



· 综述 ·

# 皮肤超声：2023年度研究进展与未来挑战

缪瑶<sup>1</sup>, 徐辉雄<sup>2</sup>, 郭乐杭<sup>1</sup>

1. 同济大学附属第十人民医院超声医学科, 上海 200072;
2. 复旦大学附属中山医院超声科, 上海 200032

[摘要] 在过去的2023年中, 高频超声技术在皮肤疾病领域的应用又获得了长足发展, 不仅在基础研究方面取得了前沿成果, 也在临床一线应用中发挥了更为重要的作用。具体而言, 在皮肤疾病的诊断、治疗前后评估、人工智能诊断、基础研究成果转化以及新型肿瘤治疗方法等领域, 高频超声技术为皮肤科医师提供了更多维度和更高精度的临床诊疗信息和干预手段。本文对2023年皮肤超声技术的研究热点和最新进展进行全面的回顾和总结。

[关键词] 皮肤疾病; 高频超声; 人工智能; 诊断

中图分类号: R751; R445.1 文献标志码: A DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2024.05.014

**Skin ultrasound: progress in 2023 and future challenges** MIAO Yao<sup>1</sup>, XU Huixiong<sup>2</sup>, GUO Lehang<sup>1</sup>  
(1. Department of Medical Ultrasound, Tenth People's Hospital, Tongji University, Shanghai 200072, China;  
2. Department of Ultrasound, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China)

Correspondence to: GUO Lehang E-mail: gopp1314@hotmail.com

[Abstract] In the year 2023, high-frequency ultrasound technology has seen significant progress in the field of skin diseases. It has made notable achievements in both basic research and clinical applications. Particularly, it has been successful in skin disease diagnosis, pre- and post-treatment evaluations, artificial intelligence-based diagnosis, the transformation of basic research results, and new tumor treatment methods. This technology provides dermatologists with more accurate and multi-dimensional clinical diagnosis and treatment information. This article provided a comprehensive review of the latest progress in skin ultrasound technology in 2023.

[Key words] Skin disease; High-frequency ultrasound; Artificial intelligence; Diagnosis

高频超声在皮肤病学领域的深入应用为皮肤科医师提供了更为精准的诊断和管理工具, 进一步推动了皮肤疾病诊疗的精细化发展。同时, 新技术的研发与转化也为解决皮肤病学领域的棘手问题带来了新的希望。本文对2023年度超声在皮肤疾病领域的研究热点和成果进行综述, 以期帮助皮肤超声从业者更好地了解当前现状及未来的发展趋势。

## 1 皮肤超声在肿瘤性病变诊疗中的进展

2023年, 高频超声在皮肤肿瘤的诊断与治疗方面展现了更高的精确性和更广泛的适用性。现已公认, 高频超声可以帮助医师确定皮肤肿瘤的空间信息及良恶性<sup>[1]</sup>, 而最新的趋势表明, 高频超声与其他成像模态及技术(如彩色多普勒

血流成像、超声造影、弹性成像、皮肤镜, 以及光学相干断层扫描等)的联合, 正在逐渐深入到皮肤肿瘤管理的各个方面。

在肿瘤的诊断和鉴别方面, 朱阳春等<sup>[2]</sup>对基底细胞癌、鳞状细胞癌及脂溢性角化病的特征进行了回顾性分析, 为复杂病情的鉴别提供了依据。王静等<sup>[3]</sup>则探讨超声联合皮肤镜对皮肤色素性肿瘤良恶性的诊断价值, 研究发现两者联合大大提高了诊断效能, 曲线下面积(area under curve, AUC)可达0.911。Wang等<sup>[4]</sup>的研究表明高频超声可用于鉴别皮肤色素性恶性肿瘤, 并有助于作出治疗决策, 减少不必要的活检。国外学者Siskou等<sup>[5]</sup>和Bozsányi等<sup>[6]</sup>在两项不同的研究中, 总结了基底细胞癌

基金项目: 国家自然科学基金(81927801)

