

·综述·

3D 打印技术在放疗中的应用与进展

南贤秀¹ 张洪明² 侯彦杰² 李险峰²

¹ 山西医科大学肿瘤放射治疗学专业, 太原 030000; ² 山西医科大学第一医院放疗科, 太原 030000

通信作者: 李险峰, Email: lixianfeng-lxf@263.net

【摘要】 随着 3D 打印技术的发展和成熟, 其在医学领域被广泛应用, 尤其在骨科、口腔颌面外科等方面取得了突破性进展。而在肿瘤的放疗领域, 创新性地将 3D 打印技术与放疗技术相结合并应用于临床, 可大大提高放疗的精确度和临床疗效, 为肿瘤的精确放疗提供有力保障。

【关键词】 打印, 三维; 肿瘤; 放射疗法

DOI: [10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.01.013](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.01.013)

Application and progress of 3D printing technology in radiotherapy

Nan Xianxiu¹, Zhang Hongming², Hou Yanjie², Li Xianfeng²

¹ Major in Radiation Oncology, Shanxi Medical University, Taiyuan 030000, China; ² Department of Radiation Oncology, the First Hospital of Shanxi Medical University, Taiyuan 030000, China

Corresponding author: Li Xianfeng, Email: lixianfeng-lxf@263.net

【Abstract】 With its rapid development, 3D printing technology has been widely used and achieved breakthrough progress in the medical field, especially in orthopedics, oral and maxillofacial surgery, organ transplantation, and other aspects. As a major cancer treatment, radiation therapy combined with 3D printing technology provides a powerful guarantee for the precise radiotherapy of tumors. This review presents the application and prospects of 3D printing technology in tumor radiotherapy.

【Key words】 Printing, three-dimensional; Neoplasms; Radiotherapy

DOI: [10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.01.013](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2020.01.013)

3D 打印技术, 英文名称为 three-dimensional printing technology, 是指运用计算机将目标物体数字化, 然后通过 3D 打印机将某些特定材料采用分层加工、叠加成型的打印方式来快速构成物体的技术。该技术能简便快捷地制造出某些结构复杂的物体, 大大提高了生产效率和精确度, 同时节省了生产材料和人力资源。3D 打印技术因其个体化制作、精确度高、操作简单等特点, 在肿瘤放疗领域被广泛应用, 如在乳腺癌的放疗中应用 3D 打印的组织补偿物来改善胸壁皮肤剂量等。相信 3D 打印技术与放疗的结合会使放疗的精确度和疗效得到显著提升。笔者就 3D 打印技术在肿瘤放疗中的应用及前景综述如下。

1 3D 打印技术与材料

目前常用的 3D 打印技术包括熔融层积成型技术和立体平版印刷技术。熔融层积成型技术又叫熔丝沉积, 是将丝状的热熔性材料加热融化, 在计算机的控制下根据截面信息, 将材料选择性地涂敷在工作台上, 快速冷却后再继续下一层, 直至成型。该技术主要以丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) 和聚乳酸为材料。其中, ABS 因具有良好的热熔性和冲击强度成为 3D 打印的首选材料, 而聚乳酸则具有安全无毒、环保、形变小、样品成型好的优势。另外, 聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4-环己烷二甲醇酯作为一

种新型的3D打印材料，结合了ABS和聚乳酸的优点，具有出众的热成型性和韧性，材料的收缩率低，有非常广阔的应用前景。立体平版印刷技术以光敏树脂为原料，通过计算机控制激光聚焦到材料表面，使之产生光聚合反应而固化，层层叠加，直至得到3D实体模型。

熔融层积成型技术操作简单、成本低廉，但是受温度影响大，难以精确控制成型效果。立体平版印刷技术成型速度快，可制作复杂、高精度的模具，但是系统造价过高、操作复杂，且树脂类材料的强度、刚度和耐热性不好。因此，为满足临床需求，需不断完善现有3D打印技术，研发新的工艺，开发新的成型材料，提高精确度、强度及性能，保证产品的安全性，同时提高效率、缩短操作步骤和降低制作成本。

