

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2026.01.018

不同头部固定系统在脑肿瘤放疗中的机械稳定性与误差控制分析

朱宇

(蚌埠医科大学第一附属医院 放疗科, 安徽蚌埠 233000)

【摘要】目的 比较不同头部固定系统(head immobilization systems, HIS)在脑肿瘤放疗中的机械稳定性与误差控制效果,为临床精准放疗提供依据。**方法** 纳入2022年1月至2024年12月蚌埠医科大学第一附属医院放疗科接受脑肿瘤放疗的80例患者,按HIS的不同,将入选患者分为热塑面罩系统(thermoplastic mask system, TMS)组、发泡胶系统(vacuum cushion system, VCS)组和立体定向框架系统(stereotactic frame system, SFS)组。治疗前均行计算机断层扫描(computed tomography, CT)模拟定位并采用加速器自带千伏锥形束CT(kilovoltage cone-beam computed tomography, kV-CBCT)影像引导校正,记录三维平移及旋转误差,计算系统误差(Σ)、随机误差(σ)、总向量误差(total vector error, TVE)及安全边界(M值),并进行单因素及多元线性回归分析。**结果** 三组平移及旋转误差均在临床允许范围内。SFS组在平移、旋转、 Σ 与 σ 方面均显著低于其他两组(均 $P<0.05$),VCS组次之,TMS组最大。根据Van Herk公式计算的安全边界亦呈相同趋势。治疗阶段分析显示,TMS组误差随分次增加而轻度升高,VCS组基本稳定,SFS组几乎无变化。多元线性回归结果提示,固定系统类型及放疗分次次数为影响误差的主要因素(均 $P<0.05$)。**结论** 不同HIS在脑肿瘤放疗中的稳定性存在差异。SFS定位精度最高,适用于高剂量小靶区放疗;VCS兼顾舒适性与稳定性;TMS在多次放疗中应结合影像引导以校正误差。合理选择与规范使用固定系统可显著提升脑肿瘤放疗的精准度与安全性。

【关键词】 脑肿瘤; 放射治疗; 头部固定系统; 定位误差; 机械稳定性

【中图分类号】 R815.2

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242(2026)01-0087-06

Analysis of mechanical stability and error control in different head immobilization systems in brain tumor radiotherapy

ZHU Yu

(Department of Radiation Oncology, The First Affiliated Hospital of Bengbu Medical University, Bengbu 233000, Anhui, China)

【Abstract】Objective To compare the mechanical stability and setup accuracy of different head immobilization systems(HIS) in brain tumor radiotherapy and provide evidence for precise treatment planning. **Methods** A total of 80 patients underwent radiotherapy for brain tumors at the Department of Radiation Oncology, The First Affiliated Hospital of Bengbu Medical University from January 2022 to December 2024 were enrolled. Based on the type of head immobilization system used, patients were divided into three groups: the thermoplastic mask system (TMS) group, the vacuum cushion system (VCS) group, and the stereotactic frame system (SFS) group. All patients underwent computed tomography (CT) simulation positioning before treatment and image-guided correction was performed using the kilovoltage cone-beam computed tomography (kV-CBCT) system built into the accelerator. Translational and rotational errors were recorded to calculate systematic error (Σ), random error (σ), total vector error (TVE), and margin (M). Univariate and multivariate linear regression analyses were performed to identify major influencing factors. **Results** The translational and rotational errors across all three groups were within acceptable clinical limits. The SFS group was significantly lower than the other two groups in translation, rotation, Σ and σ (all $P<0.05$), followed by the VCS group and TMS group. The calculated safety margins showed the same trend. Over treatment fractions, setup deviation slightly increased in the TMS group, remained stable in the VCS group, and was minimal in the SFS group. Regression analysis identified immobilization type and fraction number as the main factors affecting setup error (all $P<0.05$). **Conclusion** Mechanical stability varies among HIS in brain tumor radiotherapy. The SFS provides the best positioning precision and reproducibility, the VCS balances comfort and stability, while the TMS requires frequent image guidance during multi-fraction treatments. The rational selection and standardized use of immobilization systems can significantly enhance the precision and safety of brain tumor radiotherapy.

