

一种基于Halcyon加速器的共面容积旋转调强海马保护全脑放疗计划

方雅岚¹, 邓官华², 唐冉³, 蓝茂英⁴, 罗日顺⁵

1. 中山大学肿瘤防治中心门诊部, 广东 广州 510060; 2. 南方医科大学附属广东省人民医院(广东省医学科学院)放疗科, 广东 广州 510080; 3. 广州医科大学附属惠州医院放疗科, 广东 惠州 516000; 4. 广州医科大学附属第一医院放疗科, 广东 广州 510163; 5. 广东三九脑科医院肿瘤综合诊疗中心, 广东 广州 510510

【摘要】目的:比较瓦里安Halcyon、TrueBeam和联影uRT-506c加速器在海马保护全脑放疗中的剂量学差异。**方法:**选取15例已接受过海马保护全脑放疗的患者进行回顾性分析。分别采用Halcyon、TrueBeam和uRT-506c加速器模型设计共面双弧容积旋转调强放疗(VMAT)计划, 准直器角度分别为23°和293°。根据海马位置, 将全脑靶区拆分成3个子结构(zPTV_up、zPTV_mid和zPTV_down), 给予不同权重参数优化。记录并分析3组计划的靶区(PTV)剂量学参数、危及器官受量和机器跳数的差异。**结果:**所有患者的VMAT计划均能满足临床治疗标准。Halcyon计划的PTV $D_{2\%}$ 、 $V_{30\text{Gy}}$ 和HI, 海马 $D_{100\%}$ 、 D_{mean} 和 D_{max} , 晶体和视神经的 D_{max} , 均优于TrueBeam和uRT-506c计划, 差异有统计学意义($P<0.05$)。**结论:**Halcyon直线加速器在保护海马的全脑放疗中具有更优的剂量分布和可靠的计划计算结果, 环形机架既保证了高效的执行效率, 又展示出了精准放疗的优势, 具有不错的临床应用前景。

【关键词】Halcyon加速器; 海马保护; 全脑放疗; 容积旋转调强

【中图分类号】R318; R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2026)07-0841-06

Coplanar volumetric modulated arc therapy plan for hippocampal avoidance whole-brain radiotherapy implemented on a Halcyon linear accelerator

FANG Yalan¹, DENG Guanhu², TANG Ran³, LAN Maoying⁴, LUO Rishun⁵

1. Outpatient Department, Sun Yat-sen University Cancer Center, Guangzhou 510060, China; 2. Department of Radiation Oncology, Guangdong Provincial People's Hospital (Guangdong Academy of Medical Sciences), Southern Medical University, Guangzhou 510080, China; 3. Department of Radiation Oncology, the Affiliated Huizhou Hospital of Guangzhou Medical University, Huizhou 516000, China; 4. Department of Radiation Oncology, the First Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510163, China; 5. Department of Oncology, Guangdong Sanjiu Brain Hospital, Guangzhou 510510, China

Abstract: Objective To compare the dosimetric differences among Varian Halcyon, TrueBeam, and United Imaging uRT-506c linear accelerator in hippocampal avoidance whole-brain radiotherapy. **Methods** A retrospective analysis was conducted on 15 patients who had previously received hippocampal avoidance whole-brain volumetric modulated arc therapy (VMAT). Dual-arc coplanar VMAT plans were created using the Halcyon, TrueBeam, and uRT-506c accelerator models, with collimator angles of 23° and 293°, respectively. Based on the position of the hippocampus, the whole-brain target volume was divided into 3 substructures (zPTV_up, zPTV_mid, and zPTV_down), each optimized using different weight factors. The dosimetric parameters of the planning target volume, organ-at-risk doses, and monitor unit in the 3 groups were recorded and analyzed. **Results** VMAT plans for all patients satisfied clinical treatment criteria. Halcyon plans were superior to True Beam and uRT-506c plans in the $D_{2\%}$, $V_{30\text{Gy}}$, and HI of planning target volume, the $D_{100\%}$, D_{mean} , and D_{max} of the hippocampus, as well as the D_{max} of the lens and optic nerves, with statistically significant differences ($P<0.05$). **Conclusion** For hippocampus avoidance whole-brain radiotherapy, the Halcyon linear accelerator delivers superior dose distribution and robust plan calculation results, and its ring gantry ensures efficient treatment delivery while highlighting the strengths of precise radiotherapy, showing great potential for clinical practice.

