

基于Halcyon 3.0医用直线加速器的早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤放疗剂量学与放射诱发二次癌风险

肖鹏¹, 徐婷婷², 孙甫³, 涂宏蕾¹, 田秀梅¹, 柳先锋¹

1. 重庆大学附属肿瘤医院肿瘤放射治疗中心, 重庆 400030; 2. 丰都县人民医院肿瘤血液科, 重庆 408200; 3. 重庆市渝北区人民医院肿瘤血液科, 重庆 401102

【摘要】目的:评估Halcyon 3.0医用直线加速器在早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤调强放射治疗(IMRT)中的剂量学特性及放射诱发二次癌风险。**方法:**回顾性纳入22例早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤患者,为每例患者均设计基于Varian Edge和Halcyon 3.0平台的固定野IMRT计划,分别为IMRT(Edge)与IMRT(Halcyon)。评估两组计划在靶区覆盖质量和危及器官受照剂量的差异,并采用超额绝对风险(EAR)模型对口咽、甲状腺及双侧唾液腺的放射所致二次癌风险进行量化比较。**结果:**与IMRT(Edge)相比,IMRT(Halcyon)在靶区剂量分布上表现出更优的均匀性(降低8.51%, $P=0.018$),但其适形度稍逊(降低1.70%, $P=0.011$)。在危及器官保护方面,IMRT(Halcyon)显著降低视交叉、视神经、眼球、晶状体、脊髓和脑干的受量(降幅5.22%~33.42%, $P<0.01$)。然而,该计划也导致双侧腮腺平均剂量显著增加(左侧增加32.71%,右侧增加36.13%, $P<0.001$)。值得注意的是,IMRT(Halcyon)还显著提高所有评估器官的二次癌风险,口咽、甲状腺、左侧唾液腺和右侧唾液腺的EAR值分别增加17.47%、53.42%、51.75%和55.23%($P<0.001$)。**结论:**Halcyon 3.0平台在早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤放疗中表现出更优的靶区剂量均匀性和对多数危及器官的保护能力,但也存在腮腺受量增加和远处危及器官二次癌风险升高的问题。

【关键词】鼻腔NK/T细胞淋巴瘤;调强放射治疗;放疗剂量;二次癌风险

【中图分类号】R318;R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2026)06-0710-06

Radiotherapy dosimetry and secondary radiation-induced cancer risk for early-stage nasal NK/T-cell lymphoma treated with the Halcyon 3.0 medical linear accelerator

XIAO Peng¹, XU Tingting², SUN Fu³, TU Honglei¹, TIAN Xiumei¹, LIU Xianfeng¹

1. Department of Radiation Oncology, Chongqing University Cancer Hospital, Chongqing 400030, China; 2. Department of Oncology and Hematology, Fengdu General Hospital, Chongqing 408200, China; 3. Department of Oncology, the People's Hospital of Yubei District of Chongqing City, Chongqing 401102, China

Abstract: Objective To evaluate the dosimetric characteristics and secondary radiation-induced cancer risk in patients with early-stage nasal NK/T-cell lymphoma receiving intensity-modulated radiotherapy (IMRT) delivered on the Halcyon 3.0 medical linear accelerator. **Methods** A retrospective study was conducted on 22 patients with early-stage nasal NK/T-cell lymphoma. For each patient, fixed-field IMRT plans were created on both Varian Edge and Halcyon 3.0 platforms, denoted IMRT (Edge) and IMRT (Halcyon), respectively. Differences in target coverage and organ-at-risk (OAR) doses were evaluated. An excess absolute risk (EAR) model was applied to quantify and compare secondary cancer risks for the oropharynx, thyroid, and bilateral salivary glands. **Results** Compared with IMRT (Edge), IMRT (Halcyon) demonstrated superior target dose homogeneity (reduced by 8.51%, $P=0.018$), though with slightly inferior conformity (reduced by 1.70%, $P=0.011$). Regarding OAR sparing, IMRT (Halcyon) significantly reduced doses delivered to the optic chiasm, optic nerves, ocular globes, lenses, spinal cord, and brainstem, with reductions ranging from 5.22% to 33.42% ($P<0.01$). However, it also led to a significant increase in the mean dose to the bilateral parotid glands, with increases of 32.71% in the left parotid and 36.13% in the right parotid ($P<0.001$). Notably, IMRT (Halcyon) significantly elevated secondary cancer risks across all

