

· 论著 · 骨骼肌肉 ·

CK、TOMO、VMAT对恶性肿瘤椎体骨转移患者立体定向放疗剂量分布的影响

段梅艳^{1,*} 陈超² 孙明亮¹

1.河南科技大学第一附属医院肿瘤放疗科(河南 洛阳 471003)

2.河南科技大学第一附属医院功能检查科(河南 洛阳 471003)

【摘要】目的 观察射波刀(CK)、螺旋断层治疗(TOMO)、容积调强弧形治疗(VMAT)对恶性肿瘤椎体骨转移患者立体定向放疗(SRT)剂量分布的影响。方法 回顾性分析2022年7月至2024年12月本院收治的60例恶性肿瘤椎体骨转移患者;用上述3种设备进行SRT计划设计。比较3种设备的SRT剂量分布参数和治疗时间。结果 VAMT的D2%(最大剂量)大于CK、TOMO($P<0.05$),但3种设备间的D98%(最小剂量)、脊髓Dmax无统计学意义($P>0.05$);TOMO的适形度指数(CI)大于CK和VMAT($P<0.05$),CK的均匀性指数(HI)和梯度指数(GI)小于CK和TOMO($P<0.05$);VMAT治疗时间小于TOMO和CK($P<0.05$)。结论 CK、TOMO、VMA均能满足恶性肿瘤椎体骨转移SRT计划设计;同时,CK具有优异的计划分布均匀性和剂量梯度,TOMO具有优异的适形性,VMAT治疗时间较短。

【关键词】恶性肿瘤;椎体骨转移;立体定向放疗;射波刀;螺旋断层治疗;容积调强弧形治疗

【中图分类号】R738.1

【文献标识码】A

DOI:10.3969/j.issn.1009-3257.2025.8.040

Effects of CK, TOMO and VMAT on Dose Distribution of Stereotactic Radiotherapy in Patients with Vertebral Bone Metastases of Malignant Tumors

DUAN Mei-yan^{1,*}, CHEN Chao², SUN Ming-liang¹.

1.Department of Radiation Oncology, The First Affiliated Hospital of Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan Province, China

2.Department of Functional Examination, The First Affiliated Hospital of Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan Province, China

Abstract: Objective To observe the effects of CyberKnife (CK), helical tomography (TOMO), and volumetric-modulated arc radiotherapy (VMAT) on dose distribution of stereotactic radiotherapy (SRT) in patients with vertebral bone metastases of malignant tumors. **Methods** A total of 60 patients with vertebral bone metastases of malignant tumors who were admitted to the hospital from July 2022 to December 2024 were reviewed. Above three devices were used to develop SRT plans. The dose distribution parameters and duration of these SRT plans were compared. **Results** D2% (maximum dose) of VAMT was higher than those of CK and TOMO ($P<0.05$). However, there were no statistically significant differences in D98% (minimum dose) and spinal cord Dmax among the three devices ($P>0.05$). The conformity index (CI) of TOMO was greater than those of CK and VMAT ($P<0.05$). The homogeneity index (HI) and gradient index (GI) were smaller than those of CK and TOMO ($P<0.05$). The duration of VMAT was shorter than that of TOMO and CK ($P<0.05$). **Conclusion** CK, TOMO, and VMA all can meet the SRT plan for vertebral bone metastases of malignant tumors. Moreover, CK can achieve excellent planned distribution uniformity and dose gradient. TOMO has excellent conformity, and the duration of VMAT is relatively shorter.

