

TOMO 技术在鼻窦癌术后放疗中的剂量学研究

戴许豪, 姜亚洲, 李珍, 李杰, 任江平, 杨继明, 周瑛瑛, 王俭, 邱昌晓, 姜鹏荣

【摘要】目的 比较 C 型臂加速器 (Trilogy)、环型加速器 (Halcyon) 和螺旋断层放疗系统 (TOMO) 在鼻窦癌放疗计划中的剂量学差异。**方法** 收集 2018 年 5 月至 2024 年 1 月宁波大学附属第一医院收治的 10 例鼻窦癌患者。分别设计非共面固定野调强 (NC-IMRT)、容积弧形调强 (VMAT) 和 TOMO 放疗计划, 比较靶区和危及器官 (OARs) 的剂量学差异。**结果** 3 种技术均能满足靶区 95% 覆盖剂量要求。在靶区均匀度 (HI) 和适形度 (CI) 评估中, TOMO 计划 PGTV_70CI、PGTV_70HI 及 PTV_60HI 均优于 NC-IMRT 计划和 VMAT 计划 (均 $P < 0.05$)。NC-IMRT 技术和 VMAT 技术 PGTV_70CI 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$); 在 OARs 保护上, TOMO 对晶体、脑干、患侧视神经、患侧眼角膜及脊髓等器官保护明显优于其他两种技术 (均 $P < 0.05$)。**结论** TOMO 在鼻窦癌放疗中具有显著的剂量学优势, 在靶区剂量均匀性和 OARs 保护上表现突出。

【关键词】 鼻窦癌; 非共面固定野调强放疗; 环型加速器; TOMO 断层螺旋治疗; 剂量学差异

doi:10.3969/j.issn.1671-0800.2025.03.011

【中图分类号】 R730.55 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1671-0800(2025)03-0261-03

鼻窦癌 (sinus carcinoma, SNCs) 是一种罕见的异质性疾病, 约占所有头颈部肿瘤的 5%, 发病率为 0.556/10 万人^[1]。鼻腔离颅腔很近, 肿瘤常浸润到眼睛、视神经和脑干等关键器官。近年来常采用鼻腔镜微创手术, 在保持外观的基础上, 提高其生活质量^[2-3]。SNCs 术后常需放疗 (radio therapy, RT)^[4-5], 在过去的十年中, 随着放疗设备的不断发展, 头颈部肿瘤的疗效有了显著的改善, 鼻窦恶性肿瘤患者预后改善显著^[6]。头颈部肿瘤因放疗诱导的白内障、放射性角膜炎、失明、眼干等毒性反应发生概率和严重程度与辐射剂量相关^[7-8]。本研究旨在通过探讨螺旋断层放疗系统 (TOMO) 治疗、环型加速器 (Halcyon) 容积调强放疗 (VMAT) 和常规 C 型臂加速器 (Trilogy) 非共面固定野调强放疗 (NC-IMRT) 在鼻窦癌术后放疗中的应用, 分析 3 种放疗技术在靶区均匀性、适形性及对危及器官 (OARs) 最大剂量和平均剂量等方面的剂量学差异, 现报道如下。

作者单位: 315010 宁波, 宁波大学附属第一医院 (戴许豪、李杰、任江平、杨继明、周瑛瑛、姜鹏荣); 宁波明州医院 (姜亚洲、王俭、邱昌晓); 中山市人民医院 (李珍)

通信作者: 姜鹏荣, Email: lou10554@163.com

1 资料与方法

1.1 一般资料 回顾性选取 2018 年 5 月至 2024 年 1 月在宁波大学附属第一医院接受鼻腔及副鼻窦癌术后放疗的 SNCs 患者 10 例, 其中男 7 例, 女 3 例; 年龄 44 ~ 90 岁, 中位年龄 60.8 岁。其中低分化鳞癌 4 例, 腺癌 3 例, 淋巴上皮癌 1 例, 恶性黑色素瘤 1 例, 嗅神经母细胞瘤 1 例。本研究获得宁波大学附属第一医院医学伦理委员会批准, 豁免/免除知情同意。

