

微无创治疗时代下高强度聚焦超声治疗在胰腺癌中的应用

袁正蒙¹, 朱 辉^{2*}

¹重庆医科大学研究生院, 重庆

²重庆医科大学附属第二医院海扶肿瘤治疗中心, 重庆

收稿日期: 2026年1月10日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月12日

摘 要

在微无创治疗成为肿瘤治疗新趋势的今天, 高强度聚焦超声(High Intensity Focused Ultrasound, HIFU)作为一种高效、非侵入的局部消融手段, 正逐渐在胰腺癌治疗中展现出其独特的意义。胰腺癌历来死亡率高、生存期短, 而HIFU凭借其安全、无创、可重复、患者耐受性好等优势, 为那些无法手术、多线治疗失败或身体条件较差的患者提供了新的治疗选择。本文系统综述了高强度聚焦超声治疗胰腺癌的作用原理, 包括其直接热消融肿瘤、有效缓解癌痛以及可能调节肿瘤免疫微环境的多重效应, 并分析了目前高强度聚焦超声单独或联合放化疗、免疫治疗在不可切除胰腺癌中的应用现状, 总结其对患者生存质量与生存期的积极影响。同时, 文章也探讨了该技术目前面临的挑战与未来发展方向, 以期为高强度聚焦超声在胰腺癌临床实践中的进一步应用提供参考与思路。

关键词

高强度聚焦超声, 胰腺癌, 局部消融, 微无创

Application of High-Intensity Focused Ultrasound in Pancreatic Cancer in the Era of Minimally and Non-Invasive Therapy

Zhengmeng Yuan¹, Hui Zhu^{2*}

¹Graduate School, Chongqing Medical University, Chongqing

²HIFU Tumor Treatment Center, The Second Affiliated Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: January 10, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 12, 2026

*通讯作者。

文章引用: 袁正蒙, 朱辉. 微无创治疗时代下高强度聚焦超声治疗在胰腺癌中的应用[J]. 临床医学进展, 2026, 16(2): 2539-2546. DOI: 10.12677/acm.2026.162661

Abstract

As minimally and non-invasive therapy becomes a new trend in cancer treatment, high-intensity focused ultrasound (HIFU) is gradually demonstrating its unique significance in pancreatic cancer management as an efficient, non-invasive local ablation modality. Pancreatic cancer has long been associated with high mortality and short survival. HIFU, with its favorable safety profile, non-invasive nature, repeatability, and good patient tolerance, offers a new therapeutic alternative for patients who are ineligible for surgery, have experienced failure of multiple lines of therapy, or are in poor general condition. This article provides a systematic review of the mechanisms underlying HIFU treatment for pancreatic cancer, encompassing its multiple effects—from direct thermal ablation of tumors and effective alleviation of cancer-related pain to the potential modulation of the tumor immune microenvironment. It further analyzes the current status of HIFU application, both as a standalone treatment and in combination with radiotherapy, chemotherapy, or immunotherapy, in patients with unresectable pancreatic cancer, summarizing its positive impact on patient quality of life and survival. Furthermore, the paper discusses the existing challenges and future directions for this technology, aiming to offer insights and perspectives for its further integration into clinical practice for pancreatic cancer.

Keywords

High-Intensity Focused Ultrasound, Pancreatic Cancer, Local Ablation, Minimally and Non-Invasive

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

胰腺癌恶性程度高, 近年来发病率与死亡率持续上升, 五年生存率仅为 5%~10%, 居恶性肿瘤预后末位。其防治面临诸多挑战: 发病隐匿, 早期诊断困难, 许多患者确诊时已进展至晚期, 丧失手术机会; 胰腺癌侵袭度高, 极易侵犯周围血管组织, 手术切除率低, 复发率高达 70% [1]; 且肿瘤微环境致密、免疫抑制状态显著, 加之频繁的基因突变, 共同导致其对放化疗、靶向治疗及免疫治疗均易产生耐药, 总体疗效欠佳[2]。HIFU 技术通过将超声波能量聚集于肿瘤病灶处产生热效应、机械效应及空化效应达到无创的局部消融, 有着精确、三维适形、可重复等优势, 在肿瘤治疗进入微创时代下于不可切除胰腺癌中广泛应用[3]。下文将对 HIFU 在不可手术胰腺癌临床应用中展开综述, 为临床开展 HIFU 治疗提供理论参考及启发。

