

立体定向放射治疗在心血管疾病中的应用

陈红霞 李嫣晓 高未潼 郑颖颖

(新疆医科大学第一附属医院心脏中心, 新疆 乌鲁木齐 830054)

【摘要】 立体定向放射治疗(SRT)作为一种非侵入性放射治疗方式,已广泛应用于肿瘤治疗领域。因 SRT 具有精度高、剂量集中、对周围组织损伤小等优势,已逐步将其拓展至心血管疾病领域。现结合近年 SRT 在心血管疾病中的临床应用案例,探讨其在心律失常、高血压、梗阻性肥厚型心肌病等疾病中的治疗前景。

【关键词】 立体定向放射治疗;心血管疾病;非侵入性放射治疗;立体定向技术

【DOI】 10.16806/j.cnki.issn.1004-3934.2025.12.007

Application of Stereotactic Radiotherapy in Cardiovascular Disease

CHEN Hongxia, LI Yanxiao, GAO Weitong, ZHENG Yingying

(Heart Center, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

【Abstract】 Stereotactic radiotherapy (SRT) as a non-invasive radiotherapy method has been widely applied in the field of tumor treatment. Owing to its advantages such as high precision, concentrated dose delivery, and minimal damage to surrounding tissues, SRT has gradually expanded its application to the field of cardiovascular disease. This paper, drawing upon recent clinical application cases of SRT in cardiovascular disorders, delves into its therapeutic potential in various conditions, including arrhythmia, hypertension, and obstructive hypertrophic cardiomyopathy.

【Keywords】 Stereotactic radiotherapy; Cardiovascular disease; Non-invasive radiotherapy; Stereotactic technology

立体定向放射治疗(stereotactic radiotherapy, SRT)作为放射治疗领域的新星,最初在肿瘤治疗领域大放异彩。随着医学科技的日新月异与跨学科的深度交融, SRT 的应用边界逐渐从肿瘤治疗领域迈向非肿瘤性疾病领域。近年来,成像技术、门控技术、跟踪技术以及辐射束强度调节技术等为 SRT 在心血管疾病治疗中的应用提供了坚实的技术支撑,使得 SRT 能够精确地靶向心脏内的异常组织,从而减少对周围健康组织的损害。目前,国内外已有众多研究将目光聚焦于 SRT 在心血管疾病治疗中的应用,并取得了一系列初步成果。本文将探讨 SRT 在心血管疾病治疗中的潜力与应用,以期临床实践提供参考和借鉴。

1 SRT 的基本原理与技术特点

SRT 利用高度精准的放射治疗设备,通过非共面弧技术将射线聚焦于体内的肿瘤靶区,实现病灶组织的高剂量照射,同时最大限度地保护周围正常组织。高能射线从不同角度对肿瘤进行照射,确保病灶中心达到高剂量,而周围正常组织的受量则迅速下降,从

而实现精准治疗。SRT 的工作原理在于其精准的定位和剂量分布控制,利用计算机技术和影像技术精确地确定肿瘤的位置和形状,从而制定个体化的治疗计划。SRT 具有精确定位、安全固定、最小化正常组织暴露、严格考虑器官运动、亚厘米精度递送消融剂量分级等优势,且可以立体定位目标靶区和正常组织^[1-2]。在治疗过程中, SRT 不涉及传统意义上的手术切口。它可以实时监测与调整,提高治疗精度和有效性,减少对周围正常组织的损害,并且可以在较短时间内完成治疗。

2 SRT 在心血管疾病治疗中的应用

2.1 心律失常

近年来,基于心脏电生理标测技术的发展, SRT 因无创、精准、立体消融病灶而逐渐应用于心律失常的临床治疗,策划归纳为立体定向心律失常放射消融治疗(stereotactic arrhythmia radiotherapy, STAR)。临床前研究^[3]明确了该技术应用于心律失常治疗的科学可行性,为后续开展心律失常非侵入性放射治疗的临

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2024B03036-2);2022 年度自治区“天池英才”-领军人才

