



· 论 著 ·

基于 iCBCT 分析鼻咽癌自适应放疗过程中腮腺实际体积、位置和剂量的变化

朱海港^{1, 2, 3}, 殷欣昊^{1, 2, 4}, 陈小四³, 王 藤⁵, 曾 强¹,
高 瀚¹, 尹 丽^{1, 2, 4}

1. 江苏省肿瘤医院放射肿瘤科, 江苏 南京 210009;
2. 南京医科大学第四临床学院, 江苏 南京 211166;
3. 马鞍山市当涂县人民医院放射肿瘤科, 安徽 马鞍山 243100;
4. 南京医科大学环境基因组学教研室, 江苏省恶性肿瘤生物标志物与防治重点实验室, 癌症个性化医学协同创新中心, 江苏 南京 210009;
5. 徐州医科大学第二附属医院放射肿瘤科, 江苏 徐州 221006

[摘要] 背景与目的: 放疗尤其是调强适形放疗 (intensity-modulated radiation therapy, IMRT) 已成为鼻咽癌 (nasopharyngeal carcinoma, NPC) 的标准根治性治疗手段, 其通过精准的剂量分布提高肿瘤局部控制率并降低危及器官 (organ at risk, OAR) 的受照剂量, 从而改善患者的生存质量。但在治疗过程中, 腮腺等 OAR 的体积和位置可能发生显著变化, 导致实际受照剂量偏离计划, 从而增加不良反应的发生风险。自适应放疗 (adaptive radiotherapy, ART) 通过实时影像评估并调整计划, 能够有效地优化剂量分布。本研究基于 Halcyon 加速器获取的迭代锥形束计算机断层扫描 (iterative cone beam computed tomography, iCBCT) 影像数据, 系统分析腮腺体积、位置和受照剂量随放疗分次累加的变化规律, 旨在为优化 NPC 放疗实践、减少腮腺损伤提供数据支持和理论依据。方法: 回顾性选取 2018 年 1 月—2022 年 12 月在江苏省肿瘤医院接受治疗的 NPC 患者, 记录并比较治疗前后体重变化; 在患者每天治疗前的 iCBCT 图像上勾画腮腺, 分析腮腺体积的绝对与相对减少值、缩小速率及质心位移, 并评估腮腺向中线的位移与其体积缩小程度的相关性。同时在 Eclipse 计划系统中, 获得整个疗程中腮腺的实际累积受照剂量, 并探究剂量变化与腮腺体积、位移的相关性。所有统计学分析均使用 R 语言 (版本 4.5.1) 在 RStudio 集成开发环境 (版本 2025.05) 中完成, 采用 Wilcoxon 符号秩检验进行配对比较, 采用 Spearman 秩相关进行相关性分析。结果: 放疗期间, 所有患者体重整体呈显著下降趋势, 中位下降幅度为 4.68%。整个 NPC 放疗期间, 左、右侧腮腺体积分别减小为原体积的 53.97%、58.34%, 两侧腮腺均出现不同程度的位置改变。左侧腮腺向中线、头侧和面侧移动的比例分别为 32 (68.09%)、25 (53.19%) 和 23 (48.94%), 右侧腮腺分别为 28 (59.57%)、35 (74.47%) 和 24 (51.06%)。进一步分析表明, 向中线移动的患者中, 15 分次内的位移更为显著; 而向头侧和面侧移动的患者中, 15 分次前后的位移差异不显著。统计学检验结果也证实, 两侧腮腺在 X 轴方向上的位置, 在治疗至第 15 分次时已与初始计划相比产生显著改变。腮腺向中线靠拢与腮腺体积减小呈正相关性。左、右侧腮腺的平均受照剂量 (mean dose, D_{mean})、50% 体积受照剂量 (dose to 50% of the volume, D_{50}) 增大病例数分别为 20 例 (42.55%)、17 例 (36.17%), 在增大的病例中, 左侧腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 分别增大了 21.3% 和 24.8%, 右侧腮腺分别增大了 13.7% 和 22.2%。左、右侧腮腺 D_{mean} 前期 (15 分次内) 增长温和, 普遍在 5% 左右, 极少患者超过 120%; 后期 (15 分次后) 增长显著加速, 幅度集中在 15%~20%。通过分次对比各个分割照射区段间的 D_{mean} 与 D_{50} 相对变化发现, 主要在 15 分次后,

基金项目: 肿瘤个性化医学协同创新中心恒瑞医药临床研究基金 (JZ21449020210616)。

利益冲突: 作者声明无利益冲突。

伦理批件: KY-2026-014。

知情同意: 有。

引用本文: 朱海港, 殷欣昊, 陈小四, 等. 基于 iCBCT 分析鼻咽癌自适应放疗过程中腮腺实际体积、位置和剂量的变化[J]. 中国癌症杂志, 2026, 36(3): 239-250.

CC 协议: CC BY-NC-ND 4.0。

Funding: Personalized Medicine Collaborative Innovation Center for Cancer and Tumors Hengrui Pharmaceuticals Clinical Research Fund (JZ21449020210616).

Conflicts of interest: authors declare no conflicts of interest.

Ethical approval: KY-2026-014.

Informed consent: available.

Cite this article: ZHU H G, YIN X H, CHEN X S, et al. Actual changes in volume, position and dose of parotid glands during adaptive radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma were analyzed based on iCBCT [J]. Chin Oncol, 2026, 36(3): 239-250.

CC license: CC BY-NC-ND 4.0.

存在明显的受照剂量相对增加, 左侧腮腺在16~20、21~25和30分次后, 相比于上次受照剂量, D_{mean} 分别提高2.2% (24.2 Gy)、4.6% (24.8 Gy) 和6.9% (26.1 Gy), D_{50} 分别提高2.1% (22.0 Gy)、5.6% (22.5 Gy) 和9.6% (24.0 Gy); 右侧腮腺在21~25、30分次后, D_{mean} 分别提高3.8% (25.3 Gy)、4.1% (26.0 Gy), D_{50} 分别提高6.5% (23.3 Gy)、9.7% (24.5 Gy)。左侧腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 与其质心向中线结构靠拢的相关性为0.72和0.70, 右侧腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 与其质心向中线结构靠拢的相关性为0.63和0.67。**结论:**腮腺在整个放疗过程中, 体积减小且向中线高剂量区靠拢, 腮腺受照剂量变化与腮腺质心向中线结构靠拢有关, 腮腺体积变小并不一定引起腮腺受照剂量增加, 且主要受照剂量的增加集中在15分次后, 因此较早重新计划可控制腮腺在整个放疗中受照剂量的增加。

[关键词] 自适应放疗; 鼻咽癌; 腮腺; 几何学变化; 剂量变化

中图分类号: R739.6 文献标志码: A

DOI: 10.19401/j.cnki.1007-3639.2026.03.004

Actual changes in volume, position and dose of parotid glands during adaptive radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma were analyzed based on iCBCT ZHU Haigang^{1,2,3}, YIN Xinhao^{1,2,4}, CHEN Xiaosi³, WANG Teng⁵, ZENG Qiang¹, GAO Han¹, YIN Li^{1,2,4} (1. Department of Radiation Oncology, Jiangsu Cancer Hospital, Nanjing 210009, Jiangsu Province, China; 2. The Fourth Clinical School of Medicine, Nanjing Medical University, Nanjing 211166, Jiangsu Province, China; 3. Department of Radiation Oncology, Dangtu County People's Hospital, Ma'anshan 243100, Anhui Province, China; 4. Department of Environmental Genomics, Jiangsu Key Laboratory of Cancer Biomarkers, Prevention and Treatment, Collaborative Innovation Center for Personalized Cancer Medicine, Nanjing Medical University, Nanjing 210009, Jiangsu Province, China; 5. Department of Radiation Oncology, The Second Affiliated Hospital of Xuzhou Medical University, Xuzhou 221006, Jiangsu Province, China)