2. 高强度聚焦超声治疗的原理及生物学基础

超声波能量有着可聚焦性和良好的人体组织穿透性。高强度聚焦超声(HIFU)技术正是利用超声波这一特性将能量由超声波形式在影像的引导下精确聚集投送至病灶处产生热效应, 使得病灶组织温度瞬间升至 60°C~100°C, 导致蛋白质变性和组织凝固性坏死。同时, 超声传送的机械波在焦点处产生机械效应直接破坏肿瘤细胞结构; 高强度聚焦超声的高声压还会引发组织内微小气泡的剧烈振荡、膨胀与内爆(空化效应), 产生高速微射流和冲击波, 从内部撕裂肿瘤细胞。在这三重打击下, HIFU 技术可实现肿瘤组织的精确消融, 同时避免损伤周围正常组织[4]。有学者认为, 这三种效应, 尤其是空化效应, 不仅能通

过物理机制消融肿瘤, 还可阻断肿瘤血管再生、暴露更多肿瘤抗原、重塑肿瘤免疫微环境, 从而增强机体对肿瘤的免疫应答[5]。

3. HIFU 治疗胰腺癌的临床应用

胰腺癌当前倡导的主要治疗模式是以多学科协作为基础的综合模式, 但由于胰腺癌的特性, 常规的临床干预手段往往不尽人意, 胰腺癌手术根治机会少且相当部分患者无法耐受根治术、术后易复发、化疗易耐药、放射治疗不敏感、靶向治疗缺少相关药物和有效靶点、免疫治疗效果差使得胰腺癌患者生存质量差、生存期短[6]。HIFU 治疗基于其无创、精准、无辐射、可重复、术后恢复快的优势广泛用于胰腺癌的治疗, 延长患者生存期, 改善生活质量, 调节免疫[7]。

3.1. HIFU 单独应用

相当一部分胰腺癌患者中肿瘤进展迅速、易产生耐药性且常伴随体力状态较差(无法耐受化疗或手术)的群体, HIFU 单独治疗仍可显著改善其临床获益, 包括延长生存期、提升生活质量, 并快速缓解癌性疼痛。近年来, 许多研究报道了 HIFU 治疗胰腺癌患者后取得了较为满意的生存期。叶新民等[8]对 17 例晚期胰腺癌患者的回顾性队列研究显示, HIFU 治疗的总有效率为 70% (完全缓解率 11.76%, 部分缓解率 58.82%), 临床受益反应率为 82.36%, 癌性疼痛缓解率达 80%, 且所有病例治疗时均未出现胰液外漏、腹腔内出血或胃肠道损伤等相关并发症。王时峰等[9]在 46 例胰腺癌患者治疗结果的回顾性队列研究中指出, HIFU 消融后完全缓解率为 2.1%, 部分缓解率为 71.7%, 76.1% 的患者食欲与精神改善, 65.2% 的患者肿瘤标志物 CA-199 或 CA-242 水平下降, 治疗后血液淀粉酶未升高, 证实了治疗的安全性。上述研究发现都证明 HIFU 治疗胰腺癌具有较好的局部消融效果, 安全性较高, 为中晚期患者提供了一种有效的治疗选择, 但都为样本量较小的回顾性研究, 证据等级有限, 需进一步的大规模前瞻性研究验证。

