

个性化3D打印头枕对头颈部肿瘤放疗计划剂量学的影响

潘振鹏¹, 史颂琪¹, 李思妹¹, 陈小君², 甘庆权², 曹小飞¹

1. 广州市第一人民医院南沙肿瘤科, 广东 广州 511468; 2. 广州市第一人民医院肿瘤科, 广东 广州 510180

【摘要】目的:评估不同材料的3D打印头枕对头颈部肿瘤放疗计划剂量学的影响。通过比较放疗计划靶区剂量、均匀性指数(HI)、适形度指数(CI)、机器跳数(MU)、危及器官剂量等参数的差异,评估3D打印个性化头枕在计划中是否可被忽略。**方法:**选择10例头颈部肿瘤患者,包括5例鼻咽癌患者和5例其他头颈部肿瘤患者。使用医科达 Monaco 计划系统勾画头枕轮廓,并在相同的计算参数下,计算忽略头枕、普通头枕、10%填充的聚乳酸(PLA)和聚氨酯弹性体(TPU)材料3D打印头枕对应的放疗计划。记录靶区剂量、危及器官剂量和MU等结果,并进行统计学分析。**结果:**在 D_{95} 、 D_5 、 D_{mean} 、HI、CI、MU、危及器官剂量(脊髓最大剂量)等参数上,忽略头枕、普通头枕、PLA和TPU材料3D打印头枕4组数据之间均无统计学意义($P>0.05$)。在考虑头枕存在的情况下,对于鼻咽癌和其他头颈部肿瘤的分析结果显示,CI有统计学意义($P<0.05$)。**结论:**在计划设计阶段,可以忽略3D打印个性化头枕的存在,但考虑到头枕的存在会降低放疗计划的MU。在考虑头枕的情况下,其他头颈部肿瘤患者的CI平均值显著高于鼻咽癌患者。

【关键词】3D打印;头枕;头颈部肿瘤;剂量学

【中图分类号】R811.1

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)03-0294-05

Dosimetric effect of customized 3D-printed headrest in radiotherapy for head and neck tumor

PAN Zhanpeng¹, SHI Songqi¹, LI Simei¹, CHEN Xiaojun², GAN Qingquan², CAO Xiaofei¹

1. Department of Oncology, Nansha Branch, Guangzhou First People's Hospital, Guangzhou 511468, China; 2. Department of Oncology, Guangzhou First People's Hospital, Guangzhou 510180, China

Abstract: Objective To evaluate the dosimetric effect of three-dimensional (3D) printed headrests made of different materials in radiotherapy for head and neck tumor, and to evaluate whether the existence of customized 3D-printed headrest can be neglected during planning phase by comparing differences in target area doses, homogeneity index (HI), conformity index (CI), monitor units (MU), and organ-at-risk (OAR) dose. **Methods** Ten patients with head and neck tumors, including 5 cases with nasopharyngeal carcinoma and 5 with other head and neck tumors, were enrolled. The headrest contours were outlined using Monaco treatment planning system, and with the same calculation parameters, treatment plans were generated for scenarios without a headrest, with a standard headrest, and with 3D-printed headrests made of 10% filled polylactic acid and thermoplastic polyurethane. The target area doses, OAR dose, MU, and other results were recorded and subjected to statistical analysis. **Results** No significant differences were observed among the 4 groups (ignoring headrest, standard headrest, 3D-printed headrests with 10% filled polylactic acid and thermoplastic polyurethane) in parameters such as D_{95} , D_5 , D_{mean} , HI, CI, MU, and OAR dose (the maximum dose to the spinal cord) ($P>0.05$). Considering the presence of the headrest, significant differences were found in CI for nasopharyngeal carcinoma and other head and neck tumors ($P<0.05$). **Conclusion** During the planning phase, the existence of customized 3D-printed headrest can be ignored, but it should be noted that the presence of a headrest may reduce the MU in radiotherapy plans. When considering the headrest, the average CI of patients with other head and neck tumors is significantly higher than that with nasopharyngeal carcinoma.