2 3D打印技术在放疗中的应用

2.1 在乳腺癌中的应用

乳腺癌是女性发病率最高的肿瘤^[1]，放疗在乳腺癌的综合治疗中占有重要地位^[2]。乳腺癌根治术后放疗往往由于患者术后胸壁表面凹凸不平，加用常规组织补偿物后造成胸壁与组织补偿物间存在空气间隙。相关研究结果表明，皮肤表面剂量会因存在空气间隙而显著下降，严重影响了皮肤表面剂量的准确性和均匀性，降低了临床疗效，加重了放疗导致的不良反应^[3-7]。

2014年，Su等^[8]利用3D打印技术制作出可以改变电子线强度的组织补偿物，之后的研究主要集中于使用不同材料的组织补偿物用于改善皮肤表面贴合性^[9-12]。受此启发，2016年，Park等^[13]利用女性假人作为研究对象制作了特异性的3D打印聚乳酸组织补偿物，研究乳房皮肤的实际受照剂量，结果证实3D打印的组织补偿物可以减少位置的不确定性，克服乳腺癌放疗中胸壁与组织补偿物之间因空气间隙引起的剂量差异。2018年，侯彦杰等^[14]使用3D打印技术制作了以硅胶为材料的组织补偿物，并比较了3D打印的硅胶组织补偿物、聚乳酸组织补偿物和常规组织补偿物的差别，结果发现3D打印的组织补偿物在皮肤贴合性及剂量分布方面均优于常规组织补偿物，其中3D打印的硅胶组织补偿物在重复性、舒适性及贴合性方面均优于聚乳酸组织补偿物，且个体化制作很好地解决了乳

腺癌胸壁剂量问题。

虽然3D打印个体化组织补偿物有很好的应用前景，但受材料应用的限制，如聚乳酸、环氧树脂质地硬和造价昂贵等，不适合临床推广；且材料密度与人体组织存在差异，仍可能影响剂量分布。因此，需要更多后续的研究进行探讨。

2.2 在妇科恶性肿瘤中的应用

宫颈癌和阴道癌等妇科恶性肿瘤因解剖结构特殊，通过近距离放疗即可获得良好的疗效。但由于个体差异大，传统施源器难以达到个体化要求，并不能很好地贴合病灶，导致病灶剂量不足，疗效降低，同时危及器官剂量过高，造成了膀胱和直肠不可逆的损伤。

2016年，Lindegaard等^[15]首次将3D打印阴道模板用于ⅣA期宫颈癌MRI引导近距离放疗，结果发现可以取得良好的剂量分布。Sethi等^[16]使用热塑性塑料设计了3D打印阴道涂药器，应用于阴道狭窄或不规则的患者，结果显示患者耐受良好，没有出现3级或更高的毒性，但由于质地较硬、制作工序复杂，未能应用于临床。同年，于浪等^[17]以医用硅胶为材料设计了3D打印个体化施源器，由于缺少临床疗效及不良反应的观察，未能被广泛使用。2018年，王云龙等^[18]将3D打印技术与施源器设计相结合，以光敏树脂为材料设计了3D适体施源器，结果证实在病灶得到充分照射的同时，阴道病灶周围的正常组织也得到了有效的保护；遗憾的是，该材料熔点低，无法进行高温消毒，使用时需置入安全套内以避免感染，无法长期多次重复使用。

3D打印个体化施源器较传统施源器具有个体定制、准确性好、不良反应小和疗效好等优点，但目前在材料选择方面，由于缺乏临床疗效的评估和长期不良反应的观察，以及材料的安全性未得到解决，因此仍需更多的临床研究来进行指导。

2.3 在头颈部恶性肿瘤中的应用

头颈部肿瘤因解剖结构复杂和器官功能重要，所以手术切除的难度很大；而放疗可以在保证疗效的同时最大程度地保留器官功能，因此在头颈部恶性肿瘤的治疗中占有重要地位。但放疗所引起的近期和远期严重不良反应仍不可被忽视。尤其是在口腔癌的放疗中，由于口腔解剖结构复杂和活动度大等特点，放疗引起的不良反应往往很严重。而口腔

