·诊治分析·

基于放射治疗计划系统模拟脑部肿瘤放疗中摆位误差方向对靶区处方剂量的影响

叶天南，姜毅，项振飞

【摘要】目的　基于治疗计划系统（TPS）模拟脑部肿瘤放疗中不同方向的摆位误差，探讨正反方向偏移的剂量叠加对靶区处方剂量体积直方图（DVH）的影响。**方法**　本研究为回顾性剂量模拟研究。收集 2024 年 1 月至 2025 年 10 月宁波市医疗中心李惠利医院收治的行立体定向放射外科（SRS）治疗的脑部肿瘤患者 12 例，在 TPS 中对每例患者的原始计划进行虚拟摆位误差模拟。定义三个轴向：左右（LAT）、头脚（LNG）、腹背（VRT）。设置两组模拟数据：（1）对照组：将射野中心沿各轴向正反方向分别偏移 1、2、3、4、5、6 mm，单独计算靶区处方剂量 DVH 值；（2）实验组：将同一轴向、相同偏移距离的正反方向两个计划剂量叠加，且每个子计划治疗次数减半，获得融合 DVH 值。比较两组在不同偏移距离下的 DVH 差异。**结果**　随着偏移量增大，对照组靶区处方剂量 DVH 值逐渐降低；实验组在各偏移距离下的 DVH 值均高于对照组。在 1 ～ 5 mm 偏移范围内，实验组与对照组的 DVH 值差异均有统计学意义（均 $P < 0.05$）；在 6 mm 偏移时，两组差异无统计学意义（$P > 0.05$）。**结论**　在 1 ～ 5 mm 摆位误差范围内，正反方向随机偏移对靶区剂量覆盖存在显著的自我校正效应；当误差达到 6 mm 时，校正效应消失。

【关键词】　肿瘤；放射诊疗；摆位误差；剂量分布

DOI:10.3969/j.issn.1671-0800.2026.05.015

【中图分类号】　R739.91　**【文献标志码】**　A　　**【文章编号】**　1671-0800(2026)05-0521-03

脑部肿瘤的放射治疗已从早期的伽马刀立体定向放射外科（stereotactic radiosurgery，SRS）发展到如今的图像引导调强放疗（image-guided radiation therapy，IGRT）和自适应放疗（adaptive radiotherapy，ART）[1-3]。尽管技术不断进步，治疗过程中的摆位误差仍然是影响剂量分布准确性的关键因素之一。即使在最先进的治疗流程中，患者的体位变化、器官运动以及设备的微小偏差都可能导致实际照射剂量与计划剂量之间出现偏差，进而影响治疗效果，甚至可能增加正常脑组织损伤的风险[4-5]。本研究基于放射治疗计划系统（treatment planning system，TPS）探讨脑部肿瘤放疗不同摆位误差对剂量分布的影响，现报道如下。

1　资料与方法

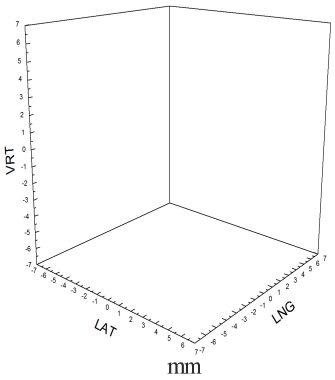
1.1　一般资料　本研究为回顾性剂量模拟研究。收集 2024 年 1 月至 2025 年 10 月宁波市医疗中心李惠利医院收治的行 SRS 治疗的脑部肿瘤患者 12 例。所有患者每次治疗前均接受锥形束计算机断层扫描（cone beam CT，CBCT）图像引导验证，共收集摆位图像数据 72 次，用于统计实际摆位误差范围（−6 ～ 6 mm），作为后续虚拟模拟的偏移依据。本研究获得宁波市医疗中心李惠利医院医学伦理委员会批准（批件号：李惠利医院伦审 2025 研第 489 号），豁免/免除知情同意。

1.2　方法　治疗计划设计与剂量计算均在荷兰 Philips 公司 Pinnacle TPS（Version 16.2）中完成。患者治疗使用美国 Varian 公司的 Trilogy 直线加速器。

在 TPS 中对每例患者的原始计划进行摆位误差虚拟模拟。定义三个轴向：左右方向为 LAT（X 轴，正方向为右，负方向为左），头脚方向为 LNG（Y 轴，正方向为头，负方向为脚），腹背方向为 VRT（Z 轴，正方向为腹，负方向为背），见图 1。

本研究设置两组模拟数据进行比较：（1）对照组（单方向偏移）。在原始计划中，将射野中心沿每个轴向的正、反两个方向分别偏移 1、2、3、4、5 及 6 mm，计算各偏移条件下的处方剂量体积直方图（dose and