【收稿日期】2025-12-27

【基金项目】国家自然科学基金(82203821);重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0587);重庆市科研机构绩效激励引导专项(cstc2019jxjl130031)

【作者简介】肖鹏,技师,研究方向:放射治疗技术,E-mail: xiaopeng135@cqu.edu.cn

【通信作者】柳先锋,高级工程师,研究方向:放射治疗物理,E-mail: liuxianfeng@cqu.edu.cn

evaluated organs, with EAR values rising by 17.47% for the oropharynx, 53.42% for the thyroid, 51.75% for the left salivary gland, and 55.23% for the right salivary gland ($P<0.001$). **Conclusion** The Halcyon 3.0 platform provides superior target dose homogeneity and better protection for most OAR in radiotherapy for early-stage nasal NK/T-cell lymphoma. However, it is associated with increased parotid gland doses and elevated secondary cancer risks in distant OAR.

Keywords: nasal NK/T-cell lymphoma; intensity-modulated radiotherapy; radiotherapy dosimetry; secondary cancer risk

前言

鼻腔NK/T细胞淋巴瘤是一种具有显著地域分布特征的恶性肿瘤,在东亚、墨西哥及中南美洲人群中发病率较高,约占所有原发性非霍奇金淋巴瘤的2%~10%^[1-3]。多数患者因局部症状早期就诊并获得及时诊断,约80%的病例在确诊时处于疾病早期^[4]。放疗是目前早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤的标准治疗方式,可显著改善患者的总生存率^[2,5]。然而,放疗后局部复发率仍较高,达41%~50%,5年总生存率普遍低于50%^[3]。有研究显示治疗失败主要与射野设计不合理及靶区剂量不足密切相关^[3,6]。因此,优化放疗策略已成为提升治疗效果的重要途径。

近年来,美国Varian公司新型O型环加速器系统Halcyon逐渐投入临床使用。该系统采用无均整器束流模式,取消传统钨门结构,并配备新型双层高速低漏射多叶准直器,在提升治疗效率和剂量传递方面具备潜在优势。目前,多种先进放疗技术,如调强放射治疗(IMRT)、容积旋转调强放疗(VMAT)和螺旋断层放疗(TOMO),已应用于该病的治疗,致力于优化靶区覆盖、保护危及器官、提高肿瘤控制率并减少治疗相关并发症。不同技术在剂量分布、器官保护及实施效率方面存在差异,射野外剂量分布亦有所不同^[3,7]。尽管放疗可有效杀灭肿瘤细胞,但其对周围正常组织的辐射损伤不容忽视。治疗相关的第二恶性肿瘤是重要的远期不良反应,尤其值得关注^[8,9]。随着患者生存期不断延长,二次肿瘤风险已成为临床管理的核心问题之一,尤其对于预期生存期较长的年轻患者,需全面评估此类风险^[10-11]。Schneider^[12-13]提出的超额绝对风险(EAR)模型为评估正常组织在放疗中受到的辐射所致二次癌风险提供有效工具。因此,基于上述风险与评估手段,系统评估早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤放疗中的二次癌风险尤为重要。

在早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤放疗中,基于Halcyon平台的IMRT在剂量学特性及正常器官二次癌风险方面尚缺乏系统评估,与其它高端平台的比较研究仍有待深入。本研究旨在对比基于Varian Halcyon与Edge平台的IMRT在早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤治疗中的计划质量和正常器官二次癌风险,以期为该病个体化放疗策略的选择提供循证依据。

1 资料与方法

1.1 病例选择

回顾性纳入22例在重庆大学附属肿瘤医院接受根治性放疗的早期(IE~IIE期)鼻腔NK/T细胞淋巴瘤患者的临床及影像资料。所有患者均经病理组织学确诊,且治疗前增强CT、MRI或PET-CT评估确认无远处转移灶。入组患者均未接受过既往放射治疗,年龄23~69岁,中位年龄46.68岁。

1.2 模拟定位

所有患者均采用飞利浦Brilliance大孔径CT模拟定位机(荷兰飞利浦公司)进行图像采集。患者取仰卧位,采用热塑膜固定头部及肩部,以最大限度减少治疗过程中的体位移动。CT扫描层厚设置为3 mm,扫描范围自锁骨下缘至颅顶,以确保完整覆盖靶区及周边危及器官。