支架可以充分限制口腔各个部位的活动，使相邻组织远离肿瘤的物理位移，这是减少放疗所致口腔不良反应的简单且有效的方法^[19-20]。

2014 年，涂文勇等^[21]用印模膏制作个体化口模，其位置重复性和塑形性尚可，但存在易摔碎、密度高、电子散射和放射伪影增加等缺点；而热塑膜虽然密度低，对射线影响小，但塑形性差，制作过程相对较复杂，这些均有待进一步改进。2015 年，丁继平等^[22]针对舌癌术后调强放疗患者，应用 3D 打印的聚乳酸口腔支架来进行危及器官的剂量学研究，结果发现其可明显降低危及器官如上唇、上颊、硬腭和软腭的受照剂量和体积，明显减少口腔黏膜炎和口干症等不良反应的发生。该研究团队还研发了一套 3D 打印制作个体化口腔放疗支架的技术方法，该方法具有模型精度高、建模速度快、个体化制作和数字化存储等优点，为口腔支架的制作提供了一种新的思路与方法^[23]。同年，Wilke 等^[24]将 3D 打印口腔支架用于接受头颈部放疗的患者，评估 3D 打印支架的适合度和舒适度，结果再次证明了 3D 打印在口腔支架中应用的可行性。3D 打印支架虽然具有巨大的优势，但仍存在一些问题，尤其是在材料选择方面，必须是足够刚性的支架，因为支架的变形将导致定位的不准确，且支架材料必须无毒，以尽量减少对患者的潜在危害。

2.4 在皮肤恶性肿瘤中的应用

3D 打印个体化组织补偿物可以使皮肤表面剂量达到放疗要求，保证剂量均匀性，同时降低危及器官的受照剂量。Canters 等^[11]和张敏等^[12]将 3D 打印的个体化组织补偿物用于皮肤癌及耳廓木村病 (Kimura 病) 患者的放疗，结果表明 3D 打印组织补偿物可以改善剂量分布；在鼻中隔复发性鳞癌、后耳廓的基底细胞癌等患者的放疗中，同样证实了 3D 打印组织补偿物在改善皮肤表面剂量和降低放疗不良反应方面的优势^[25]。

2.5 在头颈固定装置中的应用

头颈部由于解剖结构复杂、器官功能重要，对治疗的精确性要求极高。尤其是行立体定向放疗的患者，短时间内大剂量照射，位置稍有偏差，便会对周围正常组织造成严重损伤。而头颈部固定装置可以减少摆位误差，保证放疗的精确性。目前多采用简易头枕或面罩固定法，前者固定性差，后者虽然固定性较好，但摆位重复性差，且在第 6 周时由

于患者体重变化、肿块消退、面罩多次反复使用，或因佩戴不舒适导致呼吸困难和精神紧张等，易导致治疗准确性降低^[26]。同时，面罩的使用还会导致照射野中的皮肤剂量增高，增加了皮肤的放射反应。

2002 年，吴少雄等^[27]研制了一种 3D 头颈放疗固定装置，与传统面罩固定法相比，该装置有较高的位置精确性(前者摆位误差为 1.9 mm，后者为 0.9 mm)和稳定性，但由于费用昂贵、操作复杂、费时费力，临幊上未广泛应用。2017 年，Sato 等^[28]通过比较 3D 打印头颈固定装置(头枕由 ABS 制成)与传统固定装置(热塑性面罩及头枕)，结果显示两者在位置精确性及剂量学方面存在差异。2018 年，Haefner 等^[29]开发了一种基于 MRI 的 3D 打印头部固定装置的新方法，该方法利用 ABS 为材料制作头枕和面罩，并在眼、耳、口、鼻处设有孔洞，这大大提高了患者的舒适性，进一步证明了 3D 打印头部固定装置高度的精确性。

综上，虽然部分研究已证实了 3D 打印头部固定装置在提高位置精确性方面的优势，但由于其费用昂贵，操作繁琐，且研究较少，对于多次使用是否会影响位置及剂量精确性这些问题仍有待更多研究来证实。

3 3D 打印技术在粒子植人中的应用

放射性粒子植人治疗具有微创、高效、安全、可重复和靶区剂量高而正常组织剂量低的优势，因此备受关注。但由于人体自身结构的不规则及复杂性，且该疗法对于临床医师的穿刺技术要求较高，需要依靠术者的临床经验，通过 CT 逐层多次扫描，难以对靶区和危及器官的剂量做到准确把握，因此限制了其临床发展。而随着 3D 打印模板的出现，可以很好地解决这一技术难题。粒子植人针可以一次完成进针，大大缩短了手术时间，减少了扫描次数，提高了剂量的准确度。