Keywords: Malignant Tumor; Vertebral Bone Metastasis; Stereotactic Radiotherapy; CyberKnife; Helical Tomography; Volumetric-modulated Arc Radiotherapy

骨转移是恶性肿瘤晚期常见并发症,也是仅次于肺和肝的第3大常见转移部位,其中以椎体骨转移最为常见^[1-2]。研究报道,每年新发骨转移患者超过40万例,且超过70%的恶性肿瘤晚期患者都会发生骨转移,并以男性患者居多^[3];骨转移会导致患者体内肿瘤细胞的扩散,从而释放大量炎症因子,加剧对骨膜的侵犯,引起患者疼痛和骨溶解,而对于骨质疏松患者则可能引发更为严重的病理性骨折、神经压迫等并发症,严重影响了患者的健康和生活质量^[4-5]。目前,放射治疗是骨转移患者的重要治疗方式,且随着医疗技术的不断发展,其治疗机械精度也在不断提高,可用于立体定向放疗(SRT)的手段也越来越多;容积调强弧形治疗(VMAT)可以通过动态旋转模式,自动调节机架角度、速度,二元气动多叶准直器(MLC)叶片位置和剂

量率等多个自由度,从而提高靶区均匀度和适形度,减少治疗时间,提高治疗增益比^[6];螺旋断层治疗(TOMO)是实施全角度照射,且在放疗过程中,机架旋转、加速器脉冲以及MLC的开闭保持一致^[7];射波刀(CK)具有独特的追踪方式和较高的精确度,其精确度可达亚毫米级,且具有灵活的移动性,能从多个方向发射射线,同时具有优越的剂量梯度,安全性高^[8]。故本文比较CK、TOMO、VMAT对恶性肿瘤椎体骨转移患者SRT剂量分布的影响,以为行SRT治疗的恶性肿瘤椎体骨转移患者提供临床依据。

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性分析2022年7月至2024年12月本院收

【第一作者】段梅艳,女,主治医师,主要研究方向:肿瘤学。E-mail: 15137921301@163.com

【通讯作者】段梅艳

治的60例恶性肿瘤椎体骨转移且行SRT患者。60例患者一般资料如下：男性41例、女性19例；年龄18~76岁，平均(47.31±13.29)岁；原发灶来源：肺癌26例，甲状腺癌11例，前列腺癌8例，乳腺癌9例，肝癌3例，其他3例；病变椎体：颈椎11例、胸椎33例、腰椎16例；骨转移类型：溶骨性43例、成骨性17例；放疗前有脊髓11例；放疗范围：整个椎体35例、部分椎体25例；放疗前疼痛情况：无9例、轻度12例、中度30例、重度9例。本研究通过伦理审批。

纳入标准：经病理学诊断为恶性肿瘤，且经CT/MRI影像资料佐证发生骨转移；行SRT治疗者；年龄≥18岁；生存周期大于6个月；临床资料完整；患者或家属均自愿签署知情同意书。排除标准：骨转移手术患者；合并其他恶性肿瘤；既往有放疗史者；合并精神疾病者。

1.2 方法 (1)患者取仰卧位，颈椎段使用头颈热塑膜固定，胸腰骶段用真空垫和热塑膜固定。然后使用Hispeed型CT机(美国Ge公司)进行扫描，层厚1.5mm，电压120kV，扫描范围为病灶部位上下15cm；结束后，患者均行常规MRI(飞利浦，Ingenia 3.0 T)扫描，范围同CT扫描，层厚1.5mm。扫描结束后将图像传输至计划系统，两扫描图像手动融合。

(2)靶区勾画：根据融合图像，按照北美肿瘤放射协作组(RTOG)椎体骨转移SRT靶区勾画指南进行勾画^[9]。大体肿瘤体积(GTV)和临床靶体积(CTV)包括临床及影像学所见肿瘤范围、可疑脊髓信号、亚临床播散病灶；尽量将脊髓排除在CTV外；考虑到实验的严谨性，将CTV向上、下、左、右均扩展3 mm作为计划靶体积(PTV)，PTV包括GTV以及CTV，排除脊髓^[10]。