作者单位：315040 宁波，宁波市医疗中心李惠利医院
通信作者：叶天南，Email：yetiannan611@163.com



注：3 个轴向，LAT 为左右方向，LNG 为头脚方向，VRT 为腹背方向

图 1　摆位误差虚拟模拟 3 个轴向

volume histogram，DVH），重点获取靶区（planning target volume，PTV）的处方剂量 DVH 值（即靶区中处方剂量线包绕的体积百分比）。每例患者共计算 6 个方向，6 个梯度，合计 36 个偏移条件，12 例患者总计生成 432 个 DVH 数据。（2）实验组（正反叠加偏移）。针对同一轴向、相同偏移距离的正反两个方向（如左 3 mm 与右 3 mm），分别计算两个方向偏移后的 DVH，然后将两个计划的剂量分布叠加，且每个子计划的治疗次数减半（以保证总处方剂量与原始计划一致），获得融合 DVH，同样记录靶区处方剂量 DVH 值；每例患者每个轴向 6 个偏移距离，共 18 个融合 DVH，12 例患者总计 216 个叠加数据。每组均按 3 个轴向（LAT、LNG、VRT）分别分析。

1.3　观察指标　靶区处方剂量 DVH 值，即 PTV 中被处方剂量线包绕的体积百分比。

1.4　统计方法　数据采用 SPSS 23.0 软件分析，计量资料符合正态分布，采用配对 t 检验；若不符合正态分布，采用 Mann-Whitney U 检验。$P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

2　结果

在虚拟模拟中，对照组为单方向偏移（1 ～ 6 mm），实验组为正反方向相同偏移距离叠加（次数减半）。随着偏移量增大，对照组的靶区处方剂量 DVH 值逐渐降低，而实验组的 DVH 值在各偏移量下均高于对照组，见图 2。显示相反方向的中心偏移对处方剂量分布具有一定的“自我校正”效应。

对 1 ～ 6 mm 各偏移距离分别进行观察，显示在 1 ～ 5 mm 偏移范围内，实验组与对照组的 DVH 值差异均有统计学意义（均 $P < 0.05$）；在 6 mm 偏移时，两组差异无统计学意义（$P > 0.05$），见表 1。

3　讨论

随着医学物理学、影像学、功能影像学及计算机技术的飞速发展与深度融合，肿瘤放射治疗已完成从“常规放疗”向“精准放疗”的跨越式转变，治疗精度与疗效得到质的提升。图像引导放疗作为精准放疗的核心支撑技术之一，凭借其实时定位与动态追踪优势，定位精度在近年的技术迭代中已突破至亚毫米级别，为脑肿瘤精准施照提供了坚实保障[6-7]。

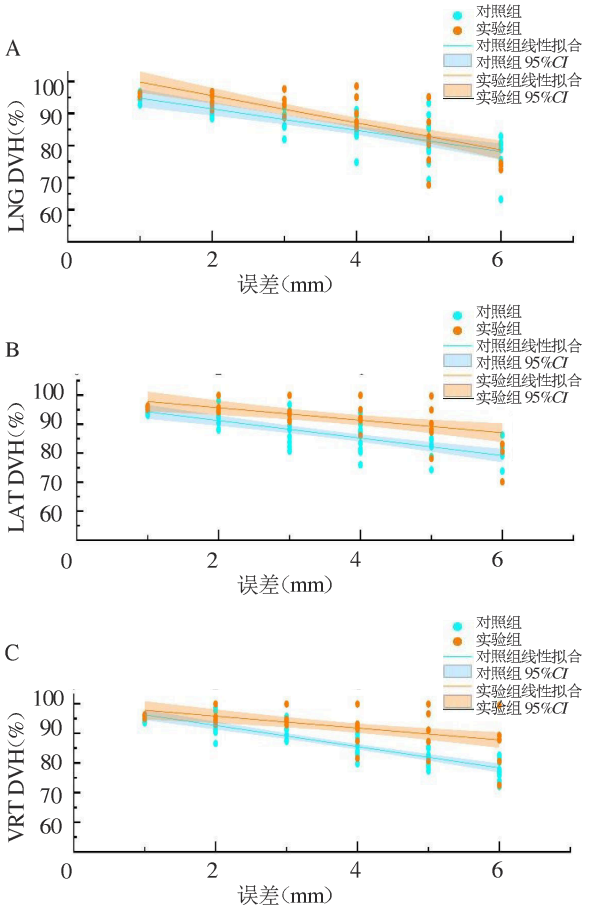
摆位误差作为影响放疗剂量分布准确性的关键因素，直接关系到肿瘤靶区的受照剂量与正常组织的保护效果，国内学者已针对这一课题开展了一系列相关研究[2,8-10]。本研究通过虚拟模拟发现，在 1 ～ 5 mm 摆位误差范围内，正反方向随机偏移可产生自我校正效应，使靶区处方剂量 DVH 值高于单纯单方向偏移。