Keywords: Halcyon accelerator; hippocampus avoidance; whole-brain radiotherapy; volumetric modulated arc therapy

【收稿日期】2026-01-25

【基金项目】广东省医学科研基金(A2023250)

【作者简介】方雅岚, 主治医师, 研究方向: 头颈部肿瘤的综合治疗, E-mail: fangyl@sysucc.org.cn

【通信作者】罗日顺, 主管技师, 研究方向: 放射物理质控, E-mail: 599046206@qq.com

前言

脑转移瘤是晚期恶性肿瘤患者的常见并发症，相关文献显示约30%的肿瘤患者会发生脑转移^[1]。常规全脑放疗(Whole Brain Radiotherapy, WBRT)是多发脑转移瘤以及小细胞肺癌预防性颅脑照射的标准治疗方式，能够在一定程度上延长患者总生存期^[2]。然而，WBRT引发中枢神经系统的毒副作用也越来越受到重视^[3]。有研究表明，放射性海马损伤会造成患者神经认知功能下降，特别是学习、记忆和空间处理等方面功能的下降^[4]。在一项单臂多中心Ⅱ期临床试验 RTOG 0933 中，受试患者接受了保护海马结构的全脑调强照射技术(Hippocampal Avoidance-Whole Brain Radiotherapy, HA-WBRT)，结果显示 HA-WBRT 可有效保护患者的神经认知功能，改善患者的生活质量^[5]。

近年来，国内越来越多三甲医院装备瓦里安 Halcyon 加速器^[6-11]。不同于传统 C 型加速器，Halcyon 取消了坞门构造，机架采用环形结构，其旋转速度达到 24°/s，是 C 形加速器的 4 倍。此外，多叶光栅(Multileaf Collimator, MLC)采用近源端 29 对、远源端 28 对的双层交错叠加 MLC，提供显著优于其他直线加速器的子野调制功能，降低 MLC 的透射和漏射率。

目前，Halcyon 在 HA-WBRT 中的效果分析鲜有报道。因此，本研究探索一种基于 Halcyon 的共面双弧容积旋转调强(Volumetric Modulated Arc Therapy, VMAT)HA-WBRT 计划的临床应用效果，并对比分析 Halcyon、TrueBeam 和 uRT-506c 加速器生成的 HA-WBRT 计划的剂量学差异，为接受 HA-WBRT 的患者提供更有价值的数据支持。

1 材料与方法

1.1 一般资料

回顾性选取 2022 年 1 月 1 日~2024 年 9 月 1 日接受 HA-WBRT 的 15 例患者。其中，男性 9 例，女性 6 例，中位年龄 53 岁(年龄范围为 33~71 岁)。所有患者均经病理(组织学或细胞学)诊断为非造血系统恶性肿瘤，且 MRI 增强影像上证实脑转移灶在海马周围外扩 5 mm 以外的区域。

1.2 模拟定位

所有患者均呈仰卧位，采用热塑面膜联合头枕进行体位固定。经 Brilliance Big Bore CT 平扫后获取定位 CT 图像，扫描层厚为 2.5 mm，扫描范围上界为颅顶头皮上缘，下界为第二颈椎上缘。此外，在接受放射治疗前 2 周内安排了 MRI 检查，扫描具体要求为：取仰卧

位，扫描层厚 1 mm，增强 MRI T₁ 加权图像。最后将 CT 及 MR 影像传输至瓦里安 Eclipse 16.1 和联影 uRT-TPOIS 计划系统，在图像配准工作区将 CT、MR 图像进行图像融合、配准，方便放疗医生精确勾画出海马结构。