Keywords: three-dimensional printing; headrest; head and neck tumor; dosimetry

【收稿日期】2023-11-06

【基金项目】广州市南沙区科技计划项目(2021MS006)

【作者简介】潘振鹏,助理工程师,从事肿瘤放射物理工作, E-mail: szupzp@qq.com

【通信作者】曹小飞,主任医师,从事肿瘤放射化疗综合诊治工作, E-mail: 1270348159@qq.com

前言

常见的头颈部肿瘤包括鼻咽癌、口咽癌和喉癌等^[1]。放射治疗是治疗70%恶性肿瘤的常见方法,在头颈部肿瘤治疗中发挥着重要作用^[2]。在放疗中,仰

卧位定位方式被广泛应用,因此头枕是最常用的定位装置之一。然而,传统常规的头枕通常采用几种固定样式,长时间使用后会变形硬化问题,无法满足精准放疗的要求^[3]。随着3D打印技术的发展,越来越多的3D打印器具被应用于放疗领域,并且相关研究也逐渐增多。本文是一项回顾性研究,旨在评估不同材料的3D打印头枕在头颈部肿瘤放疗计划中对剂量学的影响。

1 资料与方法

1.1 临床资料

选取2022年1月到2023年6月间在广州市第一人民医院南沙医院实施放疗的10例头颈部肿瘤病例,其中包括5例鼻咽癌和5例其他头颈部肿瘤,如口腔癌、喉癌等。10例患者年龄30~73岁,中位年龄60岁,男6例,女4例。本研究已通过广州市第一人民医院伦理委员会的伦理审查批准(批准号:K-2021-042-02)。

1.2 纳入与排除标准

纳入标准是头颈部原发灶,并且放疗区域包括原发灶及其淋巴引流区域,该区域剂量均为60 Gy。由于本研究是回顾性研究,不需要签署知情同意书。排除标准包括非头颈部原发灶以及在其他医院接受药物治疗或放射治疗的患者。

1.3 头枕设计

使用医科达 Monaco 5.11 系统进行头枕制作。使用 Monaco 软件的补偿物 Bolus 模式进行勾画,可以快速勾画出与皮肤贴合的头枕。完成勾画后,导出 CT 的 Dicom 图像和相应的结构(Structure),已绘制好的头枕 Structure 设置为内轮廓(Internal)。使用 PMT 3D 软件和 ideaMaker 软件处理导出的数据,包括建模、平滑和切片等操作,将填充设置为10%。最后,使用 PMT 3D 打印机(苏州普能医疗科技有限公司)进行头枕的打印。由于本研究仅涉及计划系统上的剂量学研究,所以只打印了1例患者的头枕,用于计算平均电子密度。使用两种3D打印材料,分别为聚乳酸(PLA)和聚氨酯弹性体(TPU)。头枕的设计及实物图见图1。