晚期胰腺癌患者伴有长期的顽固性疼痛、重度黄疸, 这些症状严重影响生活质量。顽固性癌痛主要是由于其侵犯周围组织及腹腔干神经节所致。阿片类药物是癌性疼痛的主要治疗药物, 但伴有恶心、便秘、呼吸抑制等多种副作用, 还可能诱发肿瘤生长、痛觉过敏及药物成瘾等问题。胰腺癌通过原位生长或肝门淋巴结转移直接压迫胆管, 肝内广泛转移直接破坏肝组织或在肝内胆管形成癌栓阻塞导致重度黄疸。内科药物治疗通常难以缓解, PTCD 治疗虽能短期快速改善黄疸, 但也有着胆瘘、胆道感染等风险, 且体外留有引流管, 存在堵塞、脱落的情况, 给患者日常生活带来不便, 影响生活质量。胡斌等[10]对 60 例晚期胰腺癌患者的回顾性队列研究显示, HIFU 治疗后, 患者通过视觉模拟评分法评估的疼痛程度及镇痛药物用量均较治疗前显著降低, 疼痛缓解有效。一项回顾性队列研究[11]表明, 中晚期胰腺癌患者接受 HIFU 治疗后, 腹痛及腰背部疼痛的缓解率可达 80%~100%。金成兵等[12]报道的回顾性队列研究显示, 约 80% 的胰腺癌患者经 HIFU 治疗后疼痛得到改善, 其中 30% 的患者疼痛完全缓解。在缓解黄疸方面, 袁长吉等[13]报道胰腺癌患者在接受 HIFU 治疗后, 肿瘤标志物 CA19-9 水平下降, 伴随的黄疸也出现消退。上述回顾性研究都指出 HIFU 能有效控制胰腺癌并发的顽固性癌痛及重度黄疸, 但局限于其回顾性研究, 仍需进一步大规模多中心盲法评估来进一步验证。

肿瘤的免疫逃避是恶性肿瘤得以进展的核心机制, 而胰腺癌恰恰是体现这一机制并导致免疫治疗疗效不佳的突出代表。肿瘤细胞可通过多种途径逃避免疫系统的识别与攻击, 例如下调主要组织相容性复合体(MHC)分子导致抗原呈递缺陷, 以及高表达 PD-L1 等免疫检查点分子, 从而抑制 T 细胞的活性。胰腺癌的肿瘤微环境尤其特殊且复杂, 其中大量的癌相关成纤维细胞(CAF)分泌的细胞外基质形成致密的物理屏障, 阻碍了免疫细胞向肿瘤组织的浸润; 同时, 微环境中还聚集了髓系来源的抑制细胞(MDSC)、调节性 T 细胞(Treg)等免疫抑制性细胞, 它们共同营造了一个强大的免疫抑制状态。这些因素共同导致胰腺

癌对现有的免疫检查点抑制剂等治疗方法反应率极低, 使其成为“冷肿瘤”的典型[2]。因此, 克服胰腺癌的免疫逃避需要着眼于改造其独特的肿瘤微环境, HIFU 治疗后, 肿瘤组织通透性显著改善, 坏死的肿瘤细胞释放抗原和细胞因子, 诱导免疫细胞浸润, 从而优化免疫微环境[14]。宋晓燕等[15]对 36 例原发性胰腺癌患者的回顾性队列研究显示, HIFU 治疗 4 周后患者外周血中免疫抑制性的 CD4⁺CD25⁺调节性 T 细胞百分比治疗前显著下降($p < 0.01$), 同时患者 KPS 评分显著改善, 癌胚抗原(CEA)和糖类抗原 199(CA19-9)水平也明显降低, 表明 HIFU 治疗能改善患者的细胞免疫功能。王宇岭等[16]对 46 例原发性胰腺癌患者的回顾性队列研究发现, HIFU 治疗后 CD4⁺ T 细胞百分数、CD4⁺/CD8⁺比值以及血清中 IL-2、IFN- γ 含量均较治疗前显著升高, 而 CD8⁺ T 细胞百分数和 IL-4、IL-10 含量则显著下降, 提示 HIFU 治疗可促进 Th1 型细胞免疫应答。高远等[17]对 39 例原发性胰腺癌患者的回顾性队列研究证实, HIFU 治疗后患者 NK 细胞百分数、CD4⁺ T 细胞百分数和 CD4⁺/CD8⁺比值均较治疗前显著提高, 有效率达 87.18%, 表明 HIFU 治疗能增强抗肿瘤免疫。HIFU 治疗通过消融肿瘤组织, 可能改变肿瘤物理屏障, 促进肿瘤抗原释放, 从而调节胰腺癌的免疫抑制微环境, 为后续免疫治疗创造有利条件。上述回顾性研究揭示了 HIFU 治疗对胰腺癌免疫环境影响, 从而为将来打破胰腺癌“免疫冷肿瘤”这一难题提供了新的方法, 但仍需要深入探究其分子机制, 并通过大样本量、多中心的前瞻研究来进一步探讨。