2015 年，王俊杰团队首次将 3D 打印应用于 CT 引导下腹膜后复发肿瘤的放射性粒子植人治疗，解决了粒子植人时的穿刺技术难度和粒子剂量学难题^[30]。之后的研究集中于将 3D 打印非共面模板应用于各种盆腔复发肿瘤、胸部肿瘤及头颈部转移瘤的粒子植人治疗中，结果表明术后与术前的剂量分布有良好的一致性，这意味着治疗准确度的提高，且后续未发生明显的不良反应^[31-36]，并且在对

腹膜后复发肿瘤、直肠癌复发患者的研究中，取得了良好的效果^[31]。2017年，王俊杰团队制定了3D打印联合粒子植入的相关操作流程和专家共识^[37-38]。进一步的研究均证实3D打印模板联合粒子植入治疗可以缩短植入所需时间，改善剂量均匀性，降低对危及器官的损伤^[39-42]。

但是该技术目前仍存在以下缺陷：粒子植入过程的操作失误导致插植针的位置发生偏差；器官运动幅度的存在，临近器官的阻挡、挤压，需要避开相邻重要血管及神经，以上均会影响靶区的一致性及剂量分布。因此，针对术中优化、剂量评估及该技术对于其他类型肿瘤的可行性研究仍需深入开展。

4 展望

3D打印作为一项新兴的技术，在放疗领域已经取得了一定的成果，但仍需要继续深入探索，如在直肠癌、肝脏恶性肿瘤和骨转移瘤等方面的应用。另外，3D打印材料与皮肤表面的贴合性、柔软度、密度及剂量分布等问题也尚需解决，并且在术中使用和植入的模型材料的选择，以及材料的消毒和安全性方面均应重点考虑。虽然打印材料的成本通常很低，但在制定打印流程时，应考虑打印的时间、印刷机的价格、印刷对象的质量和印刷材料的尺寸限制等问题。相信随着这一系列问题的解决，3D打印会在放疗领域得到更广泛的应用。