1.2 方法

1.2.1 CT 扫描和靶区勾画 所有患者在仰卧位下进行 CT 扫描, 使用个性化热塑性面罩五点固定, 采用荷兰 Philips Brilliance Big Bore CT 扫描仪进行 3 mm 层厚的薄层 CT 扫描, 扫描范围从顶点至锁骨头水平, 并将扫描数据传输至 Eclipse 放疗计划系统 (TPS)。为每位患者勾画计划靶区 (PTV)。高危临床靶区 (CTV-HR) 定义为阳性切缘或切除腔外扩 5 ~ 10 mm; 低风险临床靶区 (CTV-LR) 根据 SNCs 的自然病程 (包括颅底浸润、神经、肌肉、孔隙及鼻窦) 定义, 覆盖疾病可能的微观扩散范围。CTV-HR 和 CTV-LR 分别外扩 3 mm, 生成 PGTV_70 和 PTV_60。处方剂量: 70 Gy 至 PGTV_70, 60 Gy 至

PTV₆₀,共 30 次分割,5 次/周分割治疗。并勾画以下 OARs:眼球、晶状体、角膜、视神经、视交叉、脊髓及脑干等。在必要时,OARs 周围增加 2 mm 边缘,创建计划风险器官体积(PRV)。将影像数据传输至 Halcyon、Trilogy 和 TOMO 计划系统进行放疗计划设计。

1.2.2 计划设计与评估 NC-IMRT 计划设计在美国 Varian 公司 C 型臂加速器(Trilogy)上执行,采用 6MV FF 束流,配备 Millennium 120 多叶光栅(MLC),最大剂量率 600 MU/min。由于常规 IMRT 计划难以满足 SNCs 治疗中晶体、视神经等器官临近靶区的需求,NC-IMRT 通过优化准直器方向与角度避开敏感器官,同时确保靶区获得足够剂量^[9]。使用 7 个共面野和 2 个非共面矢状面射野(调整转床角度为 90°,机架角在 320°~360°)。VMAT 计划设计在 Varian 环型加速器(Halcyon)上进行,采用 6MV FFF 束流,配备双层堆叠 MLC,最大剂量率 800 MU/min,设计使用两个动态弧(2 arc)。TOMO 计划设计在 Accuray 螺旋断层放疗设备上执行,采用兆伏级束流,配备气动多叶准直器,最大剂量率 834 MU/min。射野宽度设为 1.048 cm,剂量计算网格设为 Fine,螺距比 Pitch 为 0.287,调制因子不固定,采用 360°旋转治疗方式。3 种计划均使用相同的剂量约束条件,并将剂量归一至 PGTV₇₀,确保 95%的靶区体积得到覆盖。

1.3 观察指标 靶区剂量评估:分为均匀性指数(HI)和适形度指数(CI)。HI=(D2%-D98%)/D 处方剂量,D2%为靶区 2%体积所照射的剂量,D98%为靶区 98%体积所照射的剂量。CI=(VT_{ref}×VT_{ref})/(V_{ref}×VT),其中 VT_{ref}为处方剂量等剂量线包绕靶区体积,V_{ref}为处方剂量等剂量线包绕的体积,VT 为靶区体积。在 HI 的评估中 PTV₆₀ 评估需要生成一个 PTV 扣除 PGTV 外扩 3 mm 的亚靶区结构 P60。HI 值越小,则靶区剂量均匀性越好;CI 越接近 1,则表示靶区剂量分布越适形。OARs 的剂

量评估包括患侧晶体、健侧晶体、患侧角膜、健侧角膜、患侧视神经、健侧视神经、视交叉、脊髓及脑干的剂量。评估眼球的平均剂量。

1.4 统计方法 采用 SPSS 27.0 统计学软件对数据进行分析。计量资料以均数±标准差表示,采用方配对样本 t 检验。P < 0.05 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区评估 3 种调强技术均满足处方剂量覆盖 95%靶区体积的要求。TOMO 计划在 PGTV₇₀CI、PGTV₇₀HI 及 PTV₆₀HI 均优于 NC-IMRT 和 VMAT 计划(t≥3.74,均 P < 0.05)。NC-IMRT 和 VMAT 计划 PGTV₇₀CI 差异有统计学意义(t=3.17, P > 0.05),见表 1。