共同第一作者:陈红霞,李嫣晓

通信作者:郑颖颖, E-mail: zhengying527@163.com

床转化研究提供了关键性的理论依据与实验支撑。室性心动过速(ventricular tachycardia, VT)和心房颤动(atrial fibrillation, AF)作为临床常见且棘手的心律失常类型,亦成为 SRT 临床应用探索的重要靶标。目前普遍认为 25 Gy 是 SRT 治疗心律失常的一个安全有效剂量。

2.1.1 VT

2015 年斯坦福大学医学院研究团队^[4]首次报道 SRT 在持续性 VT 治疗领域应用的临床研究结果。该研究以一例 71 岁的持续性 VT 患者为研究对象,对其施行单次 25 Gy 剂量的 SRT。随访结果表明,在 SRT 治疗开始前 2 个月,患者 VT 发作总数平均每月达 562 次;而在 SRT 治疗后的 2~9 个月期间,VT 发作总数平均每月降至 52 次。患者术后随访未显示明确的急性或晚期放射消融并发症。但 SRT 治疗 9 个月后,患者因呼吸衰竭、充血性心力衰竭及 VT 复发死亡。2017 年该团队再次报道 SRT 治疗 3 例 VT 患者^[5],同样给予 25 Gy 剂量,患者心律失常负荷均减轻,所有患者未观察到 SRT 并发症。

2017 年华盛顿大学医学院团队^[6]发表相关研究,阐述了 SRT 应用于 5 例结构性心脏病合并难治性 VT 患者的临床情况。在该研究中,针对计划靶区给予单次 25 Gy 的总照射剂量。治疗开始前 3 个月,患者 VT 发作总次数达 6 577 次;治疗后 6 周恢复期内,VT 发作次数为 680 次;在为期 1 年的随访期内,4 例存活患者的 VT 发作次数相较于基线水平减少了 99.9%。基于此项研究的积极成果,该团队随后启动了前瞻性 I~II 期试验(ENCORE-VT)^[7],共纳入 19 例患者,对其实施 25 Gy 剂量单次消融,术后 6 个月 VT 发作中位数由 119 次减至 3 次。部分患者出现心包炎、心包积液、放射性肺炎、头晕及恶心等不良反应,经治疗后好转。2020 年该团队 Cuculich 教授^[8]报告了 ENCORE-VT 研究的长期随访结果,数据显示 19 例患者接受 SRT 治疗后 2 年总生存率为 52.4%;并且在治疗 2 年后,78% 的患者 VT 减少的有效性终点能够持续 2 年。虽然 SRT 治疗在大多数患者中表现出良好的安全性,但部分患者出现晚期不良反应,例如心包积液等。Cuculich 教授认为心脏放射消融术目前最适合传统 VT 治疗失败的高危患者。

2019 年 Neuwirth 等^[9]对 10 例导管消融失败的难治性 VT 患者行 SRT 治疗,给予患者 25 Gy 的照射剂量。过程中无任何并发症,随访(中位数 28 个月)发现 VT 负荷较前减轻 87.56%。2023 年一项前瞻性临床试验^[10]对 6 例难治性复发性 VT 患者进行了 STAR 治疗。研究结果表明 67% 的患者 VT 发作频率减少或

超过 50%,同时抗心律失常药使用量减少。随访期间未观察到心肺功能下降或严重不良事件,且生活质量改善。2024 年,Arkles 等^[11]报道了 14 例难治性 VT 患者接受 SRT 治疗后 1 年的临床结局。其中,10 例患者存活至 12 个月随访节点,这些患者的 VT 发作次数显著减少。此外,在随访全程中,均未观察到严重不良反应的出现。与此同时,多项对比研究^[12-14]表明 STAR 是治疗 VT 的一种极具潜力的手段。

以上研究结果表明,SRT 为难治性 VT 提供了新的治疗选择。SRT 可显著降低难治性 VT 负荷,减少抗心律失常药使用,改善患者生活质量,短期安全性可控,而长期生存率受基础疾病影响。