3.2. HIFU 联合化疗

化疗是胰腺癌治疗的基石, 在晚期、新辅助及术后辅助治疗均不可或缺, 可有效控制肿瘤、延长生存。但胰腺癌肿瘤常表达多重耐药基因, 同时分泌大量细胞外基质, 导致细胞外基质代谢失衡, 肿瘤微环境呈现高度纤维化与乏氧状态。在多重因素叠加作用下, 肿瘤易产生耐药性。HIFU 作为一种非侵入性局部治疗手段, 可通过热效应、空化效应直接破坏肿瘤组织, 并可能通过诱导热休克蛋白表达等方式改变肿瘤细胞状态和微环境, 从而增强化疗药物的渗透性和杀伤效果, 起到增敏作用。孙杰等[18]通过回顾性队列研究证实, 低功率高强度聚焦超声(HIFU)能够通过热效应及机械效应改变肿瘤细胞膜的通透性, 并显著降低多药耐药相关基因(MDR1 mRNA, MRP mRNA)及 p53 的表达水平, 从而逆转胰腺癌细胞对吉西他滨的化疗耐药, 联合治疗组疾病控制率达到 73.3%, 显著高于单纯化疗组的 46.7%。一项涵盖 523 例晚期胰腺癌的回顾性研究[19]显示, HIFU 联合吉西他滨治疗可使患者中位生存期延长至 7.4 个月, 1 年生存率提升至 21.32%, 其机制主要与 HIFU 消融后肿瘤间质通透性增加、血管内空化效应增强, 从而促进化疗药物在肿瘤组织内渗透与蓄积有关。石乔等[20]的 Meta 分析进一步表明, HIFU 联合化疗可显著提高晚期胰腺癌患者的临床获益率、半年及 1 年生存率, 并有效降低血清 CA19-9 水平。陈坚等[21]对 206 例晚期胰腺癌患者的回顾性队列研究也支持 HIFU 的化疗增敏作用, 其研究显示 HIFU 联合化疗的近期有效率达 77.78%, 临床受益反应率为 85.19%, 中位生存期为 13.6 个月, 疗效显著优于单纯化疗或单纯 HIFU 治疗。以上研究提示, HIFU 可通过改变肿瘤微环境、降低耐药基因表达等多重机制增强化疗药物敏感性, 为晚期胰腺癌患者提供了一种有效的联合治疗策略, 但多数为回顾性队列研究性质, 仍需要进一步的前瞻性研究来佐证。其中列举的一篇 Meta 分析虽证据级别较高, 但纳入研究的异质性和回顾性性质可能影响结果可靠性, 需更多高质量随机对照试验支持。

3.3. HIFU 放疗

放疗杀伤肿瘤细胞很大程度上依赖于氧气作用产生自由基来破坏肿瘤 DNA, 但胰腺癌生长迅速, 血管结构异常, 导致其内部, 尤其是肿瘤中心区域氧气供应严重不足。在这种乏氧条件下, 放疗的效力会大打折扣, 相比之下, HIFU 的热效应不仅能更有效地杀伤乏氧细胞, 还可破坏异常的肿瘤血管, 加速局部血流灌注, 并可能通过水分子电离释放氧原子, 直接提高肿瘤局部氧含量, 从而增强放疗的敏感性。