2.2 OARs 评估 TOMO 在晶体、脑干、患侧视神经、患侧眼球、角膜及脊髓保护上有明显优势(t≥2.44,均 P < 0.05)。VMAT 技术在患侧晶体、健侧视神经、脊髓以及患侧角膜保护上优于 NC-IMRT 技术(t≥2.41,均 P < 0.05)。3 种技术在健侧眼球平均剂量上差异无统计学意义(P > 0.05),见表 2。

3 讨论

鼻窦腔的解剖特征使肿瘤在早期易被误诊为炎症,通常在中晚期才被发现。SNCs 通常位于晶状体和角膜、视神经等重要 OARs 附近,放疗计划的制定面临较大挑战。研究表明,晶状体平均剂量达到 8 Gy 时,患者的泪膜破裂时间和睑板腺损伤会显著变化^[10],放射性角膜损伤可能导致视力受损甚至失明;因此,晶状体和角膜的保护在鼻窦癌放疗中至关重要。Kim 等^[11]发现 TOMO 在视神经保护上的剂量均匀性优于传统静态调强放疗(S-IMRT)。本研究显示,TOMO 在晶状体和角膜等 OARs 的保护上显著优于 VMAT 和 NC-IMRT,与上文研究结论相符。这得益于 TOMO 的螺旋断层放疗模式,能更精确地

表 1 3 种调强技术在鼻腔鼻窦癌计划中靶区的剂量学差异

参数	TOMO	NC-IMRT	VMAT	Gy
PGTV-70HI	0.057±0.017	0.087±0.025	0.089±0.021	
PGTV-70CI	0.890±0.038	0.810±0.051	0.830±0.039	
PTV-60HI	0.088±0.032	0.149±0.032	0.151±0.028	
PTV-60CI	0.775±0.065	0.799±0.061	0.817±0.064	

注:TOMO 为螺旋断层放疗系统,NC-IMRT 为非共面固定野调强放疗,VMAT 为容积弧形调强放疗

表2 3种调强技术在鼻腔鼻窦癌计划中OARs的剂量学差异

参数	TOMO	NC-IMRT	VMAT
患侧晶体 Dmax	6.41±1.80	10.74±4.70	8.85±3.18
健侧晶体 Dmax	5.17±1.05	8.24±1.20	7.76±0.66
视交叉 Dmax	46.75±4.53	54.54±2.93	53.63±2.84
患侧视神经 Dmax	53.54±4.40	57.06±4.53	56.40±3.81
健侧视神经 Dmax	50.30±3.68	49.96±3.37	53.61±1.67
脑干 Dmax	44.66±10.36	51.69±2.57	49.96±9.94
脊髓 Dmax	30.28±10.64	40.15±7.89	38.02±9.68
患侧角膜 Dmax	11.87±3.77	20.83±3.13	16.67±4.68
健侧角膜 Dmax	10.66±2.75	15.97±2.91	16.45±4.36
患侧眼球 Dmean	13.64±4.84	19.72±5.72	17.63±5.74
健侧眼球 Dmean	11.25±2.88	14.83±6.81	13.81±4.55

注: TOMO 为螺旋断层放疗系统, NC-IMRT 为非共面固定野调强放疗, VMAT 为容积弧形调强放疗

控制剂量分布, 避免对 OARs 的过度照射。NC-IMRT 技术通过转床和机头角度调整避开 OARs, 较普通的共面固定野调强技术能减少 OARs 的照射剂量, 但在本研究与 TOMO 及 VMAT 相比, 在靶区适形度、均匀度和 OARs 保护上未显示显著优势^[12]。VMAT 技术在本研究中也表现出了一定的优势, 特别是配备有 MLC 的 Halcyon 在危机器官保护方面, 与现有文献中 VMAT 较普通 3DCRT 改善局部控制和生存率的结果一致^[13]。