通信作者: 郭乐杭 E-mail: gopp1314@hotmail.com

的高频超声特征，并且都指出组织学亚型与图像的特征具有强相关性，提示超声检查有精确分类的潜在能力。另外，Luo等<sup>[7]</sup>分析了基底细胞癌超声特征与Bcl-2蛋白表达的相关性，发现某些超声特征与Bcl-2蛋白表达水平相关，即Bcl-2蛋白低表达组具有更大的浸润深度、更多的皮下浸润、更多的囊性改变以及病灶内部更丰富的多普勒信号，这可能为基底细胞癌化疗药物的选择提供潜在的依据。除用于恶性皮肤肿物的诊断和鉴别外，在良性皮肤肿物的诊断与管理上也发挥着出色效能，García-Martínez等<sup>[8]</sup>通过包含临床和超声数据的聚类分析，不但可准确地识别I型神经纤维瘤病中的神经纤维瘤，而且可以鉴定神经纤维瘤的9种类型，并具有很高的观察者间相关性（ $\kappa$ 系数为0.82）；Ren等<sup>[9]</sup>利用高频超声和临床特征建立了预测模型，训练组和验证组AUC分别为0.936和0.864，可有效地鉴别表皮样囊肿和外毛根鞘囊肿。Yuan等<sup>[10]</sup>用多模态超声的方法较好地诊断了周围神经鞘瘤，诊断灵敏度、特异度、准确度分别为95.24%、96.08%、95.76%，AUC为0.987。

在皮肤肿瘤的管理中，超声的价值也日渐凸显，不仅可用于术前评估，为手术计划提供关键信息，还可以在术后进行持续监测，评估治疗效果，及时发现残留病灶或复发情况。针对黑色素瘤患者，尤其是需要进行手术切除的肢端黑色素瘤，术前确定肿瘤厚度是至关重要的。然而，现有的诊断工具和技术在灵敏度和特异度方面仍有局限性。为解决这一问题，Yu等<sup>[11]</sup>发现高频超声与组织病理学厚度测量值之间具有良好的相关性，Spearman相关系数为0.83，这将为手术计划和临床决策提供有力依据。Scoville等<sup>[12]</sup>则聚焦于儿童黑色素瘤和成人黑色素瘤间临床和生物学差异性。他们发现，患有皮肤黑色素瘤的儿童和青少年中，前哨淋巴结转移的情况更为常见，且复发风险在原发病灶较厚且前哨淋巴结阳性的患者中更高。此研究还指出，在发现前哨淋巴结阳性后，采用超声监测与完全淋巴结清扫在肿瘤学结局方面并无显著差异。

展望未来，随着超声技术的不断进步，其在

皮肤肿瘤的诊断、治疗和随访中的应用前景将更为广阔。未来的发展趋势可能包括实现更精准的肿瘤诊断、提高治疗的精准性、结合其他技术实现多模态诊断方式，以及向智能化和自动化方向发展。

## 2 皮肤超声在炎症性疾病诊疗中的进展

在皮肤炎症性疾病的治疗引导和疗效评估方面，高频超声同样具有重要的临床价值。在带状疱疹后神经痛方面，Gao等<sup>[13]</sup>的研究显示，沿筋膜、经络和神经针刺结合超声引导椎旁神经阻滞术治疗比超声引导下椎旁神经阻滞术单独治疗更有效，治疗3、4周后，观察组视觉模拟评分较对照组明显降低，两组视觉模拟评分下降（治疗后-治疗前），差异有统计学意义。此外，两组患者的睡眠状况均有改善，且观察组明显优于对照组。在特应性皮炎方面，Liu等<sup>[14]</sup>发现，相比临床评分系统，使用皮肤镜和高频超声能更深入地反映患者的炎症反应程度，同时也可以准确地评估和监测特应性皮炎患者使用度普利尤单抗的疗效。结核菌素皮肤试验是一种通过皮内注射结核菌素纯蛋白衍生物（purified protein derivative, PPD），并根据注射部位的皮肤反应来判断是否感染结核病的方法，故结核菌素皮肤试验被称为PPD试验。PPD试验通常被用作结核病的筛查工具，然而传统的PPD检测判断标准受主观因素的影响，导致检测结果不准确、不直观。而Jiao等<sup>[15]</sup>的研究证实PPD的超声诊断过程更加快速，检查结果更准确。因此，超声检查可以作为传统PPD检测判断方法的辅助方法。对于化脓性汗腺炎，Wortsmann等<sup>[16]</sup>提出的两种新的评分方法均能提供很好的解剖学信息，可以实现更准确、更早期的诊断，以及更精确的严重程度分期，从而更好地治疗化脓性汗腺炎。靳诗颖等<sup>[17]</sup>采用高频超声观察丹毒患者皮肤厚度的变化，发现与单用抗生素相比，联合抗生素和短期使用糖皮质激素治疗的方法能更有效地减轻皮肤炎症，更快地消除皮下组织水肿。

