

多模态超声联合AI评估妊娠期糖尿病胎盘功能的价值分析

张妍春¹, 殷伟红²

¹滨州医学院附属烟台山医院超声诊断科, 山东 烟台

²滨州医学院烟台附属医院超声诊断科, 山东 烟台

收稿日期: 2024年9月21日; 录用日期: 2024年10月13日; 发布日期: 2024年10月22日

摘要

妊娠期糖尿病正呈逐渐上升, 并且发病年龄呈年轻化趋势, 给母婴健康带来严重的威胁与挑战。胎盘是孕期联系母体与胎儿的重要器官, 对妊娠的维持和妊娠结局至关重要, 胎盘发育良好, 是胎儿宫内正常发育的前提, 胎盘功能不全是多种不良妊娠的病理基础。因此, 妊娠期胎盘微环境逐渐成为近期研究各种类型母婴并发症机制的热点, 超声检查作为常规产科检查手段, 也是评估胎盘功能的首选检查方法, 而单一超声参数评价胎盘功能有一定局限性, 因此本文就多模态超声技术联合人工智能在妊娠期糖尿病胎盘功能的研究进展进行探讨并予以综述。

关键词

妊娠期糖尿病, 胎盘, 多模态, 人工智能, 超声

Analysis of the Value of Multimodal Ultrasound Combined with AI in Evaluating Placental Function in Gestational Diabetes Mellitus

Yanchun Zhang¹, Weihong Yin²

¹Department of Ultrasound Diagnosis, Yantaishan Hospital Affiliated to Binzhou Medical University, Yantai Shandong

²Department of Ultrasound Diagnosis, Yantai Hospital Affiliated to Binzhou Medical University, Yantai Shandong

Received: Sep. 21st, 2024; accepted: Oct. 13th, 2024; published: Oct. 22nd, 2024

Abstract

Gestational diabetes is gradually increasing, and the age of onset is showing a trend of younger age, which poses a serious threat and challenge to the health of mothers and infants. The placenta is an important organ that connects the mother and the fetus during pregnancy. It is crucial to the maintenance of pregnancy and the outcome of pregnancy. A well-developed placenta is a prerequisite for normal intrauterine development of the fetus. Placental insufficiency is the pathological basis of many adverse pregnancies. Therefore, the placental microenvironment during pregnancy has gradually become a hot spot for recent research on the mechanisms of various types of maternal and infant complications. Ultrasound examination, as a routine obstetric examination method, is also the preferred examination method for evaluating placental function. However, there are certain limitations in evaluating placental function with a single ultrasound parameter. Therefore, this article discusses and reviews the research progress of multimodal ultrasound technology combined with artificial intelligence in the placental function of gestational diabetes.

Keywords

Gestational Diabetes, Placenta, Multimodality, Artificial Intelligence, Ultrasound

Copyright © 2024 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

妊娠期糖尿病(gestational diabetes mellitus, GDM)是指妊娠前糖代谢正常, 妊娠期间首次出现葡萄糖不耐受, 占孕期糖尿病的 80%~90% [1]。GDM 给母婴健康带来严重的威胁与挑战, GDM 孕妇可发生流产、早产、羊水过多、剖宫产等风险; 再次妊娠时有 50%~73% 的风险发生 GDM [2], 产后 5~10 年发展为 2 型糖尿病的风险是正常妇女的 10 倍, 而且其罹患心血管疾病的风险也较正常妇女增加。对于 GDM 产妇分娩的新生儿, 容易患巨大儿、产后低血糖、病理性黄疸等疾病; 成年后更容易发生超重或肥胖, 最终导致 2 型糖尿病的发生[3]-[5]。目前临床对于 GDM 患者的处理主要在于早发现、早诊断、早干预。因此早期发现孕妇妊娠期糖尿病病情, 寻找妊娠期糖尿病孕妇不良妊娠结局风险有效的预测指标, 为及早干预提供思路尤为重要。

目前已有多种超声新技术应用于产前母婴检查并获得认可; 而 AI 技术更是近期的热门话题, 随着 AI 研究的不断发展, 多种系统已逐渐应用于我们的临床工作, 本文就多模态超声联合 AI 技术在妊娠期糖尿病胎盘功能的研究进展进行探讨并予以综述。