【Key words】 Brain tumor; Radiotherapy; Head immobilization systems; Setup error; Mechanical stability

收稿日期: 2025-03-16。

作者简介: 朱宇, 技师, 研究方向肿瘤放射治疗。E-mail: zhuyu3928179@163.com。

脑肿瘤是神经系统中最常见且预后差异显著的一类肿瘤,其治疗策略以手术切除、放射治疗和化学治疗为核心^[1]。其中,放射治疗作为脑肿瘤综合治疗的重要组成部分,在提高手术难以完全切除病灶患者的生存率和局部控制率方面具有不可替代的作用^[2]。

为确保脑肿瘤放疗的精准性与可重复性,头部固定系统(head immobilization system, HIS)的选择和应用至关重要。目前临床常用的头部固定装置主要包括热塑面罩系统(thermoplastic mask system, TMS)和发泡胶系统(vacuum cushion system, VCS),部分中心还采用高精度的立体定向框架系统(stereotactic frame system, SFS)^[3]。近年来,随着影像引导放疗(image-guided radiotherapy, IGRT)技术的普及,放射治疗定位误差得以实时监测和修正^[4-5]。然而,固定系统自身的机械稳定性仍是导致摆位偏差的重要因素之一。如何在保障患者舒适度的同时,最大限度提高固定系统的稳定性与重复性,成为脑肿瘤放射治疗质量控制的核心问题之一。

基于以上背景,本研究比较不同 HIS 在脑肿瘤放射治疗治疗过程中的定位误差特征与稳定性差异,探讨其在精准放射治疗质量控制中的应用价值,为临床制定个体化放疗固定策略提供依据。

1 研究对象

1.1 一般资料

本研究为单中心回顾性分析,研究对象为 2022 年 1 月至 2024 年 12 月在蚌埠医科大学第一附属医院放疗中心接受脑肿瘤放疗的 80 例患者。所有患者均经影像学及病理学确诊为颅内恶性或良性肿瘤。所有病例均完成全程放疗计划并接受至少 1 次影像引导摆位校正记录,资料完整可追溯。根据 HIS 的不同,将患者分为三组:TMS 组($n=28$),采用真空热塑材料面罩配合头托定位系统;VCS 组($n=27$),采用负压成型发泡胶联合头枕定位;SFS 组($n=25$),使用铝合金或碳纤维框架式固定装置,定位精度在 1 mm 以内。三组患者在肿瘤类型、病灶部位、放疗剂量及分次方案等方面差异均无统计学意义(均 $P>0.05$)。所有患者及其家属在放疗前均签署知情同意书,允许使用其匿名化影像资料及定位数据进行科研分析。

纳入标准:①经计算机断层扫描(computed

tomography, CT)或磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)影像学及病理确诊的颅内肿瘤患者;②拟行常规放疗或立体定向放射治疗(stereotactic radiotherapy, SRT),治疗前完成 CT 模拟定位;③可耐受平卧体位,治疗期间无明显头部运动障碍;④放疗全程定位数据记录完整,可供误差分析。排除标准:①头面部骨骼畸形或严重水肿,无法佩戴固定装置者;②合并严重神经功能障碍或精神障碍,不能配合放疗者;③治疗过程中因病情变化中断放疗或更换固定系统者;④定位影像或放疗数据不全者。

1.2 放疗设备与定位系统

1.2.1 放疗设备与影像系统 放疗采用瑞典医科达(Elekta)公司生产的 Infinity 型直线加速器及 IGRT 图像引导系统。影像定位与校准均通过加速器自带千伏锥形束 CT(kilovoltage cone-beam computed tomography, kV-CBCT)完成,CBCT 影像分辨率为 $1.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}$ 。定位系统可实现 6 自由度(6 degrees of freedom, 6DoF)位移修正,包括三维平移(X 轴、Y 轴、Z 轴)与三维旋转(Pitch、Roll、Yaw),定位精度 $\leq 1\text{ mm}$ 、旋转精度 $\leq 1^\circ$ 。