1.3 靶区和危及器官勾画

参照美国肿瘤放射治疗协作组海马勾画图谱，将 CT 及 MRI T₁ 加权像进行融合配准后手动勾画出海马。海马回避区(Hippocampus Avoid, HA)由海马三维外放 5 mm 得到。临床靶区(Clinical Target volume, CTV)定义为全部脑实质排除 HA。计划靶区(Planning Target Volume, PTV)由 CTV 三维外放 3 mm 排除 HA。PTV 的处方剂量为 30 Gy/10 次，要求至少 95% 体积的 PTV 要达到处方剂量，所有患者的 PTV、海马和各危及器官(Organ At Risk, OAR)剂量限值要求如表 1 所示。

表 1 海马保护全脑放疗的剂量学要求
Table 1 Dosimetric compliance criteria for hippocampal avoidance whole-brain radiotherapy

参数	剂量限值
PTV	$V_{30\text{ Gy}} \geq 95\%$, $D_{2\%} \leq 37.5\text{ Gy}$, $D_{98\%} \geq 25\text{ Gy}$
海马	$D_{\text{max}} \leq 16\text{ Gy}$, $D_{100\%} \leq 9\text{ Gy}$
视神经	$D_{\text{max}} \leq 33\text{ Gy}$
晶体	$D_{\text{max}} \leq 7\text{ Gy}$

1.4 设备参数

使用瓦里安公司环形机架设计的 Halcyon 加速器，配备 5 mm 叶片分辨率的双层 MLC，其中近源端 29 对，远源端 28 对，射线能量为 FFF 的 6 MV 光子线，最大剂量率为 800 MU/min。瓦里安 TrueBeam 和联影 uRT-506c 均配备 60 对单层 MLC，其中包括 40 对 5 mm 宽度 MLC 和 20 对 10 mm 宽度 MLC，可实现动态铅门跟随功能，最大剂量率为 1 400 MU/min。所有放疗计划分别在瓦里安 Eclipse 16.1 版本和联影 uRT-TPOIS 上进行优化，采用 Acrous XB 和蒙特卡罗算法计算剂量分布，计算网格为 2.5 mm×2.5 mm×2.5 mm。

1.5 计划设计思路

患者计划在进行目标优化前，需对 PTV 进行逻辑结构处理。根据海马处于 PTV 的中间位置，将 PTV 拆分成 3 个子结构，分别是 zPTV_{up}、zPTV_{mid} 和 zPTV_{down}。zPTV_{up} 上界至 PTV 上缘，下界至 HA 上缘；zPTV_{mid} 为 HA 上下缘之间的靶区；zPTV_{down} 上界至 HA 下缘，下界至 PTV 下缘，如图 1a 所示。

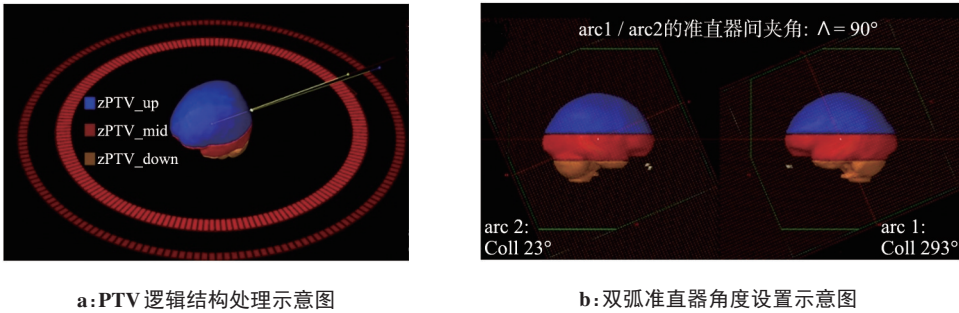


图1 VMAT放疗计划设计示意图
Figure 1 Schematic diagram of VMAT plan design

为确保本次研究是在其他临床条件一致的情况下仅针对所选机器模型做的比较评估,所有计划均采用2条全弧的VMAT进行设计,双弧的准直器角度分别为23°和293°(夹角90°),如图1b所示。Halcyon和TrueBeam优化算法选择光子优化(Photon Optimization, PO)算法,uRT-506c优化算法选择随机平台优化(Stochastic Platform Optimization, SPO)算法。