利益冲突 本研究由署名作者按以下贡献声明独立开展，不涉及任何利益冲突。

作者贡献声明 南贤秀负责文献的检索、归纳及文章的撰写；张洪明、侯彦杰负责文献的分析；李险峰负责文章的审阅。

参 考 文 献

- [1] Siegel RL, Miller KD, Jemal A. Cancer statistics, 2018[J]. *CA Cancer J Clin*, 2018, 68(1): 7–30. DOI: [10.3322/caac.21442](https://doi.org/10.3322/caac.21442).
- [2] 中国抗癌协会乳腺癌专业委员会. 中国抗癌协会乳腺癌诊治指南与规范(2017年版)[J]. *中国癌症杂志*, 2017, 27(9): 695–759. DOI: [10.19401/j.cnki.1007-3639.2017.09.004](https://doi.org/10.19401/j.cnki.1007-3639.2017.09.004).
China Cancer Association Breast Cancer Professional Committee. Guidelines and Guidelines for the Diagnosis and Treatment of Breast Cancer by the China Anti-Cancer Association(2017)[J]. *China Oncol*, 2017, 27(9): 695–759. DOI: [10.19401/j.cnki.1007-3639.2017.09.004](https://doi.org/10.19401/j.cnki.1007-3639.2017.09.004).
- [3] Butson MJ, Cheung T, Yu P, et al. Effects on skin dose from unwanted air gaps under bolus in photon beam radiotherapy[J]. *Radiat Meas*, 2000, 32(3): 201–204. DOI: [10.1016/s1350-4487\(99\)00276-0](https://doi.org/10.1016/s1350-4487(99)00276-0).
- [4] Kong M, Holloway L. An investigation of central axis depth dose distribution perturbation due to an air gap between patient and bolus for electron beams[J]. *Australas Phys Eng Sci Med*, 2007, 30(2): 111–119. DOI: [10.1007/bf03178415](https://doi.org/10.1007/bf03178415).
- [5] Khan Y, Villarreal-Barajas JE, Udowicz M, et al. Clinical and Dosimetric Implications of Air Gaps Between Bolus and Skin Surface During Radiation Therapy[J]. *J Cancer Ther*, 2013, 4(7): 1251–1255. DOI: [10.4236/jct.2013.47147](https://doi.org/10.4236/jct.2013.47147).
- [6] Sharma SC, Johnson MW. Surface dose perturbation due to air gap between patient and bolus for electron beams[J]. *Med Phys*, 1993, 20(2): 377–378. DOI: [10.1118/1.597079](https://doi.org/10.1118/1.597079).
- [7] Vyas V, Palmer L, Mudge R, et al. On bolus for megavoltage photon and electron radiation therapy[J]. *Med Dosim*, 2013, 38(3): 268–273. DOI: [10.1016/j.meddos.2013.02.007](https://doi.org/10.1016/j.meddos.2013.02.007).
- [8] Su SQ, Moran K, Robar JL. Design and production of 3D printed bolus for electron radiation therapy[J/OL]. *J Appl Clin Med Phys*, 2014, 15(4): 194–211[2019-02-22]. <https://aapm.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1120/jacmp.v15i4.4831>. DOI: [10.1120/jacmp.v15i4.4831](https://doi.org/10.1120/jacmp.v15i4.4831).
- [9] 王峻峰, 李定宇, 黄章玲, 等. Merkel细胞癌电子线放疗中3D打印补偿物的模拟应用[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2016, 25(9): 999–1002. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.022](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.022).
Wang JF, Li DY, Huang ZL, et al. Simulation and application of 3D printed compensator in electron radiation therapy for Merkel cell carcinoma[J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2016, 25(9): 999–1002. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.022](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.022).
- [10] Park JW, Yea JW. Three-dimensional customized bolus for intensity-modulated radiotherapy in a patient with Kimura's disease involving the auricle[J]. *Cancer Radiother*, 2016, 20(3): 205–209. DOI: [10.1016/j.cancrad.2015.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cancrad.2015.11.003).
- [11] Canters RA, Lips IM, Wendling M, et al. Clinical implementation of 3D printing in the construction of patient specific bolus for electron beam radiotherapy for non-melanoma skin cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2016, 121(1): 148–153. DOI: [10.1016/j.radonc.2016.07.011](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2016.07.011).
- [12] 张敏, 赵波, 尹金鹏, 等. 新型3D打印组织补偿物的放疗应用研究[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2017, 26(2): 210–214. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.02.018](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.02.018).
Zhang M, Zhao B, Yin JP, et al. Application of new three-dimensional printed tissue compensators in radiotherapy[J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2017, 26(2): 210–214. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.02.018](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.02.018).
- [13] Park SY, Choi CH, Park JM, et al. A Patient-Specific Polylactic Acid Bolus Made by A 3D Printer for Breast Cancer Radiation Therapy[J/OL]. *PLoS One*, 2016, 11(12): e0168063[2019-02-22]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0168063>. DOI: [10.1371/journal.pone.0168063](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168063).
- [14] 侯彦杰, 于江平, 王永强, 等. 3D打印胸壁硅胶 bolus 制作及临