2.1.2 AF

研究者^[15-16]以小型猪、犬等实验动物为研究对象,不仅证实了 SRT 在 AF 治疗的可行性,还对其安全剂量、潜在并发症等关键问题进行了探索。这为后续临床研究奠定了重要实验基础。

2016 年 Monroy 等^[17]首次报道 STAR 治疗 AF 的个案。该患者接受射频刀环肺静脉无创消融,术后 6 个月患者 AF 复发但无症状,随访期间未出现食管、呼吸道等相关不适症状,术后 1 年 MRI 提示有消融瘢痕。

2019 年 Qian 等^[18]开展了 SRT 治疗药物难治性阵发性 AF 的临床可行性研究。该研究纳入 2 例患者,采用 25~35 Gy 剂量对肺静脉与左心房后壁实施连续线性消融。其中 1 例术后 6 个月出现持续性 AF,另 1 例术后 6 个月超声心动图示 4 mm 心包积液(经保守治疗缓解),术后 12 个月 MRI 显示左心房纤维化灶与消融目标一致,且随访 48 个月未再发生 AF。为进一步改进 STAR 的技术,Bonaparte 等^[19]开展了一项前瞻性 II 期临床试验,旨在评价基于直线加速器的 STAR 在老年药物难治性 AF 患者中的安全性与有效性。消融总剂量为 25 Gy,治疗时长 3 min,共 5 例患者完成治疗,平均随访 4 个月。所有患者术后 1 个月的 1 周动态心电图均显示存在频繁心房异位搏动及房性心动过速,但无 AF 复发,且放射治疗后均未使用抗心律失常药。1 例患者发生 1 级食管炎,经药物治疗后好转,未观察到其他不良反应。同时此研究收集的数据显示最佳靶区覆盖率,在减少治疗时间的同时如何保护周围组织,使老年阵发性 AF 患者获益。

整体而言,STAR 尤其适合难治性心律失常传统治疗失败或高风险的患者。虽然上述病例报告、小规模临床研究报道了 SRT 治疗难治性心律失常的可行性、有效性和安全性,但仅为初步研究结果,尚缺乏随机对照研究及大样本、真实世界和长期随访的研究证

据,仍需要进一步的 SRT 研究证实以上初步结果的可靠性,并分析优化最佳 SRT 方案。

2.2 高血压

去肾神经术 (renal denervation, RDN) 是一种治疗难治性高血压的新兴技术,其中射频消融是 RDN 疗法中应用最多的方式。临床前研究^[20]表明,射频消融后神经损伤在 7 d 达到峰值,最大功能性去神经持续 < 30 d。还有研究^[21-22]表明,再生反应早在 RDN 后 7 d 即可发生,可能无法维持交感神经活性的持续降低。为改善上述局限性,SRT 技术被引入该领域。

李毅刚团队^[23]针对正常猪模型,开展了 SRT 去肾交感神经术的初步探索,其对 12 头血压正常猪的 24 条肾动脉以 25、35、45 Gy 的剂量 (每种剂量 $n=4$) 进行 SRT,另设 4 头猪作为对照组。结果显示不同剂量均可抑制交感神经活动,并实现完全环周去神经支配;治疗组血压和肾脏去甲肾上腺素均呈下降趋势,但组间无统计学差异。此外,35 Gy 和 45 Gy 组出现周围软组织损伤和肾坏死等不良反应,而 25 Gy 组未观察到明显不良事件。基于此,本研究中,25 Gy 被确定为最优辐射剂量,为后续研究提供了重要依据。随后该团队进一步在高血压猪模型中开展 SRT 去肾交感神经术的相关研究,通过 SRT 给予 25 Gy 剂量以实现肾去神经支配,结果显示 SRT 术后 1 个月和 6 个月时,实验组血压水平与对照组无显著差异;而术后 6 个月后,肾脏去甲肾上腺素水平显著降低,且肾交感神经功能持续受损,神经再生水平较低^[24]。未来,SRT 去肾交感神经术的研究可从以下方向深化探索:(1)明确该技术在不同类型高血压患者(如原发性高血压、继发性高血压、顽固性高血压等)中的治疗效果与安全性,同时确定最佳治疗剂量、治疗频次及间隔时间等关键参数;(2)深入阐明射线对肾交感神经及周围组织的作用机制,为治疗方案的优化提供理论支撑;(3)需探索该技术与其他高血压治疗手段(如药物治疗、其他器械干预等)的联合应用模式,以期提升高血压综合治疗效果。