同时, 本研究存在样本量较小, 可能导致结果不够精确。未来应进行前瞻性、多中心的大样本研究, 进一步验证结果并探索不同调强放疗技术在不同类型鼻窦癌中的效果。

综上所述, TOMO 技术在鼻窦癌术后放疗中展现出显著的剂量学优势, 尤其在 OARs 保护、靶区剂量均匀性和适形度方面优于 VMAT 和 NC-IMRT。

利益冲突 所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明 戴许豪: 实验设计、文章撰写; 任江平: 研究指导; 李杰: 数据统计分析; 姜亚洲、王俭、邱昌晓: TOMO 计划制定与数据收集; 李珍: Halcyon VMAT 计划制定与数据收集; 周璞瑛、杨继明: Trilogy NC-IMRT 计划制定与数据收集; 娄鹏荣: 论文审阅、经费支持

参 考 文 献

[1] THAWANI R, KIM M S, ARASTU A, et al. The contemporary management of cancers of the sinonasal tract in adults[J]. CA Cancer J Clin, 2023, 73(1): 72-112.
 [2] FERELLA L, CAVALLO A, MICELI R, et al. Prognostic role of primary tumor, nodal neck, and retropharyngeal GTVs for unresectable sinonasal cancers treated with IMRT and chemotherapy[J]. Tumori, 2020, 106(1): 39-46.

[3] SU S Y, KUPFERMAN M E, DEMONTE F, et al. Endoscopic resection of sinonasal cancers[J]. Curr Oncol Rep, 2014, 16(2): 369.
 [4] FERRARI M, ORLANDI E, BOSSI P. Sinonasal cancers treatments: State of the art[J]. Curr Opin Oncol, 2021, 33(3): 196-205.
 [5] ALFOUZAN A F. Radiation therapy in head and neck cancer[J]. Saudi Med J, 2021, 42(3): 247-254.
 [6] ORLANDI E, CAVALIERI S, GRANATA R, et al. Locally advanced epithelial sinonasal tumors: The impact of multimodal approach[J]. Laryngoscope, 2020, 130(4): 857-865.
 [7] SHARMA R K, IRACE A L, SCHLOSSER R J, et al. Conditional and overall disease-specific survival in patients with paranasal sinus and nasal cavity cancer: Improved outcomes in the endoscopic era[J]. Am J Rhinol Allergy, 2022, 36(1): 57-64.
 [8] AKAGUNDUZ O O, YILMAZ S G, TAVLAYAN E, et al. Radiation-induced ocular surface disorders and retinopathy: Ocular structures and radiation dose-volume effect[J]. Cancer Res Treat, 2022, 54(2): 417-423.
 [9] 杨继明, 陆婷, 马敏, 等. 三种固定野调强计划在鼻腔及鼻窦肿瘤放疗中的对比研究[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2022, 42(12): 950-957.
 [10] SUJITHRA H, SHAH K N, ANOOP R, et al. Ocular surface changes in patients who have undergone head and neck radiation therapy[J]. Indian J Ophthalmol, 2024, 72(Suppl 4): S669-S675.
 [11] KIM S, LEE I J, KIM Y B, et al. A comparison of treatment plans using linac-based intensity-modulated radiation therapy and helical tomotherapy for maxillary sinus carcinoma[J]. Technol Cancer Res Treat, 2009, 8(4): 257-263.
 [12] SMYTH G, EVANS P M, BAMBER J C, et al. Recent developments in non-coplanar radiotherapy[J]. Br J Radiol, 2019, 92(1097): 20180908.
 [13] FREDERIC-MOREAU T, PIRAML, BELLINIR, et al. Postoperative volumetric modulated arc therapy for sinonasal cancer: Improved survival compared with 3D conformal radiation therapy[J]. Head Neck, 2019, 41(2): 448-455.

收稿日期: 2024-12-20
 (本文编辑: 吴迪汉)