1.6 计划评估

采用计划系统中的剂量体积直方图(Dose Volume Histogram, DVH)对PTV和OAR受量进行评估。PTV评价指标包括V_{30 Gy}、适形度指数(Conformity Index, CI)和均匀性指数(Homogeneity Index, HI)。CI和HI计算公式如下^[12]:

$$CI = \frac{V_{t,ref}^2}{V_t \times V_{ref}} \tag{1}$$

$$HI = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}} \tag{2}$$

其中,V_{t,ref}为处方剂量覆盖的体积,V_t为靶区体积,V_{ref}为靶区内处方剂量所覆盖的体积;D_{2%}、D_{98%}、D_{50%}分别为2%、98%、50%靶区体积的受照射剂量。CI值越接近1,表明靶区剂量适形度越好;HI值越趋近0,说明靶区的剂量分布越均匀。

OAR评估参数包括海马的D_{100%}、D_{mean}和D_{max},晶体的D_{max}以及视神经D_{max}。同时,对所有计划的总机器跳数(Monitor Units, MU)进行统计。

1.7 统计学分析

所有数据统计分析均在SPSS 25.0和Origin 2022中完成。计量数据若符合正态分布,数据以均值±标准差表示,若不符合正态分布,数据以M(Q1, Q3)表示。采用配对t检验或非参数Wilcoxon检验比较组间差异,采用ANOVA或Kruskal-Wallis检验比较多组间差异,检验水准α=0.05(双尾)。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 剂量分布

图2为HA-WBRT患者的Halcyon、TrueBeam和uRT-506c计划的剂量分布图。由图2可以看出Halcyon计划具有较好的PTV覆盖,很好地保护了海马组织,且均优于TrueBeam和uRT-506c计划。图3为患者的DVH图,3组计划的PTV和OAR均能满足临床需求。Halcyon计划的OAR受量均低于最大耐受剂量,且Halcyon计划的DVH显著优于TrueBeam和uRT-506c计划。

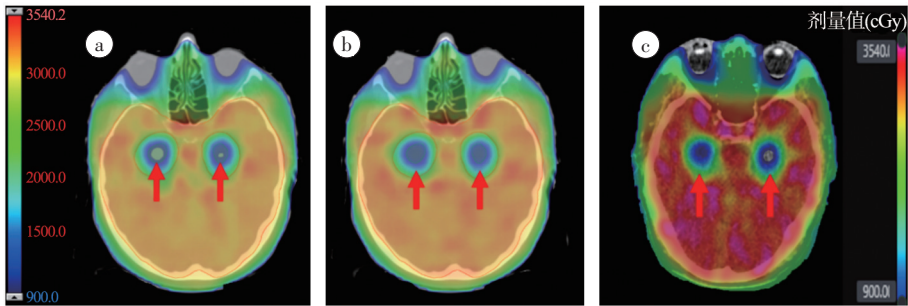


图2 Halcyon, TrueBeam和uRT-506c计划患者的共面双弧VMAT计划剂量分布图
Figure 2 Dose distributions of dual-arc coplanar VMAT plans created using the Halcyon, TrueBeam, and uRT-506c accelerators

a: Halcyon; b: TrueBeam; c: uRT-506c

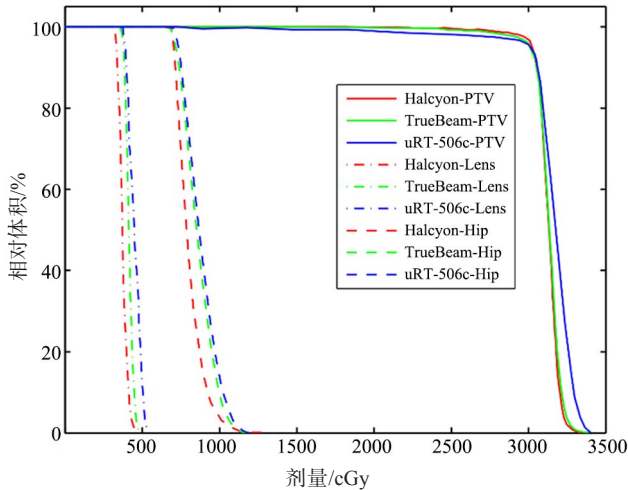


图3 Halcyon、TrueBeam与uRT-506c的PTV和OAR的DVH图
Figure 3 DVH curves of PTV and OAR for Halcyon, TrueBeam and uRT-506c