1.3 靶区和危及器官定义

所有患者的靶区及危及器官勾画均在Varian Eclipse治疗计划系统(版本15.6,美国瓦里安医疗系统公司)中完成。大体肿瘤体积(GTV)包括影像学可见的原发肿瘤病灶及经MRI、CT或内镜与体格检查确认的转移淋巴结。临床靶体积(CTV)在GTV基础上向外扩展,涵盖肿瘤可能侵犯的亚临床播散区域及邻近高危淋巴引流区。为补偿治疗摆位误差,计划靶体积(PTV)为CTV外放3 mm生成。全部患者的PTV体积平均为257.48 cm³(范围:145.2~471.3 cm³)。

危及器官勾画严格依据相关共识指南进行,包括双侧晶状体、眼球、视神经、视交叉、脑干、脊髓、腮腺、唾液腺、口咽及甲状腺等关键正常结构。所有勾画工作由同一位资深放射治疗医师完成,并由另一位高年资医师审核,以最大限度保证勾画轮廓的一致性与准确性。

1.4 放疗计划设计

对本研究纳入的22例患者,分别基于Varian Halcyon 3.0和Varian Edge平台,在Eclipse 15.6治疗计划系统(Varian Medical Systems, Palo Alto, CA, USA)中设计固定野IMRT计划,并分别命名为IMRT(Halcyon)和IMRT(Edge)。所有计划均采用6 MV FFF X射线。其中,IMRT(Halcyon)计划设置的剂量率为800 MU/min,射野角度统一为255°、290°、325°、0°、

35°、70°和105°。计划优化均采用光子优化(Photon Optimizer, PO)算法进行逆向优化,并使用各向异性分析算法(Anisotropic Analytical Algorithm, AAA)进行最终剂量计算。Halcyon系统每次治疗前必须实施图像引导验证,支持千伏级锥形束CT(kV-CBCT)和兆伏级锥形束CT(MV-CBCT),其中MV-CBCT须参与计划的剂量计算。本研究采用低剂量5 MU MV-CBCT进行扫描,其视野范围以计划等中心为基准,头脚方向覆盖14 cm,左右方向覆盖28 cm。IMRT(Edge)计划在射野角度、优化算法与剂量计算算法等核心参数方面均与IMRT(Halcyon)计划保持一致,以确保计划比较的可比性。

所有计划的处方剂量均设置为50 Gy,分25次完成,2 Gy/次。计划评价标准要求100%的处方剂量至少覆盖95%以上的PTV,同时限制PTV内接受>107.5%以上处方剂量的百分体积不超过2%。为保障剂量学比较的一致性,所有计划均以100%的处方剂量覆盖95%的PTV为条件进行归一化处理。危及器官的剂量约束均参考临床共识与相关指南设定并做适度修改,具体如下:眼睛、视神经、视交叉和脑干的最大剂量(D_{\max})需限制在50 Gy以内;脊髓的 D_{\max} 不得超过45 Gy;晶状体的 D_{\max} 限值为10 Gy。此外,腮腺的平均剂量(D_{mean})应低于26 Gy,而唾液腺、口咽及甲状腺的 D_{mean} 均需控制在40 Gy以内。

1.5 剂量学评估指标

对全部44个放疗计划的剂量体积直方图数据进行系统分析,靶区剂量评估指标包括:PTV的 $D_{2\%}$ (近似最大剂量)、 $D_{98\%}$ (近似最小剂量)及 D_{mean} ;冷点体积(PTV内接受剂量低于93%处方剂量的体积百分比,该值通常要求小于1%);均匀性指数[HI,反映靶区内剂量波动,计算公式为 $(D_{5\%}-D_{95\%})/D_{\text{mean}}$];以及适形度指数[CI,采用Paddick $CI=(TV_{\text{PIV}})^2/(TV \times PIV)$ 评估靶区剂量适形度,CI越接近1表明适形性越好]。其中, $D_{5\%}$ 表示5%的靶体积所接受的最低剂量, $D_{95\%}$ 为95%的靶体积所接受的最低剂量; TV_{PIV} 定义为达到处方剂量要求的靶体积,TV是计划靶体积,PIV则为接受不少于95%处方剂量的所有组织体积。危及器官的评估包括晶状体、眼球、视神经、腮腺、视交叉、脊髓和脑干。对各危及器官均记录其 D_{\max} 和 D_{mean} ,以全面评估不同计划对正常组织的保护效果,并为临床剂量限制符合性提供依据。