Correspondence to: YIN Li E-mail: yinli_2012@126.com

[Abstract] **Background and purpose:** Radiation therapy, particularly intensity-modulated radiation therapy (IMRT), has become the standard radical treatment for nasopharyngeal carcinoma (NPC). It enhances local tumor control and reduces the radiation dose to organ at risk (OAR) through precise dose distribution, thereby improving patients' quality of life. However, during the treatment process, the volume and position of OAR such as the parotid gland may undergo significant changes, leading to deviations between the actual delivered dose and the planned dose, which increases the risk of adverse reactions. Adaptive radiotherapy (ART) effectively optimizes dose distribution by assessing and adjusting the treatment plan in real-time based on imaging. This study systematically analyzes the changes in the volume, position and radiation dose of the parotid gland with the accumulation of radiotherapy fractions, using iterative cone beam computed tomography (iCBCT) imaging data obtained from a Halcyon linear accelerator. The findings provide data support and a theoretical basis for optimizing radiotherapy practices for NPC and reducing parotid gland damage. **Methods:** NPC patients who were treated at Jiangsu Cancer Hospital from January 2018 to December 2022 were retrospectively enrolled. The body weight before and after treatment was recorded and compared. The parotid glands were contoured on the daily pre-treatment iCBCT images to analyze the absolute and relative volume reduction, shrinkage rate, and centroid displacement of the parotid glands. The correlation between medial displacement of the parotid glands and the extent of volume shrinkage was also assessed. Additionally, the actual cumulative radiation dose to the parotid glands over the entire treatment course was obtained using the Eclipse treatment planning system, and the correlation between dose variations and parotid gland volume changes or displacement was investigated. All statistical analyses were performed using the R language (version 4.5.1) within the RStudio integrated development environment (version 2025.05). Paired comparisons were conducted using the Wilcoxon signed-rank test, and Spearman rank correlation was employed for correlation analysis. **Results:** During radiotherapy, the overall trend in patient body weight was a decrease, with a statistically significant median reduction of 4.68%. Throughout the entire course of radiotherapy for NPC, the volumes of the left and right parotid glands decreased to 53.97% and 58.34% of their original volumes, respectively, and both glands exhibited positional changes to varying degrees. Specifically, the proportions of left parotid glands that moved medially, cranially, and anteriorly were 32 (68.09%), 25 (53.19%) and 23 (48.94%), respectively, while the corresponding proportions for the right parotid gland were 28 (59.57%), 35 (74.47%) and 24 (51.06%). Further analysis indicated that among patients with medial displacement, the shift was more pronounced within the first 15 treatment fractions; whereas for patients with cranial or anterior displacement, the difference in displacement before and after 15 fractions was not significant. Statistical test results also confirmed that the positions of both parotid glands along the X-axis had changed significantly by the 15th fraction compared to the initial plan. A positive correlation was observed between medial displacement and volume reduction of the parotid glands. The number of cases with an increase in mean dose (D_{mean}) and dose to 50% of the volume (D_{50}) for the left and right parotid glands was 20 (42.55%) and 17 (36.17%), respectively. Among these cases, the left D_{mean} and D_{50} increased by 21.3% and 24.8%, while the right D_{mean} and D_{50} increased by 13.7% and 22.2%, respectively. The D_{mean} for both left and right parotid glands showed a mild increase in the early stage (before the 15th fraction), generally around 5%, with very few patients exceeding 120%. In the later stage (after the 15th fraction), the increase accelerated significantly, primarily ranging between 15% and 20%. By comparing the

relative changes in D_{mean} and D_{50} across different fractionation intervals, we also found a notable relative increase in the delivered dose, primarily after the 15th fraction. For the left parotid gland, during fractions 16-20, 21-25 and after the 30th fraction, D_{mean} increased by 2.2% (24.2 Gy), 4.6% (24.8 Gy) and 6.9% (26.1 Gy) compared to the previous interval, respectively, while D_{50} increased by 2.1% (22.0 Gy), 5.6% (22.5 Gy) and 9.6% (24.0 Gy), respectively. For the right parotid gland, during fractions 21-25 and after the 30th fraction, D_{mean} increased by 3.8% (25.3 Gy) and 4.1% (26.0 Gy) compared to the previous interval, while D_{50} increased by 6.5% (23.3 Gy) and 9.7% (24.5 Gy), respectively. The correlations between changes in D_{mean} and D_{50} for the left parotid glands and the medial displacement of their centroids were 0.72 and 0.70. The correlations between changes in D_{mean} and D_{50} for the right parotid glands and the medial displacement of their centroids were 0.63 and 0.67. **Conclusion:** During the entire radiotherapy process, the parotid glands decreased in volume and moved closer to the midline high-dose region. The changes in the radiation dose received by the parotid glands were related to the movement of their centroids toward the midline structures. A reduction in parotid gland volume did not necessarily lead to an increase in the radiation dose received by the parotid glands, and the main increase in radiation dose occurred after 15 fractions. Therefore, early replanning can help control the increase in radiation dose received by the parotid glands throughout radiotherapy.

[Key words] Adaptive radiotherapy; Nasopharyngeal carcinoma; Parotid gland; Geometric change; Dosimetric change

鼻咽癌 (nasopharyngeal carcinoma, NPC) 是一种好发于东南亚地区及中国南部地区,而在欧美地区相对罕见的鼻咽部鳞状上皮细胞恶性肿瘤,多起源于咽隐窝处^[1-3]。在NPC高发地区,肿瘤的主要病理学类型为非角化未分化上皮细胞型,多与EB病毒 (Epstein-Barr virus, EBV) 感染有关,侵袭性高且远处转移多发^[4]。由于NPC复杂的解剖学结构、隐匿的好发部位及对放射线高度敏感的病理学类型,放疗已成为NPC的主要根治性治疗手段。调强适形放疗 (intensity-modulated radiation therapy, IMRT) 是目前NPC的标准治疗方法,与传统放疗相比,不仅可以为靶区提供高度适形且分布均匀的照射剂量,改善肿瘤局部控制,而且由于其陡峭的剂量梯度,能够减少危及器官 (organ at risk, OAR) 的受照剂量^[5-7],从而降低不良反应发生率,提高患者生存质量。但鼻咽部解剖学结构复杂,在治疗过程中体重、肿瘤及淋巴结体积、位置的改变,均可能使肿瘤周围OAR (脑干、脊髓、视神经、腮腺等) 的受照剂量偏离计划剂量限制,从而导致放疗相关不良反应的发生^[8]。腮腺由于其解剖位置及自身组织结构的特殊性,极易在放疗过程中发生改变,有研究^[9-14]表明,腮腺在放疗期间体积减小26%~30%,体积减小会导致腮腺向高剂量覆盖区移动的情况发生,从而显著增大腮腺的平均受照剂量 (mean dose, D_{mean}),导致口干等不良反应的发生率和严重程度明显增加。因此,在NPC治疗过程中,保留腮腺功能是改善患者生存质量的重要措施。

初始定位计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 和治疗计划并不能完全反映IMRT中OAR体积、位置及剂量学的变化,且传统放疗时只能持续将初始CT和治疗计划应用于

治疗全流程。因此自适应放疗 (adaptive radiotherapy, ART) 便成为缓解放疗过程中OAR照射剂量改变的重要技术。ART是利用影像数据来评估患者治疗过程中靶区和OAR的解剖变化及其对剂量学的影响,通过及时重新计划来确保靶区和OAR剂量分布准确性的同时减少OAR因解剖位置变化带来的实际受照剂量增加的风险^[7],根据放疗过程中的解剖结构改变进行重新计划生成的ART方案可显著改善腮腺的受照情况及功能状况^[15-18]。

为深入探究腮腺在放疗过程中的动态变化及其对剂量学的影响,本研究基于Halcyon加速器获取的迭代锥形束计算机断层扫描 (iterative cone beam computed tomography, iCBCT) 影像数据,对腮腺的体积、位置和受照剂量与放疗分次累加之间的关系进行系统性分析。通过追踪腮腺在不同放疗分次中的体积减小规律、空间位移特征及剂量累积效应,旨在为临床实践中NPC放疗的优化实施提供数据支持和理论依据。