1.2.2 HIS 类型与制作流程 (1) TMS: 采用 Klarity (美国)公司生产的真空热塑面罩。制作时患者平卧于定位床上,头部轻微后仰,中线对齐激光基准线。经 70°C 恒温热水软化的热塑材料覆盖于患者面部及枕部,在自然冷却成型过程中保持患者静止。冷却后材料硬化形成高贴合度面罩,固定于碳纤维底板。(2) VCS: 采用 Klarity (美国)公司生产的真空固定垫,由外层尼龙复合膜与内层聚苯乙烯微珠组成。患者取仰卧位,头颈肩部置于发泡胶上,经抽气装置排出空气后形成个体化支撑结构。

(3) SFS: 采用 BrainLAB 公司立体定向固定架,由碳纤维框架、可调支撑杆及头钉构成。安装时在局麻下于颞骨或额骨处以钉针固定,形成刚性支撑。

1.2.3 CT 模拟定位与数据采集流程 所有患者于治疗前均在荷兰飞利浦的 Brilliance BigBore 模拟定位机上完成扫描。扫描范围自颅顶至第二颈椎下缘,层厚 2.5 mm ,矩阵 512×512 。定位完成后,所有 CT 数据通过网络传输至 Eclipse TPS 系统,用于后续靶区勾画与计划设计。

1.3 放射治疗计划设计

1.3.1 计划系统与计算参数 计划系统采用 Elekta Monaco 软件, 剂量计算算法选用 Monte Carlo algorithm, 以水等效组织为基准, 计算网格尺寸设为 2.5 mm。计划优化采用调强放射治疗 (intensity-modulated radiation therapy, IMRT) 或容积旋转调强放疗 (volumetric modulated arc therapy, VMAT) 技术, 确保靶区剂量分布均匀且符合处方要求。加速器能量统一为 6 MV 光子束, 剂量率为 600 MU/min。每例患者的治疗计划均经独立剂量验证与射野强度验证, γ 分析通过率 $\geq 95\%$ (3 mm/3%标准), 确保剂量投递的准确性。

1.3.2 靶区勾画与剂量处方 靶区勾画基于模拟 CT 影像, 并结合 MRI 融合结果完成。由放疗医师在 Eclipse TPS 上定义以下区域: 肿瘤区 (gross tumor volume, GTV): 病灶可见的实质性肿瘤体积; 临床靶区 (clinical target volume, CTV): GTV 外扩 3~5 mm, 包含潜在亚临床病灶范围; 计划靶区 (planning target volume, PTV): 在 CTV 基础上外扩 3 mm 以补偿定位误差与摆位偏差。

剂量处方根据病理类型及临床阶段确定: 常规分割放疗患者处方剂量为 50~60 Gy/25~30 次; SRT 患者处方剂量为 18~25 Gy/1~5 次。计划优化目标为: 95%的 PTV 体积接受到处方剂量 (D95 \geq 处方剂量), 同时控制危及器官 (organs at risk, OARs) 剂量在耐受阈值以下。主要 OARs 包括视神经、视交叉、脑干、丘脑及海马, 均采用限量约束。视神经 Dmax \leq 54 Gy, 脑干 Dmax \leq 54 Gy, 双海马 Dmax \leq 30 Gy。

1.3.3 计划验证与实施 所有放疗计划在治疗前均经放疗物理师进行剂量学验证。通过平面剂量验证 (MapCHECK 2) 或三维剂量验证 (ArcCHECK) 评估剂量分布与 TPS 计算值的一致性。验证合格后, 治疗计划上传至 Mosaic 治疗管理系统, 并与 Elekta 或 CBCT 图像引导系统联机同步。放疗科技师每日在治疗前执行“影像验证 \rightarrow 误差校正 \rightarrow 剂量投递”流程, 确保摆位精度与计划一致性。治疗实施过程中, 若 CBCT 验证发现平移误差 > 2 mm 或旋转误差 $> 2^\circ$, 则暂停照射并重新调整体位; 若同一患者连续 3 次出现方向性偏移趋势, 则由科技师与医师共

同复核固定系统的稳定性及面罩贴合度。每次治疗后的影像误差数据均自动存储于设备数据库中, 用于后续误差统计分析。

1.4 摆位误差评估方法

1.4.1 误差评估维度与分析指标

(1) 平移误差: X 轴、Y 轴、Z 轴三方向的位移量 (mm), 记录每次校正前系统测得的偏移值;

(2) 旋转误差: Pitch、Roll、Yaw 三角度误差 ($^\circ$), 由 6D 配准结果自动生成;