1.6 二次癌风险预估模型

根据Schneider等建立的EAR模型,对入组患者的特定危及器官发生二次癌的长期风险进行预估。该模型整合放射生物学响应、剂量体积直方图数据及患者特定因素,旨在量化辐射诱导的致癌风险,具

体通过以下数学框架实现:

$$EAR^{\text{org}} = \frac{1}{V_T} \sum V(D_i) \beta_{\text{EAR}} \text{RED}(D_i) \mu(x, a) \quad (1)$$

其中, V_T 代表所评估器官的总体积; $V(D_i)$ 表示接受剂量为 D_i 的器官体积,该参数从剂量体积直方图中导出; β_{EAR} 为低剂量区中剂量反应曲线的斜率参数,其数值大小反映该器官的平均辐射敏感程度; $\text{RED}(D_i)$ 函数用于描述分次照射中细胞杀伤及修复效应的生物学效应剂量,其定义为:

$$\text{RED}(D_i) = \frac{e^{-\alpha D_i}}{\alpha' R} \left(1 - 2R + R^2 e^{\alpha' D_i} - (1-R)^2 e^{-\frac{\alpha' R}{1-R} D_i} \right) \quad (2)$$

其中, R 为组织再殖/修复参数,表征在分次照射间隔中细胞的修复能力; α' 是修正后的线性系数,其表达式为:

$$\alpha' = \alpha + \beta d = \alpha + \beta D_i / D_T d_T \quad (3)$$

其中, D_T 和 d_T 分别为靶区的处方总剂量和单次分割剂量。

此处,函数 $\mu(x, a)$ 用于对年龄及暴露年龄进行修正,其形式为:

$$\mu(x, a) = e^{[\gamma_e(x-30) + \gamma_a \ln(a/70)]} \quad (4)$$

其中, γ_e 和 γ_a 是年龄修正参数,分别为暴露年龄与到达年龄的修正参数,用于调整不同年龄群体对辐射致癌敏感性的差异。

本研究对口咽、甲状腺及双侧唾液腺等器官的辐射诱导二次癌风险进行评估。在构建EAR模型时,所涉及器官的 α 及 α/β 取值均引自己发表的文献[14-17]。由于目前尚无研究明确报道甲状腺的 R 值,本研究依据既往方法论^[18],将该值假设为0.5,以代表中等修复能力。模型中所使用的其余参数均参照已有文献推荐的数值^[14]。全部参数取值见表1。

表1 EAR模型中使用的所有参数

Table 1 Parameters used in the EAR model

危及器官	β_{EAR}	γ_e	γ_a	a	α/β	R
口咽	0.56	-0.024	2.38	0.043	10	0.97
甲状腺	1.20	-0.046	0.60	0.033	3	0.50
左唾液腺	0.56	-0.024	2.38	0.087	3	0.23
右唾液腺	0.56	-0.024	2.38	0.087	3	0.23

1.7 统计学分析

采用SPSS25.0统计软件包(IBM, USA)进行数据分析。计量资料以均数±标准差表示,组间比较采用配对 t 检验。 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 靶区和危及器官剂量学比较

典型病例的剂量体积直方图比较如图1所示,揭示两组计划在剂量分布上的关键差异。靶区的剂量学比较结果见表2。与IMRT(Edge)计划相比,IMRT

(Halcyon)计划在多项指标上表现出显著差异:其靶区 $D_{2\%}$ 、 D_{mean} 和 CI 分别轻微降低 0.48%、0.33% 和 1.70%。同时,IMRT(Halcyon)的 HI 显著改善,降幅达 8.51%。另一方面,IMRT(Halcyon)计划的靶区 $D_{98\%}$ 略高于 IMRT(Edge),轻微增加 0.37%。