1 资料和方法

1.1 研究对象

回顾性选取2018年1月—2022年12月在江苏省肿瘤医院放射肿瘤科接受根治性放疗的NPC患者。纳入标准:① 18岁≤年龄≤70岁;② 经病理学检查证实的NPC患者;③ 卡氏功能状态评分 (Karnofsky performance score, KPS) ≥70分,且无阻碍患者进行治疗的严重内科疾病;④ 首次接受放疗;⑤ 治疗前血常规、肝功能、肾功能等基本正常;⑥ 如果存在受孕风险,治疗过程中必须有效避孕;⑦ 患者及家属知情同意并已签署知情同意书。排除标准:① 年龄<18岁或>70岁;② 伴有恶病质等放疗禁忌证;③ 既往有精神病、

脑创伤、阿尔茨海默病、帕金森病等影响认知功能的疾病；④既往接受过手术治疗或放疗；⑤不能配合使用治疗固定装置的患者；⑥脑水肿症状严重的患者；⑦近5年内患有其他恶性肿瘤，但不包括已治愈的皮肤基底细胞癌和子宫颈原位癌；⑧有任何未控制的全身性疾病，包括脑水肿，活动性感染，未控制的高血压，糖尿病，不稳定性心绞痛，充血性心力衰竭，心肌梗死（治疗开始前1年内），需要药物治疗的严重心律失常，以及肝、肾代谢性疾病；⑨同时接受其他临床研究的试验性治疗（处于临床研究的试验性治疗期）。

1.2 治疗方案

1.2.1 模拟定位

患者治疗前均通过SOMATOM Definition AS 64排螺旋CT（德国Siemens公司）获取CT模拟定位，患者取仰卧位，双臂放松置于身侧，通过头颈肩热塑膜进行头颈部固定，注射碘海醇造影剂后接受CT模拟定位扫描，扫描范围从颅顶到胸骨柄，扫描层厚3 mm。

1.2.2 靶区勾画

采用6 MV光子的Halcyon直线加速器（美国Varian公司）进行IMRT。所有患者均接受双侧颈部放疗，治疗靶区勾画由1名经验丰富的主治医师在定位CT所得的图像上完成，并交由主任医师审核。根据患者的临床信息、内镜、影像学检查〔如CT、磁共振成像（magnetic resonance imaging, MRI）〕结果等确定患者的鼻咽原发肿瘤靶区（gross tumor volume of the primary nasopharynx, GTVnx）及转移淋巴结靶区（gross tumor volume of metastatic lymph nodes, GTVnd），临床靶区（clinical target volume, CTV）包括高危亚临床靶区（CTV1）和低危亚临床靶区（CTV2）。

1.2.3 处方剂量

GTVnx的处方剂量为66~76 Gy/32~34分次，GTVnd的处方剂量为60~70 Gy/32~34分次，CTV1的处方剂量为60.0~64.0 Gy/32分次，CTV2的处方剂量为50.4~54.0 Gy/28分次。每周放疗5次，GTV的单次剂量为2.00~2.18 Gy，CTV的单次剂量为1.80~1.88 Gy。

1.3 腮腺变化评估及计划设计

选择Halcyon自带的KV级CBCT获取患者每天治疗前的iCBCT图像以检测解剖结构变化。由高年资主治医师在患者每分次iCBCT上勾画左、右侧腮腺，经高年资副主任医师或主任医师检查

修改确认，统计每分次左、右侧腮腺体积和质心变化，质心坐标X代表左右方向、Y代表腹背方向、Z代表头脚方向。

由高年资物理师将带有腮腺的每分次iCBCT和定位CT导入到Velocity进行形变配准，分别生成对应分次的伪CT，并将每分次iCBCT上左、右侧腮腺刚性复制到对应的伪CT上，将带有左、右侧腮腺结构的伪CT回传到Eclipse计划系统（美国Varian公司）中，使用治疗计划在每分次伪CT上重建剂量，获得每分次的评估计划。评估计划的处方分次数不变，分次数改为1次来获得每分次左、右侧腮腺实际受照剂量，再将所有分次评估计划累加获得左、右侧腮腺在整个放疗期间的实际受照剂量。

1.4 数据描述性分析

1.4.1 体重变化

记录患者治疗前后体重，计算中位体重变化。

1.4.2 腮腺体积与位置变化分析

基于每天的iCBCT影像，分析双侧腮腺变化，描述绝对与相对体积减小值，并计算整个疗程平均体积缩小百分比。

同时，以X、Y、Z三轴评估腮腺三维空间的位置变化，统计在整个疗程中发生各方向位移的患者例数及百分比。将治疗过程以第15次分割照射为界分为前后两个阶段，分别计算质点发生向中线、头侧和面侧位移的患者群体左、右侧腮腺在X轴上15分次内和15分次后的平均位置变化之和。

1.4.3 腮腺受照剂量变化分析

描述患者双侧腮腺的 D_{mean} 及50%体积受照剂量（dose to 50% of the volume, D_{50} ）的剂量学变化，统计剂量增加或减少的病例数，并在剂量增加亚组中计算 D_{mean} 和 D_{50} 的平均增加百分比。

将疗程划分为不同区段（如前15次、16~25次等），统计各阶段 D_{mean} 超过预设阈值（如>105%、>110%）的患者例数，并计算各阶段相对于前一区段的剂量变化百分比。

1.5 统计学处理

所有统计学分析均使用R语言（版本4.5.1）在RStudio集成开发环境（版本2025.05）中完成， $P<0.05$ 为差异有统计学意义。使用Wilcoxon符号秩检验比较配对样本：①比较患者治疗初始与结束时的体重差异；②以第15分次分割为界，比较前后两阶段的体积减小速率（ $\text{cm}^3/\text{分次}$ ）；③比较治疗前、后两个阶段（以第15分次分割

为界)腮腺在空间上位移程度的差异;④比较各阶段重建剂量与初始计划剂量的差异。采用Spearman秩相关分析对变量间的相关性进行评估:①评估在整个放疗过程中,双侧腮腺向中线的位移幅度与其体积缩小程度之间的相关性;②检验腮腺体积变化、质心位移与 D_{mean} 、 D_{50} 变化百分比之间的相关性。

2 结果

2.1 患者的一般临床特征

患者纳入和排除流程图见图1,最终纳入NPC患者共47例,其男性29例,女性18例,中位年龄50岁(范围:18~70岁),所有患者均完成了IMRT治疗,中位治疗33分次(范围:32~34分次),患者的一般临床特征见表1。

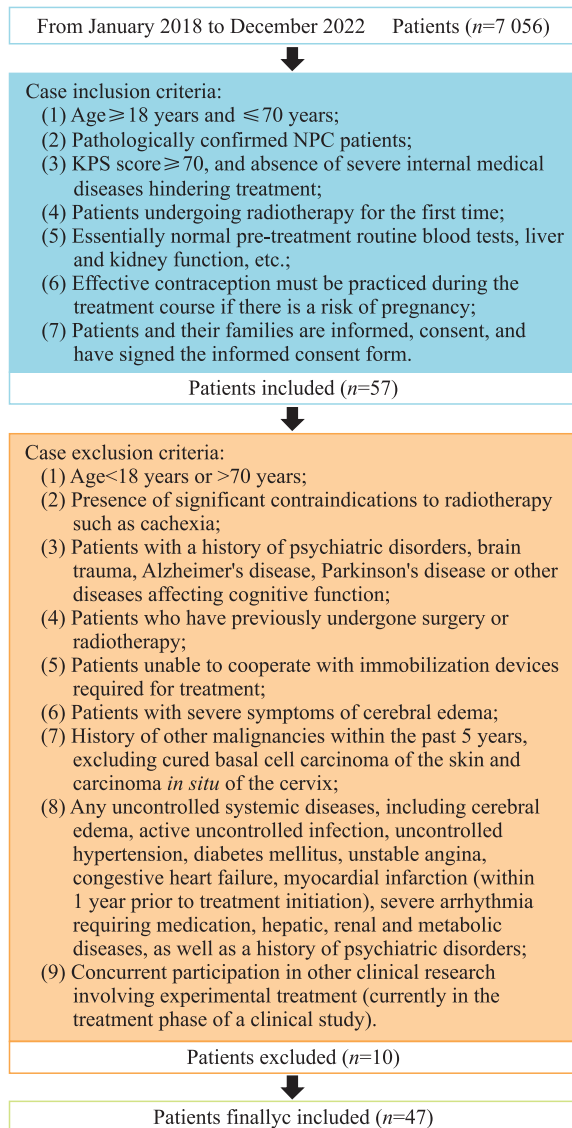


图1 患者纳入和排除流程图

Fig. 1 Patient Inclusion and Exclusion Flowchart

2.2 体重变化

患者在放疗过程中总体呈现体重减轻趋势,从治疗开始到疗程结束,中位体重变化为-4.68%(范围:-20.31%~4.00%, Wilcoxon符号秩检验 $P<0.001$)。患者在放疗过程中体重降低的主要原因包括:放疗引起的口腔黏膜炎、口干、味觉改变或丧失导致进食困难和疼痛,进而减少食物摄入;同时,放疗可能损伤唾液腺,影响消化功能,加之肿瘤本身及治疗带来的疲劳和代谢消耗增加,共同导致营养摄入不足和体重下降。