2. 胎盘的结构及功能

胎盘虽然在人体内存在的时间较短, 但扮演着重要的角色。胎儿在子宫内通过胎盘从母体获取必要的营养, 以支持其生长发育。此外, 胎盘还可分泌多种激素, 以满足妊娠期间的正常生理需要。据文献报告超声最早可在孕 6 周(经阴道超声)或孕 10 周(经腹部超声)显示出胎盘, 其表现为妊娠囊周围的薄层环状高回声。孕 12~13 周时, 多普勒超声可显示绒毛血流。孕 14~15 周时, 胎盘已充分发育, 表现为低回声。在这个阶段, 我们可以观察到由蜕膜、妊娠肌壁和子宫血管组成的胎盘后复合体, 到中晚孕时,

胎盘逐渐增大成熟, 表现为中高回声, 内部回声欠均匀, 其内还可见数量大小不等的强回声(为钙化灶), 部分胎盘内可见边界欠清的低回声区, 内可见缓慢流动的血流信号, 称血池(胎盘湖)。

正常胎盘是由从密绒毛膜与底蜕膜一起形成的圆盘形结构, 呈中央厚边缘薄, 直径约为 15~20 cm, 厚度为 2~4 cm。胎盘可分为三部分, 分别为: 胎盘绒毛膜板(胎儿侧)、胎盘实质、基底板(母体侧)。胎盘随着妊娠的进展而逐渐增大, 胎盘发育的情况与胎儿成熟度相关联。从早孕的 0 级到中晚孕的 I 级和 II 级, 如果胎儿在足月时仍未出生, 导致过期妊娠或因妊娠期并发症等疾病原因, 胎盘可能发生老化而发展为 III 级胎盘, 此时胎盘内钙化就比较明显, 出现特征性的环形钙化。

胎盘的功能复杂, 胎盘可调节、分配、转运及合成胎儿发育和维持妊娠所需的重要营养物质并通过胎盘屏障阻止胎儿的有毒物质暴露。胎盘的正常功能对于维持正常的围产结局至关重要, 所以评价胎盘功能的研究一直很多, 而超声检查具有无创、实时、安全等优势, 是胎盘的主要检查方法。

3. 妊娠期糖尿病对胎盘的影响

妊娠期间并发症可引起胎盘改变, 一些研究表明妊娠期高血糖可引起胎盘组织病理结构改变, 包括合体细胞结增多、纤维素样坏死及血管病变等, 近期的研究发现, GDM 的孕妇在怀孕前已经存在 β 细胞功能障碍或胰岛素抵抗。在怀孕期间, 由于雌激素、孕激素等拮抗胰岛素的激素分泌增多, 呈现高血糖状态, 导致胎盘血管及绒毛膜系统受损, 最终引起胎盘功能异常[6]。Vishram Singh 等[7]对 62 例无 GDM 史的孕妇及 31 例 GDM 孕妇的胎盘组织样本进行分析, 结果显示, 妊娠期糖尿病孕妇胎盘平均重量、胎盘面积、胎盘体积及子叶数均高于对照组。与对照组相比, 妊娠期糖尿病孕妇的平均胎儿体重更大。妊娠期糖尿病孕妇的胎盘平均横径大于对照组的胎盘平均横径, 具有统计学意义。其病理检查发现胎盘肿大、绒毛基质水肿、毛细血管增生、新生血管增多等多种胎盘病理改变。基础研究进一步发现[8], 糖尿病孕鼠模型的胎盘增厚、增大, GDM 患者胎盘中细胞增殖指标(Ki-67 等)表达水平显著升高, 细胞周期调节标志物(cyclin D3, p57 等)表达异常改变, 凋亡相关基因(bcl-2 等)的表达水平降低, 这可能是 GDM 胎盘增厚的潜在机制。综上所述, 高血糖可能是诱导胎盘重量、直径、厚度等有所增加的独立危险因素, 而胎盘这一系列的改变进一步损害母胎血氧及营养交换的效率, 对母体及胎儿产生不良影响。