施琦等[22]在其回顾性队列研究中指出与单纯放疗相比, 接受 HIFU 联合调强放疗的患者, 其血清中的肿瘤标志物(如 CA199、CA242)及与肿瘤进展相关的 DJ-1、microRNA-155 水平降低更为显著。这表明联合治疗在分子层面产生了更强的抗肿瘤效果。王继营等[23]的回顾性队列研究显示, HIFU 联合放疗具有高临床受益率(95.45%)和令人鼓舞的中位生存期(17.4 个月)。周莉等[24]的回顾性队列研究发现, 联合治疗组拥有更高的肿瘤缓解率和患者生存率。其潜在机制被认为是 HIFU 的热效应能够有效杀伤对放射线不敏感的乏氧细胞, 并且可能通过破坏肿瘤内部异常的血管结构, 改善局部血供和氧合状态, 从而提高了后续放疗的敏感性。以上回顾性研究证明了高强度聚焦超声与放疗联合的治疗策略, 能够有效克服胰腺癌乏氧微环境对放疗的限制, 通过热效应等多种机制增强放疗效果, 并改善患者的临床症状和生存预后, 但因回顾性队列本身的局限, 加上样本量较小, 仍需进一步前瞻研究及深入的机制探讨。

3.4. HIFU 联合中药

近年来, 中药在胰腺癌恶性肿瘤中得到了越来越多的应用主要得益于其“扶正祛邪”原则, 通过清热解毒、活血化瘀等方法进行整体辨证施治, 调节机体免疫功能, 改善内环境, 在改善胰腺癌患者的临床症状和生活质量等方面均存在一定的临床价值。因此, HIFU 治疗联合中药能更好地改善患者生活质量和延长生存期。李娜等[25]的回顾性队列研究发现, 调肝理脾化积方联合 HIFU 治疗局部晚期胰腺癌患者 1、3 个月临床受益率分别达 64.29% 和 63.16%, 生活质量评分显著改善, 且 CEA 水平较对照组明显降低。王琨等[26]的回顾性队列研究显示, 清热化湿中药联合 HIFU 治疗晚期胰腺癌可使疾病稳定率达 74.4%, 中位生存时间 6 个月, 半年和 1 年生存率分别为 53.5% 和 30.2%。上述 HIFU 与中药联合治疗的研究均为回顾性队列研究, 仍需进行双盲前瞻性研究并结合基础研究来进一步探讨。

3.5. HIFU 治疗的安全性

HIFU 治疗后有部分患者可能出现一些与热消融相关的不良反应。李萃萃等[7]的系统性评价分析了 23 项临床研究(其中包括 19 项随机对照试验和 4 项临床对照试验)的数据, 其结果显示 HIFU 治疗本身直接相关的不良反应发生率较低, 主要表现为轻度皮肤损伤(发生率为 1.6%)和发热(发生率为 6.2%)。对于皮肤损伤, 常规处理措施包括局部冰敷、使用烫伤膏以及预防感染; 发热多为肿瘤组织坏死吸收所致, 通常为一过性, 无需特殊干预即可自行缓解。HIFU 治疗的 III~IV 级严重不良反应的案例较少, 多数报道中发生的 III~IV 级不良反应主要与 HIFU 联合其他治疗如化疗、放疗等有关。值得关注的是当 HIFU 与放疗或化疗联合使用时, HIFU 并未显著增加严重并发症的发生率。总体而言, HIFU 治疗相关不良反应发生率较低, 多为症状轻微、短暂可控的皮肤损伤和发热, 并且联合其他治疗时不增加其他不良反应发生率, 其治疗方式安全可靠。