在硬皮病方面，Cai等<sup>[18]</sup>研究了剪切波弹性成像（shear wave elastography, SWE）在评估皮肤硬度和诊断系统性硬化症（systemic sclerosis，

SSc) 方面的价值, 发现SWE与疾病活动性及皮肤胶原沉积密切相关, 比改良的Rodnan皮肤评分更可靠, 有助于评估皮肤硬度和SSc的疾病诊断及进展。Yang等<sup>[19]</sup>的研究发现, 对于SSc的皮肤评估, 基于SWE的评估系统显示出几点优势, 包括临床特征的影响较小, 对区分不同的Rodnan皮肤评分具有更高的灵敏度。当与高频超声的结果相结合时, SWE的诊断效能可以进一步提高。Hong等<sup>[20]</sup>的研究发现高频超声联合声触诊组织成像技术可定量评估SSc患者皮肤受累程度, 其AUC为0.923, 这可为临床诊疗提供有价值的信息。

除了皮肤器官本身, 超声的临床价值进一步延伸到皮肤疾病的共病管理中。对于银屑病关节炎 (psoriatic arthritis, PsA), Chen等<sup>[21]</sup>在OMERACT附着点炎定义的基础上, 基于较大样本量和严格筛查, 发现只有滑膜-附着点炎 (附着点炎或附着点炎合并滑膜炎) 在对照组、无关节炎症状银屑病和有有关节炎症状银屑病3组间存在显著性差异, 中重度银屑病患者中处于亚临床银屑病关节炎阶段的患者达16.1% (62/384), 为此建议重点筛查部位为下肢。Smerilli等<sup>[22]</sup>的研究发现, 当超声检测到存在能量多普勒信号和附着点的骨侵蚀时, 代表着更严重的PsA, 即有关节的侵蚀损伤。另外, Forien等<sup>[23]</sup>进行了一项横断面研究, 结果显示利用超声评估踝关节屈肌支持带可能有助于鉴别类风湿关节炎与PsA, 即与类风湿关节炎相比, 超声下踝关节屈肌支持带的异常在PsA中更常见, 特异度为97%。Elliott等<sup>[24]</sup>首次应用超声评估了PsA附着点炎接受两组生物制剂 (司库奇尤单抗 vs 肿瘤坏死因子抑制剂) 治疗后的效果, 发现两类药物的附着点评分均有整体改善, 并证明肿瘤坏死因子抑制剂能更加有效地降低附着点的活性。

由此可见, 高频超声在皮肤炎症性疾病领域的应用已经从初级的临床观察, 逐步扩展到疾病分层评估、治疗决策, 以及随访管理和共病管理等多个层面。特别是在银屑病、硬皮病等慢性皮肤疾病的长期管理中, 目前已有多个团队启动了包含超声维度的前瞻性研究, 未来有望产出更多

成果。

### 3 人工智能在皮肤超声中的应用

2023年, 人工智能成为皮肤超声领域中的研究热点。然而, 相比于乳腺、甲状腺、肝脏等脏器的研究领域, 皮肤超声领域的人工智能研究目前尚处于初级探索阶段。Long等<sup>[25]</sup>提出了一种创新的超声深度学习模型 (deep learning model, DLM) 系统, 发现其对浅表软组织肿块具有较高的诊断效能, 对于良性和恶性肿瘤的区分, 该模型的AUC达到了0.992。Zhu等<sup>[26]</sup>提出了一种基于多模态超声的深度学习模型, 该模型可用于颈部淋巴结转移肿瘤的分类。其研究发现, 结合常规超声和临床指标可以提高鉴别诊断的效能, 总体AUC为0.822。另外, Lee等<sup>[27]</sup>设计了一种组合卷积神经网络模型, 能够诊断3种良性皮肤肿瘤 (表皮样囊肿、脂肪瘤、毛母质瘤), 其平均准确度、平均灵敏度和平均特异度分别达到了95.87%、90.10%和96.23%, 这一判断水平与医师相当。

人工智能技术的持续进步, 使得皮肤超声解决问题的能力逐步加强。随着大模型时代的到来, 生成式人工智能对多模态、小样本、多分类数据分析的能力进一步提升, 十分契合皮肤疾病的特点, 必将成为未来皮肤超声重要的解决方案。