表1 患者的一般临床特征

Tab. 1 General clinical characteristics of the patients

[n (%)]

Characteristic	Case
Gender	
Male	29 (61.70)
Female	18 (38.30)
KPS	
≥70	47 (100.00)
Primary tumor site	
Left lateral wall	14 (29.79)
Right lateral wall	18 (38.30)
Bilateral walls	9 (19.15)
Left retropharyngeal wall	0 (0.00)
Right retropharyngeal wall	1 (2.13)
Posterosuperior wall	20 (42.55)
Unknown	2 (4.26)
T stage	
T1	6 (12.77)
T2	6 (12.77)
T3	17 (36.17)
T4	18 (38.30)
N stage	
N0	1 (2.13)
N1	20 (42.55)
N2	11 (23.40)
N3	14 (29.79)
M stage	
M0	47 (100.00)
Antitumor drug regimen	
Induction chemotherapy	38 (80.85)
Concurrent chemotherapy	45 (95.74)
Adjuvant chemotherapy	27 (57.45)
Targeted therapy	29 (61.70)
Immunotherapy	11 (23.40)

2.3 患者腮腺体积、位置变化分析

每例患者的平均腮腺体积在疗程中均显著减小(图2、3), 仅有1例患者的左侧腮腺体积相较于初始体积增加(107.5%)。患者左、右侧腮腺体积在整个放疗结束后分别减小为原体积的53.97%、58.34%, 左、右侧腮腺中位体积分别减小10.0、9.4 cm³(范围为-0.6~38.8、0.2~79.9 cm³), 左、右侧腮腺中位相对体积分别减小46.67%、42.42%(范围为-7.5%~87.78%、2.5%~88.29%)。根据每天iCBCT观察到的体积变化趋势, 腮腺体积的减少主要发生在前15分次治疗期间。

与15分次后的体积变化相比, 15分次内的变化趋势更为陡峭。15分次内左、右侧腮腺的中

位体积减小速率分别为0.34、0.29 cm³/分次(范围为-0.17~1.22、-0.13~3.71 cm³/分次); 而在15分次后, 体积减小速率趋于平缓并基本稳定, 15分次后的中位体积减小速率为0.3、0.26 cm³/分次(范围为-0.06~1.40、-0.05~1.40 cm³/d), 但差异无统计学意义($P>0.05$)。

左侧腮腺向中线、头侧和面侧靠拢的患者分别有32例(68.09%)、25例(53.19%)和23例(48.94%), 右侧腮腺分别有28例(59.57%)、35例(74.47%)和24例(51.06%)。

对质点向中线、头侧和面侧靠拢的患者群体分析其总体位移情况并进行计算汇总。通过腮腺质点在X、Y、Z轴上的位置, 计算每例患者腮腺质点的位移情况。通过Wilcoxon符号秩检验,

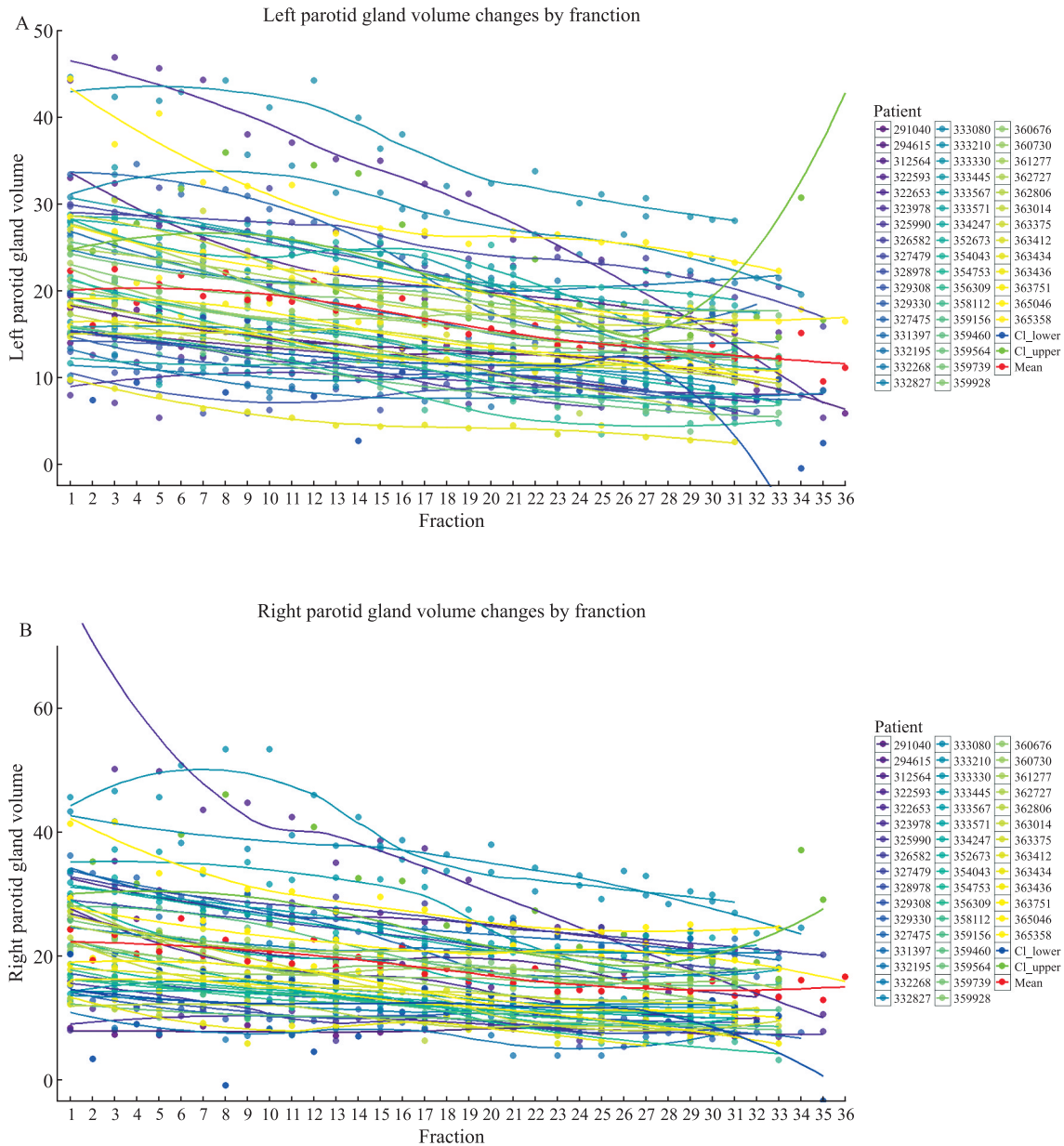


图2 患者在疗程中腮腺体积变化趋势

Fig. 2 Trend of volume changes in the parotid gland during the treatment course

A: The left parotid gland; B: The right parotid gland.