2.3 梗阻性肥厚型心肌病

目前已有多项研究探讨了 SRT 在梗阻性肥厚型心肌病 (obstructive hypertrophic cardiomyopathy, OHCM) 治疗中的应用价值。Zhu 等^[25]开展的动物实验验证了 SRT 照射猪心脏室间隔的安全性和可行性。该研究选用 5 头 6 月龄雄性小猪,其中 2 头接受 25 Gy 剂量照射,3 头接受 40 Gy 剂量照射。结果显示照射 6 个月,两组猪的放射靶区心肌均出现坏死改变,且 40 Gy 剂量组的室间隔组织坏死更为明显;40 Gy 剂量组 N 末端脑钠肽前体及肌钙蛋白 T 水平在照射后均

呈现出高于 25 Gy 剂量组的趋势,但组间差异均无统计学意义,且两组猪的左室射血分数、左心室流出道流速未见明显变化。此外,SRT 照射后,5 头实验猪的左室射血分数、心脏瓣膜、房室结等均未出现损伤。这项研究提示 SRT 照射猪心脏室间隔安全、可行,为临床转化提供参考。

一项小样本研究^[26]表明,SRT 是药物难治性 OHCM 患者的一种可行放射消融治疗选择。该研究纳入 5 例不愿接受手术或酒精室间隔消融术的药物难治性 OHCM 患者,均接受 25 Gy 剂量的 SRT 治疗。结果显示:5 例患者均存活;超声心动图和心脏 MRI 检测发现目标心室间隔舒张期厚度从 23.7 mm 降至 22.4 mm。值得注意的是,其中 1 例患者在 SRT 治疗前每年发生 2~3 次晕厥,而术后 1 年随访期间未再出现晕厥;且治疗期间和术后 12 个月内未观察到与放射相关的并发症。这项研究表明,SRT 在减轻左心室流出道压力梯度及改善症状方面具有潜在价值,为进一步研究 SRT 在 OHCM 治疗中的应用提供了依据。此外,复旦大学附属华山医院研究团队^[27]也进行了立体定向射波刀放射治疗肥厚型心肌病的基础研究及临床探索,发现此方法可降低肥厚型心肌病模型的室间隔厚度及左心室质量/体重比值,改善肥厚型心肌病患者的临床症状,未对动物及临床患者造成严重不良反应。研究进一步证明了 SRT 减轻肥厚型心肌病室间隔肥厚的可行性、有效性、安全性良好,其临床疗效值得进一步探索。

2.4 心脏肿瘤

SRT 在心脏肿瘤治疗领域亦有应用探索。Bonomo 等^[28]报告了 2 例心脏血管肉瘤和 1 例黑色素瘤心脏转移接受 SRT 治疗的案例,对心脏血管肉瘤和心脏转移分别给予 3 次 24 Gy 和 5 次 30 Gy 照射剂量,MRI 显示心脏血管肉瘤患者获得部分缓解,而黑色素瘤心脏转移保持稳定;所有病例在治疗后 6 个月后经对比增强心脏 MRI 证实没有局部进展,且未出现任何治疗相关不良反应。该研究表明,SRT 在控制心脏恶性肿瘤患者的局部疾病进展方面具有可行性与有效性。另外 1 例原发性心脏血管肉瘤病例报告^[29]显示,患者接受 40 Gy 剂量的 SRT 治疗后 7 个月,胸部 CT 显示肿瘤显著消退,患者保持良好的临床状况,没有治疗长期后后遗症的证据。此外,1 例肾细胞癌心脏转移患者接受 SRT (分 5 次给予 30 Gy) 治疗后,胸痛及呼吸困难症状缓解,左室射血分数较前改善^[30]。SRT 可以实现对心脏肿瘤的良好局部控制,为这类罕见且侵袭性强的肿瘤提供了一种有效的放射治疗选择。