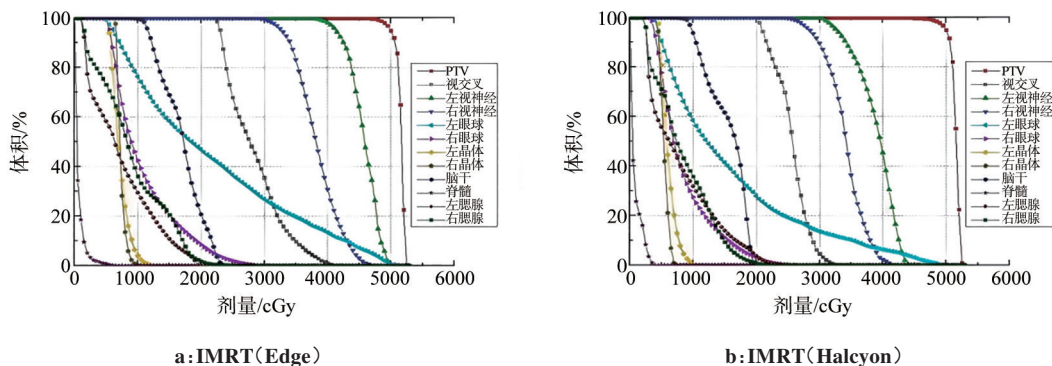


图1 典型病例的剂量体积直方图比较

Figure 1 Dose-volume histogram comparison for a representative case

表2 靶区的剂量学比较($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Dosimetric comparison results for the target volumes (Mean±SD)

剂量指标	IMRT(Edge)	IMRT(Halcyon)	P值
$D_{98\%}/Gy$	49.00±0.23	49.18±0.19	0.003
$D_{2\%}/Gy$	52.55±0.46	52.30±0.17	0.016
D_{mean}/Gy	51.51±0.25	51.34±0.12	0.004
冷点体积/%	0.195±0.185	0.242±0.285	0.524
CI	0.883±0.014	0.868±0.019	0.011
HI	0.047±0.008	0.043±0.003	0.018

表3列出危及器官的剂量学比较结果。与IMRT(Edge)相比,IMRT(Halcyon)在多数危及器官的保护方面展现出显著优势:视交叉的 D_{max} 与 D_{mean} 分别降低 9.41% 与 6.97%;左、右视神经的 D_{max} 和 D_{mean} 也均显著下降(降幅 5.22%~9.86%);双侧眼球的 D_{mean} 降幅超过 13%;双侧晶状体的 D_{max} 及 D_{mean} 更降低逾 20%;脊髓的 D_{max} 显著下降 33.42%;脑干的 D_{max} 和 D_{mean} 也分别降低 17.95% 和 9.14%。然而,与上述趋势相反的是,IMRT(Halcyon)计划也导致双侧腮腺的 D_{mean} 显著上升:左、右腮腺的 D_{mean} 分别增加 32.71% 与 36.13%。

2.2 危及器官二次癌风险比较

表4展示 IMRT(Edge) 与 IMRT(Halcyon) 两种放疗计划在口咽、甲状腺及双侧唾液腺中 EAR 值的比较结果。与 IMRT(Edge) 计划相比,IMRT(Halcyon)

表3 危及器官的剂量学比较($Gy, \bar{x} \pm s$)

Table 3 Dosimetric comparison results for the organs-at-risk (Gy, Mean±SD)

危及器官	剂量指标	IMRT(Edge)	IMRT(Halcyon)	P值
视交叉	D_{max}	44.43±6.66	40.25±8.18	<0.001
	D_{mean}	30.43±7.20	28.31±6.28	0.001
左视神经	D_{max}	50.12±1.14	47.27±4.92	0.009
	D_{mean}	42.78±2.96	39.23±4.79	<0.001
右视神经	D_{max}	49.00±4.12	46.44±4.51	<0.001
	D_{mean}	40.28±3.83	36.31±5.24	<0.001
左眼球	D_{max}	50.30±2.44	50.29±2.14	0.985
	D_{mean}	22.01±3.38	18.40±4.60	<0.001
右眼球	D_{max}	47.55±5.47	47.42±6.04	0.762
	D_{mean}	19.97±3.94	17.23±5.31	<0.001
左晶体	D_{max}	11.37±1.51	9.08±1.64	<0.001
	D_{mean}	8.06±0.94	6.10±0.67	<0.001
右晶体	D_{max}	10.68±1.93	8.54±2.04	<0.001
	D_{mean}	8.00±0.84	5.95±0.79	<0.001
脑干	D_{max}	32.03±7.99	26.28±7.91	<0.001
	D_{mean}	18.82±3.58	17.10±4.38	0.001
脊髓	D_{max}	16.25±11.84	10.82±9.13	<0.001
	D_{mean}	1.56±1.45	1.55±1.21	0.957
左腮腺	D_{max}	24.49±9.71	23.61±7.6	0.333
	D_{mean}	5.84±5.53	7.75±4.40	<0.001
右腮腺	D_{max}	24.42±10.05	23.81±7.76	0.556
	D_{mean}	5.84±6.30	7.95±5.27	<0.001