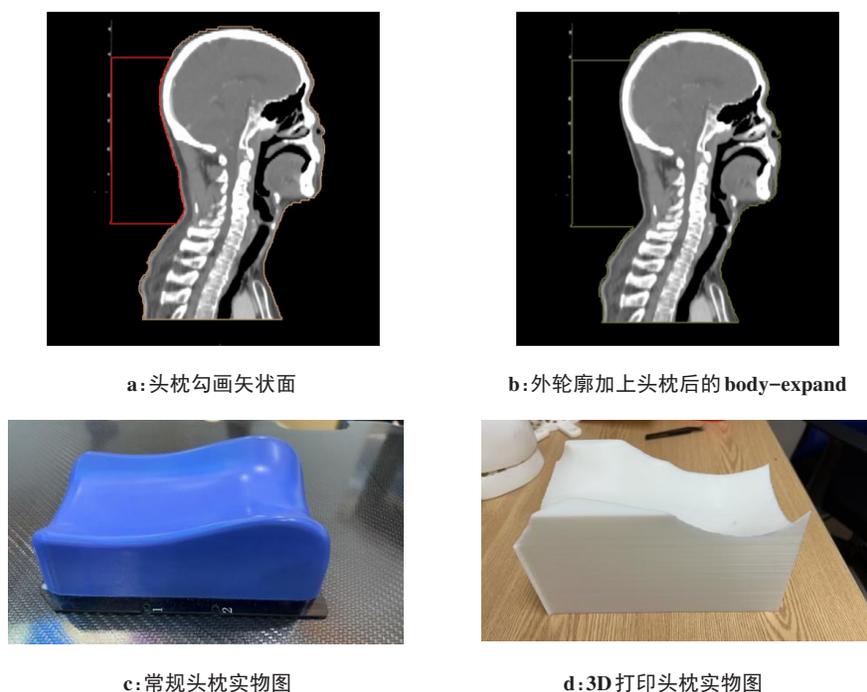


图1 头枕设计与实物图

Figure 1 Headrest design and photos

1.4 电子密度估算

为了让 Monaco 系统在计算时考虑到3D打印头枕的存在,需要获得3D打印头枕的平均电子密度。使用 Philips Big Bore CT 扫描打印原材料 PLA 和 TPU,并将其导入 Monaco 系统,在 Monaco 上查看这两种材料的电子密度。随机选取10个点,并计算出

PLA 和 TPU 的平均电子密度。根据耗材供应商提供的物理密度,计算出密度转换因子。通过3D打印头枕的体积和质量,计算头枕的平均物理密度,并使用密度转换因子计算出头枕的平均电子密度。表1为1例患者使用这两种材料打印的头枕信息。

表1 1例患者10%填充3D打印头枕参数
Table 1 Parameters of the 3D-printed headrest with 10% filling for a patient

材料类型	密度/g·cm ⁻³	材料电子密度	头枕质量/g	头枕体积/cm ³	头枕平均密度/g·cm ⁻³	头枕平均电子密度
PLA	1.24±0.02	0.98	505.3	2 033	0.249	0.197
TPU	1.12±0.02	0.88	459.9	2 033	0.226	0.179

1.5 计划设计

放疗计划的模板和参数直接采用之前已执行完成的放疗计划,靶区和危及器官保持不变。由于头颈部肿瘤通常涉及多个靶区,本试验仅研究面积较大的淋巴引流区PTV60部分。试验组为有头枕组,其中包括常规头枕、PLA头枕和TPU头枕;对照组为忽略头枕组。忽略头枕组的外轮廓body是根据正常皮肤轮廓定义的,而有头枕组的外轮廓body是在没有头枕的外轮廓的基础上添加了绘制的头枕区域,命名为body-expand,如图1b所示。这样的设置是因为Monaco系统计算时只会考虑外轮廓内的电子密度,外轮廓外的区域会被视为电子密度为0的空气。在进行计划计算时,所有病例的硬件配置参数和射野参数设置保持一致。4组均采用相同的中心和射野布置,其中鼻咽癌病例使用9野动态多页光栅调强(DMLC),其他头颈部肿瘤病例既有使用9野DMLC的,也有使用容积旋转调强(VMAT)的。在计算优化函数方面,4组使用相同的函数和参数,而对于外轮廓的函数设置上,对照组的外轮廓结构为body,试验组的外轮廓结构为body-expand。试验组中,常规头枕计算时不设置头枕的电子密度,PLA头枕设置电子密度为0.197,TPU头枕设置电子密度为0.179。

1.6 观察指标

对所有计划进行一次优化和二次优化,在计划计算优化完成后,记录机器跳数(MU)、D₉₅、D₅、D_{mean}、适形度指数(CI)、均匀性指数(HI)、脊髓最大剂量(D_{sp_max})等参数以供统计分析。

其中CI计算公式如下:

$$CI = \frac{V_{ptv_ref}}{V_{ptv}} \times \frac{V_{ptv_ref}}{V_{ref}} \quad (1)$$

式中,V_{ptv}为靶区体积,V_{ptv_ref}为在PTV中的处方剂量等剂量线的体积,V_{ref}为处方剂量等剂量线总体积。CI取值为0~1,越接近1表明靶区适形度越好。