3 总结及展望

SRT 在心脏疾病治疗方面的应用还处于早期阶段,需要更多的临床研究和长期随访数据来评估其真正的疗效和潜在风险。这种新方法存在以下几个方面的问题。(1)剂量和疗程:确定最佳的治疗剂量、治疗时间和治疗次数,以实现最佳的治疗效果。(2)定位和正常组织暴露最小化:立体定向靶点定位和准确的靶点勾画是至关重要的,这一步需要使用多模态成像来帮助区分健康组织和病变组织。由于心脏是照射目标,并且治疗过程中的呼吸和心脏运动可能增加偏离目标的风险,因此心脏的精准定位尤其重要,需要电生理医师、放射治疗医师、放射治疗物理师及技师的多学科团队的共同参与,同时对辅助医疗器械的要求较高,常需要多项影像学检查、电生理检查,包括单光子发射计算机断层成像、CT 和增强 MRI 等,从而将影像学信息和电生理信息相结合以精确勾画靶区。同时可以使用呼吸门控和心脏门控技术让辐射束和患者的呼吸、心跳同步,从而减少呼吸和心脏运动对 SRT 治疗疾病的干扰,提高准确性和正常组织暴露最小化。(3)并发症防治:在治疗过程中,要密切监测心脏的结构和功能变化,预防可能的并发症,如心包炎、心包积液和放射性肺炎等。心脏的位置会随着呼吸和心跳而移动,这会影 响放射治疗的精准度。同时,心脏附近的食管、气管、冠状动脉等重要结构也需要特别小心。

未来,随着影像技术、放射治疗设备等的不断进步,以及多学科协作的深入开展,SRT 有望在心血管疾病治疗中发挥更重要的作用。我们期待通过持续不懈的研究探索,能够更好地掌握 SRT 在心血管疾病中的应用规律,为患者制定更安全、更有效的治疗方案,推动心血管疾病治疗迈向精准化、个性化的崭新高度。