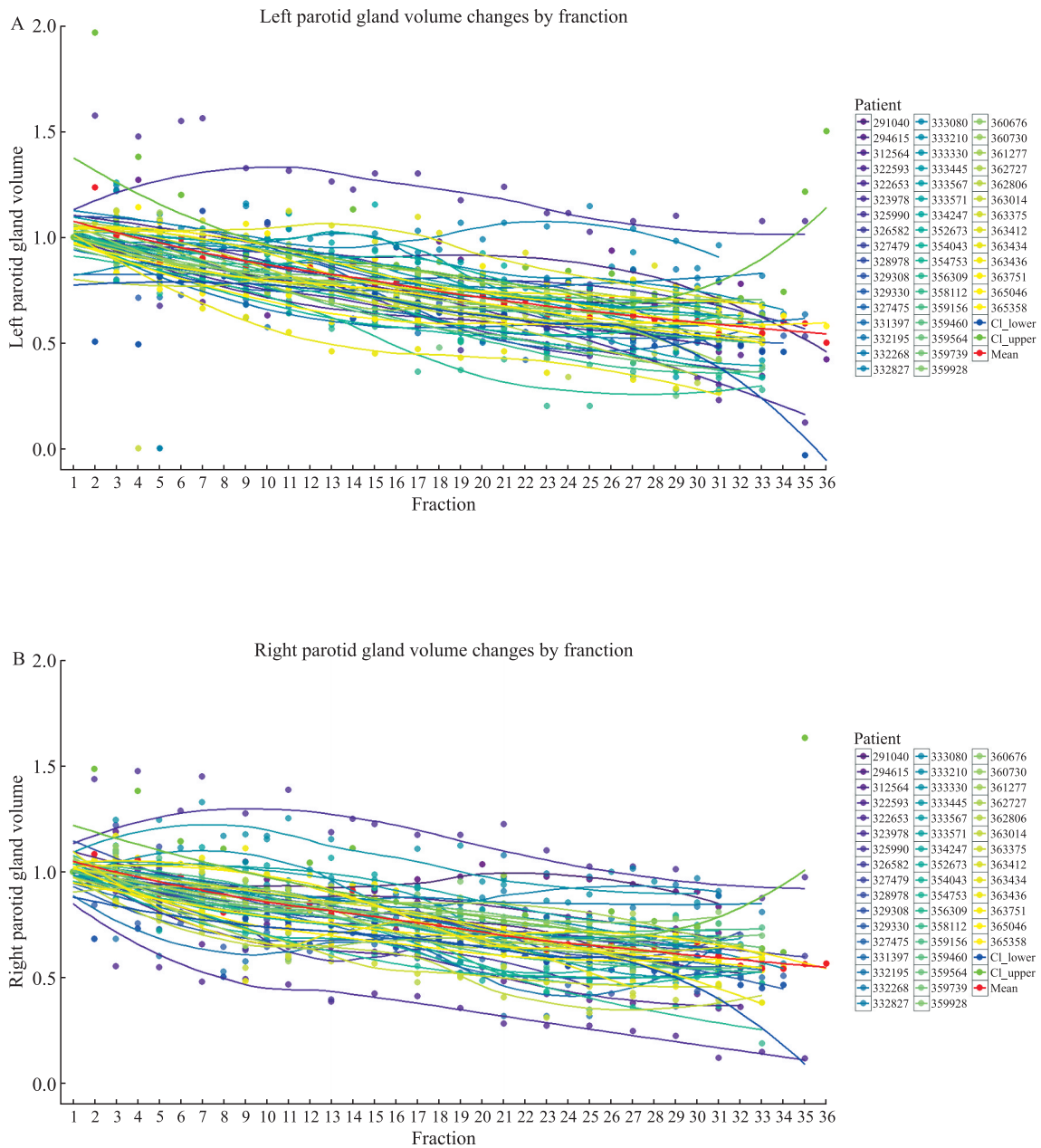


图3 患者在疗程中腮腺体积相对变化趋势

Fig. 3 Trend of relative volume changes of the parotid gland during the treatment course

A: The left parotid gland; B: The right parotid gland.

分析腮腺质点在15分次前后位移情况的差异，发现在质点向中线位移的患者中，15分次内的两侧腮腺向中线位移情况（左、右侧距离相加）更为显著（15分次内：0.033 6 cm/分次；15分次后：0.000 09 cm/分次， $P=0.002$ ），但对于质点向头端和面端靠拢的患者而言，Wilcoxon符号秩检验显示，15分次前后之间并无显著差异（向头端，15分次内：0.024 1 cm/分次；15分次后：0.019 8 cm/分次， $P=0.635$ ；向面端，15分次内：0.017 8 cm/分次；15分次后：0.018 0 cm/分次， $P=0.735$ ）。

此外通过Wilcoxon符号秩检验，对腮腺质点各个放疗分割时间段（5分次、10分次、15分

次、20分次、25分次、30分次、30分次后）的位置与腮腺质点初始位置进行统计学分析，发现左、右侧腮腺在前15分次内，发生了显著位移，左、右侧在X轴上的质点位置情况，在15分次时与初始计划时差异有统计学意义（表2）。

进行Spearman相关性分析发现，左、右侧腮腺整个放疗过程中向中线位移及体积变化情况呈正相关性，向中线位移患者的Spearman相关系数分别为0.397（0.057~0.655）、0.304（-0.078~0.608）。但向头端及面端位移并未显示出一致性。因此推测腮腺在放疗过程中，因受照射而体积缩小会导致其向中线高剂量区位移。

2.4 腮腺受照射剂量分析

47例患者中左、右侧腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 增大的分别有20例(42.55%)和17例(36.17%),减小的分别有27例(57.45%)和30例(63.83%)。在增大的病例中,左侧腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 分别增大121.3%和124.8%,右侧腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 分别增大113.7%和122.2%。

在腮腺受照射剂量增加的患者中,左、右侧腮腺 D_{mean} 逐渐增加,治疗5分次内增大超过105%的有9例(19.15%)、4例(8.51%),超过110%的有3例(6.38%)、3例(6.38%),而在30分次后,左、右侧腮腺 D_{mean} 超过105%的有16例(34.04%)、9例(19.15%),超过110%的有15例(31.91%)、5例(10.64%)。患者在15分次内腮腺 D_{mean} 增加范围主要集中在5%左右,例如,在15分次内, D_{mean} 增加至105%的患者为11例(23.40%)、6例(12.77%),而超过120%的患者仅为2例(4.26%)、2例(4.26%);而在15分次后,患者腮腺 D_{mean} 增加显著,范围主要集中在15%~20%,30分次后约半数患者均超过120% [超过120%的有8例(17.02%)、4例(8.51%),表3]。

通过分次对比各个分割照射区段间的 D_{mean} 和 D_{50} 的相对变化(表4),发现在15分次后,存在明显的受照剂量相对增加的情况,在左侧腮腺,在16~20分次、21~25分次、30分次后,相比于前1次受照剂量, D_{mean} 分别提高2.2%(24.2 Gy)、4.6%(24.8 Gy)、6.9%(26.1 Gy), D_{50} 分别提高2.1%(22.0 Gy)、5.6%(22.5 Gy)、9.6%(24.0 Gy);在右侧腮腺,在21~25分次、30分次后, D_{mean} 分别提高3.8%(25.3 Gy)、4.1%(26.0 Gy), D_{50} 分别提高6.5%(23.3 Gy)、9.7%(24.5 Gy)。此外,通过Wilcoxon符号秩检验发现,在15分次后,左、右侧腮腺重新评估的 D_{50} 均与初始受照剂量展现出显著性差异(表5)。上述结果提示腮腺在15分次内的位置或体积变化,导致腮腺向中线高剂量区位移,可能使其在15分次后的受照剂量明显增加。

2.5 影响腮腺受照射剂量变化的因素

通过Spearman相关性分析发现,左、右侧腮腺整个放疗过程的 D_{mean} 和 D_{50} 变化与腮腺体积变化无明显相关性;而腮腺在放疗过程中的向中线位移情况,却对受照剂量产生影响,左侧腮腺的 D_{mean} 和 D_{50} 与其质心向中线结构靠拢相关性为