(3) 总向量误差 (total vector error, TVE): $TVE = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ 。用于反映空间整体位移大小。此外, 为评估长程治疗中的稳定性变化, 记录每位患者治疗初期、中期、末期三阶段的平均误差, 分析不同阶段误差趋势与系统漂移情况。

1.5 统计学方法

本研究所有数据均采用 SPSS 26.0 软件 (IBM, 美国) 进行统计分析, 图表绘制使用 GraphPad Prism 9.0。数据由两名放疗科技师分别录入并经第三方复核, 以确保数据的准确性与一致性。所有计量资料在分析前均进行正态性检验, 符合正态分布的数据以均数 \pm 标准差 ($\bar{x} \pm s$) 表示, 不符合正态分布的数据则以中位数及四分位间距 [$M(P_{25}, P_{75})$] 表示。计数资料以例 (%) 表示。三维平移误差 (X、Y、Z)、旋转误差 (Pitch、Roll、Yaw) 以及 Σ 、 σ 和 M 值为主要分析指标。组间比较根据数据分布特征选择相应方法: 当数据符合正态分布且方差齐性时采用单因素方差分析 (One-way ANOVA), 若不满足上述条件则采用 Kruskal-Wallis 秩和检验; 必要时进行两两比较并采用 Bonferroni 或 Dunn's 事后校正以控制第一类错误率。对于同一患者在放疗初期、中期及末期的定位误差变化趋势分析, 采用重复测量方差分析或 Friedman 秩和检验, 以评价误差随治疗进程的动态变化特征。此外, 为探讨定位误差与患者一般资料 (如年龄、病灶部位、放疗分次次数等) 之间的相关性, 采用 Pearson 或 Spearman 相关分析, 并进一步通过多元线性回归模型筛选独立影响因素, 报告 95% 置信区间 (95% confidence interval, 95% CI)。所有统计检验均为双侧检验, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$, $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。

2 结果

2.1 一般资料

三组患者性别、年龄、肿瘤类型、病灶部位、

放疗分次及处方剂量比较差异均无统计学意义(均 $P>0.05$), 具有可比性(表 1)。

表 1 三组患者一般资料比较

项目	TMS 组 (n=28)	VCS 组 (n=27)	SFS 组 (n=25)	χ^2/F	P
性别(男/女, 例)	15/13	14/13	13/12	0.031	0.985
年龄($\bar{x} \pm s$, 岁)	52.10±10.60	51.80±9.90	53.50±10.20	0.213	0.808
肿瘤类型[例(%)]					
胶质瘤	13 (46.43)	12 (44.44)	9 (36.00)		
脑膜瘤	6 (21.43)	5 (18.52)	7 (28.00)	0.742	0.692
转移瘤	7 (25.00)	8 (29.63)	6 (24.00)		
垂体瘤	2 (7.14)	2 (7.41)	3 (12.00)		
病灶部位(额/颞/顶/小脑/其他, 例)	9/7/5/4/3	8/6/5/5/3	7/7/4/4/3	0.521	0.875
放疗分次($\bar{x} \pm s$, 次)	22.90±5.30	22.10±5.00	23.00±4.90	0.183	0.834
处方剂量($\bar{x} \pm s$, Gy)	57.80±6.10	58.30±5.80	57.60±6.30	0.092	0.912

注: TMS 为热塑面罩系统; VCS 为发泡胶系统; SFS 为立体定向框架系统。

2.2 平移误差分析

三种固定系统的平移误差均控制在 2 mm 以内。SFS 组在各方向的平均误差最小, VCS 组次之, TMS 组最大, 组间比较差异均具有统计学意义(均 $P<0.05$)(表 2)。

表 2 三组平移误差比较($\bar{x} \pm s$, mm)

组别	X(左右)	Y(头脚)	Z(前后)	三维平均误差
TMS 组 (n=28)	1.42±0.63	1.56±0.72	1.38±0.57	1.45±0.51
VCS 组 (n=27)	1.08±0.51	1.11±0.48	1.03±0.46	1.07±0.44
SFS 组 (n=25)	0.78±0.39	0.85±0.41	0.79±0.35	0.81±0.36
F	6.218	7.026	6.741	8.164
P	0.003	0.002	0.002	<0.001