参 考 文 献

- [1] Potters L, Kavanagh B, Galvin JM, et al. American Society for Therapeutic Radiology and Oncology (ASTRO) and American College of Radiology (ACR) practice guideline for the performance of stereotactic body radiation therapy [J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2010, 76(2): 326-332.
- [2] Timmerman RD, Kavanagh BD, Cho LC, et al. Stereotactic body radiation therapy in multiple organ sites [J]. *J Clin Oncol*, 2007, 25(8): 947-952.
- [3] Chang JH, Cha MJ, Seo JW, et al. Feasibility study on stereotactic radiotherapy for total pulmonary vein isolation in a canine model [J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1): 12369.
- [4] Loo BW Jr, Soltys SG, Wang L, et al. Stereotactic ablative radiotherapy for the treatment of refractory cardiac ventricular arrhythmia [J]. *Circ Arrhythm Electrophysiol*, 2015, 8(3): 748-750.
- [5] Paul CZ, Edward AG, Thomas F, et al. P1809 Noninvasive cardiac radiosurgery: current clinical experience for treatment of refractory arrhythmias [J]. *Europace*, 2017, 40(suppl 1): ehz748. 0500.
- [6] Cuculich PS, Schill MR, Kashani R, et al. Noninvasive cardiac radiation for ablation of ventricular tachycardia [J]. *N Engl J Med*, 2017, 377(24): 2325-2336.
- [7] Robinson CG, Samson PP, Moore KMS, et al. Phase I/II trial of electrophysiology-guided noninvasive cardiac radioablation for ventricular tachycardia [J]. *Circulation*, 2019, 139(3): 313-321.
- [8] Cuculich P. HRS 2020: longer term results from the ENCORE-VT study [Z]. 2020 <https://www.radcliffecardiology.com/video-index/hrs-2020-longer-results-encore-vt-study>.
- [9] Neuwirth R, Cvek J, Knybel L, et al. Stereotactic radiosurgery for ablation of ventricular tachycardia [J]. *Europace*, 2019, 21(7): 1088-1095.
- [10] van der Ree MH, Dieleman EMT, Visser J, et al. Non-invasive stereotactic arrhythmia radiotherapy for ventricular tachycardia: results of the prospective STARNL-1 trial [J]. *Europace*, 2023, 25(3): 1015-1024.
- [11] Arkes J, Markman T, Trevillian R, et al. One-year outcomes after stereotactic body radiotherapy for refractory ventricular tachycardia [J]. *Heart Rhythm*, 2024, 21(1): 18-24.
- [12] Miszczyk M, Hoeksema WF, Kuna K, et al. Stereotactic arrhythmia radioablation (STAR)—A systematic review and meta-analysis of prospective trials on behalf of the STOPSTORM. eu consortium [J]. *Heart Rhythm*, 2025, 22(1): 80-89.
- [13] Gupta A, Sattar Z, Chaaban N, et al. Stereotactic cardiac radiotherapy for refractory ventricular tachycardia in structural heart disease patients: a systematic review [J]. *Europace*, 2024, 27(1): euae305.
- [14] Wei C, Boeck M, Qian PC, et al. Cost of cardiac stereotactic body radioablation therapy versus catheter ablation for treatment of ventricular tachycardia [J]. *Pacing Clin Electrophysiol*, 2022, 45(9): 1124-1131.
- [15] Sharma A, Wong D, Weidlich G, et al. Noninvasive stereotactic radiosurgery (CyberHeart) for creation of ablation lesions in the atrium [J]. *Heart Rhythm*, 2010, 7(6): 802-810.
- [16] Bode F, Blanck O, Gebhard M, et al. Pulmonary vein isolation by radiosurgery: implications for non-invasive treatment of atrial fibrillation [J]. *Europace*, 2015, 17(12): 1868-1874.
- [17] Monroy E, Azpiri J, de la Peña C, et al. Late gadolinium enhancement cardiac magnetic resonance imaging post-robotic radiosurgical pulmonary vein isolation (RRPVI): first case in the world [J]. *Cureus*, 2016, 8(8): e738.
- [18] Qian PC, Azpiri JR, Assad J, et al. Noninvasive stereotactic radioablation for the treatment of atrial fibrillation: first-in-man experience [J]. *J Arrhythm*, 2020, 36(1): 67-74.
- [19] Bonaparte I, Gregucci F, di Monaco A, et al. Phase II trial of LINAC-based STereotactic Arrhythmia Radioablation (STAR) for paroxysmal atrial fibrillation in elderly: planning and dosimetric point of view [J]. *J Pers Med*, 2023, 13(4): 596.
- [20] Sakakura K, Tunev S, Yahagi K, et al. Comparison of histopathologic analysis following renal sympathetic denervation over multiple time points [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2015, 8(2): e001813.
- [21] Rousselle SD, Brants IK, Sakaoka A, et al. Neuromatous regeneration as a nerve response after catheter-based renal denervation therapy in a large animal model: immunohistochemical study [J]. *Circ Cardiovasc Interv*, 2015, 8(5): e002293.
- [22] Booth LC, Nishi EE, Yao ST, et al. Reinnervation of renal afferent and efferent nerves at 5.5 and 11 months after catheter-based radiofrequency renal denervation in sheep [J]. *Hypertension*, 2015, 65(2): 393-400.
- [23] Cai XX, Yang YL, Shen YC, et al. Noninvasive stereotactic radiotherapy for renal denervation in a swine model [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2019, 74(13): 1697-1709.