图中红色、绿色和蓝色曲线分别代表Halcyon、TrueBeam和uRT-506c的PTV和OAR受照剂量

2.2 PTV 剂量学参数及 MU 比较

所有计划PTV的 $V_{30\text{ Gy}}$ 均达到了95%以上靶区体积的覆盖,且Halcyon计划的靶区覆盖率(97.16%)略高于TrueBeam(96.37%)和uRT-506c计划(96.09%),差异有统计学意义($P<0.05$)。在 $D_{2\%}$ 方面, Halcyon计划显著优于TrueBeam和uRT-506c计划,差异有统计学意义($P<0.05$)。在HI方面, Halcyon计划同样显著优于TrueBeam和uRT-506c计划,差异有统计学意义($P<0.05$)。TrueBeam计划PTV的CI为1.12,略优于Halcyon的1.15和uRT-506c的1.13。在MU方面, TrueBeam的MU显著少于Halcyon和uRT-506c计划,差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.3 OAR 剂量学参数比较

15例患者HA平均体积为5.5 cc,PTV平均体积为1 592 cc,HA体积和PTV体积比值的平均值为0.35%。在海马的3个评价指标 $D_{100\%}$ 、 D_{mean} 和 D_{max} 中,

表2 PTV 剂量学参数及 MU 比较($n=15, \bar{x} \pm s$)
Table 2 Comparisons of PTV dosimetric parameters and MU ($n=15, \text{Mean} \pm \text{SD}$)

参数	Halcyon	TrueBeam	uRT-506c	P 值
$V_{30\text{ Gy}}/\%$	97.16±0.33	96.37±0.24 ^a	96.09±0.69 ^a	<0.001
$D_{2\%}/\text{cGy}$	3 268.69±18.46	3 277.05±24.29 ^a	3 377.79±27.92 ^{a,b}	<0.001
CI	1.15±0.06	1.12±0.05 ^a	1.13±0.05	0.214
HI	0.10±0.01	0.12±0.01 ^a	0.14(0.14, 0.14) ^{a,b}	<0.001
MU	1 102.97±49.45	910.33±33.30 ^a	1 746(1634, 1810) ^{a,b}	<0.001

与 Halcyon 组计划比较, ^a $P<0.05$; 与 TrueBeam 组计划比较, ^b $P<0.05$

Halcyon 计划较 TrueBeam 和 uRT-506c 计划展现出更好的剂量控制效果($P<0.05$)。Halcyon 计划的晶体 D_{max} 优于 TrueBeam 和 uRT-506c 计划($P<0.05$)。

Halcyon 计划的视神经 D_{max} 同样优于 TrueBeam 和 uRT-506c 计划($P<0.05$)。

表3 OAR 剂量学参数比较($n=15, \text{cGy}$)
Table 3 Comparisons of OAR dosimetric parameters ($n=15, \text{cGy}$)

OAR	参数	Halcyon	TrueBeam	uRT-506c	P 值
海马	$D_{100\%}$	609.6(600.6, 625.9)	676.2(671.0, 687.2) ^a	700.73±25.60 ^a	<0.001
	D_{mean}	857.55±31.75	888.87±51.83 ^a	889(867, 913) ^a	0.006
	D_{max}	1 327.75±59.40	1 373.24±67.94 ^a	1 418.93±161.49 ^a	0.049
晶体	D_{max}	485.28±37.95	511.76±38.31 ^a	667.87±24.23 ^{a,b}	<0.001
视神经	D_{max}	3 046.03±75.82	3 080.01±44.29 ^a	3 200.13±93.04 ^{a,b}	<0.001