注: TMS 为热塑面罩系统; VCS 为发泡胶系统; SFS 为立体定向框架系统。

2.3 旋转误差分析

三组的旋转误差均控制在 2° 以内。SFS 组在三

个方向上的平均误差均最低, VCS 组次之, TMS 组最高, 组间比较差异均具有统计学意义(均 $P<0.05$)(表 3)。

表 3 三组旋转误差比较($\bar{x} \pm s$, °)

组别	Pitch(俯仰)	Roll(翻转)	Yaw(旋转)	平均旋转误差
TMS 组 (n=28)	1.32±0.48	1.21±0.45	1.18±0.42	1.24±0.38
VCS 组 (n=27)	0.97±0.39	0.88±0.37	0.86±0.34	0.90±0.35
SFS 组 (n=25)	0.69±0.32	0.63±0.29	0.60±0.26	0.64±0.29
F	8.173	9.024	10.273	9.562
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: TMS 为热塑面罩系统; VCS 为发泡胶系统; SFS 为立体定向框架系统。

2.4 Σ 与 σ 比较

三组的 Σ 与 σ 均维持在 1 mm 以内, 但 SFS 组的误差均显著小于 VCS 组与 TMS 组(均 $P<0.05$)(表 4)。

表 4 三组 Σ 与 σ 比较($\bar{x} \pm s$, mm)

组别	X(左右)		Y(头脚)		Z(前后)	
	Σ	σ	Σ	σ	Σ	σ
TMS 组 (n=28)	0.76±0.25	0.71±0.24	0.89±0.27	0.83±0.26	0.81±0.26	0.76±0.23
VCS 组 (n=27)	0.58±0.20	0.55±0.19	0.61±0.22	0.58±0.20	0.60±0.21	0.56±0.19
SFS 组 (n=25)	0.39±0.17	0.36±0.15	0.43±0.18	0.39±0.17	0.42±0.16	0.38±0.15
F	8.472	7.951	10.264	9.837	9.125	8.673
P	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: TMS 为热塑面罩系统; VCS 为发泡胶系统; SFS 为立体定向框架系统。

2.5 TVE 与 M 值

SFS 组的 TVE 最小, VCS 组次之, TMS 组最大, 差异具有统计学意义($P<0.05$)。根据 Van Herk 公式计算所得, TMS 组 M 值最高, VCS 组次之, SFS 组最低, 组间差异显著($P<0.05$)(表 5、图 1)。

表 5 三组总体 TVE 与 M 值比较($\bar{x} \pm s$, mm)

组别	TVE	M 值
TMS 组 (n=28)	1.78±0.47	2.72±0.61
VCS 组 (n=27)	1.43±0.41	2.08±0.49
SFS 组 (n=25)	1.09±0.34	1.68±0.43
F	11.236	12.084
P	<0.001	<0.001

注: TVE 为总向量误差; TMS 为热塑面罩系统; VCS 为发泡胶系统; SFS 为立体定向框架系统。

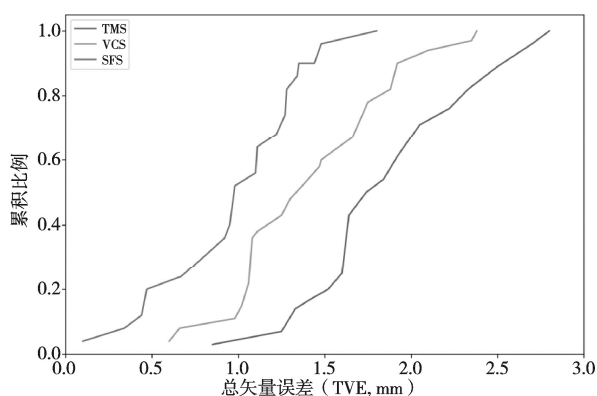


图 1 不同 HIS 下的 TVE 累积分布

注: HIS 为头部固定系统; TVE 为总向量误差; TMS 为热塑面罩系统; VCS 为发泡胶系统; SFS 为立体定向框架系统。

2.6 治疗阶段误差趋势分析

TMS 组的误差随治疗进程略有增加 ($P>0.05$), VCS 组中期后误差基本稳定 ($P>0.05$); SFS 组三阶段间误差变化不显著 ($P>0.05$), 稳定性最佳。总体比较, 三组间误差变化趋势差异显著(均 $P<0.05$) (表 6)。