在图像引导调强放疗的临床实践中，尽管锥形束计算机断层扫描技术能够提供高精度的在线摆位

表 1　不同偏移距离下实验组与对照组 DVH 值比较

偏移距离	配对差值（95% 置信区间）	t 值	P 值
1 mm	−1.956 ～−0.731	4.62	＜ 0.05
2 mm	−4.405 ～−2.376	6.89	＜ 0.05
3 mm	−7.092 ～−4.008	7.39	＜ 0.05
4 mm	−8.111 ～−4.924	8.35	＜ 0.05
5 mm	−8.627 ～−3.728	5.13	＜ 0.05
6 mm	−8.050 ～ 0.495	1.83	＞ 0.05

注：差值为对照组 DVH 值减去实验组 DVH 值，负值表示实验组 DVH 值高于对照组。DVH 值为靶区处方剂量覆盖百分比，数值越高代表剂量覆盖越好



注：LNG 为头脚方向，LAT 为左右方向，VRT 为腹背方向，DVH 值为靶区处方剂量覆盖百分比

图 2　不同偏移量的 DVH 值

验证，但在实际操作中，许多放疗中心受限于治疗效率、患者数量以及设备的工作负荷，难以对每一位患者的每一次分次治疗都进行 CBCT 摆位验证[9]。这种情况下，如何在保证治疗精度的同时兼顾治疗效率，成为临床上面临的一个现实挑战。本研究为解决这一挑战提供了新的思路。通过对患者前几次治疗的 CBCT 验证数据进行系统性分析，并计算其摆位偏移的中心平均值，可以初步判断该患者摆位误差的整体趋势和稳定性。如果患者摆位误差较小且相对稳定，那么在后续的分次治疗中，临床医生可以考虑适当减少 CBCT 验证的频率，从而在保证治疗精度的前提下，有效提高治疗效率。反之，如果发现摆位误差较大或波动明显，则提示需要加强摆位验证和校正，甚至重新评估和优化固定装置或摆位流程。

利益冲突　所有作者声明无利益冲突

作者贡献声明　叶天南：酝酿和设计实验，实施研究，采集数据，分析/解释数据，文章撰写；姜毅：采集数据，文章撰写；项振飞：行政、技术或材料支持，指导，支持性贡献

参　考　文　献

[1]　贺选，张军维，万伟. 伽马刀头架固定螺钉长度的选择[J]. 中华脑科疾病与康复杂志(电子版)，2019，9(6)：341-344.

[2]　高研，高献书，马茗微，等. 前列腺癌放疗时 CBCT 使用频率和匹配策略的剂量学分析[J]. 中华放射肿瘤学杂志，2024，33(8)：733-739.

[3]　Yan D, Vicini F, Wong J, et al. Adaptive radiation therapy[J]. Phys Med Biol, 1997, 42(1): 123-132.

[4]　陈蕾，周莉，徐庆丰，等. 自适应放疗在鼻咽癌放疗中的研究进展[J]. 国际生物医学工程杂志，2022，45(5)：424-429.

[5]　陈乐康，李楚豪，曾文杰，等. 鼻咽癌放疗头颈部摆位误差及外轮廓变化对放疗剂量的影响[J]. 中国医学物理学杂志，2024，41(9)：1057-1063.

[6]　Chang J, Yenice K M, Narayana A, et al. Accuracy and feasibility of cone-beam computed tomography for stereotactic radiosurgery setup[J]. Med Phys, 2007, 34(6Part1): 2077-2084.

[7]　Tryggestad E, Christian M, Ford E, et al. Inter- and intrafraction patient positioning uncertainties for intracranial radiotherapy: A study of four frameless, thermoplastic mask-based immobilization strategies using daily cone-beam CT[J]. Int J Radiat Oncol, 2011, 80(1): 281-290.

[8]　李亮，陈鑫，范雪梅，等. 体部立体定向放射治疗摆位误差分布预测模型的构建[J]. 中国医疗设备，2025，40(7)：54-60.

[9]　吴润叶，高黎，李明辉，等. 应用非每日锥形束 CT 校位减少摆位误差对鼻咽癌调强放疗剂量影响[J]. 中华放射肿瘤学杂志，2011，20(5)：379-383.

[10] 万宝，葛彦东，孙朔，等. 六维床在头、胸、腹部肿瘤常规直线加速器放射治疗中的摆位误差回顾性分析[J]. 辐射研究与辐射工艺学报，2025，43(2)：52-59.

收稿日期：2025-11-19

（本文编辑：钟美春）