与 Halcyon 组计划比较, ^a $P<0.05$; 与 TrueBeam 组计划比较, ^b $P<0.05$

3 讨论

HA-WBRT在维持神经认知功能和改善患者生活质量方面优于标准WBRT^[13],已逐渐成为治疗脑转移的常见方法。笔者基于Halcyon、TrueBeam和uRT-506c加速器分别生成了3种HA-WBRT计划,分析了HA-WBRT计划中PTV及OAR的剂量分布差异,结果显示3种计划均能满足RTOG 0933协议和实际临床要求。在笔者的研究中,尽管Halcyon计划的MU比TrueBeam计划的多约22%(比uRT-506c计划少约56%),但是Halcyon加速器的机架转速是TrueBeam和uRT-506c速度的4倍。因此,Halcyon计划的整体执行效率更高。

笔者研究中的海马结构是在MR T₁增强影像下精确勾画得到的,平均体积约5.5 cc,海马体积和PTV体积的比值约为0.35%。相较于既往研究报道的海马体积(3.3 cc~4.1 cc)、海马体积/PTV体积为0.25%^[14-15],笔者的海马体积和海马/PTV体积比更大,意味着笔者研究的计划难度更高。相比于TrueBeam和uRT-506c计划,Halcyon计划在PTV(V_{30 Gy}、HI和D_{2%})、海马(D_{max}、D_{100%}、D_{mean})、晶体D_{max}和视神经D_{max}上具有明显的优势($P<0.05$)。这表明Halcyon计划对于此类被靶区环绕包裹住的正常组织,其保护效果会更好。这可能是由于:①Halcyon加速器取消了铅门结构,使叶片距离源的位置更近。因此,剂量学叶片间隙(Dosimetric Leaf Gap, DLG)的数值仅为0.1 mm^[16],形成的射野剂量边界较以前半影更小,而TrueBeam和uRT-506c装配的MLC模型DLG分别约为1.8 mm和0.35 mm。②Halcyon采用的是无钨门、双层交错排列的MLC,叶片穿射因子仅为0.47%^[17],而TrueBeam和uRT-506c在6 MV能量时的MLC叶片平均透射率约1.5%和1.1%^[18]。③Halcyon装配的MLC,其最大叶片运动速度达到了5 cm/s,相比之下,TrueBeam和uRT-506c配备的MLC最大叶片运动速率仅为2.5 cm/s。已有的研究亦证实,为了最大程度保护靶区以外的OAR,应选择更高运动速度的MLC叶片,这一发现与笔者的研究结果相符^[19]。④在运用传统加速器进行计划制定时,由于靶区横径过长、射野较大的问题导致多叶准直器的移动不理想,通常需要固定jaw位置,以实现理想的计划调制能力,而基于Halcyon直线加速器的MLC可完全扩展到对面。

Rong等^[20]对比了HA-WBRT的IMRT、VMAT和螺旋断层放疗(Helical Tomotherapy, HT)的剂量学特点,结果表明HT因其更优的剂量分布而成为HA-WBRT的首选放疗技术。在Takaoka等^[21]的研究中,采用

HT技术能够做到PTV V_{30 Gy}覆盖率达到95%,PTV的CI为1.3,海马结构的D_{max}、D_{mean}和D_{100%}分别为14.7 Gy、11.1 Gy和9.3 Gy。而笔者的研究结果显示,在RTOG 0933临床目标协议标准下,Halcyon计划对海马的保护效果并不逊色于HT计划。

Nevelsky等^[22]采用9野非共面IMRT照射方式,海马结构的D_{max}和D_{mean}可以控制在14.1 Gy和7.3 Gy,但PTV V_{30 Gy}的覆盖率只达到92%,且PTV D_{max}达36 Gy。Xue等^[23]采用非共面VMAT技术,将PTV V_{30 Gy}的覆盖率提高到了95%,HI和CI分别为0.249和0.821,海马的D_{100%}、D_{max}和D_{mean}分别为8.03、16.81和11.71 Gy。尽管Halcyon加速器目前暂不支持非共面照射,但笔者基于该设备设计的HA-WBRT计划,与现有非共面HA-WBRT技术相比,仍表现出很强的临床竞争力。

