具代表性。其次，治疗计划仅基于剂量学分析，未考虑患者长期随访结果和临床结局差异。此外，计划设计过程中对调强参数的设定可能影响结果的可比性。因此，未来需要多中心研究和长期随访数据，以进一步验证本研究的发现，并优化不同治疗技术的适应证。

综上所述，TOMO、VMAT和CK3种分次立体定向放射治疗技术在治疗颅内寡转移瘤时均表现出良好的剂量学特性，但各有优势和局限。TOMO适形性强，适合复杂形状的病灶和长靶区肿瘤放疗。VMAT均匀性高，治疗效率优越，适合身体机能弱和放疗时间耐受性较差的患者。CK在敏感器官保护方面表现突出，适合治疗位于神经等敏感器官附近的肿瘤，但由于设备昂贵，限制了临床实际推广使用。因此临床应用时需根据患者的具体情况，综合考虑病灶特点、危及器官位置及治疗效率，选择最适宜的治疗方案，以实现精准放射治疗的目标。

参 考 文 献

[1] Nayak L, Lee EQ, Wen PY. Epidemiology of brain metastases[J]. Curr Oncol Rep, 2012, 14(1): 48-54.

[2] Giuseppe ZR, Silvia C, Eleonora F, et al. Hippocampal-sparing radiotherapy and neurocognitive impairment: a systematic literature review [J]. J Cancer Res Ther, 2020, 16(6): 1215-1222.

[3] Yan Q, Li R, Yang JY, et al. Efficacy and safety evaluation of combined therapies incorporating whole-brain radiotherapy in patients with brain metastases: a systematic review and meta-analysis[J]. Clin Transl Oncol, 2024, 26(12): 3020-3036.

[4] Chen H, Louie AV, Higginson DS, et al. Stereotactic radiosurgery and stereotactic body radiotherapy in the management of oligometastatic disease[J]. Clin Oncol, 2020, 32(11): 713-727.

[5] Brown PD, Jaeckle K, Ballman KV, et al. Effect of radiosurgery alone vs radiosurgery with whole brain radiation therapy on cognitive function in patients with 1 to 3 brain metastases: a randomized clinical trial[J]. JAMA, 2016, 316(4): 401-409.

[6] Greenwood H, Hassan J, Fife K, et al. Single-fraction stereotactic ablative body radiotherapy for primary and extracranial oligometastatic cancers[J]. Clin Oncol, 2023, 35(12): 773-786.

[7] Gawish A, Abdulayev N, El-Arayed S, et al. A single-center experience with linear accelerator-based stereotactic radiotherapy for meningiomas: hypofractionation and radiosurgery[J]. J Cancer Res Clin Oncol, 2023, 149(1): 103-109.

[8] de Melo LP, Arruda Viani G, de Paula JS. Radiotherapy for the treatment of optic nerve sheath meningioma: a systematic review and

meta-analysis[J]. Radiother Oncol, 2021, 165: 135-141.

[9] Kraus KM, Kampfer S, Wilkens JJ, et al. Helical tomotherapy: Comparison of Hi-ART and Radixact clinical patient treatments at the Technical University of Munich[J]. Sci Rep, 2020, 10: 4928.

[10] Alsaihaty Z, Abdul Manan H, Sabarudin A, et al. Hybrid treatment planning for chest wall irradiation utilizing three-dimensional conformal radiotherapy (3DCRT), intensity-modulated radiation therapy (IMRT), and volumetric modulated arc therapy (VMAT): a systematic review[J]. Cureus, 2024, 16(5): e59583.

[11] Telentschak S, Ruess D, Grau S, et al. Cyberknife® hypofractionated stereotactic radiosurgery (CK-hSRS) as salvage treatment for brain metastases[J]. J Cancer Res Clin Oncol, 2021, 147(9): 2765-2773.

[12] 陈杰添，程 涛，陈科权，等. 容积调强和射波刀在颅内肿瘤不规则病灶立体定向放疗中对剂量跌落梯度和适形指数的影响[J]. 医药前沿，2023，13(8)：53-55.

Chen JT, Cheng T, Chen KQ, et al. The Influence of Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) and CyberKnife on Dose Gradient and Conformity Index in Stereotactic Radiosurgery for Irregular Intracranial Tumor Lesions[J]. Front. Med, 2023, 13(8): 53-55.

[13] Song YQ, Hong J, Wang JY, et al. Dosimetric comparison of different intensity-modulated radiotherapy techniques for whole-breast irradiation of right-breast cancer[J]. Cancer Radiother, 2023, 27(1): 11-16.

[14] Shaw E, Kline R, Gillin M, et al. Radiation therapy oncology group: Radiosurgery quality assurance guidelines[J]. Int J Radiat Oncol, 1993, 27(5): 1231-1239.

[15] 刘永志，王红旗. 立体定向放疗与全脑放疗对肺癌脑转移瘤近期疗效的影响[J]. 医药论坛杂志，2024，45(13)：1414-1418.