HI计算公式如下:

$$HI = D_5 / D_{95} \quad (2)$$

式中,D₅为5%靶区体积所受剂量,D₉₅为95%靶区体积所受剂量。HI值越大,表明该计划剂量分布均匀性越差。

1.7 统计学分析

使用SPSSAU网站(<https://spssau.com>)的在线版SPSS软件对实验数据进行分析,SPSSAU提供常规的统计和检验功能。采用方差分析,比较4组数据(忽略头枕、常规头枕、PLA头枕和TPU头枕)之间的差异性。采用t检验,分析头枕对鼻咽癌和其他头颈部肿瘤放疗计划剂量的影响是否存在显著差异。P<0.05为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 数据正态分析

进行正态性检验时,使用Shapiro-Wilk检验,并发现只有MU项数据满足正态分布。根据经验,如果数据的峰度绝对值小于10且偏度绝对值小于3,则说明数据虽然不是绝对正态分布,但基本上可以接受为正态分布。根据对数据的正态性分析结果,共有7项数据,每组各有10个样本,总共40个数据。这7项数据均满足峰度绝对值小于10且偏度绝对值小于3的要求,因此可以接受为正态分布,并且可以进行t检验和方差分析。

2.2 不同组别方差分析

从表2可以看出,不同头枕分类样本在7项指标上均无统计学意义(P>0.05),说明10%填充的3D打印个性化头枕与常规头枕或忽略头枕的情况并无差异,因此在计划设计阶段可以忽略其存在。

2.3 鼻咽癌与其他头颈部肿瘤t检验结果

见表3。鼻咽癌和其他头颈部肿瘤在MU、D₉₅、D₅、D_{mean}、HI、D_{sp_max}这6个指标上无统计学意义(P>0.05),仅CI有统计学意义(P<0.05),表现为其他头颈部肿瘤的CI高于鼻咽癌。

3 讨论

在3D打印材料的研究中,PLA和TPU常常被用于放疗领域,因其良好的组织等效性常被用于补偿膜的制作^[4-10]。在体模方面,杨元佳等^[11]在2020年使用3D打印的胸部体模,通过填充其他等效组织物,用于剂量验证。孙海涛等^[12]报道使用3D打印的体模,并验证了其在剂量上的相似性。另外,闫慧娟等^[13]

表2 不同头枕方差分析结果($n=10, \bar{x} \pm s$)Table 2 Analysis of variance results for different headrests ($n=10, Mean \pm SD$)

头枕	MU	D ₉₅ /cGy	D ₅ /cGy	D _{mena} /cGy	HI	CI	D _{sp_max} /cGy
PLA	957.07±164.29	5 837.01±539.57	6 801.07±962.53	6 272.88±719.13	1.16±0.08	0.69±0.19	3 670.77±794.15
TPU	960.70±179.81	5 837.09±545.39	6 803.38±974.71	6 272.81±726.91	1.16±0.08	0.70±0.15	3 696.97±798.79
常规头枕	963.71±180.28	5 861.82±546.80	6 806.74±976.10	6 288.57±728.37	1.16±0.08	0.69±0.19	3 657.86±767.93
忽略头枕	996.24±197.85	5 840.79±545.15	6 811.52±964.46	6 274.05±717.80	1.16±0.07	0.70±0.19	3 702.61±786.72
F值	0.100	0.005	0.000	0.001	0.010	0.009	0.007
P值	0.960	1.000	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999

表3 鼻咽癌与其他头颈部肿瘤t检验结果($n=15, \bar{x} \pm s$)Table 3 t-test results for nasopharyngeal carcinoma and other head-neck tumors ($n=15, Mean \pm SD$)

病种	MU	D ₉₅ /cGy	D ₅ /cGy	D _{mena} /cGy	HI	CI	D _{sp_max} /cGy
其他头颈部肿瘤	956.35±205.84	5 804.57±602.11	6 647.25±982.58	6 171.92±745.00	1.14±0.07	0.76±0.04	3 427.25±1012.42
鼻咽癌	964.64±128.99	5 886.05±452.53	6 960.21±894.94	6 384.25±658.88	1.18±0.07	0.62±0.22	3 923.15±196.38
t值	-0.132	-0.419	-0.912	-0.827	-1.410	2.370	-1.862
P值	0.896	0.678	0.370	0.415	0.169	<0.05	0.082