### 4 皮肤超声成像新技术

2023年, 新型的超声成像方法也日益发展以适应皮肤科临床工作需要。光声皮肤镜 (photoacoustic dermatoscopy, PAD) 是一种新兴的无创成像技术, 通过获取皮肤组织的光吸收信息来辅助皮肤病的诊断。Gao等<sup>[28]</sup>开发了一种用于PAD的四维光谱空间成像的计算方法, 以实现皮肤结构和功能成像的定量分析和优化。该方法考虑了异质皮肤组织的光学和声学特性, 可用于校正激发光的光场、可探测的超声场, 为多层皮肤组织提供精确的PAD单光谱分析或多光谱成像解决方案。同时, 该方法借助多变量参数数据集, 能够进一步开发和优化临床PAD应用, 并提高对人体皮肤光声数据进行临床预测的准确性。

以往高频超声对皮肤低速血流的多普勒灵敏度不足,显示微血管的能力受限。尽管奇异值分解滤波技术在一定程度上可解决这一问题,但在不同层次皮肤成像中,血液流速、血管直径和深度的变化仍受到杂波的干扰,从而无法准确地评估疾病的进展情况。面对这一挑战,Bhatti等<sup>[29]</sup>设计了一种基于区域奇异值分解滤波技术的高频超快超声扫描新方法。他们成功地克服了以往技术的局限性,在手背部选取了3个部位实现了皮肤血管网络的高清可视化,显著提高了图像质量。这一技术突破预示着未来可能为皮肤疾病的诊断和预后预测提供全新的诊断参数,掌握更为翔实的微灌注信息,从而更精准地服务于临床。

另一方面,光声成像与临床超声成像系统的结合为获取组织的结构和功能信息开辟了新途径。Lee等<sup>[30]</sup>提出了一种先进的临床全景容积光声成像和超声成像系统,配备手持成像扫描仪,可进行多次光学/超声扫描以覆盖最大视野。该系统在6个自由度方位进行校正,实现采集到的光学和超声容积数据的融合,进而实现最大振幅的可视化在线投影,同时离线量化频谱未混合数据。通过对人体手臂和颈部血管网络进行三维成像,该系统展现了巨大的潜力。此外,该系统还成功地量化了桡动脉、肱动脉、颈动脉和颈静脉中的血红蛋白氧饱和度水平。展望未来,这一系统有望在临床多个领域发挥重要作用,尤其在外周血管成像和皮肤成像方面将具有广阔的应用前景。通过为疾病诊断提供更合适的临床参数,该技术将不断推动医学诊断的精准化和便捷化。

## 5 基础研究

在基础研究领域,高频超声已超越其传统的成像功能,逐渐展现出其在药物递送、环境感知和物理调控等方面的潜力,成为一种安全且具有转化前景的新兴技术。

在肿瘤治疗方面,Park等<sup>[31]</sup>提出了一种凸声透镜附着超声(convex acoustic lens-attached ultrasound, CALUS),作为一种简单、经济和有效的聚焦超声用于药物递送系统的替代方案。在小鼠黑色素瘤模型中,CALUS显著增强了抗肿瘤药物(多柔比星)的治疗效果。当多柔比星

与CALUS联合应用时,其抑制肿瘤生长的效果比单独使用多柔比星高出约55%,表明两者具有协同抗肿瘤作用。此外,Fan等<sup>[32]</sup>开发了一种仿生聚合物纳米粒子,用于协同化学-声动力治疗。他们还设计了一种独特的红细胞膜伪装的纳米药物,这种仿生纳米药物具有消耗谷胱甘肽和增强活性氧自由基生成的能力,为实现鳞癌的新型化疗+声动力协同治疗策略提供了有力支持。Chang等<sup>[33]</sup>开发了一种靶向PD-L1的纳米治疗药物,以阻断免疫检查点,用于协同光热免疫治疗肿瘤,并辅以有效的光声成像。这种纳米治疗方式有效地抑制了小鼠肿瘤的生长,为肿瘤的生物成像和光免疫治疗提供了一种颇有吸引力的手段。另外,Li等<sup>[34]</sup>对小鼠皮肤鳞状细胞癌(cutaneous squamous cell carcinoma, cSCC)进行了5-氨基乙酰丙酸声动力治疗(5-aminolevulinic acid sonodynamic therapy, ALA-SDT),研究发现ALA-SDT对cSCC细胞有明显的细胞毒性。在体内进行一次ALA-SDT后,肿瘤的生长速度减慢,同时ALA-SDT对小鼠生长无异常影响,对重要器官无损伤,生物安全性高。此研究还探讨了ALA-SDT的各项参数,为今后的临床应用提供了理论依据。