计划在所有评估器官中均显示出EAR值的显著升高:口咽部位的EAR值增加17.47%,甲状腺部位的EAR提高53.42%,左、右侧唾液腺的EAR值分别增加51.75%和55.23%。

表4 两种放疗计划的EAR值比较结果($\bar{x}\pm s$)
Table 4 Comparison of EAR values between the two radiotherapy plans (Mean \pm SD)

危及器官	IMRT(Edge)	IMRT(Halcyon)	P值
口咽	3.091 \pm 2.047	3.631 \pm 2.051	<0.001
甲状腺	0.161 \pm 0.111	0.247 \pm 0.152	<0.001
左唾液腺	0.570 \pm 0.236	0.865 \pm 0.373	<0.001
右唾液腺	0.554 \pm 0.224	0.860 \pm 0.374	<0.001

3 讨论

鉴于目前关于Halcyon 3.0平台的IMRT在正常组织中诱发二次癌风险的系统性研究仍较为有限,深入探讨基于该平台的IMRT技术在早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤治疗中的剂量学表现及其对正常器官的远期放射致瘤效应具有重要意义。本研究通过对比基于Varian Halcyon 3.0与Edge平台的IMRT计划在靶区覆盖、危及器官受量与二次癌风险方面的差异,旨在为临床个体化放疗方案的选择提供剂量学与远期风险权衡方面的循证依据。

新型O型环加速器系统Halcyon通过采用无均整器束流、摒弃传统钨门及配置双层高速多叶光栅等创新设计,在优化靶区覆盖质量和减少危及器官受量方面展现出显著潜力。本研究结果显示基于Halcyon的IMRT计划在靶区覆盖方面具有优势,具体表现为更高的 $D_{98\%}$ 、更低的 $D_{2\%}$ 及更优的HI,同时在多数危及器官的保护中也表现更佳。这些发现与既往头颈部肿瘤研究结果一致,先前研究表明与传统C型臂加速器相比,基于Halcyon的IMRT在满足临床靶区剂量要求的同时,能够更好地保护靶区周围的正常组织,特别是在眼部等重要器官中表现出明显优势^[19-20]。这种剂量学优势主要归因于其先进的双层多叶准直器系统。与传统C型臂加速器的单层多叶光栅相比,Halcyon的多叶光栅系统在叶片半影、透射率、漏射率和运行速度等关键参数上具有更优性能,从而实现更精准的剂量分布和更好的危及器官保护效果^[20-22]。

本研究观察到基于Halcyon的IMRT计划导致远离靶区的双侧腮腺 D_{mean} 显著增加。该现象主要源于治疗过程中每日MV-CBCT图像引导所产生的额外剂量累积。为量化MV-CBCT所致额外剂量的具体

影响,李阔等^[19]开展研究并证实在计入该累积剂量后,左侧腮腺 D_{mean} 增加8.81%($P=0.144$),右侧腮腺 D_{mean} 亦增加6.90%($P<0.001$)。一项系统比较研究显示,Halcyon所采用的MV-CBCT的成像累积剂量显著高于TrueBeam系统所配置的kV-CBCT^[23]。由此可见,尽管单次MV-CBCT扫描剂量仅约5 MU,其在整个疗程中的多次累积仍会显著提升相关危及器官的总体受照水平^[19]。必须指出,尽管每日图像引导对于确保治疗摆位精度具有不可替代的临床价值,但其引入的低剂量辐射亦不容忽视,这不仅可能加重正常组织损伤风险,也可能潜在地提高远期放射相关二次癌的发生概率。