(3)靶区和危及器官(OAR)剂量限值：GTV处方剂量为12Gy×2次。D_{98%}(最小剂量)>95%处方剂量，D_{2%}(最大剂

量)<110%处方剂量(处方剂量为95%PTV剂量)；脊髓D_{max}≤17 Gy，马尾D_{max}≤20 Gy^[11]。

(4)设备：各设备资料见表1。

1.3 剂量评估 为了缩小不同计划系统之间的误差，将所有检测结果导入同一软件。靶区剂量评估参数^[12]包括CTV、PTV、适形度指数(CI)、均匀性指数(HI)、梯度指数(GI)、脊髓D_{maxo}。HI=(D_{2%}~D_{98%})/D_{50%}；CI=(TVRI/TV)×(TVRI/VRI)；GI=50%处方剂量包绕体积/100%处方剂量包绕体积。PTV覆盖率在95%以上。各参数意义见表2。

1.4 统计学方法 数据采用SPSS 26.0进行分析，计量资料用($\bar{x} \pm s$)表示，t检验，3组设备间参数使用SNK-q检验。检验水准α=0.05。

2 结果

2.1 60例患者的PTV及GTV 骨转移发生在颈椎、胸椎及腰椎部位间的PTV及GTV均有统计学意义(P<0.05)；且骨转移发生在腰椎部位患者的PTV及GTV最大。

2.2 3种设备的Dx比较 3种设备间的D_{2%}有统计学意义(P<0.05)，且VAMT的D_{2%}大于CK、TOMO(P<0.05)；但3种设备间的D_{98%}、脊髓D_{max}无统计学意义(P>0.05)。见表4。

2.3 3种设备的CI、HI、GI比较 3种设备间的CI、HI、GI均有统计学意义(P<0.05)，且TOMO的CI大于CK和VMAT(P<0.05)，CK的HI和GI小于VMAT和TOMO(P<0.05)。见表5。

2.4 3种设备的治疗时间比较 VMAT治疗时间平均为(5.03±0.67)min，TOMO治疗时间平均为(9.27±1.53)min，CK治疗时间平均为(26.61±6.69)min；3种设备间的治疗时间有统计学意义(P<0.05)。

表1 设备资料

设备	公司	治疗方式	计划系统	剂量算法	模式
CK	美国Accuray	脊柱追踪	Multipan5.2.1	蒙特卡罗算法模型	直线加速器
TOMO	美国Accuray	-	DEM5.0.6	convolution superposition算法模型	动态准直器技术、螺旋强调模式
VMAT	美国医科达公司	-	Monaco	各向异性分析算法	6 MV X线不带均整过滤器模式

表2 各参数意义

参数	意义
TV	靶区体积
TVRI	处方剂量包绕的靶体积
VRI	处方剂量包绕的所有体积
CI	越接近于1，适形性越好
HI	越大，计划分布均匀性越差

表3 60例患者的PTV及GTV[(cm³)，例(%)]

部位	例数	PTV	GTV
颈椎	11(18.33)	18.75±2.23	28.69±3.01
胸椎	33(55.00)	23.34±2.61	32.78±4.14
腰椎	16(26.67)	26.25±3.37	34.28±4.11
F值		23.875	6.791
P值		0.000	0.000

表4 3种设备的Dx比较(Gy)(n=60)

	D _{2%}	D _{98%}	脊髓D _{max}
CK	23.52±0.39	23.71±0.65	17.57±3.59
TOMO	24.09±0.47 ^a	23.86±0.76	16.85±3.41
VMAT	25.11±0.87 ^{ab}	23.97±0.93	18.31±3.76 ^b
F值	10.167	1.644	2.482
P值	0.000	0.196	0.087

注：与CK相比，^aP<0.05；与TOMO相比，^bP<0.05。

表5 3种设备的CI、HI、GI比较

	CI	HI	GI
CK	0.72±0.04	0.04±0.01	4.08±0.51
TOMO	0.74±0.04 ^a	0.06±0.02 ^a	5.21±0.66 ^a
VMAT	0.68±0.05 ^{ab}	0.09±0.02 ^{ab}	8.76±0.93 ^{ab}
F值	5.249	11.255	26.277
P值	0.000	0.000	0.000