在皮肤抗感染和屏障修复方面,2023年,Xu等<sup>[35]</sup>首次制备了一种具有高膨胀性、可降解性和可调流变性能的黏附型压电抗菌水凝胶。超声波作为外源机械波,可以触发压电效应,从而有效地增加活性氧的产生,具有优越的抗菌效率和防止伤口感染的作用。体外和体内试验结果表明,压电水凝胶可以通过皮肤再生、抑制炎症反应、增加胶原沉积、促进血管生成等方式加速小鼠全层皮肤创面愈合。Han等<sup>[36]</sup>制备了一种新型超声-纳米气泡偶联剂,该超声纳米气泡偶联剂通过放大超声空化效应,穿透双层屏障,有效地实现了深层给药。对于痤疮治疗,为了避免过度使用抗生素并有效地治疗痤疮部位,Xiang等<sup>[37]</sup>研发了一种透明质酸钠微针贴片,它可以介导超声反应实现纳米颗粒的透皮递送,有效地治疗痤疮。骨髓间充质干细胞来源的细胞外囊泡在骨关节炎和神经退行性疾病等多种病理生理学

状态下显示出强大的抗炎功能。Li等<sup>[38]</sup>利用低强度脉冲超声刺激骨髓间充质干细胞可显著地增加细胞外囊泡的分泌并增强其抗炎作用。同样, Yamaguchi等<sup>[39]</sup>的研究证实高强度超声可促进骨骼肌肌管中抗炎细胞外囊泡的释放, 并对巨噬细胞发挥抗炎作用。

最后, 超声激活和皮肤相关的微创微设备由于其出色的可穿戴性、灵活性和舒适性, 在智能药物输送和生物医学诊断领域引起了极大的关注。Zeng等<sup>[40]</sup>概述了超声激活和皮肤相关的微创微设备的重大进展, 特别关注设备设计的关键技术、潜在应用场景及可能遭遇的挑战, 对未来超声激活和皮肤相关的微创微设备的应用前景充满信心。

## 6 总结与展望

在过去的2023年, 皮肤超声相关研究纷纷涌现, 呈现出百花齐放的局面。通过统计不难发现, “人工智能” “模型” “基因” 等新技术相关词汇, 以及“治疗” “检测” “预测” “随访” 等临床管理相关词汇成为年度高频热词, 标志着皮肤超声和人工智能技术的加速融合, 新型成像技术逐渐从幕后走向前台, 且与临床的关联性不断增加, 为皮肤超声未来的研究指明了方向。

**【利益冲突声明】**所有作者均声明不存在利益冲突。

## 【参 考 文 献】

[1] MIAO Y, REN W W, YANG F Y, et al. Diagnostic value of high-frequency ultrasound (HFUS) in evaluation of subcutaneous lesions [J]. *Skin Res Technol*, 2023, 29(9): e13464.

[2] 朱阳春, 陈 文, 崔立刚, 等. 皮肤基底细胞癌、鳞状细胞癌及脂溢性角化病临床和超声特点 [J]. *中国医学影像技术*, 2023, 39(11): 1698-1701.

[3] 王 静, 孟 盈, 王迎春, 等. 超声联合皮肤镜诊断皮肤色素性肿瘤良恶性的价值 [J]. *中国超声医学杂志*, 2023, 39(11): 1261-1264.

[4] WANG L F, NI N, HOU J J, et al. Assessment of the diagnostic performance of clinical examinations and high-frequency ultrasound in patients with pigmented skin tumors [J]. *J Ultrasound Med*, 2024, 43(1): 151-160.

[5] SISKOU S, PASQUALI P, TRAKATELLI M. High frequency ultrasound of basal cell carcinomas: ultrasonographic features and histological subtypes, a retrospective study of 100 tumors [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(12): 3893.

[6] BOZSÁNYI S, BOOSTANI M, FARKAS K, et al. Optically guided high-frequency ultrasound to differentiate high-risk basal cell carcinoma subtypes: a single-centre prospective study [J]. *J Clin Med*, 2023, 12(21): 6910.

[7] LUO P P, CHEN Y X, ZHONG Z R, et al. Correlation of ultrasound features with Bcl-2 protein expression in basal cell carcinomas (BCCs) [J]. *J Clin Ultrasound*, 2023, 51(9): 1615-1621.