评估放疗相关二次癌风险的重要性,随着癌症患者生存期的延长而日益凸显。现有临床证据表明,既往接受放疗的患者,其二次癌发生率显著升高,且多发生于曾接受全剂量或中低剂量(2~50 Gy)照射的邻近组织^[24-25]。尤其对于甲状腺等辐射敏感器官,儿童及年轻人群的致癌剂量阈值可低至0.05 Gy^[25]。因此,放疗中野外剂量分布,特别是辐射敏感器官所在区域的剂量分布,应予以高度重视。不容忽视的是,治疗设备中射线散射与漏射所产生的野外剂量可能诱发二次癌症,其风险与设备物理特性密切相关^[26]。Halcyon 3.0所配备的双层高速多叶光栅在危及器官保护方面具备优势,然而该平台强制采用的每日MV-CBCT扫描所带来的累积成像剂量,仍会显著增加相关器官的二次癌风险。本研究结果证实,与Edge平台相比,基于Halcyon 3.0的IMRT计划导致所有评估器官(口咽、甲状腺及双侧唾液腺)的二次癌风险均显著升高。

本研究存在一定局限性,包括回顾性研究可能存在偏倚、样本量有限,以及二次癌风险评估依赖于商用治疗计划系统与预测模型。当前这些系统和模型仍存在固有局限,故相关风险评估结论需谨慎解读。此外,MV-CBCT的实际剂量贡献尚需通过更精确的体模测量或蒙特卡罗模拟进一步量化。

4 结论

Halcyon 3.0平台凭借其硬件优势,在早期鼻腔NK/T细胞淋巴瘤IMRT中展现出优异的靶区剂量学结果和危及器官保护效果。然而,其集成式MV-CBCT影像引导策略所带来的累积剂量不可忽视,可导致腮腺 D_{mean} 升高以及口咽、甲状腺与唾液腺区域的二次癌风险增加。在临床采用该技术时,应在充分肯定其剂量学优势的基础上,综合评估其影像引导所引入的长期潜在风险,尤其对于生存期较长的年轻患者。