- 床前研究[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2018, 27(9): 835–838. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2018.09.010](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2018.09.010).
- Hou YJ, Yu JP, Wang YQ, et al. Fabrication and pre-clinical application of patient-specific 3D silicone rubber bolus for chest wall[J]. Chin J Radiat Oncol, 2018, 27(9): 835–838. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2018.09.010](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2018.09.010).
- [15] Lindegaard JC, Madsen ML, Traberg A, et al. Individualised 3D printed vaginal template for MRI guided brachytherapy in locally advanced cervical cancer[J]. Radiother Oncol, 2016, 118(1): 173–175. DOI: [10.1016/j.radonc.2015.12.012](https://doi.org/10.1016/j.radonc.2015.12.012).
- [16] Sethi R, Cunha A, Mellis K, et al. Clinical applications of custom-made vaginal cylinders constructed using three-dimensional printing technology[J]. J Contemp Brachytherapy, 2016, 8(3): 208–214. DOI: [10.5114/jcb.2016.60679](https://doi.org/10.5114/jcb.2016.60679).
- [17] 于浪, 连欣, 晏俊芳, 等. 3D 打印技术在 CT 引导宫颈癌术后阴道残端肿瘤近距离治疗中应用[J]. 中华放射肿瘤学杂志, 2016, 25(9): 965–967. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.013](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.013).
- Yu L, Lian X, Yan JF, et al. Application of 3D printing technology in brachytherapy for vaginal stump tumor after CT-guided cervical carcinoma surgery[J]. Chin J Radiat Oncol, 2016, 25(9): 965–967. DOI: [10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.013](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.013).
- [18] 王云龙, 李昕迪, 赵钰哲. 3D 打印技术在阴道癌放射治疗中的应用研究[J]. 中国数字医学, 2018, 13(6): 64–65, 71. DOI: [10.3969/j.issn.1673-7571.2018.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-7571.2018.06.022).
- Wang YL, Li XD, Zhao YZ. Study on the Application of 3D Printing Technology in the Treatment of Vaginal Cancer[J]. China Digit Med, 2018, 13(6): 64–65, 71. DOI: [10.3969/j.issn.1673-7571.2018.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-7571.2018.06.022).
- [19] Kaanders JHAM, Fleming TJ, Ang KK, et al. Devices valuable in head and neck radiotherapy[J]. Int J Radiat Oncol Biol Phys, 1992, 23(3): 639–645. DOI: [10.1016/0360-3016\(92\)90023-B](https://doi.org/10.1016/0360-3016(92)90023-B).
- [20] Nayar S, Brett R, Clayton N, et al. The effect of a radiation positioning stent (RPS) in the reduction of radiation dosage to the opposing jaw and maintenance of mouth opening after radiation therapy[J]. Eur J Prosthodont Restor Dent, 2016, 24(2): 71–77.
- [21] 涂文勇, 丁继平, 胡海生, 等. 口腔放疗用上下分隔壁支架及其制作方法: 中国, CN104043205A[P]. 2014-09-17.
- Tu WY, Ding JP, Hu HS, et al. Stent with upper and lower separation for oral radiotherapy and its manufacturing method: CN, CN104043205A[P]. 2014-09-17.
- [22] 丁继平, 涂文勇, 胡海生, 等. 3D 打印口腔支架对舌癌术后调强放疗危及器官的剂量学影响[J]. 中华肿瘤防治杂志, 2015, 22(15): 1221–1225.
- Ding JP, Tu WY, Hu HS, et al. Influence on normal tissue dosimetry in intensity-modulated radiotherapy of post-operative lingual carcinoma patients with 3D intraoral stent[J]. Chin J Cancer Prev Treat, 2015, 22(15): 1221–1225.