表2 不同治疗分次时质点位移情况的比较

Tab. 2 Comparison of centroid displacement at different treatment fractions

Direction of displacement	P value						
	≤5 fractions	≤10 fractions	≤15 fractions	≤20 fractions	≤25 fractions	≤30 fractions	>30 fractions
Left parotid- medial shift	0.304	0.012	0.002	0.004	<0.001	0.009	<0.001
Left parotid- ventral shift	0.198	1.000	0.733	0.061	0.022	0.008	<0.001
Left parotid- cephalad shift	0.004	0.021	0.035	0.011	0.003	<0.001	<0.001
Right parotid- medial shift	0.431	0.239	0.026	0.010	<0.001	<0.001	<0.001
Right parotid- ventral shift	0.028	0.520	0.007	0.002	0.001	<0.001	<0.001
Right parotid- cephalad shift	0.039	0.0005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

表3 腮腺 D_{mean} 增大百分比-治疗分次分布

Tab. 3 Distribution of percentage increase in D_{mean} to parotid glands by treatment fraction

Dose increase threshold	Parotid gland	[n (%)]						
		1-5 fractions	6-10 fractions	11-15 fractions	16-20 fractions	21-25 fractions	26-30 fractions	>30 fractions
≥105%	Left	9 (19.15)	8 (17.02)	11 (23.40)	11 (23.40)	12 (25.53)	13 (27.66)	16 (34.04)
	Right	4 (8.51)	5 (10.64)	6 (12.77)	8 (17.02)	12 (25.53)	8 (17.02)	9 (19.15)
≥110%	Left	3 (6.38)	1 (2.13)	3 (6.38)	8 (17.02)	10 (21.28)	11 (23.40)	15 (31.91)
	Right	3 (6.38)	3 (6.38)	3 (6.38)	4 (8.51)	8 (17.02)	6 (12.77)	5 (10.64)
≥115%	Left	2 (4.26)	0 (0.00)	3 (6.38)	7 (14.89)	7 (14.89)	9 (19.15)	12 (25.53)
	Right	2 (4.26)	0 (0.00)	2 (4.26)	4 (8.51)	3 (6.38)	5 (10.64)	5 (10.64)
≥120%	Left	0 (0.00)	0 (0.00)	2 (4.26)	5 (10.64)	5 (10.64)	5 (10.64)	8 (17.02)
	Right	1 (2.13)	0 (0.00)	2 (4.26)	1 (2.13)	2 (4.26)	2 (4.26)	4 (8.51)
≥125%	Left	0 (0.00)	0 (0.00)	2 (4.26)	2 (4.26)	5 (10.64)	5 (10.64)	7 (14.89)
	Right	1 (2.13)	0 (0.00)	1 (2.13)	1 (2.13)	2 (4.26)	1 (2.13)	2 (4.26)
≥130%	Left	0 (0.00)	0 (0.00)	2 (4.26)	2 (4.26)	3 (6.38)	5 (10.64)	6 (12.77)
	Right	0 (0.00)	0 (0.00)	1 (2.13)	1 (2.13)	1 (2.13)	0 (0.00)	1 (2.13)

表4 腮腺 D_{mean} 增大百分比-治疗分次分布
Tab. 4 Relative changes in D_{mean} to the parotid glands

Item	1-5 fractions	6-10 fractions	11-15 fractions	16-20 fractions	21-25 fractions	26-30 fractions	>30 fractions
Left parotid D_{mean}	+1.5% (22.8 Gy)	+1.6% (23.1 Gy)	+3.0% (23.5 Gy)	+2.2% (24.2 Gy)	+4.6% (24.8 Gy)	+0.6% (25.9 Gy)	+6.9% (26.1 Gy)
Left parotid D_{50}	+0.9% (20.5 Gy)	+2.5% (20.7 Gy)	+3.7% (21.2 Gy)	+2.1% (22.0 Gy)	+5.6% (22.5 Gy)	+0.8% (23.8 Gy)	+9.6% (24.0 Gy)
Right parotid D_{mean}	+0.6% (24.1 Gy)	-0.4% (24.3 Gy)	+3.9% (24.2 Gy)	+0.9% (25.1 Gy)	+3.8% (25.3 Gy)	+1.2% (25.7 Gy)	+4.1% (26.0 Gy)
Right parotid D_{50}	+0.1% (21.8 Gy)	+1.1% (21.8 Gy)	+5.3% (22.1 Gy)	+0.2% (23.2 Gy)	+6.5% (23.3 Gy)	+1.7% (24.1 Gy)	+9.7% (24.5 Gy)

表5 初始受照剂量与不同治疗分次的比较
Tab. 5 Comparison of initial radiation dose with doses at different treatment fractions

Item	P value						
	5 fractions	10 fractions	15 fractions	20 fractions	25 fractions	30 fractions	>30 fractions
Left parotid D_{mean}	0.460	0.060	0.050	0.050	0.005	0.004	<0.001
Left parotid D_{50}	0.290	0.048	0.002	0.050	<0.001	0.005	<0.001
Right parotid D_{mean}	0.930	0.850	0.240	0.100	0.020	0.050	<0.001
Right parotid D_{50}	0.850	0.580	0.060	0.050	0.040	0.050	<0.001

0.72 (0.545~0.834) 和 0.70 (0.517~0.822)，右侧腮腺的 D_{mean} 和 D_{50} 与其质心向中线结构靠拢相关性为 0.63 (0.419~0.777) 和 0.67 (0.474~0.803)，与其他两个方向位置变化相关性较弱 (表6)。

表6 腮腺受照剂量与质心坐标变化相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis between radiation dose to parotid glands and centroid coordinate changes

Item	Axis	Displacement direction	Spearman's ρ
Left parotid D_{mean}	X	Medial-lateral	0.72 (0.545-0.834)
	Y	Anterior-posterior	0.16 (-0.134-0.427)
	Z	Superior-inferior	0.20 (-0.093-0.461)
Left parotid D_{50}	X	Medial-lateral	0.70 (0.517-0.822)
	Y	Anterior-posterior	0.12 (-0.173-0.393)
	Z	Superior-inferior	0.17 (-0.123-0.436)
Right parotid D_{mean}	X	Medial-lateral	0.63 (0.419-0.777)
	Y	Anterior-posterior	0.12 (0.419-0.777)
	Z	Superior-inferior	0.46 (0.199-0.660)
Right parotid D_{50}	X	Medial-lateral	0.67 (0.474-0.803)
	Y	Anterior-posterior	0.07 (-0.222-0.350)
	Z	Superior-inferior	0.42 (0.151-0.631)

X indicates the medial-lateral direction; Y indicates the anterior-posterior direction; Z indicates the superior-inferior direction.

腮腺质心位置变化与初始计划腮腺的 D_{max} 、 D_{min} 、 D_{mean} 和 D_{50} 的相关分析结果均低于 0.3，与腮腺的最大、最小、平均 HU 值和 HU 值范围的相关性分析结果均低于 0.25。

3 讨论

ART 是在疗程早期通过系统地监测靶区及 OAR 解剖位置的变化，并纳入这些变化来重新优化计划，从而改善放疗效果 [7]。ART 的实现通常被分为在治疗分次之后的离线、在治疗分次之前的在线及在治疗分次期间的实时。在头颈部肿瘤的前瞻性临床试验中，离线 ART 已显示出改善靶区覆盖和降低 OAR 受照剂量的效果 [17]。

基于 CBCT 的 ART 剂量计算是一个活跃的研究领域 [19-25]。有研究 [23-25] 指出，iCBCT 重建在图像质量上具有优势，如提高 HU 均匀性和一致性，减少条形伪影和图像噪声。基于 iCBCT 能够较为清晰地识别腮腺边界，勾画获得腮腺能够更精准地反映腮腺每天治疗前的轮廓和位置。Washio 等 [25] 研究发现，基于 iCBCT 能够提供更为准确的计量计算基础。