4. HIFU 增效剂

超声微泡在 HIFU 治疗胰腺癌中主要起增效作用, 其作为空化核, 显著增强超声的空化效应, 降低产生空化所需的能量阈值, 从而帮助 HIFU 能量更高效地在肿瘤部位沉积, 提高消融效率, 并可能减少治疗所需的总能量和时长。研究表明, 这种联合应用能有效缓解晚期胰腺癌患者的疼痛, 改善生活质量, 并可能延长生存期。此外, 超声微泡本身可用于治疗过程中的影像监控, 有助于评估疗效。秦艳等[27]通过动物实验证实, HIFU 联合 SonoVue 微泡造影剂能显著增大山羊肝脏组织的凝固性坏死体积, 能效因子降低至 7.17~8.18 J/mm³, 且对声轴方向上邻近焦点的血管未造成损伤, 血管内皮细胞结构完整证明了超声微泡联合 HIFU 治疗的安全性。陈莉等[28]在文献综述中总结出微泡造影剂通过增加空化核数量与降低空化阈值, 显著提升 HIFU 的热效应与空化效应, 从而改善胰腺癌消融效果, 超声微泡在 HIFU 已经广泛用于临床治疗中, 但目前仍缺乏大规模多中心的临床研究来进一步验证疗效, 尚无统一用法用量的专

家共识。

5. HIFU 与其他局部消融治疗对比

在治疗局部进展期胰腺癌的多种局部消融技术中, 高强度聚焦超声(HIFU)与射频消融(RFA)、微波消融(MWA)及不可逆电穿孔(IRE)等在原理、侵袭性、适用范围及安全性上各有特点。HIFU 作为一种完全无创的技术, 其原理是利用超声波的可聚焦性和可穿透性, 将体外低强度超声波聚焦于体内病灶, 在焦点处瞬间产生高温(60°C~100°C), 使病灶组织发生不可逆的凝固性坏死, 从而实现不开刀、不流血的治疗; 与需要经皮穿刺将消融针置入肿瘤内部的热消融技术(如 RFA、MWA)或 IRE 相比, HIFU 避免了穿刺相关的出血、感染和针道种植转移等风险。在适用范围上, HIFU 尤其适用于因肿瘤侵犯重要血管而无法手术或不宜穿刺的局部晚期胰腺癌患者, 治疗可有效减轻肿瘤负荷、缓解疼痛并可能延长生存期; 相比之下, RFA 和 MWA 作为热消融技术, 其疗效可能受“热沉效应”影响, 靠近大血管的肿瘤易消融不全, 且对周围空腔脏器有热损伤风险[29]。马洋洋等[30]在回顾性队列研究中指出, IRE 作为一种非热消融技术, 通过高压电脉冲在细胞膜上形成纳米级不可逆穿孔诱导细胞凋亡, 能选择性保留血管、胆管等重要结构, 尤其适用于胰腺周围解剖结构复杂的肿瘤, 但该技术通常需进行全身麻醉和严格的心电监护, 且存在发生胰瘘、心律失常等并发症的风险。张宸恺等[29]在文献综述中总结出, 联合消融的综合疗法是进展期胰腺癌治疗的重要研究方向, HIFU 因其无创、可重复治疗的特点, 在联合放化疗、免疫治疗等方面具有独特优势。上述文献综述与回顾性研究初步证明了 HIFU 相比其他局部消融治疗有着独特优势, 但仍需进一步的前瞻性研究来验证。