- [23] 丁继平, 涂文勇, 胡海生, 等. 基于 3D 打印技术的个体化口腔放疗支架的设计[J]. 中国医疗器械杂志, 2017, 41(6): 458–459, 468. DOI: [10.3969/j.issn.1671-7104.2017.06.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2017.06.018).
- Ding JP, Tu WY, Hu HS, et al. Design of Individualized Oral Radiotherapy Stent Based on 3D Printing Technique[J]. Chin J Med Instrument, 2017, 41(6): 458–459, 468. DOI: [10.3969/j.issn.1671-7104.2017.06.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-7104.2017.06.018).
- [24] Wilke CT, Zaid M, Chung C, et al. Design and fabrication of a 3D-printed oral stent for head and neck radiotherapy from routine diagnostic imaging[J/OL]. 3D Print Med, 2017, 3(1): 12 [2019-02-22]. <https://threedmedprint.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41205-017-0021-4>. DOI: [10.1186/s41205-017-0021-4](https://doi.org/10.1186/s41205-017-0021-4).
- [25] Zhao YZ, Moran K, Yewondwossen M, et al. Clinical applications of 3-dimensional printing in radiation therapy[J]. Med Dosim, 2017, 42(2): 150–155. DOI: [10.1016/j.meddos.2017.03.001](https://doi.org/10.1016/j.meddos.2017.03.001).
- [26] 赵家成, 李多杰, 段诗苗, 等. 头颈肩面罩在鼻咽癌调强放疗中的固定效果与精度比较[J]. 中华全科医学, 2012, 10(3): 363, 412.
- Zhao JC, Li DJ, Duan SM, et al. The Fix Effects and Accuracy of the Head, Neck and Shoulder Mask in Intensity-modulated Radiotherapy of Nasopharyngeal Carcinoma[J]. Chin J Gen Pract, 2012, 10(3): 363, 412.
- [27] 吴少雄, 温志祥, 何晓华, 等. 一种新型三维头颈放疗固定装置的研制及临床验证[J]. 癌症, 2002, 21(11): 1265–1266. DOI: [10.3321/j.issn:1000-467X.2002.11.024](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-467X.2002.11.024).
- Wu SX, Wen ZX, He XH, et al. Development and clinical verification of a new type of three-dimensional head and neck radiotherapy fixation device[J]. Chin J Cancer, 2002, 21(11): 1265–1266. DOI: [10.3321/j.issn:1000-467X.2002.11.024](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-467X.2002.11.024).
- [28] Sato K, Takeda K, Dobashi S, et al. Evaluation of the Positional Accuracy and Dosimetric Properties of a Three-dimensional Printed Device for Head and Neck Immobilization[J]. Jpn J Radiol Technol, 2017, 73(1): 57–65. DOI: [10.6009/jjrt.2017_jsrt_73.1.57](https://doi.org/10.6009/jjrt.2017_jsrt_73.1.57).
- [29] Haefner MF, Giesel FL, Mattke M, et al. 3D-Printed masks as a new approach for immobilization in radiotherapy—a study of positioning accuracy[J/OL]. Oncotarget, 2018, 9(5): 6490–6498 [2019-02-22]. [http://www.oncotarget.com/index.php?journal=oncotarget&page=article&op=view&path\[\]24032&path\[\]75562](http://www.oncotarget.com/index.php?journal=oncotarget&page=article&op=view&path[]24032&path[]75562). DOI: [10.18632/oncotarget.24032](https://doi.org/10.18632/oncotarget.24032).
- [30] 吉喆, 姜玉良, 郭福新, 等. 3D 打印模板联合 CT 引导下放射性粒子植入治疗椎旁/腹膜后恶性肿瘤的剂量学验证观察[J]. 中华医学杂志, 2017, 97(13): 996–1000. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2017.13.007](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2017.13.007).
- Ji Z, Jiang YL, Guo FX, et al. Dosimetry verification of radioactive seed implantation with 3D printing template and CT guidance for paravertebral/retroperitoneal malignant tumor[J]. Nat Med J China, 2017, 97(13): 996–1000. DOI: [10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2017.13.007](https://doi.org/10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2017.13.007).