本研究基于直线加速器 Halcyon 获取的每天治疗前的 iCBCT 图像勾画腮腺，获取腮腺在放疗过程中的体积及位置变化，此外为了减少 iCBCT

与定位CT之间的CT-ED值转换差异导致的剂量计算不准确性, 本研究通过形变配准后生成伪CT, 将每个治疗分次的腮腺刚性复制到对应的伪CT上, 使用治疗计划在伪CT上重新计算剂量, 获得腮腺的剂量分布。

He等^[9]的研究表明, 在头颈部放疗期间同侧和对侧腮腺体积分别显著减少了39.4%和37.1%。Wu等^[26]的研究指出, 腮腺体积在放疗期间显著下降, 平均体积减小为原腮腺体积的25.5%。Ilangovan等^[27]研究发现, 随着放疗疗程增加, 双侧腮腺体积明显减小(同侧和对侧均萎缩33%~36%), 而这一解剖变化导致了双侧腮腺的 D_{mean} 显著增加。Gayakwad等^[28]研究发现, 腮腺在头颈部放疗过程中体积减小且呈现向内侧移位趋势, 此外腮腺受照剂量增加。Kumar等^[29]在一项前瞻性观察研究中通过15分次时CT图像制订的重新计划与初始计划对比, 发现腮腺受照剂量(D_{mean} 、 D_{50})显著增加。Yu等^[30]的研究表明, 在放疗过程中, 双侧腮腺受照剂量逐渐增加, 显著的剂量变化主要发生在第3~6周。

本研究中左、右侧腮腺体积放疗结束后分别减小为原体积的53.97%、58.34%, 左侧腮腺向中线、头侧和面侧靠拢的患者分别有32例(68.09%)、25例(53.19%)和23例(48.94%), 右侧腮腺分别有28例(59.57%)、35例(74.47%)和24例(51.06%), 且腮腺的体积变化及质点向中线位移情况在15分次内相较于15分次后更为明显, 右腮腺向中线位移情况与腮腺体积变化均呈正相关性。本研究的腮腺体积变化相对上述研究更加显著^[26-27], 可能与纳入患者分期相对较晚, 且放疗前接受诱导化疗有关, 诱导化疗会导致一般情况不佳伴食欲减退, 从而引起腮腺脂肪/实质体积减小。

通过筛选分析, 本研究中左、右侧腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 增大的病例分别为20例(42.55%)和17例(36.17%), 通过计算这些患者的不同分割放疗次数区间的 D_{mean} 、 D_{50} 平均相对变化, 发现受照剂量的增加主要集中在15分次后, 通过相关性分析发现引起左、右侧腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 增大与腮腺质心向中线结构靠拢有关, 其相关性分析结果分别为0.72和0.70、0.63和0.67, 但腮腺 D_{mean} 和 D_{50} 增大并未与腮腺体积减小显示出明显相关性。上述结果说明腮腺体积减小会使双侧腮腺向中线结构靠拢, 导致腮腺向高剂量区移动, 这是腮腺受照剂量增加的主要原因, 该机制与以往研究结

果^[27-30]极为相似。

Atienza等^[31]通过放疗方案的重新计划, 显著改善了NPC患者OAR的受照情况, 其中腮腺平均累积剂量降低4.1%, 极大程度地促进了患者生存质量改善。

本研究发现, 在腮腺 D_{mean} 增大的病例中, 大部分病例腮腺 D_{mean} 低于120%, 左侧腮腺为14例, 右侧腮腺为13例。5分次内左、右侧腮腺 D_{mean} 增大大部分未超过105%, 10分次内大部分未超过110%, 15分次内大部分未超过115%, 但在15分次后, 存在腮腺受照剂量的显著增加, 左、右侧腮腺超过初始受照剂量120%的人数显著增加。

Gan等^[32]的研究亦表明, 对于接受头颈部照射的患者而言, 在第3周(即第15分次)左右, 进行重新计划, 有助于控制头颈部周围OAR, 尤其是双侧腮腺的累计受照剂量。

综上所述, 腮腺初始受照剂量在剂量限值边缘且治疗过程中腮腺质心向中线结构移动的患者, 在治疗前15分次内需利用离线ART进行每分次腮腺实际受照剂量的评估, 发现腮腺受照剂量增加超过限值时应立即重新计划。如腮腺初始受照射剂量较低, 可根据腮腺受照剂量增大的幅度选择重新计划的时机。然而, 并非所有患者均表现出腮腺体积减小和向内线位移的趋势, 提示腮腺的几何学变化可能存在潜在影响因素。本研究分析了腮腺质心变化与腮腺初始受照射剂量、腮腺受照射前HU值分布之间的相关性, 结果均未超过0.3, 可能是本研究选择描述腮腺初始受照射剂量、腮腺受照射前HU值分布的参数不够准确, 不能反映其与腮腺质心变化的关系, 后续研究中还需要引入影像组学和剂量组学参数来探索腮腺质心变化的规律, 以预测临床中患者腮腺受照剂量是否随照射次数累积而增大。腮腺在整个放疗期间体积减小并不一定会引起腮腺实际受照剂量的增加, 前15分次腮腺受照导致的体积减小使腮腺质心向中线高剂量区移动才有可能增加腮腺实际受照射剂量; 腮腺质心向高剂量区移动与腮腺初始受照射 D_{min} 、 D_{max} 、 D_{mean} 、 D_{50} 相关性不大, 与腮腺受照射之前的HU分布相关性不大; 腮腺受照剂量增加主要集中在15分次后, 15分次内剂量增加大部分不超过115%, 因此建议临床上不仅要密切关注腮腺受照剂量增加的患者, 尽早根据腮腺治疗计划的剂量分布选择合适的重新计划介入时机(15分次内), 治疗计划腮腺受照剂量越高应越早重新计划, 还应关注在NPC放

疗过程中腮腺质心位置向高剂量区移动的患者,这可能是优化NPC放疗方案并筛选可以从优化治疗方案中获益的患者的有益策略。

尽管本研究为NPC放疗中腮腺几何学变化及其对受照剂量的影响提供了有价值的见解,但仍存在以下局限性,需要在后续研究中予以完善:

① 单中心设计:本研究为单中心研究,研究结果可能受到特定机构设备、治疗流程及患者人群特征的影响,外部推广性受限。多中心、大样本研究将有助于验证本研究结论的普遍适用性。② 样本量有限:本研究共纳入47例患者,样本量相对较小,无法充分揭示所有潜在影响因素(如肿瘤分期、诱导化疗方案等)与腮腺变化之间的复杂关系。扩大样本量有望增强研究结论的可靠性。③ 未系统记录口腔开口度:口腔开口度可能影响腮腺位置及体积,但本研究未系统记录该参数,因此无法评估其与腮腺位移或剂量变化的相关性。未来研究应考虑纳入口腔开口度等动态解剖因素。④ 腮腺勾画及剂量计算的依赖性:本研究基于iCBCT图像进行腮腺勾画,并通过形变配准生成伪CT进行剂量计算。尽管该方法被证实较为准确,但仍可能受到图像分辨率、配准误差及CT-ED转换不确定性的影响,可能引入一定的系统误差。⑤ 未考虑其他OAR及临床终点:研究聚焦于腮腺的变化,未系统评估其他OAR(如颌下腺、口腔黏膜等)的剂量学变化,也未直接关联临床终点(如口干症发生率、生活质量评分等)。未来研究应整合多个OAR评估及长期临床随访。⑥ 时间分辨率与重新计划时机的普适性:本研究提出15分次内进行剂量评估及重新计划的建议,但最佳重新计划时机可能因患者个体差异(如解剖变化速度、初始剂量分布等)而有所不同。本研究结果仍需在前瞻性临床实践中进一步验证。

第一作者:

朱海港 (ORCID: 0009-0000-8565-5871), 硕士在读, 副主任医师。

通信作者:

尹丽 (ORCID: 0000-0001-5280-0075), 博士, 主任医师, 江苏省肿瘤医院放疗科副主任, E-mail: yinli_2012@126.com。

作者贡献声明:

朱海港, 殷欣昊, 陈小四: 构思研究, 撰写论文初稿, 阅读并批准论文终稿; 王藤, 曾强, 高瀚: 参与数据收集, 阅读并批准论文终稿; 尹丽: 修改并编辑论文, 阅读并批准论文终稿。