6. 挑战与展望

在肿瘤综合治疗越来越多样化, 以及追求最佳疗效、最小伤害、精准治疗的大背景下, HIFU 得益于其无创、精准、可重复的特点, 在许多恶性肿瘤的治疗中被视为重要手段。胰腺癌恶性程度高、侵袭性强、手术机会少、复发率高, 且对传统化疗耐药明显, 新兴靶向治疗应答率有限, 患者常伴顽固性癌痛。而 HIFU 以无创的超声波形式, 通过超声成像的实时引导将超声波精准聚焦于深部肿瘤组织, 使癌细胞凝固性坏死, 同时几乎不影响周围正常组织。除肿瘤病灶的适形消融外, HIFU 还能精确定位并破坏肿瘤后方的胰周神经丛, 显著缓解多数患者顽固的癌性疼痛, 减少对强阿片类药物的依赖, 使患者生活质量得到提高。HIFU 整个治疗过程不开刀、不流血、无辐射, 患者对其耐受良好, 为高龄、体弱或无法耐受手术者提供了重要选择, 且治疗后恢复快。基于其无创、耐受良好的特点, HIFU 可实现多次治疗, 有效控制残留或复发病灶, 同时可协同化疗、放疗等手段, 增强整体抗肿瘤效果, 延长患者生存期。但 HIFU 治疗因其独特的能量传播方式, 疗效中十分依赖声通道的条件, 超声波的穿透和聚焦效果在体内极易受到胃肠道气体干扰, 从而影响治疗效果, 还可能灼伤正常组织, 许多靠近胃肠道的病灶难以得到满意的消融, 尤其是在胰腺这种腹腔深处器官, 前方有胃和横结肠, 周围密布重要的血管和神经。超声波在到达胰腺病灶的路径时, 很容易受到前方胃肠道内气体的干扰, 导致能量衰减和聚焦偏离。同时由于呼吸运动, 单位时间内聚焦在病灶上的能量会不同程度削减, 导致消融不完全。未来随着声学工程、人工智能的发展, 可通过实时精准导航与运动补偿技术来弥补 HIFU 治疗胰腺癌中的不足。目前, HIFU 治疗胰腺癌还缺乏大规模前瞻性随机对照试验(RCT), 其疗效评价及治疗标准还需统一。

参考文献

- [1] 马福林, 王新刚, 王琛. 胰腺癌早期诊断的研究进展[J]. 中国微创外科杂志, 2020, 20(4): 358-361.
- [2] 周怡章, 郭肖凡, 陈志强, 等. 胰腺癌抑制性免疫微环境促进肿瘤细胞化疗耐药的研究进展[J]. 中国肿瘤临床, 2019, 46(18): 969-975.