表 6 三组在不同治疗阶段的平均平移误差比较 ($\bar{x}\pm s$, mm)

组别	初期 (1~5 次)	中期 (10~15 次)	末期 (20 次 及以上)	F	P
TMS 组 ($n=28$)	1.37±0.42	1.52±0.46	1.66±0.49	4.226	0.018
VCS 组 ($n=27$)	1.10±0.38	1.14±0.41	1.21±0.44	2.566	0.087
SFS 组 ($n=25$)	0.83±0.33	0.85±0.35	0.87±0.36	1.302	0.276
组间比较	—	—	—	7.593	<0.001

注: TMS 为热塑面罩系统; VCS 为发泡胶系统; SFS 为立体定向框架系统。

2.7 误差影响因素分析

固定系统类型及放疗分次次数对摆位误差影响显著(均 $P<0.05$), 其余变量差异无统计学意义(均 $P>0.05$)。将固定系统类型与放疗分次次数纳入多元线性回归模型分析, 结果表明固定系统类型为主要独立影响因素, 放疗分次次数次之(均 $P<0.05$)。模型拟合良好 ($R^2=0.453$, $F=16.372$, $P<0.05$) (表 7、表 8)。

表 7 放疗摆位误差的单因素分析

变量	分组	TVE (mm)	F	P
性别	男 ($n=42$)	1.43±0.46	0.273	0.602
	女 ($n=38$)	1.49±0.44		
年龄	<50 岁 ($n=28$)	1.44±0.41	0.195	0.660
	≥50 岁 ($n=52$)	1.48±0.47		
病灶部位	额叶 ($n=23$)	1.46±0.45	0.517	0.672
	颞叶 ($n=21$)	1.51±0.44		
	其他 ($n=36$)	1.47±0.46		

续表 7

变量	分组	TVE (mm)	F	P
放疗分次 (次)	≤20 次 ($n=26$)	1.34±0.43	4.231	0.043
	>20 次 ($n=54$)	1.54±0.45		
固定系统类型	TMS 组 ($n=28$)	1.78±0.47	18.324	<0.001
	VCS 组 ($n=27$)	1.43±0.41		
	SFS 组 ($n=25$)	1.09±0.34		

注: TVE 为总向量误差; TMS 为热塑面罩系统; VCS 为发泡胶系统; SFS 为立体定向框架系统。

表 8 放疗摆位误差的多元线性回归分析

变量	β	SE	t	P	95%CI
常数	0.524	0.159	3.296	0.002	0.207~0.841
固定系统类型	0.609	0.095	6.428	0.001	0.420~0.798
放疗分次次数	0.236	0.103	2.287	0.025	0.030~0.442

注: 95%CI 为 95%置信区间。

3 讨论

脑肿瘤放疗的精准度直接决定肿瘤控制率与正常组织损伤风险。由于颅脑结构致密, 靶区与 OARs 距离极近, 任何微小摆位误差均可能导致剂量分布偏离, 影响疗效与安全性^[6-7]。因此, 如何通过合理的 HIS 实现头部高精度、可重复定位, 是放疗质量控制的重要环节。本研究从平移误差、旋转误差、 Σ 与 σ 及综合空间误差等多维度比较了 3 种常用 HIS 的机械稳定性与误差控制特点, 为临床系统选择提供量化依据。

本研究结果显示, 三组总体平移误差均控制在 2 mm 以内, 旋转误差均小于 2° , 符合国际放疗精度要求 (美国医学物理家协会工作组 142 号报告、欧洲放射治疗与肿瘤学学会 2008 指南)。其中, SFS 组的三维平均平移误差和旋转误差最低, Σ 与 σ 分别维持在 0.5 mm 以内, TVE 为 (1.09±0.34) mm, 显著优于 VCS 组与 TMS 组。这表明刚性固定结构可显著降低头部微动及日间体位漂移, 其高机械稳定性为高剂量小靶区放疗提供精确保障。TMS 组在支持颈后及枕部时表现较好, 短程治疗稳定性接近 SFS 组, 但在多分次放疗中略有漂移, 可能与真空密封衰减或患者体位肌张力变化有关。TMS 组虽患者舒适度较高, 但其材料弹性回弹及长期使用后的形变, 易导致纵向与前后方向轻度偏移 (最大 Σ 为 0.89 mm), 需通过每日影像引导修正。 Σ 反映患者在整个治疗周期中固定偏差的趋势, σ 反映每日摆位波动。本研究发现, SFS 组在两类误差中均表现最佳, 表明