4. 常规超声检查评估妊娠期糖尿病胎盘功能

4.1. 二维 B 型超声

目前二维 B 型超声观察胎盘主要包括回声、厚薄、位置、成熟度、下缘与宫颈内口关系、胎盘后结构、脐带插入点与胎盘位置关系等[9]。二维上, 胎盘实质呈月牙状稍强回声, 均匀细密, 胎盘后方可见由蜕膜、子宫肌层、子宫血管组成的胎盘后复合体。二维超声通过对胎盘成熟度的分级来评估胎盘功能, 胎盘成熟度的分级主要根据胎盘绒毛膜板、胎盘实质、胎盘基底膜在不同孕期的声像图表现, 将胎盘分为 4 级。然而传统 B 型超声能提供的胎盘信息有限, 仅用于胎盘功能的初步评估; 各胎盘分级之间的发展变化并不显著, 且无重要意义, 但若发现胎盘成熟度与胎龄差异较大时, 需结合其他指标做进一步的相关检查。B 超显示胎盘发育超过妊娠月份不一定代表胎盘老化, 通常我们 B 超提示的 III 级胎盘为胎盘成熟度分级的声像图表现, 胎盘和孩子一样, 有一个发生、成长、发育、成熟这样的过程, 并不意味着胎盘功能的下降[10]。胎盘成熟度可作为胎儿成熟度的预测方法, 但影像学检查存在一定的误差, 临床上通常不作为判定胎盘功能的手段, 已有多项国内外研究表明胎盘分级高低与围产儿不良结局并没有绝对关系。

4.2. 彩色多普勒血流成像(Color Dopplerflow Imaging, CDFI)

CDFI 是以二维图像为基础进行彩色编码, 反映组织的血流方向、速度和血流状态等; 母体血液以喷

射形式通过母体-胎盘界面进入胎盘, 螺旋动脉的管腔大小和“射流”长度随孕周增加, 但峰值速度减小。其常用参数包括: 搏动指数(pulsatility index, PI)、阻力指数(resistance index, RI)及收缩期最大血流速度/舒张末期血流速度(peak systolic velocity/end diastolic velocity, S/D)。国际妇产科超声学会(International Society of Ultrasound in Obstetrics & Gynecology, ISUOG)产科超声实践指南推荐将 PI、RI 和 S/D 作为动脉血流的 3 个标志性波形[11]。目前主要通过对脐动脉、子宫动脉、胎儿大脑中动脉及母胎循环多普勒检查来评估胎盘功能, 来指导孕期临床对妊娠期并发症的管理。正常情况下, 脐动脉舒张期血流在孕 12~14 周才出现, 且随孕周增加而增高, 脐动脉 S/D 随孕周增加而下降, 这种变化主要由胎盘的绒毛间质纤维化所致[12]。胎盘功能异常时, 胎盘实质内的小动脉发生一系列病理改变可导致脐动脉 RI 值增大, 这种改变常提示胎儿宫内缺氧。子宫动脉是子宫主要营养血管, 其血流参数可直接反映母体血流动力学改变。妊娠早期, 子宫螺旋动脉由高阻变为低阻, 以保证子宫的血流灌注充足。子宫动脉 RI 及 PI 均随孕周增加而逐渐减低, 直至孕晚期子宫动脉阻力趋于消失[13]。故而通过彩色多普勒超声检测子宫动脉可反映胎盘灌注情况。

妊娠期糖尿病可影响孕妇滋养细胞浸润及子宫动脉重铸, 从而影响胎盘-胎儿循环, 引起子宫动脉 RI 升高, 且子宫动脉血流参数与病情严重程度密切相关, 其中 PI 更具有代表性[14]。子宫动脉血流参数有助于及时发现胎盘血流灌注异常, 研究表明, 通过彩色多普勒超声检测孕妇子宫动脉、胎儿血流动力学参数可有效预测妊娠期糖尿病的发生与发展, 结合其他血流动力学参数指标进行综合分析, 还可对胎儿的宫内状态进行评估, 对于早期采取干预措施, 改善妊娠结局提供重要的帮助[15]-[17]。

Vangrieken 等人[18]为了解彩色多普勒超声对母体的动脉血流动力学参数的价值, 选取了 GDM 孕妇进行深入研究, 发现妊娠期糖尿病组 S/D 值、RI 值、PI 值、动脉血流评分及发生率舒张早期切迹显著高于正常对照组, 动脉最大收缩压和舒张压最低速度均低于正常对照组。其研究结果表明血流动力学参数与血流评分有关, 彩色多普勒超声的使用可以在一定程度上检测孕妇的动脉血流指标。

4.3. 三维能量多普勒超声(Three-Dimensional Power Doppler, 3DPD)

3DPD 与 CDFI 不同, 其成像依赖红细胞散射能量, 不受入射角度、血流方向及流速的限制, 对低速、低流量血流有较高的敏感度, 可直观显示胎盘床血管形态及其空间位置关系, 可以直接评价血液灌注器官的感兴趣区域, 为胎盘功能及形态评估提供依据。