- [3] 周崑, Dimitrov, D.D., Andreev, T.V., 等. 高强度聚焦超声治疗不能手术胰腺癌的 1 年生存分析: 中国和保加利亚的多中心临床研究[J]. 重庆医科大学学报, 2015, 40(3): 378-383.
- [4] 姬艳红, 李全禄, 杨瑛, 等. 高强度聚焦超声在医学领域中的应用的新进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2008, 25(4): 759-762, 780.
- [5] 顾惠琼. 高强度聚焦超声“切除”肿瘤过程中的空化效应[J]. 国外医学. 生物医学工程分册, 2003, 26(6): 241-244.
- [6] 《中国胰腺癌多学科综合治疗模式专家共识(2020 版)》专家组. 中国胰腺癌多学科综合治疗模式专家共识(2020 版) [J]. 中华肿瘤杂志, 2020, 42(9): 689-698.
- [7] 李萃萃, 王应强, 李幼平, 等. 高强度聚焦超声治疗胰腺癌有效性和安全性的系统评价[J]. 中国循证医学杂志, 2014, 14(11): 1332-1342.
- [8] 叶新民, 周陈华, 楼阿丽, 等. 高强度聚焦超声治疗晚期胰腺癌 17 例临床疗效分析[J]. 医学研究杂志, 2007, 36(8): 114-116.
- [9] 王时峰, 赵鑫, 郭月皓. 高强度聚焦超声治疗系统治疗胰腺癌临床应用[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2020, 36(6): 68-71.
- [10] 胡斌, 吕伟, 王丹, 赵玮, 周丁华. 高强度聚焦超声治疗对缓解胰腺癌疼痛的疗效观察[J]. 肝胆胰外科杂志, 2014, 26(2): 105-108.
- [11] 王瑾碧, 葛信国, 王纓, 孙文辉, 曹杰, 周俭, 蒋小燕. HIFU 合中药对胰腺癌镇痛疗效及临床受益的影响[J]. 辽宁中医杂志, 2007, 34(11): 1567-1569.
- [12] 张喆, 金成兵, 周崑, 冉立峰, 杨炜. 无法手术的中晚期胰腺癌 HIFU 治疗后的生存分析[J]. 重庆医学, 2017, 46(1): 88-90.
- [13] 袁长吉, 杨雷, 姚程, 等. 高能聚焦超声治疗胰腺癌 40 例[J]. 临床肝胆病杂志, 2003, 19(3): 145-146.
- [14] 吴双杰, 蔡端, 赵洪, 等. 高强度聚焦超声治疗晚期胰腺癌对机体免疫功能的影响[J]. 外科理论与实践, 2007, 12(6): 570-573.
- [15] 宋晓燕, 马宁, 姜振宇, 等. 原发性胰腺癌患者高强度聚焦超声治疗前后外周血 CD4⁺CD25⁺调节性 T 细胞的变化及其意义[J]. 吉林大学学报(医学版), 2013, 39(4): 791-794.
- [16] 王宇岭, 高远, 吴灵芝, 等. 高能聚焦超声治疗对原发性胰腺癌患者免疫功能的影响[J]. 江苏医药, 2007(7): 679-680.
- [17] 高远, 孙静, 冯军, 等. 高强度聚焦超声治疗对胰腺癌患者外周血免疫细胞的影响[J]. 肿瘤, 2009, 29(5): 490-492.
- [18] 孙杰, 姜丽娜, 潘赛英, 等. 低功率聚焦超声对胰腺癌化疗增敏作用的临床研究[J]. 现代肿瘤医学, 2013, 21(8): 1805-1808.
- [19] Ning, Z., Xie, J., Chen, Q., Zhang, C., Xu, L., Song, L., *et al.* (2019) HIFU Is Safe, Effective, and Feasible in Pancreatic Cancer Patients: A Monocentric Retrospective Study among 523 Patients. *OncoTargets and Therapy*, 12, 1021-1029. <https://doi.org/10.2147/ott.s185424>
- [20] 石乔, 刘垒, 张晓艺, 等. 国内应用吉西他滨联合高强度聚焦超声治疗中晚期胰腺癌疗效的 Meta 分析[J]. 临床外科杂志, 2019, 27(8): 680-683.
- [21] 陈坚, 徐周敏, 裴峰, 等. 非手术治疗晚期胰腺癌 206 例临床分析[J]. 中国肿瘤临床, 2011, 38(23): 1453-1458.
- [22] 施琦, 马士杰, 周传文, 等. 放疗联合高强度聚焦超声治疗胰腺癌的研究[J]. 中国现代医学杂志, 2020, 30(7): 59-63.
- [23] 王继营, 李峻, 田丹, 等. 高能聚焦超声联合三维适形放疗同步治疗局部晚期胰腺癌[J]. 临床肿瘤学杂志, 2009, 14(9): 834-836.
- [24] 周莉, 朱小鹏. 高强度聚焦超声联合同步放化疗治疗中晚期胰腺癌临床观察[J]. 医学临床研究, 2015, 32(9): 1772-1775.
- [25] 李娜, 张青, 刘声, 等. 调肝理脾化积方联合高强度聚焦超声治疗局部晚期胰腺癌临床研究[J]. 中国中医药信息杂志, 2017, 24(1): 25-29.
- [26] 王琨, 高惠峰, 孟志强, 等. 清热化湿中药联合高强度聚焦超声治疗晚期胰腺癌的临床分析[J]. 中国科技论文在线, 2013, 8(12): 45-48.
- [27] 秦艳. HIFU 联合微泡造影剂 SonoVue 对声轴方向上邻近焦点血管的影响[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆医科大学, 2009.
- [28] 陈莉, 胡兵. HIFU 联合超声微泡造影剂治疗肿瘤的研究进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2011, 19(2): 158-160.

- [29] 张宸恺, 张彬, 顾玉青, 等. 联合消融的综合疗法在进展期胰腺癌中的应用现状与进展[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 437-442.
- [30] 马洋洋, 行艳丽, 李红梅, 等. 不可逆电穿孔同步化疗治疗局部进展性胰腺癌[J]. 肝胆胰外科杂志, 2022, 34(10): 606-610.