Liu YZ, Wang HQ. Effects of stereotactic radiotherapy and whole brain radiotherapy on short-term efficacy in lung cancer with brain metastases [J]. J Medical Forum, 2024, 45(13): 1414-1418.

[16] 田智峰，杜德希，朱明琪，等. 小细胞肺癌全脑放疗后再发病灶立体定向放疗的临床分析[J]. 实用肿瘤杂志，2023，38(5)：447-455.

Tian ZF, Du DX, Zhu MQ, et al. Clinical analysis of stereotactic radiotherapy for recurrent lesions of small cell lung cancer after whole brain radiotherapy[J]. J Pract Oncol, 2023, 38(5): 447-455.

[17] Li S, Xu S, Li L, et al. Efficacy and safety of EGFR-TKI combined with WBRT *vs*. WBRT alone in the treatment of brain metastases from NSCLC: a systematic review and meta-analysis[J]. Front Neurol, 2024, 15: 1362061.

[18] Palmer JD, Klamer BG, Ballman KV, et al. Association of long-term outcomes with stereotactic radiosurgery vs whole-brain radiotherapy for resected brain metastasis: a secondary analysis of the N107C/CEC. 3 (alliance for clinical trials in oncology/Canadian cancer trials group) randomized clinical trial[J]. JAMA Oncol, 2022, 8(12): 1809-1815.

[19] Patil CG, Pricola K, Sarmiento JM, et al. Whole brain radiation therapy (WBRT) alone versus WBRT and radiosurgery for the treatment of brain metastases[J]. Cochrane Database Syst Rev, 2017, 9: CD006121.

[20] Duma MN, Heinrich C, Schönknecht C, et al. Helical TomoTherapy for locally advanced or recurrent breast cancer[J]. Radiat Oncol, 2017, 12(1): 31.

[21] Peeken JC, Knie C, Kessel KA, et al. Neoadjuvant image-guided helical intensity modulated radiotherapy of extremity sarcomas - a single center experience[J]. Radiat Oncol, 2019, 14(1): 2.

[22] Cavinato S, Fusella M, Paiusco M, et al. Quantitative assessment of helical tomotherapy plans complexity[J]. J Appl Clin Med Phys, 2023, 24(1): e13781.

[23] Ohtakara K, Suzuki K. Determining simple and effective cost functions for an efficient volumetric-modulated arcs-based stereotactic radiosurgery for single brain metastases using Monaco® planning system [J]. Cureus, 2024, 16(9): e70560.

[24] Oshiro Y, Mizumoto M, Kato Y, et al. Single isocenter dynamic conformal arcs-based radiosurgery for brain metastases: Dosimetric comparison with Cyberknife and clinical investigation[J]. Tech Innov Patient Support Radiat Oncol, 2024, 29: 100235.

[25] Demir H, Doğan B, Günbey HP, et al. Predictors of local control after robotic stereotactic radiotherapy for brain metastases: 10-years-experience after Cyberknife installation[J]. ANZ J Surg, 2024, 94(5): 833-839.

[26] Kirova YM, Chargari C, Zefkili S, et al. Could helical tomotherapy do whole brain radiotherapy and radiosurgery?[J]. World J Radiol, 2010, 2(4): 148-150.

[27] 陈知然，王晓红，李向斌，等. 多发脑转移瘤容积旋转调强立体定向放射外科计划对比[J]. 中国医学物理学杂志，2021，38(12)：1482-1486.

Chen ZR, Wang XH, Li XBet al. Comparison of volumetric modulated arc therapy stereotactic radiosurgery plans of multiple brain metastases [J]. Chin J Med Phys, 2021, 38(12): 1482-1486.

[28] 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.

Wei XP, Su JH, Lin CJ, et al. Comparison among 3 different SRS techniques in the treatment of single or multiple brain metastases[J]. Chin J Med Phys, 2022, 39(11): 1329-1333.

[29] Inata H, Tominaga M, Sasaki M, et al. Estimation of imaging intervals and intrafraction displacement in CyberKnife image-guided radiotherapy for intracranial lesions[J]. Med Phys, 2021, 48(12): 7580-7589.

[30] Ohtakara K, Tanahashi K, Kamomae T, et al. Correlation of brain metastasis shrinking and deviation during 10-fraction stereotactic radiosurgery with late sequela: suggesting dose ramification between tumor eradication and symptomatic radionecrosis[J]. Cureus, 2023, 15(1): e33411.

[31] Wang K, Tepper JE. Radiation therapy-associated toxicity: etiology, management, and prevention[J]. CA Cancer J Clin, 2021, 71(5): 437-454.

[32] Tambe Nilesh S, Pires Isabel M, Craig M, et al. Predicting personalised optimal arc parameter using knowledge-based planning model for inoperable locally advanced lung cancer patients to reduce organ at risk doses[J]. Biomed Phys Eng Express, 2021, 7(6): e065016.

（责任编辑：李青颖）

本文引用格式：

冉凤伟，李纪伟，张 康，等. 3种分次立体定向放射治疗技术在颅内寡转移瘤中剂量学研究[J]. 重庆医科大学学报，2025，50(7)：913-919.