- [31] 王皓,王俊杰,姜玉良,等.3D打印模板联合CT引导¹²⁵I粒子治疗盆腔复发直肠癌的剂量学分析[J].中华医学杂志,2016,96(47):3782-3786. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2016.47.003.
Wang H, Wang JJ, Jiang YL, et al. CT guidance ¹²⁵I seed implantation for pelvic recurrent rectal cancer assisted by 3D printing individual non-coplanar template[J]. *Nat Med J China*, 2016, 96(47): 3782-3786. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2016.47.003.
- [32] 姜玉良,王皓,吉喆,等.CT引导辅助3D打印个体化非共面模板指导¹²⁵I粒子治疗盆腔复发肿瘤剂量学研究[J].中华放射肿瘤学杂志,2016,25(9): 959-964. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.012.
Jiang YL, Wang H, Ji Z, et al. Computed tomography image-guided and personalized 3D printed template-assisted 125-iodine seed implantation for recurrent pelvic tumor: a dosimetric study[J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2016, 25(9): 959-964. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2016.09.012.
- [33] 孙海涛,姚丽红,王俊杰,等.3D打印非共面模板引导¹²⁵I粒子组织间近距离治疗盆腔肿瘤个体化设计[J].中华放射医学与防护杂志,2017,37(7): 485-489. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.07.002.
Sun HT, Yao LH, Wang JJ, et al. 3D-printing non-coplanar template assisted ¹²⁵I seed implantation for pelvic tumor: individual template design method[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2017, 37(7): 485-489. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.07.002.
- [34] 郭福新,姜玉良,吉喆,等.3D打印非共面模板辅助CT引导¹²⁵I粒子植入治疗锁骨上复发转移瘤的剂量学研究[J].北京大学学报:医学版,2017,49(3): 506-511. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2017.03.022.
Guo FX, Jiang YL, Ji Z, et al. 3D printed template-assisted and computed tomography image-guided 125-iodine seed implantation for supraclavicular metastatic tumor: a dosimetric study[J]. *J Peking Univ: Health Sci*, 2017, 49(3): 506-511. DOI: 10.3969/j.issn.1671-167X.2017.03.022.
- [35] 姜玉良,吉喆,郭福新,等.CT引导3D打印非共面模板辅助¹²⁵I粒子治疗头颈部复发转移瘤不良反应研究[J].中华放射医学与防护杂志,2017,37(7): 495-499. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.07.004.
Jiang YL, Ji Z, Guo FX, et al. Side effect of radioactive ¹²⁵I seed implantation for recurrent malignant tumor of head and neck assisted by 3D-printing individual guide plate[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2017, 37(7): 495-499. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.07.004.
- [36] 吉喆,姜玉良,郭福新,等.3D打印非共面模板辅助CT引导放射性粒子植入治疗胸部恶性肿瘤剂量学评估[J].中华放射肿瘤学杂志,2017, 26(7): 754-758. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.07.007.
Ji Z, Jiang YL, Guo FX, et al. Dosimetric assessment of CT-guided radioactive seed implantation assisted by 3D printing non-coplanar template in treatment of chest malignant tumor[J]. *Chin J Radiat Oncol*, 2017, 26(7): 754-758. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.07.007.
- [37] 王俊杰,张凤娟,郭江华,等.专家共识:3D打印模板辅助CT引导¹²⁵I粒子植入治疗肿瘤[J].中华放射医学与防护杂志,2017,37(3): 161-170. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.03.001.
Wang JJ, Zhang FJ, Guo JH, et al. Expert consensus workshop report: Guideline for three-dimensional printing template-assisted computed tomography-guided ¹²⁵I seeds interstitial implantation brachytherapy[J]. *J Cancer Res Ther*, 2017, 13(4): 607-612. DOI: 10.4103/jcrt.JCRT_412_17.
- [38] 王俊杰,柴树德,郑广钧,等.3D打印模板辅助CT引导放射性¹²⁵I粒子植入治疗肿瘤专家共识[J].中华放射医学与防护杂志,2017, 37(3): 161-170. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.03.001.
Wang JJ, Chai SD, Zheng GJ, et al. Expert consensus on 3D-printing template assisted CT-guided radioactive ¹²⁵I seed implantation brachytherapy[J]. *Chin J Radiol Med Prot*, 2017, 37(3): 161-170. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2017.03.001.
- [39] 黄明伟,张静,郑亮,等.3D打印个性化模板在头部和颈部肿瘤近距离治疗中的准确性评价[J].放射肿瘤学杂志,2016,57(6): 662-667. DOI: 10.1093/jrr/rnw033.
Huang MW, Zhang JG, Zheng L, et al. Accuracy evaluation of a 3D-printed individual template for needle guidance in head and neck brachytherapy[J]. *J Radiat Res*, 2016, 57(6): 662-667. DOI: 10.1093/jrr/rnw033.
- [40] 吉喆,姜玉良,郭福新,等.Dosimetry verification of radioactive seed implantation for malignant tumors assisted by 3D printing individual templates and CT guidance[J]. *Appl Radiat Isot*, 2017, 124: 68-74. DOI: 10.1016/j.apradiso.2016.12.009.
- [41] 韩涛,杨晓东,徐勇,等.3-D打印模板辅助¹²⁵I粒子植入治疗恶性肝肿瘤的疗效[J].肿瘤治疗与研究,2017,10: 3277-3283[2019-02-22]. <https://www.dovepress.com/therapeutic-value-of-3-d-printing-template-assisted-125i-seed-implanta-peer-reviewed-article-OTT>. DOI: 10.2147/OTT.S134290.
- [42] 江亚玲,吉喆,郭福新,等.CT引导¹²⁵I粒子植入治疗复发恶性肿瘤的不良反应[J].放射肿瘤学杂志,2018,13(1): 18[2019-02-22]. <https://ro-journal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13014-018-0959-4>. DOI: 10.1186/s13014-018-0959-4.

(收稿日期: 2019-02-22)