由于HA-WBRT的复杂性,准直器角度的优化是提升计划质量的关键部分。笔者研究中的准直器角度设置原则是弧1(293°)和弧2(23°)间的夹角为90°,与前人研究一致^[24]。在此基础之上,笔者的研究还将原有的复杂度高的PTV结构进行结构拆分,将更难达到目标条件的zPTV_mid靶区给予更高的优化权重,一定程度上使得计划优化过程中获得更好的调制效果。这与Fu等^[25]的改良VMAT方案相似。基于Halcyon加速器生成的HA-WBRT计划,具有更高的处方剂量覆盖度和更优的均匀性,PTV覆盖率达97%,热点(D_{2%})控制在109%处方剂量以内,海马的D_{mean}可以控制在9 Gy以下,晶体的D_{max}也能压制到6 Gy以下。笔者的研究结果不仅深化了对Halcyon加速器剂量学性能的理解,也为后续相关研究及临床方案优化提供了有益的参考。

【参考文献】

- [1] Brown PD, Ahluwalia MS, Khan OH, et al. Whole-brain radiotherapy for brain metastases: evolution or revolution? [J]. J Clin Oncol, 2018, 36(5): 483-491.
- [2] Sperduto PW, Kased N, Roberge D, et al. Effect of tumor subtype on survival and the graded prognostic assessment for patients with breast cancer and brain metastases [J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2012, 82(5): 2111-2117.
- [3] Gore EM, Bae K, Wong SJ, et al. Phase III comparison of prophylactic cranial irradiation versus observation in patients with locally advanced non-small-cell lung cancer: primary analysis of radiation therapy oncology group study RTOG 0214 [J]. J Clin Oncol, 2011, 29(3): 272-278.
- [4] Tallet AV, Azria D, Barlesi F, et al. Neurocognitive function impairment after whole brain radiotherapy for brain metastases: actual assessment [J]. Radiat Oncol, 2012, 7: 77.
- [5] Gondi V, Pugh SL, Tome WA, et al. Preservation of memory with conformal avoidance of the hippocampal neural stem-cell compartment during whole-brain radiotherapy for brain metastases (RTOG 0933): a phase II multi-institutional trial [J]. J Clin Oncol, 2014, 32(34): 3810-3816.
- [6] 苏洁洪,魏夏平,周子涵,等. Halcyon直线加速器在鼻咽癌放疗中靶区外放边界及摆位误差分析[J]. 中国医学物理学杂志, 2023, 40(12): 1459-1462.