[参 考 文 献]

- [1] SU Z Y, SIAK P Y, LWIN Y Y, et al. Epidemiology of nasopharyngeal carcinoma: current insights and future outlook [J]. *Cancer Metastasis Rev*, 2024, 43(3): 919-939.
- [2] AN G L, LIU J, LIN T, et al. Global trends in research of nasopharyngeal carcinoma: a bibliometric and visualization analysis[J]. *Front Oncol*, 2024, 14: 1392245.
- [3] LIU Q Q, WANG H Y, CHEN Z, et al. Global, regional, and national epidemiology of nasopharyngeal carcinoma in middle-aged and elderly patients from 1990 to 2021 [J]. *Ageing Res Rev*, 2025, 104: 102613.
- [4] MAHDAVI P, PANAHIPOOR JAVAHERDEHI A, KHANJANPOOR P, et al. The role of c-Myc in Epstein-Barr virus-associated cancers: mechanistic insights and therapeutic implications[J]. *Microb Pathog*, 2024, 197: 107025.
- [5] JIANG W, LV J W, TANG L L, et al. Enhancing efficacy and reducing toxicity: therapeutic optimization in locoregionally advanced nasopharyngeal carcinoma[J]. *Cell Rep Med*, 2024, 5(6): 101594.
- [6] YUCE SARI S, YILMAZ M T, YAZICI G, et al. Analysis of patients with parotid recurrence after parotid-sparing IMRT for nasopharyngeal carcinoma: case series and review of the literature[J]. *Strahlenther Onkol*, 2024, 200(12): 1057-1065.
- [7] ZHOU X T, SHAO T C, JIA H J, et al. Current state, challenges, and future perspective of adaptive radiotherapy: a narrative review of nasopharyngeal carcinoma [J]. *Oral Oncol*, 2024, 158: 107008.
- [8] CHEN K, CAI Y, JIANG L Y, et al. Radiotherapy-related quality of life in nasopharyngeal carcinoma patients: a systematic review and meta-analysis [J]. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*, 2024, 86(5/6): 200-210.
- [9] WANG H, FAN M, YAN L, et al. Early prediction of parotid glands secretory function based on ADC variations during radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma: a phase II prospective study[J]. *Radiat Oncol*, 2025, 20(1): 117.
- [10] MENDESSI O, DAOUD B, NOURI O, et al. Comparison of static and dynamic intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma: dosimetric and normal tissue complication probability analysis[J]. *Cancer Radiother*, 2025, 29(4): 104645.
- [11] ZHENG L R, MEI Q L, GAO Y X, et al. Parotid gland stem cell preservation during intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma: dosimetric analysis and feasibility [J]. *J Oncol*, 2022, 2022: 4922409.
- [12] ZHENG L R, TONG L, DU F L, et al. Effect of three-dimensional conformal radiotherapy and intensity-modulated radiotherapy on parotid gland function and quality of life in patients with nasopharyngeal carcinoma [J]. *Am J Transl Res*, 2021, 13(5): 5272-5279.
- [13] TASAKA S, JINGU K, TAKAHASHI N, et al. The long-term recovery of parotid glands in nasopharyngeal carcinoma treated by intensity-modulated radiotherapy [J]. *Front Oncol*, 2021, 11: 665837.
- [14] CHEN X M, HUANG X T, WANG Y J, et al. Positioning accuracy and dosimetric evaluation of customized immobilization for FBCT guided VMAT in nasopharyngeal carcinoma [J]. *Sci Rep*, 2025, 15(1): 42284.

- [15] ARISTOPHANOUS M, ALIOTTA E, LICHTENWALNER P, et al. Clinical experience with an offline adaptive radiation therapy head and neck program: dosimetric benefits and opportunities for patient selection[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2024, 119(5): 1557–1568.
- [16] WONG J D, NG A H, TAN L K, et al. Timing or criteria to trigger adaptive radiotherapy (ART) for nasopharyngeal carcinoma (NPC): a systematic review[J]. *Phys Med*, 2025, 139: 105203.
- [17] CASTELLI J, THARIAT J, BENEZERY K, et al. Weekly adaptive radiotherapy vs standard intensity-modulated radiotherapy for improving salivary function in patients with head and neck cancer: a phase 3 randomized clinical trial[J]. *JAMA Oncol*, 2023, 9(8): 1056–1064.
- [18] BOLLEN H, ONORATI E, LAENEN A, et al. Strategy to select nasopharyngeal cancer patients for adaptive radiotherapy[J]. *Front Oncol*, 2025, 15: 1653060.
- [19] BRANCO D, MAYADEV J, MOORE K, et al. Dosimetric and feasibility evaluation of a CBCT-based daily adaptive radiotherapy protocol for locally advanced cervical cancer[J]. *J Appl Clin Med Phys*, 2023, 24(1): e13783.
- [20] DAI X J, LEI Y, WANG T H, et al. Head-and-neck organs-at-risk auto-delineation using dual pyramid networks for CBCT-guided adaptive radiotherapy[J]. *Phys Med Biol*, 2021, 66(4): 045021.
- [21] IRMAK S, GEORG D, LECHNER W. Comparison of CBCT conversion methods for dose calculation in the head and neck region[J]. *Z Med Phys*, 2020, 30(4): 289–299.
- [22] BELSHAW L, AGNEW C E, IRVINE D M, et al. Adaptive radiotherapy for head and neck cancer reduces the requirement for rescans during treatment due to spinal cord dose[J]. *Radiat Oncol*, 2019, 14(1): 189.
- [23] MAO W H, LIU C, GARDNER S J, et al. Evaluation and clinical application of a commercially available iterative reconstruction algorithm for CBCT-based IGRT[J]. *Technol Cancer Res Treat*, 2019, 18: 1533033818823054.
- [24] GARDNER S J, MAO W H, LIU C, et al. Improvements in CBCT image quality using a novel iterative reconstruction algorithm: a clinical evaluation[J]. *Adv Radiat Oncol*, 2019, 4(2): 390–400.
- [25] WASHIO H, OHIRA S, FUNAMA Y, et al. Accuracy of dose calculation on iterative CBCT for head and neck radiotherapy[J]. *Phys Med*, 2021, 86: 106–112.
- [26] WU V W C, YING M T, KWONG D L, et al. A longitudinal study on parotid and submandibular gland changes assessed by magnetic resonance imaging and ultrasonography in post-radiotherapy nasopharyngeal cancer patients[J]. *BJR Open*, 2020, 2(1): 20200003.
- [27] ILANGOVA B, VENKATRAMAN M, BALASUNDARAM S. Volume changes during head-and-neck radiotherapy and its impact on the parotid dose—a single-institution observational study[J]. *J Cancer Res Ther*, 2020, 16(3): 575–580.
- [28] GAYAKWAD S, BUDRUKKAR A, MURTHY V, et al. Volumetric and geometric changes in the parotid glands and target volume during image-guided radiotherapy for locally advanced oropharyngeal cancers[J]. *J Cancer Res Ther*, 2024, 20(5): 1545–1550.
- [29] KUMAR V, NAUTIYAL V, KANT R, et al. Study of volumetric and dosimetric changes during fractionated radiotherapy in head and neck cancers: a single centre experience[J]. *J Cancer Res Ther*, 2021, 17(1): 235–241.
- [30] YU X L, HU J, YANG Y X, et al. Real-time morphological and dosimetric adaptation in nasopharyngeal carcinoma radiotherapy: insights from autosegmented fractional fan-beam CT[J]. *Radiat Oncol*, 2025, 20(1): 68.
- [31] ATIENZA C, SHEPARD A, UZOMAH U, et al. Preliminary experience using MR-guided adaptive radiotherapy in head and neck cancer[J]. *Front Oncol*, 2024, 14: 1474115.
- [32] GAN Y, LANGENDIJK J A, OLDEHINKEL E, et al. Optimal timing of re-planning for head and neck adaptive radiotherapy[J]. *Radiat Oncol*, 2024, 194: 110145.

(收稿日期: 2025-10-25 修回日期: 2025-12-28)

(责任编辑: 李广涛)