3DPD 常用的指标包括: 血管生成指数(vascularization index, VI)、血流指数(flow index, FI)及血管化血流指数(vascularization flow index, VFI)。VI、FI、VFI 均为评估胎盘灌注的三维能量参数, 其中 VI 反映血管稀疏程度, FI 表示血流信号强度, VFI 则反映血管及血流信号总和, 三者共同显示胎盘血管三维分布。通过对胎盘进行三维能量多普勒超声检查可以定量地得到胎盘的 VI、FI、VFI 值, 它们在妊娠期间随着孕周的增加而逐渐增高[19]。正常妊娠胎盘内血管呈立体树枝状, 且晚期妊娠组较中期妊娠组明显增多、增粗。胎盘的三维彩色能量多普勒血管超声成像参数与胎儿生长参数呈正相关关系。

研究发现, 当孕妇并发妊娠期糖尿病时, 其 VI、FI 和 VFI 值较正常胎儿的 VI、FI、VFI 值降低, 反映胎盘血管化水平降低[20], 由于该技术对运动极为敏感, 母体呼吸、胎儿运动和子宫收缩等因素都会影响多普勒信号, 其在胎盘功能单位定性和定量评估中的价值有待进一步探讨。通过对胎盘 VI、FI、VFI 的测量可以对胎儿胎盘状态有准确且量化的评估, 在临床应用上具有重要的应用价值。

3DPD 促进了胎盘内血流的可视化, 使得胎盘血管化程度的量化成为可能, 是一项观察妊娠胎盘血管树发育的非常实用的方法。能量多普勒超声可作为二维灰度多普勒超声的辅助手段, 提供血流分布、速度和方向等信息, 有利于胎盘异常的产前诊断, 为降低围生期胎儿发病率及死亡率提供了具有临床价值的重要辅助检查指标。

4.4. 超微血流成像(Superb Microvascular Imaging, SMI)

SMI 是一种创新的超声技术, 由于常用的超声血流检查技术对于低速血流检查效果欠佳[21], SMI 通过使用高帧率高分辨率多普勒技术更能清晰地显示组织微血管内的低速血流, 提高胎盘血管分支细节图像的分辨率, 从而对组织器官微血流灌注情况进行高效评估, 对胎盘终末绒毛血流的研究更有优势。Furuya 等[22]在观察妊娠 32 周胎盘中的小血管时, 将传统彩色多普勒和 SMI 进行比较时发现, 即使母体存在呼吸运动, SMI 也比彩色多普勒更清楚地显示出胎盘中的小血管。SMI 和 Smart 3D 的结合具有提供高分辨率, 脉管系统 3D 映射的优势。SMI 被认为是一种比彩色多普勒灵敏度更高的方法, Çelik 等[23]利用 SMI 测量方法评估妊娠期糖尿病患者的胎盘微循环, 为了消除背景上的散射伪影, 通过在像素的色调、饱和度和亮度参数中设置一定的阈值来测量血管比率, 研究发现, 妊娠糖尿病患者的胎盘体积、血液供应和血管生成会因胰岛素水平高和其他病理生理因素而增加。Çelik 等将妊娠糖尿病患者的胎盘血管分布比正常妊娠患者高这一现象归因于这些病理生理变化。

4.5. 剪切波弹性成像(Shear Wave Elastography, SWE)

SWE 是一种新型超声成像诊断技术, 其基于机械振动传播原理, 通过时间飞跃算法获得组织的剪切波速度, 生成定量弹性图, 从而能够对组织弹性进行测定并计算组织弹性模量, 模量越高说明剪切波速度越快[24]。胎盘超声弹性成像是一个相对较新的研究领域, 检测胎盘硬度时, 取样点应避开脐带插入块、血窦及钙化等, 测得杨氏模量值可作为评价胎盘功能的间接指标。有研究报道[25], 剪切波弹性成像一方面可以开展实时定量测量分析, 监测胎盘弹性值, 避免了操作者主观判断; 另一方面其具备更好的可重复性, 通过该方法获得杨氏模量值的高低反映了组织硬度情况, 可成为评估胎盘功能的客观指标。