- Su JH, Wei XP, Zhou ZH, et al. Target volume margins and positioning errors in radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma using Halcyon linear accelerator[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2023, 40(12): 1459-1462.
- [7] 黄元彤, 许青, 李乾永, 等. Halcyon 3.0 加速器在乳腺癌放射治疗中的精度分析: 摆位误差与移床差量的相关性研究[J]. 中国医疗器械信息, 2025, 31(20): 1-3.
- Huang YT, Xu Q, Li QY, et al. Precision analysis of halcyon 3.0 accelerator in breast cancer radiotherapy: a correlation study between setup errors and couch shifts[J]. China Medical Device Information, 2025, 31(20): 1-3.
- [8] 祝起祺, 杨波, 汪之群, 等. 基于 Halcyon 2.0 和 Truebeam 的多部位 VMAT 计划剂量学质量与复杂度综合对比研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2023, 32(3): 241-247.
- Zhu QZ, Yang B, Wang ZQ, et al. Comprehensive comparison between Halcyon 2.0 and Truebeam VMAT plans for different treatment sites: dosimetric quality and plan complexity[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2023, 32(3): 241-247.
- [9] 曾宏伟, 张瑜, 郭翔宇, 等. 基于 Halcyon 3.0 海马保护全脑放疗计划中不同子野调制参数的剂量学评估[J]. 中华放射医学与防护杂志, 2023, 43(9): 682-688.
- Zeng HW, Zhang Y, E XY, et al. Dosimetric evaluation of different aperture shape controller parameters based on the Halcyon 3.0 accelerator in the hippocampal avoidance-whole brain radiotherapy[J]. Chinese Journal of Radiological Medicine and Protection, 2023, 43(9): 682-688.
- [10] 胡俏俏, 吴昊, 蒋藩, 等. 瓦里安 Halcyon 加速器的安装验收测试[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2021, 30(7): 712-716.
- Hu QQ, Wu H, Jiang F, et al. Installation product acceptance of Varian Halcyon accelerator[J]. Chinese Journal of Radiation Oncology, 2021, 30(7): 712-716.
- [11] 尹楚欧, 邓娟, 梅国建, 等. Halcyon 加速器在乳腺癌保乳术后放射治疗中的临床应用[J]. 生物医学工程与临床, 2024, 28(5): 641-646.
- Yin CO, Deng J, Mei GJ, et al. Clinical application of radiotherapy for breast cancer after breast-conserving surgery on Halcyon accelerator[J]. Biomedical Engineering and Clinical Medicine, 2024, 28(5): 641-646.
- [12] Tang R, Li AM, Li YJ, et al. Dosimetric comparison of two dose expansion methods in intensity modulated radiotherapy for breast cancer[J]. Radiat Oncol, 2023, 18(1): 23.
- [13] Oskan F, Ganswindt U, Schwarz SB, et al. Hippocampus sparing in whole-brain radiotherapy[J]. Strahlenther Onkol, 2014, 190(4): 337-341.
- [14] Zhang HW, Hu B, Pang HW. Dosimetric comparison of helical tomotherapy and volumetric modulated arc therapy in hippocampal avoidance whole-brain radiotherapy[J]. J Appl Clin Med Phys, 2024, 25(1): e14218.
- [15] Gondi V, Tolakanahalli R, Mehta MP, et al. Hippocampal-sparing whole-brain radiotherapy: a "how-to" technique using helical tomotherapy and linear accelerator-based intensity-modulated radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 2010, 78(4): 1244-1252.
- [16] Hernandez V, Saez J, Angerud A, et al. Dosimetric leaf gap and leaf trailing effect in a double-stacked multileaf collimator[J]. Med Phys, 2021, 48(7): 3413-3424.
- [17] Lim TY, Dragojević I, Hoffman D, et al. Characterization of the halcyon (TM) multileaf collimator system[J]. J Appl Clin Med Phys, 2019, 20(4): 106-114.
- [18] Li YH, Chen LX, Zhu JH, et al. A quantitative method to the analysis of MLC leaf position and speed based on EPID and EBT3 film for dynamic IMRT treatment with different types of MLC[J]. J Appl Clin Med Phys, 2017, 18(4): 106-115.
- [19] Vorwerk H, Wagner D, Hess CF. Impact of different leaf velocities and dose rates on the number of monitor units and the dose-volume-histograms using intensity modulated radiotherapy with sliding-window technique[J]. Radiat Oncol, 2008, 3: 31.
- [20] Rong Y, Evans J, Xu-Welliver M, et al. Dosimetric evaluation of intensity-modulated radiotherapy, volumetric modulated arc therapy, and helical tomotherapy for hippocampal-avoidance whole brain radiotherapy[J]. PLoS One, 2015, 10(4): e0126222.
- [21] Takaoka T, Tomita N, Mizuno T, et al. Dosimetric comparison of helical tomotherapy and intensity-modulated proton therapy in hippocampus- and scalp-sparing whole brain radiotherapy[J]. Technol Cancer Res Treat, 2021, 20: 15330338211060170.
- [22] Nevelsky A, Ieumwananonthachai N, Kaidar-Person O, et al. Hippocampal-sparing whole-brain radiotherapy using Elekta equipment[J]. J Appl Clin Med Phys, 2013, 14(3): 4205.
- [23] Xue J, Jin SN, Zhang HT, et al. A simplified non-coplanar volumetric modulated arc therapy for the whole brain radiotherapy with hippocampus avoidance[J]. Front Oncol, 2023, 13: 1143564.
- [24] Sun WJ, Chen KZ, Li Y, et al. Optimization of collimator angles in dual-arc volumetric modulated arc therapy planning for whole-brain radiotherapy with hippocampus and inner ear sparing[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 19035.
- [25] Fu Q, Chen DQ, Yan H, et al. Treatment planning of volumetric modulated arc therapy and positioning optimization for hippocampal-avoidance prophylactic cranial irradiation[J]. J Appl Clin Med Phys, 2021, 22(5): 15-23.

(编辑: 薛泽玲)