[8] GARCÍA-MARTÍNEZ F J, ALFAGEME F, DUAT-RODRÍGUEZ A, et al. Clinical and sonographic classification of neurofibromas in children with neurofibromatosis type 1 – a cluster analysis [J]. *Ultraschall Med*, 2023, 44(2): e118-e125.

[9] REN W W, WU L, WANG Q, et al. The value of ultrasound for differentiating trichilemmal cysts from epidermoid cysts [J]. *J Ultrasound Med*, 2023, 42(9): 1941-1950.

[10] YUAN Y, GAO J M, XIONG G Y, et al. Diagnostic accuracy of multiparametric ultrasound for peripheral nerve schwannoma [J]. *Acta Radiol*, 2023, 64(4): 1608-1614.

[11] YU N Z, HUANG K, LI Y X, et al. The utility of high-frequency 18 MHz ultrasonography for preoperative evaluation of acral melanoma thickness in Chinese patients [J]. *Front Oncol*, 2023, 13: 1185389.

[12] SCOVILLE S D, STANEK J R, RINEHARDT H, et al. Comparison of outcomes between surveillance ultrasound and completion lymph node dissection in children and adolescents with sentinel lymph node-positive cutaneous melanoma [J]. *Ann Surg*, 2024, 279(3): 536-541.

[13] GAO X M, WANG C Y, YONG N I, et al. Clinical effect of acupuncture along fascia, meridians, and nerves combined with ultrasound-guided paravertebral nerve block in the treatment of postherpetic neuralgia: a randomized parallel-controlled study [J]. *Chung I Tsa Chih Ying Wen Pan*, 2023, 43(2): 359-364.

[14] LIU Z R, NIU Z H, ZHANG D D, et al. Improve the dupilumab therapy evaluation with dermoscopy and high-frequency ultrasound in moderate-to-severe atopic dermatitis [J]. *Skin Res Technol*, 2023, 29(1): e13260.

[15] JIAO W J, HUANG Y, LEI Y, et al. Ultrasonography – a novel auxiliary interpretive approach for tuberculin-purified pure protein derivative skin test: a comparative study [J]. *Ther Adv Respir Dis*, 2023, 17: 17534666231213638.

[16] WORTSMAN X. Update on ultrasound diagnostic criteria and new ultrasound severity and activity scorings of hidradenitis suppurativa: modified SOS-HS and US-HSA [J]. *J Ultrasound Med*, 2024, 43(1): 207-213.

[17] 靳诗颖, 史进军, 高 启, 等. 高频超声辅助评估丹毒治疗效果的前瞻性对照研究 [J]. *中华皮肤科杂志*, 2023, 56(5): 434-438.