研究发现当孕妇合并妊娠期糖尿病、妊娠期高血压或者胎儿宫内生长受限时胎盘内部的小动脉可出现梗塞、缺血性变化、炎性改变及纤维化等病理改变。这些病理改变在其他器官(肝脏、甲状腺等)已被证明可增加实质脏器的弹性值。Bayraktar 等[26]在一家三级中心医院进行了一项前瞻性队列研究, 纳入的孕妇在妊娠 24~28 周期间接受了 75 克口服葡萄糖耐量测试, 其研究表明, GDM 组外周胎盘、中央胎盘和肺的 SWE 速度较高, GDM 组的胎儿胎盘和肺部僵硬程度增加。

Imtiaz 等[27]研究发现 GDM 组及 GDM 不良妊娠结局组胎盘弹性值较正常对照组增高, 因此认为 GDM 对胎盘功能造成的损伤在一定程度上可通过胎盘弹性值的改变来体现。Ali Taner Anuk 等[28]研究发现 GDM 的孕妇胎盘中央和周边部分的平均弹性值显著高于对照组, 同时观察到代谢失调的糖尿病患者的 HbA1c、空腹血糖值和弹性值增加之间存在很强的正相关性, 这可能具有临床价值。因此, 超声弹性成像检查已经显示出在评估 GDM 相关胎盘功能改变方面的潜力, 为临床医生提供了一个有价值的参考, 以便于更好地理解和管理 GDM 对母婴健康的影响。

4.6. 人工智能(Artificial Intelligence, AI)

AI 是通过计算机程序来呈现人类智能的一门新的科学技术, 近年来 AI 在医学领域取得了飞快发展, 尤其是在甲状腺、乳腺及肝脏等疾病的诊断方面, 其在妇产超声领域的发展还处在起步阶段[29]。开发用于报告病理生理状态的无创且有效的方法在现代医学中仍然是一个难以实现的目标[30]。随着越来越多人工智能的使用, AI 也被应用于研究胎盘及其相关病理[31]。由于在 GDM 中, 孕早期胎盘微循环已经发生了病理改变, 因此推测这些变化可能通过其图像的变化反映出来[32]。这些变化在常规的超声检查中不会被检测到, 但在使用机器学习和人工智能技术的图像处理中可能会很明显。深度学习允许由多个处理层组成的计算模型学习具有多个抽象级别的数据表示。

已有多项研究报道了深度学习算法在胎盘组织病理学中的应用, 特别是用于表征绒毛形态和检测血

管病理。Stefano [33]等根据相关指南、系统评价和荟萃分析筛选出 15 篇文章共 158 名妊娠期糖尿病患者, 检查正常胎盘和并发先兆子痫或妊娠前糖尿病的妊娠胎盘绒毛血管体积的差异。结果显示在妊娠前糖尿病患者中, 绒毛血管树发生了显著的量变, 而传统光学显微镜无法检测到, 这表明毛细血管树的形态分析可能对这种疾病具有诊断意义。

未来 AI 在产科超声中的应用可能会增加, 最新的许多超声系统都集成了智能应用程序, 目前人工智能在产科超声新技术的应用能有效地提高超声诊断效率, 通过机器学习或深度学习方法, 从人类推理规则中获得的描述性模式来训练模型机器学习, 减少观察者间的变异性并缩短产科超声医师的培训时间, 提高围产期并发症的诊断, 改善母婴结局[34]。

5. 多模态超声评估妊娠期糖尿病胎盘

获得胎盘的功能信息对妊娠期糖尿病的诊断和治疗有重要辅助价值, 而单一超声参数评价胎盘功能有一定局限性, 联合应用多模态超声技术评估胎盘的灌注及营养运输成为研究的关键, 为指导临床早期干预提供依据。

三峡大学附属医院[35] 2023 年一项研究显示, 常规超声检查、3DPD、SWE 三者单一评估 GDM 患者的胎盘功能均有一定的参考价值, 若同时应用多种方法得到的曲线下面积最大, 灵敏度最高, 因此应用多模态超声能提高评估 GDM 胎盘功能的诊断效能。同时研究发现联合应用胎盘 SWV 值、UAR、UA PI、UA S/D、Ut-A RI、Ut-A PI、Ut-A S/D 进行对 GDM 患者不良妊娠结局的预测, 比单独应用各超声参数具有更高的预测效能, 可提高诊断的准确性, 为临床医生提供了更实时、客观性的参考依据, 对判断妊娠结局及改善母婴预后具有一定的实际应用意义。