- [29] Chen J, Zou X. Self-assemble peptide biomaterials and their biomedical applications[J]. *Bioactive Mater*, 2019, 4:120-131.
- [30] Kumar VA, Liu Q, Wickremasinghe NC, et al. Treatment of hind limb ischemia using angiogenic peptide nanofibers[J]. *Biomaterials*, 2016, 98:113-119.
- [31] Tongers J, Webber MJ, Vaughan EE, et al. Enhanced potency of cell-based therapy for ischemic tissue repair using an injectable bioactive epitope presenting nanofiber support matrix[J]. *J Mol Cell Cardiol*, 2014, 74:231-239.
- [32] Yang L, Shridhar SV, Gerwitz M, et al. An in vitro vascular chip using 3D printing-enabled hydrogel casting[J]. *Biofabrication*, 2016, 8(3):035015.
- [33] Pinnock CB, Meier EM, Joshi NN, et al. Customizable engineered blood vessels using 3D printed inserts[J]. *Methods*, 2016, 99:20-27.
- [34] Gao G, Lee JH, Jang J, et al. Tissue engineered bio-blood-vessels constructed using a tissue-specific bioink and 3D coaxial cell printing technique: a novel therapy for ischemic disease[J]. *Adv Funct Mater*, 2017, 27(33):1700798.
- [35] Niu J, Huang H, Pei J. Research and development strategy for biodegradable magnesium-based vascular stents: a review[J]. *Biomater Transl*, 2021, 2(3):236-247.
- [36] Bosiers M, Peeters P, D'archambeau O, et al. AMS INSIGHT—Absorbable metal stent implantation for treatment of below-the-knee critical limb ischemia: 6-month analysis[J]. *Cardiovasc Intervent Radiol*, 2009, 32(3):424-435.
- [37] Wang Y, Wang X, Chen J, et al. Stem-cell-based small-diameter blood vessels with 3D printing[J]. *Small Sci*, 2024, 4(11):2400261.
- [38] Zhong L, Tan X, Yang W, et al. Bioactive matters based on natural product for cardiovascular diseases[J]. *Smart Mater Med*, 2024, 5(4):542-565.
- [39] Wang Q, Zhang Y, Shao F, et al. Bio-inspired design of 4D-printed scaffolds capable of programmable multi-step transformations toward vascular reconstruction[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(45):2407592.
- [40] Aslan C, Zolbanin NM, Faraji F, et al. Exosomes for CRISPR-Cas9 delivery: the cutting edge in genome editing[J]. *Mol Biotechnol*, 2024, 66(11):3092-3116.
- [41] Xu SJ, Yang F, Zhou X, et al. Uniform PEGylated PLGA microcapsules with embedded Fe₃O₄ nanoparticles for US/MR dual-modality imaging[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7(36):20460-20468.

收稿日期:2025-02-21

(上接第 1089 页)

- [24] Cai X, Shen Y, Yang Y, et al. Renal denervation by noninvasive stereotactic radiotherapy induces persistent reduction of sympathetic activity in a hypertensive swine model[J]. *J Am Heart Assoc*, 2021, 10(16):e020068.
- [25] Zhu ZW, Li XP, Gao YW, et al. [Safety and feasibility of stereotactic radiation therapy on porcine ventricular septum: a preliminary study][J]. *Zhonghua Xin Xue Guan Bing Za Zhi*, 2022, 50(9):907-912.
- [26] Li X, Zhu Z, Liu J, et al. Septal radioablation therapy for patients with hypertrophic obstructive cardiomyopathy: first-in-human study[J]. *Eur Heart J Open*, 2023, 3(3):oead052.
- [27] 李慧洋, 吴俊劼, 周鹏, 等. 立体定向射波刀放射治疗肥厚型心肌病的基础研究及临床探索[J]. *复旦学报(医学版)*, 2022, 49(3):360-368, 383.
- [28] Bonomo P, Cipressi S, Desideri I, et al. Stereotactic body radiotherapy with CyberKnife for cardiac malignancies[J]. *Tumori*, 2015, 101(3):294-297.
- [29] Stergioula A, Pantelis E. Treatment of a primary cardiac angiosarcoma with stereotactic body radiation therapy[J]. *Hellenic J Cardiol*, 2023, 72:70-71.
- [30] Dhar A, Donovan E, Leong D, et al. Stereotactic Body Radiation Therapy (SBRT) for a patient with a myocardial metastasis: a case report[J]. *Curr Oncol*, 2021, 28(1):390-395.

收稿日期:2025-06-05