[18] CAI R Y, LIN Z H, XU D, et al. The value of shear wave

- elastography in diagnosis and assessment of systemic sclerosis [ J ] . *Rheumatol Adv Pract*, 2023, 7(3): rkad075.
- [ 19 ] YANG Y J, TANG X Y, ZHONG L, et al. Shear wave elastography-based skin assessment system for systemic sclerosis: a supplement or alternative to conventional ultrasound? [ J ] . *Quant Imaging Med Surg*, 2023, 13(7): 4405-4414.
- [ 20 ] HONG D R, HUANG C Y, XU Z H. Evaluating skin involvement in systemic sclerosis using high-frequency ultrasound and virtual touch tissue imaging [ J ] . *Ultrasound Med Biol*, 2024, 50(4): 536-539.
- [ 21 ] CHEN Z T, CHEN R F, LI X L, et al. The role of ultrasound in screening subclinical psoriatic arthritis in patients with moderate to severe psoriasis [ J ] . *Eur Radiol*, 2023, 33(6): 3943-3953.
- [ 22 ] SMERILLI G, CIPOLLETTA E, DESTRO CASTANITI G M, et al. Doppler signal and bone erosions at the enthesis are independently associated with ultrasound joint erosive damage in psoriatic arthritis [ J ] . *J Rheumatol*, 2023, 50(1): 70-75.
- [ 23 ] FORIEN M, EBSTEIN E, LÉGER B, et al. Ankle retinacula abnormalities as features of psoriatic arthritis: an ultrasound study [ J ] . *Joint Bone Spine*, 2024, 91(1): 105649.
- [ 24 ] ELLIOTT A, WRIGHT G, PENDLETON A, et al. Effects of TNF- $\alpha$  inhibition versus secukinumab on active ultrasound-confirmed enthesitis in psoriatic arthritis [ J ] . *Ther Adv Musculoskelet Dis*, 2023, 15: 1759720X231179524.
- [ 25 ] LONG B, ZHANG H Y, ZHANG H, et al. Deep learning models of ultrasonography significantly improved the differential diagnosis performance for superficial soft-tissue masses: a retrospective multicenter study [ J ] . *BMC Med*, 2023, 21(1): 405.
- [ 26 ] ZHU Y Y, MENG Z L, WU H, et al. Deep learning radiomics of multimodal ultrasound for classifying metastaticcervicallymph adenopathy into primary cancer sites: a feasibility study [ J ] . *Ultraschall Med*, 2024, 45(3): 305-315.
- [ 27 ] LEE H, LEE Y, JUNG S W, et al. Deep learning-based evaluation of ultrasound images for benign skin tumors [ J ] . *Sensors*, 2023, 23(17): 7374.
- [ 28 ] GAO Y, FENG T, QIU H X, et al. 4D spectral-spatial computational photoacoustic dermoscopy [ J ] . *Photoacoustics*, 2023, 34: 100572.
- [ 29 ] BHATTI A, ISH II T, KANNO N, et al. Region-based SVD processing of high-frequency ultrafast ultrasound to visualize cutaneous vascular networks [ J ] . *Ultrasonics*, 2023, 129: 106907.
- [ 30 ] LEE C, CHO S, LEE D, et al. Panoramic volumetric clinical handheld photoacoustic and ultrasound imaging [ J ] . *Photoacoustics*, 2023, 31: 100512.
- [ 31 ] PARK J H, LEE S, JEON H, et al. A novel convex acoustic lens-attached ultrasound drug delivery system and its testing in a murine melanoma subcutaneous model [ J ] . *Int J Pharm*, 2023, 642: 123118.
- [ 32 ] FAN Y Y, XU P F, FANG Q, et al. Biomimetic nanoparticle with glutathione depletion and amplified ROS generation capabilities for synergistic chemo-sonodynamic therapy in squamous cell carcinomas [ J ] . *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(22): 27183-27194.
- [ 33 ] CHANG R M, LI T, FU Y, et al. A PD-L1 targeting nanotheranostic for effective photoacoustic imaging guided photothermal-immunotherapy of tumor [ J ] . *J Mater Chem B*, 2023, 11(35): 8492-8505.
- [ 34 ] LI C X, YAN J, WANG P R, et al. 5-aminolevulinic acid sonodynamic therapy for cutaneous squamous cell carcinoma [ J ] . *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 2023, 44: 103801.
- [ 35 ] XU M, WU S Z, DING L, et al. Engineering ultrasound-activated piezoelectric hydrogels with antibacterial activity to promote wound healing [ J ] . *J Mater Chem B*, 2023, 11(19): 4318-4329.
- [ 36 ] HAN X Y, WANG F, SHEN J L, et al. Ultrasound nanobubble coupling agent for effective noninvasive deep-layer drug delivery [ J ] . *Adv Mater*, 2024, 36(3): e2306993.
- [ 37 ] XIANG Y M, LU J L, MAO C Y, et al. Ultrasound-triggered interfacial engineering-based microneedle for bacterial infection acne treatment [ J ] . *Sci Adv*, 2023, 9(10): eadf0854.
- [ 38 ] LI X K, ZHONG Y, ZHOU W Q, et al. Low-intensity pulsed ultrasound (LIPUS) enhances the anti-inflammatory effects of bone marrow mesenchymal stem cells (BMSCs)-derived extracellular vesicles [ J ] . *Cell Mol Biol Lett*, 2023, 28(1): 9.
- [ 39 ] YAMAGUCHI A, MAESHIGE N, NOGUCHI H, et al. Pulsed ultrasound promotes secretion of anti-inflammatory extracellular vesicles from skeletal myotubes via elevation of intracellular calcium level [ J ] . *Elife*, 2023, 12: RP89512.
- [ 40 ] ZENG Q, LI G Y, CHEN W. Ultrasound-activatable and skin-associated minimally invasive microdevices for smart drug delivery and diagnosis [ J ] . *Adv Drug Deliv Rev*, 2023, 203: 115133.

( 收稿日期: 2024-05-09 修回日期: 2024-08-21 )