复旦大学附属妇产科医院 2022 年一项研究中提出了一种新的多模型融合网络[36], 结合超声灰阶图像(GSI)和微血流图像(MFI)来评估和分类 GDM 中的胎盘特征, 以证明高血糖代谢紊乱是否与胎儿-胎盘功能独立相关, 利用深度学习技术提取图像微结构的能力并综合现有的研究结果得出高血糖是胎盘组织学异常的重要因素之一; 同时推断, 高血糖引起的胎盘结构变化可能具有累积效应, 为 GDM 研究开辟新的途径, 成为临床诊断和治疗的有用工具。

目前关于多模态超声联合 AI 技术评估胎盘功能的研究尚少, 且诊断的准确度和特异度存在较大差异, 因此有待进行更全面、更深入的研究, 以明确多模态超声联合 AI 技术的诊断价值[37]。

6. 总结

GDM 的发生是个复杂的过程, 它与妊娠期及产后远期的并发症密切相关[38], 获得胎盘的功能信息对妊娠期糖尿病的早期诊断有重要的辅助价值; 探索其相关因子的变化及机制对于制定合理的干预和预防策略、对女性健康发展是至关重要[39]。

超声具有无创、无辐射、简单便捷等优势, 可作为胎儿生长发育情况及评估胎盘功能的常用检查方法; 并且可于妊娠期不同阶段纵向评估胎盘功能。AI 技术的飞速发展在医学领域带来了巨大的改变。由于影响胎盘功能的因素较多, 故以单一检查或指标无法全面评价胎盘功能相关信息[40]。因此, 多模态超声联合 AI 技术综合评估胎盘功能成为研究的关键, 纳入更多评价指标进行更全面的研究将成为未来研究的关注热点。

参考文献

- [1] 胡路遥, 汤益波, 梁朝霞. 妊娠期糖尿病免疫相关发病机制的研究进展[J]. 中华预防医学杂志, 2024, 58(3): 394-399.
- [2] 隽娟, 高迪, 杨慧霞. 妊娠期糖尿病对母亲及其子代近远期健康的影响[J]. 中国医学前沿杂志(电子版), 2024,