【参考文献】

- [1] Wu X, Li P, Zhao J, et al. A clinical study of 115 patients with extranodal natural killer/T-cell lymphoma, nasal type[J]. Clin Oncol, 2008, 20(8): 619-625.
- [2] Au WY, Weisenburger DD, Intragumtornchai T, et al. Clinical differences between nasal and extranasal natural killer/T-cell lymphoma: a study of 136 cases from the International Peripheral T-Cell Lymphoma Project[J]. Blood, 2009, 113(17): 3931-3937.
- [3] Liu XF, Huang EL, Wang Y, et al. Dosimetric comparison of helical tomotherapy, VMAT, fixed-field IMRT and 3D-conformal radiotherapy for stage I-II nasal natural killer T-cell lymphoma[J]. Radiat Oncol, 2017, 12(1): 76.
- [4] Ma XJ, Guo Y, Pang ZQ, et al. A randomized phase II study of CEOP with or without semustine as induction chemotherapy in patients with stage IE/IIIE extranodal NK/T-cell lymphoma, nasal type in the upper aerodigestive tract[J]. Radiother Oncol, 2009, 93(3): 492-497.
- [5] Huang MJ, Jiang Y, Liu WP, et al. Early or up-front radiotherapy improved survival of localized extranodal NK/T-cell lymphoma, nasal-type in the upper aerodigestive tract[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 70(1): 166-174.
- [6] Isobe K, Uno T, Tamaru J, et al. Extranodal natural killer/T-cell lymphoma, nasal type: the significance of radiotherapeutic parameters [J]. Cancer, 2006, 106(3): 609-615.
- [7] Shen QW, Ma XJ, Hu WG, et al. Intensity-modulated radiotherapy versus three-dimensional conformal radiotherapy for stage I-II natural killer/T-cell lymphoma nasal type: dosimetric and clinical results[J]. Radiat Oncol, 2013, 8: 152.
- [8] Deasy JO, Moiseenko V, Marks L, et al. Radiotherapy dose-volume effects on salivary gland function[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 76(Suppl 3): S58-S63.
- [9] Toda K, Shibuya H, Hayashi K, et al. Radiation-induced cancer after radiotherapy for non-Hodgkin's lymphoma of the head and neck: a retrospective study[J]. Radiat Oncol, 2009, 4: 21.
- [10] Grantzau T, Mellekjær L, Overgaard J. Second primary cancers after adjuvant radiotherapy in early breast cancer patients: a national population based study under the Danish Breast Cancer Cooperative Group (DBCG)[J]. Radiother Oncol, 2013, 106(1): 42-49.
- [11] Bartkowiak D, Humble N, Suhr P, et al. Second cancer after radiotherapy, 1981-2007[J]. Radiother Oncol, 2012, 105(1): 122-126.
- [12] Schneider U. Modeling the risk of secondary malignancies after radiotherapy[J]. Genes (Basel), 2011, 2(4): 1033-1049.
- [13] Schneider U. Mechanistic model of radiation-induced cancer after fractionated radiotherapy using the linear-quadratic formula[J]. Med Phys, 2009, 36(4): 1138-1143.
- [14] Schneider U, Zwahlen D, Ross D, et al. Estimation of radiation-induced cancer from three-dimensional dose distributions: concept of organ equivalent dose[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2005, 61(5): 1510-1515.
- [15] Pedicini P, Nappi A, Strigari L, et al. Correlation between EGF α expression and accelerated proliferation during radiotherapy of head and neck squamous cell carcinoma[J]. Radiat Oncol, 2012, 7: 143.
- [16] Bakhshandeh M, Hashemi B, Mahdavi SR, et al. Normal tissue complication probability modeling of radiation-induced hypothyroidism after head-and-neck radiation therapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2013, 85(2): 514-521.
- [17] Murdoch-Kinch CA, Kim HM, Vineberg KA, et al. Dose-effect relationships for the submandibular salivary glands and implications for their sparing by intensity modulated radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2008, 72(2): 373-382.
- [18] Zwahlen DR, Bischoff LI, Gruber G, et al. Estimation of second cancer risk after radiotherapy for rectal cancer: comparison of 3D conformal radiotherapy and volumetric modulated arc therapy using different high dose fractionation schemes[J]. Radiat Oncol, 2016, 11(1): 149.
- [19] 李阔, 李成强, 祝婷, 等. Halcyon在30例鼻咽癌固定野调强计划中计划质量研究[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2021, 28(8): 612-615.
- Li K, Li CQ, Zhu T, et al. Dosimetric study of nasopharyngeal carcinoma based on Halcyon accelerator fixed field inverse intensity modulation plan [J]. Chinese Journal of Cancer Prevention and Treatment, 2021, 28(8): 612-615.
- [20] 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.
- Yang JM, Lu T, Ma M, et al. Comparison of three fixed-field IMRT plans for nasal cavity and paranasal sinus tumors[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2022, 42(12): 950-957.
- [21] 魏夏平, 苏洁洪, 黄小伟, 等. 基于Halcyon加速器的乳腺癌IMRT计划设计方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(7): 817-822.
- Wei XP, Su JH, Huang XW, et al. IMRT planning for breast cancer based on Halcyon accelerator[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2022, 39(7): 817-822.
- [22] Li TR, Scheuermann R, Lin A, et al. Impact of multi-leaf collimator parameters on head and neck plan quality and delivery: a comparison between HalcyonTM and Truebeam[®] treatment delivery systems[J]. Cureus, 2018, 10(11): e3648.
- [23] Huang YL, Du Y, Li CG, et al. Pediatric cone beam CT on Varian Halcyon and TrueBeam radiotherapy systems: radiation dose and positioning accuracy evaluations [J]. J Radiol Prot, 2019, 39(3): 739-748.
- [24] Berrington de Gonzalez A, Gilbert E, Curtis R, et al. Second solid cancers after radiation therapy: a systematic review of the epidemiologic studies of the radiation dose-response relationship [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2013, 86(2): 224-233.
- [25] Liu XF, Wu FR, Guo QS, et al. Estimation of radiotherapy modalities for patients with stage I-II nasal natural killer T-Cell lymphoma [J]. Cancer Manag Res, 2019, 11: 7219-7229.
- [26] Joosten A, Bochud F, Baechler S, et al. Variability of a peripheral dose among various linac geometries for second cancer risk assessment [J]. Phys Med Biol, 2011, 56(16): 5131-5151.

(编辑:黄开颜)