研究3D打印头膜和传统热塑膜在10 cm×10 cm射野下的剂量学差异,发现不同厚度头膜对患者皮肤吸收剂量存在显著差异。3D打印技术能够有效降低放疗过程中的定位误差,提高治疗的精确性。樊文慧等^[14]报道与传统的3D打印口腔支架相比,可分离式3D打印口腔支架能够显著提高定位精度。其他研究人员证实3D打印个性化定位器具能够有效减少定位误差^[15-17]。3D打印面罩常被用于头部定位^[18-19]。此外,在近距离放射治疗领域,曹璐等^[20]在2023年的综述中提到3D打印器具在宫颈癌治疗中的应用。3D打印个性化施源器和3D打印个性化插植模板已经成功应用于近距离放疗的实践中^[21]。有关伽马刀的定位装置研究中,Baltz等^[22]与Moon等^[23]都提出特殊的无框伽马刀头部固定装置,以提高患者舒适度和摆位重复性。

尽管3D打印个性化定位装置的研究越来越多,对于3D打印头枕在放疗计划中的影响的研究仍然较少。邓官华等^[24]利用3D打印制作用于儿童放疗的头枕。在临床实践中,普遍认为头枕对放疗计划和剂量的影响可以忽略不计,因此3D打印头枕在临床中的使用也被认为是可以忽略的。然而,林发生等^[25]发现40%填充的PLA材料的3D打印头枕与传统头枕相比存在3%的剂量误差。这表明在相同的照射条件下,3D打印头枕会引起剂量方面的误差。然而,林发生等^[25]研究并未考虑3D打印头枕是否在

计划设计阶段就已经对剂量学产生了影响。另外,肖青等^[26]探讨了不同厚度补偿膜对乳腺癌患者靶区剂量和直线加速器MU的影响,发现MU随着补偿膜厚度的增加呈现先增加后减少再增加的趋势。因此,研究3D打印头枕在放疗计划中的剂量学影响对于指导临床上3D打印头枕的使用具有重要意义。

临床实际应用中,由于头枕的低密度,通常在计划设计中被忽略。本文利用实验数据证明3D打印头枕是可以被忽略的。然而,细致观察发现,尽管从统计学角度来看无显著性差异,但数据仍然展示了一些有意义的发现。从MU分析的结果来看,在忽略头枕的情况下,平均值为996.24 MU,比其他3组有头枕的高出约35 MU。这类似于肖青等^[26]对3D打印补偿膜的研究结论。3D打印头枕类似于在人体表面增加了补偿膜,可以降低MU。其次,高出的35 MU刚好为忽略头枕平均MU的3%,与林发生等^[25]报道的与实际照射剂量存在3%的误差吻合,因此实际照射剂量的误差可能与计划设计阶段忽略头枕相关,这需要后续进行更多的研究证明。从保护机器的角度考虑,如果计划执行了30次,忽略头枕的情况下总跳数将增加1 000 MU以上,考虑头枕可以降低总跳数,可实现对机器的保护效果。因此,物理师在计划设计时,对于使用年限较长的直线加速器,可以将头枕考虑到计划优化中,以保护机器。

头枕在头颈部肿瘤放疗中是必不可少的定位装

置。常规的头枕以几个标准弧度制作,难以适合不同病人。然而,随着3D打印技术的发展,个性化头枕的制作成为可能。越来越多的学者开始研究3D打印的个性化定位装置对剂量学和摆位误差的影响。本研究旨在评估不同材料的3D打印头枕对头颈部放疗计划剂量学的影响。本研究存在一些缺陷。首先,样本数量较少,这是由于本院肿瘤科放疗中心的开科时间短和头颈部病人数量较少所导致的。其次,本研究是回顾性研究,只比较了不同头枕在放疗计划中的影响。最后,本研究只研究了填充比例为10%的3D打印头枕,未来的研究需要探讨不同填充比例下3D打印头枕对放疗计划剂量学的影响。