- 16(4): 1-7.
- [3] 韩炜, 唐成和. 母亲妊娠期糖尿病对胎儿结局影响的研究进展[J]. 中华实用儿科临床杂志, 2022, 37(14): 1117-1120.
- [4] 张伟, 徐先明. 妊娠期糖尿病对母儿的远期影响[J]. 中华围产医学杂志, 2009, 12(1): 55-57.
- [5] Chakravarti, S.P., Gao, X., Xiang, A. and Page, K.A. (2024) 1962-LB: Intrauterine Exposure to Gestational Diabetes and the Developing Brain. *Diabetes*, **73**, 1962-LB. <https://doi.org/10.2337/db24-1962-lb>
- [6] 张阳, 刘晓夏, 邹丽. 胎盘增厚的研究进展[J]. 中华妇产科杂志, 2023, 58(2): 148-152.
- [7] Yanik, T., Katirci, E., Simsek, M., Korgun, E.T. and Kipmen-Korgun, D. (2024) Effects of Hyperglycemia on Angiogenesis in Human Placental Endothelial Cells. *Zeitschrift für Geburtshilfe und Neonatologie*, **228**, 346-354. <https://doi.org/10.1055/a-2282-9007>
- [8] Singh, V., Ranjan, K., Tewarson, S.L., Singh, R. and Yadav, Y. (2020) Study of Placental Morphometric Anatomy in Mothers with Gestational Diabetes Mellitus and Influence of Gestational Diabetes Mellitus on the Fetal Weight. *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences*, **11**, 7549-7558. <https://doi.org/10.26452/ijrps.v11i4.3961>
- [9] Meng, R., Gao, Q., Liang, R., Guan, L., Liu, S., Zhu, Q., et al. (2022) Changes in Gene Expression in Rat Placenta at Gestational Day 16.5 in Response to Hyperglycemia. *General and Comparative Endocrinology*, **320**, Article 113999. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2022.113999>
- [10] 曾婵娟, 赵延华, 费奎琳, 等. 胎盘和母胎循环多普勒在产科的应用进展[J]. 中华围产医学杂志, 2023, 26(5): 434-438.
- [11] 陈嘉媛, 程海东, 张庆英, 等. 胎盘免疫细胞与妊娠期糖尿病[J]. 中华围产医学杂志, 2020, 23(7): 496-501.
- [12] Tewari, V., Tewari, A. and Bhardwaj, N. (2011) Histological and Histochemical Changes in Placenta of Diabetic Pregnant Females and Its Comparison with Normal Placenta. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*, **1**, 1-4. [https://doi.org/10.1016/s2222-1808\(11\)60001-7](https://doi.org/10.1016/s2222-1808(11)60001-7)
- [13] Qaiser, H., John, A., Ali, A., et al. (2024) Evaluation of Pregnancies with Pre-Existing Hypertension and Diabetes. *Journal of Nutritional & Food Sciences*, **3**, 10-13.
- [14] Bhattacharjee, D., Mondal, S.K., Garain, P., Mandal, P., Ray, R.N. and Dey, G. (2017) Histopathological Study with Immunohistochemical Expression of Vascular Endothelial Growth Factor in Placentas of Hyperglycemic and Diabetic Women. *Journal of Laboratory Physicians*, **9**, 227-233. https://doi.org/10.4103/jlp.jlp_148_16
- [15] Lafta, I., Abdulhameed, W. and AL-Bakri, N. (2021) Histochemical Study of Human Placental Tissues in Gestational Diabetic Mellitus. *Iraqi Journal of Embryos and Infertility Research*, **10**, 29-38. <https://doi.org/10.28969/ijeir.v10.i2.r3>
- [16] 刘生贵. 彩色多普勒检测子宫动脉在妊娠期糖尿病孕妇中的临床价值分析[J]. 影像研究与医学应用, 2017, 1(6): 148-149.
- [17] 安黎明, 蔡冬燕, 史秀丽, 宫俊英. 妊娠期糖尿病孕妇脐血流 S/D 比值和超声参数 Z-评分对宫内生长受限胎儿的预测价值[J]. 川北医学院学报, 2020, 35(4): 633-636.
- [18] Perkovic-Kepeci, S., Cirkovic, A., Milic, N., Dugalic, S., Stanisavljevic, D., Milincic, M., et al. (2023) Doppler Indices of the Uterine, Umbilical and Fetal Middle Cerebral Artery in Diabetic versus Non-Diabetic Pregnancy: Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicina*, **59**, Article 1502.
- [19] 孙鹏宇. 三维能量多普勒超声评价胎盘功能的临床应用[J]. 家庭医药, 2017(2): 34-35.
- [20] 李燕, 齐明. 三维超声评估妊娠期糖尿病患者孕晚期胎盘血流参数的价值[J]. 医学临床研究, 2024, 41(3): 403-405+409.
- [21] 牛梓涵, 张培培, 武玺宁, 等. 超声微血管成像评价胎盘灌注与胎儿生长发育关系的初步研究[J]. 中华超声影像学杂志, 2021, 30(8): 691-696.
- [22] Furuya, N., Hasegawa, J., Homma, C., Kawahara, T., Iwahata, Y., Iwahata, H., et al. (2020) Novel Ultrasound Assessment of Placental Pathological Function Using Superb Microvascular Imaging. *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*, **35**, 3036-3039. <https://doi.org/10.1080/14767058.2020.1795120>
- [23] Çelik, A.O., Günay, B., Çoker, G.B., Ustaşoğlu, F.E., Ateş, S. and Tunçbilek, N. (2023) Evaluation of Placenta in Patients with Gestational Diabetes Using Shear Wave Elastography and Superb Microvascular Imaging. *Acta Radiologica*, **65**, 318-323. <https://doi.org/10.1177/02841851231217201>
- [24] 闫紫薇, 赵云, 平杰, 张玲, 张秉宜, 邢博缘. 剪切波弹性成像评估晚孕期妊娠高血压胎盘功能的临床研究[J]. 中国超声医学杂志, 2021, 37(6): 678-681.
- [25] 刘耘利, 伍丹, 郭志伟, 杨伟清, 成方霞, 谢梅兰, 刘彦红. 实时剪切波弹性成像检测妊娠期糖尿病胎盘弹性的临床价值研究[J]. 中国医学装备, 2021, 18(7): 103-107.