注：与CK相比，^aP<0.05；与TOMO相比，^bP<0.05。

3 结 果

骨转移是恶性肿瘤常见现象,其转移途径多为血行播散,研究发现,超过70%的恶性肿瘤患者都会出现骨转移,且接近40%的肿瘤死亡患者其骨转移都发生在脊柱,并以腰胸椎最为常见^[13]。骨转移会对椎体造成破坏,从而造成椎体不稳定,引发患者出现一系列背部疼痛,且肿瘤病灶还可导致神经压迫,甚至造成瘫痪,严重影响了患者的健康和生活质量^[14]。放疗作为恶性肿瘤的治疗手段之一,且随着其影像引导技术的日益进步,其治疗机械精度也在不断提高,能够减少正常组织受到照射带来的伤害,更好地保障了重要器官的安全,

故SRT被逐渐应用于恶性肿瘤骨转移的治疗^[15]。CK、TOMO、VMAT均具有椎体SRT能力,但各有优缺点,无具体选择指导方针,故本文比较CK、TOMO、VMAT对恶性肿瘤椎体骨转移患者SRT剂量分布的影响。

研究结果显示,骨转移发生在颈椎、胸椎及腰椎部位间的PTV及GTV均有统计学意义,且骨转移发生在腰椎部位患者的PTV及GTV最大;说明与骨转移发生在颈椎、胸椎相比,发生在腰椎部位时,患者的肿瘤体积和计划靶体积较大。分析原因可能是腰椎部位具有丰富的组织结构,其血供相对丰富,为肿瘤的生长提供了充足的营养和氧气,故腰椎部位的肿瘤体积相对较大,且在制定放疗计划时,为了确保治疗有效性,故需要设定更大的PTV来覆盖整个肿瘤及其可能扩散的区域^[16]。

3种设备的SRT剂量分布结果显示,3种设备间的D_{2%}、D_{50%}及CI、HI、GI有统计学意义,且VAMT的D_{2%}、D_{50%}大于CK、TOMO,TOMO的CI大于CK和VMAT、脊髓D_{max}小于CK和VMAT,CK的HI和GI小于VMAT和TOMO;说明在SRT计划中,CK有优异的计划分布均匀性和剂量梯度,原因可能是CK系统使用先进的图像引导技术,能够精确地定位肿瘤靶区,确保了照射剂量的精确性和准确性,从而提高了计划分布的均匀性,并且CK系统通过等中心或非等中心多野聚焦方式,使得剂量可以高度集中于靶区,同时迅速递减至靶区外,从而实现了优异的剂量梯度^[17];TOMO具有优异的适形性,且能够减少对正常组织的损伤,原因可能是TOMO系统通过在线成像系统确定肿瘤位置,然后对患者实施全角度精准照射,这种照射方式可以确保放射线高度适形地覆盖肿瘤靶区,同时减少对正常组织的照射^[18];VAMT具有较高的最大覆盖剂量,原因可能是VAMT具有较高的剂量率,在相同的时间内可以向肿瘤靶区传递更多的反辐射能量,从而提高治疗效果^[19]。3种设备的治疗时间结果显示,VMAT治疗时间平均为(5.03±0.67)min,显著小于TOMO和CK的治疗时间;说明VMAT具有治疗时间较短的优势。

综上所述,CK、TOMO、VMA均能满足恶性肿瘤椎体骨转移SRT计划设计,且都能最大限度地减少对正常组织的损伤;同时,CK具有优异的计划分布均匀性和剂量梯度,TOMO具有优异的适形性,VMAT治疗时间较短;故临床上,可以根据患者的靶区特点选择SRT系统。