【参考文献】

- [1] 刘万阳, 许青. 螺旋断层放射治疗技术在头颈部肿瘤中的应用[J]. 中国医疗器械信息, 2022, 28(1): 52-54.
Liu WY, Xu Q. Application of tomography in the treatment for head and neck cancer[J]. China Medical Device Information, 2022, 28(1): 52-54.
- [2] 赫捷, 王绿化, 李晔雄, 等. 放射治疗质量控制基本指南[J]. 上海医学, 2018, 41(10): 577-583.
He J, Wang LH, Li YX, et al. Basic guidelines of quality control for radiotherapy[J]. Shanghai Medical Journal, 2018, 41(10): 577-583.
- [3] 杨涛, 金晓峰, 胡强, 等. 头颈部放疗中头枕质控的意义及方法探讨[J]. 医疗卫生装备, 2021, 42(7): 40-44.
Yang T, Jin XF, Hu Q, et al. Significance and method of headrest quality control during head and neck radiotherapy [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2021, 42(7): 40-44.
- [4] Van der Walt M, Crabtree T, Albantow C. PLA as a suitable 3D printing thermoplastic for use in external beam radiotherapy[J]. Australas Phys Eng Sci Med, 2019, 42(4): 1165-1176.
- [5] Zhang CS, Lewin W, Cullen A, et al. Evaluation of 3D-printed bolus for radiotherapy using megavoltage X-ray beams[J]. Radiol Phys Technol, 2023, 16(3): 414-421.
- [6] Diaz-Merchan JA, Español-Castro C, Martínez-Ovalle SA, et al. Bolus 3D printing for radiotherapy with conventional PLA, ABS and TPU filaments: theoretical-experimental study[J]. Appl Radiat Isot, 2023, 199: 110908.
- [7] An HJ, Kim MS, Kim J, et al. Geometric evaluation of patient-specific 3D bolus from 3D printed mold and casting method for radiation therapy[J]. Prog Med Phys, 2019, 30(1): 32-38.
- [8] Dai GY, Xu X, Wu XH, et al. Application of 3D-print silica bolus for nasal NK/T-cell lymphoma radiation therapy[J]. J Radiat Res, 2020, 61(6): 920-928.
- [9] Wang J, Xiang ZZ, Tan CF, et al. Individualized 3D-printed bolus promotes precise postmastectomy radiotherapy in patients receiving breast reconstruction[J]. Front Oncol, 2023, 13: 1239636.
- [10] 李进, 黄玉胜, 杨镇洲, 等. 3D打印组织补偿块在鼻腔NK/T细胞淋巴瘤放疗中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2021, 38(11): 1321-1324.
Li J, Huang YS, Yang ZZ, et al. Clinical application of 3D printed bolus for nasal natural killer/T-cell lymphoma in radiotherapy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2021, 38(11): 1321-1324.
- [11] 杨元佳, 童蕾, 钟安妮, 等. 基于3D打印的胸部个体化剂量验证体模设计[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(6): 702-707.
Yang YJ, Tong L, Zhong AN, et al. Design of a 3D printing-based individualized thorax phantom for dose verification [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(6): 702-707.
- [12] 孙海涛, 李吉友, 王宁. 基于3D打印的个性化体模在放疗剂量验证的研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2021, 45(4): 454-458.
Sun HT, Li JY, Wang N. Research on individualized phantom based on 3D printing for radiotherapy dose verification[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2021, 45(4): 454-458.
- [13] 闫慧娟, 王斌, 薛涛, 等. 3D打印头膜对X射线治疗剂量的影响[J]. 中国医疗设备, 2021, 36(4): 177-180.
Yan HJ, Wang B, Xue T, et al. Impact of 3D printed head mask on X-ray therapeutic dose[J]. China Medical Devices, 2021, 36(4): 177-180.
- [14] 樊文慧, 劳峥, 石慧峰, 等. 3D打印可分离式口腔支架在口腔癌放疗中的摆位准确性研究[J]. 中国口腔颌面外科杂志, 2022, 20(5): 466-470.