其在机械结构与定位重复性方面优势明显。TMS 组的 Σ 在治疗后期略有增加, 与材料长期塑性变形及患者皮肤张力变化有关; VCS 组误差较为稳定, 但在头脚方向存在微弱积累效应。根据 Van Herk 公式计算的 M 值结果, 三组依次为 2.72 mm、2.08 mm、1.68 mm, 提示在常规分割放疗中, 非刚性系统需适当增加 PTV 外扩范围以补偿潜在误差, 而框架式系统可在较小边界下保证剂量覆盖, 实现靶区剂量集中与 OARs 保护的平衡。多元线性回归分析结果表明, 固定系统类型是定位误差的主要独立影响因素, 放疗分次次数次之。随着分次次数增加, 非刚性系统在重复贴合过程中会逐渐产生细微累积偏差, 尤其 TMS 易受面部轮廓变化与皮肤水分影响导致局部滑动。此外, 患者依从性、呼吸幅度及颈部肌张力均可能对误差产生次要影响。周梅芳等^[7]研究指出, TMS 在颅脑分割放疗中的平移误差普遍在 1.5 mm 左右, 与本研究结果相符。SFS 因机械锁定刚性高, 可有效消除日间重定位误差, 但其侵入性和制作复杂度限制了常规推广。临床实践中, HIS 的选择应综合治疗目的、放疗模式及患者耐受性。

综上所述, 不同 HIS 在脑肿瘤放疗中的稳定性差异显著。SFS 在定位精度与重复性方面最优, VCS

兼顾舒适性与稳定性, TMS 在多次治疗中需结合影像引导降低误差。合理选择固定系统并配合精准影像校正, 是实现高质量脑肿瘤放疗的关键。

参考文献

- [1] 李鑫蕊, 张艳芳, 康晓东, 等. 基于集成学习的 MRI 脑肿瘤智能诊断[J]. 计算机科学, 2024, 51 (S1): 380-386.
- [2] 曹才能, 陈晓钟, 袁双虎. 头颈部肿瘤放疗相关急性黏膜炎的预防与治疗指南(2023 年更新版)[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2023, 30 (7): 381-385.
- [3] 谢莉莉, 徐诸凤, 郁玺玺, 等. 头部制动固定装置的设计及应用[C]//中华口腔医学会口腔颌面-头颈肿瘤专业委员会. 2019 第一届全国口腔颌面-头颈肿瘤学术大会——聚合引领、协同发展论文集. 上海交通大学医学院附属第九人民医院, 2019: 22.
- [4] 陈文强, 赵军军, 李扬, 等. 对比和分析腹部肿瘤影像引导放疗中千伏级锥形束 CT 与兆伏级电子摄像系统的应用效果[J]. 影像研究与医学应用, 2024, 8 (23): 181-183.
- [5] LEGOUTÉ F, PADOVANI L, CLAUDE L, *et al.* Apport du guidage par l' image pour le repositionnement au cours de la radiothérapie des tumeurs encéphaliques [Interest of image-guided radiotherapy for brain tumors and positioning control][J]. Cancer Radiother, 2018, 22(6-7):593-601.
- [6] 戴雨薇, 李洁, 杨昊楠, 等. 头颈部肿瘤放疗患者种植修复策略研究进展[J]. 中国实用口腔科杂志, 2024, 17 (6): 739-743.
- [7] 申红峰, 王小深, 欧光明, 等. 基于图像引导下头颈部肿瘤放疗治疗患者摆位误差的相关性分析[J]. 中国医学装备, 2016, 13(10): 22-24.
- [8] 周梅芳, 朱惠萍. Leksell Icon™ 伽马刀患者应用热塑膜面罩的护理[J]. 当代护士 (下旬刊), 2022, 29 (10): 137-140.