参考文献

- [1] Aljabab S, Vellayappan B, Vandervoort E, et al. Comparison of four techniques for spine stereotactic body radiotherapy: dosimetric and efficiency analysis[J]. J Appl Clin Med Phys, 2018, 19(2): 160-167.
- [2] 刘莹, 杨沛, 么倩文, 等. 中西医结合治疗椎体骨转移瘤临床效果及有效率分析[J]. 医学食疗与健康, 2021, 19(25): 40-41.
- [3] Hernandez R K, Wade S W, Reich A, et al. Incidence of bone metastases in patients with solid tumors: analysis of oncology electronic medical records in the United States[J]. BMC Cancer, 2018, 18(1): 44.
- [4] Wang G, Chen J, Ma R, et al. Effects of zoledronic acid and ibandronate in the treatment of cancer pain in rats with lung cancer combined with bone metastases[J]. Oncol Lett, 2018, 16(2): 1696-1700.
- [5] 李凡, 张誉, 汤雷. 唑来膦酸联合化疗治疗恶性肿瘤椎体转移伴病理性骨折高风险患者的临床价值[J]. 颈腰痛杂志, 2021, 42(4): 470-473.
- [6] 王宇, 吴文, 许敬辉, 等. 脑胶质瘤共面、非共面容积旋转调强及螺旋断层放射治疗技术的剂量学比较研究[J]. 中国医学装备, 2018, 15(2): 47-50.
- [7] 肖月, 邱英鹏, 史黎炜, 等. 螺旋断层放射治疗系统在我国公立医院应用现状分析[J]. 中国医学装备, 2020, 17(12): 8-12.
- [8] 吴拾瑶, 曾昭冲, 朱文超, 等. 射波刀治疗肝细胞癌的影像引导定位追踪研究进展[J]. 中国临床医学, 2024, 31(3): 508-513.
- [9] Stroom J C, Heijmen B J. Geometrical uncertainties, radiotherapy planning margins, and the ICRU-62 report[J]. Radiother Oncol, 2002, 64(1): 75-83.
- [10] 赵彪, 袁美芳, 马立双, 等. 胸中段食管癌sIMRT、VMAT、TOMO三种放疗技术靶区和危及器官剂量学研究[J]. 现代肿瘤医学, 2022, 30(13): 2424-2428.
- [11] 岳丹, 李新迪, 全晓月, 等. 肿瘤椎体骨转移立体定向放疗计划在3种设备的剂量分布比较[J]. 中华转移性肿瘤杂志, 2022, 5(3): 245-249.
- [12] 黎国全, 胡斌, 张甜, 等. 基于VMAT与CK-6D Skull技术多发脑转移瘤立体定向放疗方案综合评价[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2020, 29(10): 833-836.
- [13] Lawton A J, Lee K A, Cheville A L, et al. Assessment and management of patients with metastatic spinal cord compression: a multidisciplinary review[J]. J Clin Oncol, 2019, 37(1): 61-71.
- [14] 纪经涛, 胡永成, 苗军. 3D打印人工椎体在胸腰椎肿瘤整块切除后重建中的应用[J]. 中华骨科杂志, 2020, 40(4): 208-216.
- [15] Yu T, Choi C W, Kim K S. Treatment outcomes of stereotactic ablative radiation therapy for non-spinal bone metastases: focus on response assessment and treatment indication[J]. Br J Radiol, 2019, 92(1099): 20181048.
- [16] 袁建军, 刘岩, 李广, 等. 脊柱转移性肿瘤治疗方式的研究进展[J]. 山东医药, 2023, 63(10): 109-112.
- [17] 李君, 刘旭红, 王工, 等. 手臂位置对射波刀放射治疗脊柱肿瘤患者的剂量学影响[J]. 北京大学学报(医学版), 2022, 54(1): 182-186.
- [18] 张伟, 冯鑫, 张彦新, 等. TOMO与C型臂加速器在头颈部肿瘤放疗中的摆位误差分析[J]. 医疗卫生装备, 2022, 43(7): 51-54, 72.
- [19] 郭兴照, 刘静, 王刚, 等. 基于EBCT皮肤剂量在均整和非均整模式头颈部肿瘤放疗中的剂量学研究[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2024, 31(18): 1131-1136, 1145.

(收稿日期: 2024-12-12)

(校对编辑: 江丽华、赵望淇)