- [26] Bayraktar, B., Golbasi, H., Omeroglu, I., Golbasi, C., Tunver Can, S., Ince, O., *et al.* (2024) Evaluation of Placenta and Fetal Lung Using Shear Wave Elastography in Gestational Diabetes Mellitus: An Innovative Approach. *Ultraschall in der Medizin—European Journal of Ultrasound*. <https://doi.org/10.1055/a-2323-0941>
- [27] Imtiaz, S., Naz, N., Walid, A., Rahim, A. and Waseem, H.F. (2023) Role of Shear Wave Elastography in Assessment of Placental Elasticity in Normal and High-Risk Pregnancies in Third Trimester. *Journal of the Pakistan Medical Association*, **73**, 2205-2208. <https://doi.org/10.47391/jpma.9314>
- [28] Anuk, A.T., Tanacan, A., Erol, S.A., Alkan, M., Altinboga, O., Oguz, Y., *et al.* (2021) Evaluation of the Relationship between Placental Stiffness Measured by Shear Wave Elastography and Perinatal Outcomes in Women with Gestational Diabetes Mellitus. *Acta Radiologica*, **63**, 1721-1728. <https://doi.org/10.1177/02841851211054255>
- [29] 张芸, 丁霞, 李刚, 龚俊丹, 丁文萍, 徐成. 人工智能技术评估早孕期胎盘体积应用价值分析[J]. 中国初级卫生保健, 2024, 38(3): 56-59.
- [30] Andreasen, L.A., Feragen, A., Christensen, A.N., Thybo, J.K., Svendsen, M.B.S., Zepf, K., *et al.* (2023) Multi-Centre Deep Learning for Placenta Segmentation in Obstetric Ultrasound with Multi-Observer and Cross-Country Generalization. *Scientific Reports*, **13**, Article No. 2221. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29105-x>
- [31] Zhou, H., Chen, W., Chen, C., Zeng, Y., Chen, J., Lin, J., *et al.* (2024) Predictive Value of Ultrasonic Artificial Intelligence in Placental Characteristics of Early Pregnancy for Gestational Diabetes Mellitus. *Frontiers in Endocrinology*, **15**, Article 1344666. <https://doi.org/10.3389/fendo.2024.1344666>
- [32] Davidson, L. and Boland, M.R. (2021) Towards Deep Phenotyping Pregnancy: A Systematic Review on Artificial Intelligence and Machine Learning Methods to Improve Pregnancy Outcomes. *Briefings in Bioinformatics*, **22**, bbaa369. <https://doi.org/10.1093/bib/bbaa369>
- [33] Marletta, S., Pantanowitz, L., Santonicco, N., Caputo, A., Bragantini, E., Brunelli, M., *et al.* (2022) Application of Digital Imaging and Artificial Intelligence to Pathology of the Placenta. *Pediatric and Developmental Pathology*, **26**, 5-12. <https://doi.org/10.1177/10935266221137953>
- [34] Gupta, K., Balyan, K., Lamba, B., Puri, M., Sengupta, D. and Kumar, M. (2021) Ultrasound Placental Image Texture Analysis Using Artificial Intelligence to Predict Hypertension in Pregnancy. *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*, **35**, 5587-5594. <https://doi.org/10.1080/14767058.2021.1887847>
- [35] 李欢, 胡兵, 卢佳, 丁凌, 杨莹. 多参数超声评估中孕期妊娠期糖尿病患者胎盘功能的临床价值[J]. 中国超声医学杂志, 2023, 39(1): 56-59.
- [36] Sun, H., Jiao, J., Ren, Y., Guo, Y. and Wang, Y. (2022) Model Application to Quantitatively Evaluate Placental Features from Ultrasound Images with Gestational Diabetes. *Journal of Clinical Ultrasound*, **50**, 976-983. <https://doi.org/10.1002/jcu.23233>
- [37] Diniz, P.H.B., Yin, Y. and Collins, S. (2024) Deep Learning Strategies for Ultrasound in Pregnancy. *European Medical Journal Reproductive Health*, **6**, 73-80.
- [38] 周毛吉. ARFI 联合彩色多普勒超声对妊娠期糖尿病患者胎盘功能评价及妊娠结局预测的应用价值[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海大学, 2023.
- [39] Dasgupta, S., Banerjee, U., Mukhopadhyay, P., Maity, P., Saha, S. and Das, B. (2022) Clinicopathological Study and Immunohistochemical Analysis of Expression of Annexin A5 and Apelin in Human Placentae of Gestational Diabetes Mellitus. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, **16**, Article 102435. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2022.102435>
- [40] 孙红双, 任芸芸. 基于超声成像技术评价胎盘功能的研究新进展[J]. 中国医学影像学杂志, 2022, 30(4): 406-411.