Fan WH, Lao Z, Shi HF, et al. Accuracy of detachable 3D-printed stent placement in radiotherapy for oral cancer patients[J]. China Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2022, 20(5): 466-470.
- [15] 谭林, 徐博, 叶荣, 等. 3D打印头枕在鼻咽癌放疗摆位误差中的应用[J]. 中国肿瘤临床, 2022, 49(14): 734-738.
Tan L, Xu B, Ye R, et al. Application of a three-dimensional-printed radiotherapy headrest to avoid setup errors while examining patients with nasopharyngeal cancer[J]. Chinese Journal of Clinical Oncology, 2022, 49(14): 734-738.
- [16] 彭荷情, 张明, 苏锋峰, 等. 3D打印乳腺托架增加乳腺癌调强放疗摆位准确度研究[J]. 四川医学, 2023, 44(4): 400-404.
Peng HQ, Zhang M, Su DF, et al. Research on 3D printed breast bracket to increase the positioning accuracy of intensity modulated radiotherapy for breast cancer[J]. Sichuan Medical Journal, 2023, 44(4): 400-404.
- [17] 闫显莹, 叶荣, 于路新, 等. 3D打印头枕提高了鼻咽癌调强放疗体位重复性[J]. 现代肿瘤医学, 2023, 31(8): 1485-1489.
Yan YY, Ye R, Yu LX, et al. The 3D printed headrest improves the repeatability of the position of intensity-modulated radiotherapy for nasopharyngeal carcinoma[J]. Journal of Modern Oncology, 2023, 31(8): 1485-1489.
- [18] Pham QVV, Lavallée AP, Foias A, et al. Radiotherapy immobilization mask molding through the use of 3D-Printed head models[J]. Technol Cancer Res Treat, 2018, 17: 1533033818809051.
- [19] Mattke M, Rath D, Häfner MF, et al. Individual 3D-printed fixation masks for radiotherapy: first clinical experiences[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2021, 16(6): 1043-1049.
- [20] 曹璐, 王婷, 罗斌, 等. 3D打印技术在宫颈肿瘤近距离放疗中的应用进展[J]. 中国医疗设备, 2023, 38(2): 165-169.
Cao L, Wang T, Luo B, et al. Application of 3D printing technique in brachytherapy of cervical tumor[J]. China Medical Devices, 2023, 38(2): 165-169.
- [21] 成坚强, 安永伟, 陶娜, 等. 3种宫颈癌近距离放射治疗技术剂量学研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(10): 1199-1203.
Cheng JQ, An YW, Tao N, et al. Dosimetric comparison among 3 kinds of brachytherapy techniques in cervical cancer[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2022, 39(10): 1199-1203.
- [22] Baltz GC, Briere T, Luo D, et al. 3D-printed headrest for frameless gamma knife radiosurgery: design and validation[J]. J Appl Clin Med Phys, 2020, 21(9): 6-15.
- [23] Moon HC, Park SJ, Kim YD, et al. Navigation of frameless fixation for gamma knife radiosurgery using fixed augmented reality[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 4486.
- [24] 邓官华, 罗龙辉, 吴伟, 等. 3D打印技术在儿童放射治疗定位头枕设计中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2019, 36(11): 1272-1276.
Deng GH, Luo LH, Wu W, et al. Application of 3D printing technology in designing headrest for pediatric patients having radiotherapy[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2019, 36(11): 1272-1276.
- [25] 林发生, 陈景强, 陈榕钦, 等. 基于3D打印制作放疗个性化头枕的剂量学测量研究[J]. 医疗装备, 2020, 33(3): 11-13.
Lin FS, Chen JQ, Chen RQ, et al. Dosimetric measurement of personalized headrest based on 3D printing[J]. Medical Equipment, 2020, 33(3): 11-13.
- [26] 肖青, 罗志辉, 陈小君, 等. 3D打印乳腺癌补偿膜厚度对容积旋转调强治疗计划的剂量学影响研究[J]. 中国医学装备, 2023, 20(2): 19-23.
Xiao Q, Luo ZH, Chen XJ, et al. Study on the influence of 3D-printed compensation film of breast cancer on VMAT dosimetry[J]. China Medical Equipment, 2023, 20(2): 19-23.

(编辑:黄开颜)