

人工智能在维持性血液透析糖尿病患者血糖管理中的应用研究进展

李佳真^{ID}, 牟 娇*

重庆医科大学附属大学城医院肾脏内科, 重庆

收稿日期: 2026年4月19日; 录用日期: 2026年5月12日; 发布日期: 2026年5月20日

摘 要

人工智能(artificial intelligence, AI)技术的发展为糖尿病管理提供了新的手段。维持性血液透析(maintenance hemodialysis, MHD)糖尿病患者由于血糖波动大、胰岛素代谢异常及多因素干扰,其血糖管理复杂,传统经验性调整模式存在局限。本文综述人工智能在该人群血糖管理中的应用进展,重点分析其在血糖预测、胰岛素剂量优化及风险评估等方面的研究现状。现有研究表明,基于机器学习、深度学习及强化学习的模型能够整合多维临床数据,提高血糖预测准确性并优化治疗策略。同时,人工智能在临床应用中仍面临数据质量、模型可解释性及临床整合等问题。未来需通过多中心研究及前瞻性验证进一步提升其可靠性与可推广性。人工智能有望成为透析患者血糖管理的重要辅助工具。

关键词

人工智能, 维持性血液透析, 糖尿病, 血糖管理, 强化学习, 胰岛素剂量, 连续葡萄糖监测

Research Progress on the Application of Artificial Intelligence in Glycemic Management of Diabetic Patients Undergoing Maintenance Hemodialysis

Jiazhen Li^{ID}, Jiao Mu*

Department of Nephrology, University-Town Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: April 19, 2026; accepted: May 12, 2026; published: May 20, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李佳真, 牟娇. 人工智能在维持性血液透析糖尿病患者血糖管理中的应用研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(5): 1622-1632. DOI: 10.12677/acm.2026.1651965

Abstract

The rapid development of artificial intelligence (AI) has introduced novel approaches for diabetes management. Glycemic control in diabetic patients undergoing maintenance hemodialysis (MHD) remains particularly challenging due to pronounced glucose fluctuations, altered insulin metabolism, and multiple dialysis-related interfering factors, rendering traditional experience-based adjustment strategies insufficient. This review summarizes recent advances in the application of AI for glycemic management in this population, with particular emphasis on its roles in glucose prediction, insulin dose optimization, and risk assessment. Current evidence suggests that machine learning-, deep learning-, and reinforcement learning-based models can integrate multidimensional clinical data to improve the accuracy of glucose prediction and optimize therapeutic strategies. Nevertheless, challenges remain regarding data quality, model interpretability, and integration into clinical workflows. Future multicenter studies and prospective validations are warranted to further enhance the reliability and generalizability of these technologies. AI is expected to become an important adjunctive tool in glycemic management for patients undergoing hemodialysis.

Keywords

Artificial Intelligence, Maintenance Hemodialysis, Diabetes Mellitus, Glycemic Management, Reinforcement Learning, Insulin Dosing, Continuous Glucose Monitoring

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

1.1. 研究背景与意义

糖尿病作为全球范围内最重要的慢性代谢性疾病之一,其相关并发症已成为影响人类健康的重要负担。其中,糖尿病肾病(diabetic nephropathy, DN)是导致终末期肾病(end-stage renal disease, ESRD)的主要病因。随着疾病进展,维持性血液透析(maintenance hemodialysis, MHD)成为主要肾脏替代治疗方式之一[1]。在MHD人群中,糖尿病患者占比逐年升高,其血糖管理直接关系到心血管事件、感染风险及长期生存预后。然而,该人群同时存在代谢紊乱、透析相关生理变化及多种并发症叠加,使血糖控制显著复杂化。传统基于经验的胰岛素调整模式难以适应这一高度动态的代谢环境,临床亟需更加精准和个体化的管理策略[2][3]。近年来,人工智能(AI)技术的快速发展推动医学领域从经验驱动向数据驱动转变。基于机器学习与强化学习的决策模型在复杂系统建模与序贯决策优化方面展现出独特优势,为解决透析人群血糖管理难题提供了新的技术路径[4]-[6]。本文旨在系统梳理该领域的研究进展,为临床实践和后续研究提供参考。

1.2. 维持性血液透析糖尿病患者血糖管理的特殊性及其挑战

维持性血液透析糖尿病患者的血糖管理具有显著复杂性,其本质在于透析过程与代谢紊乱的双重叠加效应。该人群的血糖波动不仅来源于饮食及胰岛素治疗,还受到透析相关因素的持续干扰,表现出明显不同于普通糖尿病患者的动态特征。透析过程中,血流动力学变化及溶质清除可引起血糖快速波动,形成透析日与非透析日之间的节律差异。透析间期常出现血糖升高,而透析过程中则可能因葡萄糖丢失

及胰岛素敏感性变化而诱发低血糖, 形成所谓“血糖波动加剧现象”。这种高血糖变异性(GV)已被证实与不良预后密切相关[7]-[9]。与此同时, 终末期肾病状态下胰岛素代谢显著改变。肾脏清除功能下降导致胰岛素半衰期延长, 而尿毒症相关炎症及代谢紊乱又可诱导胰岛素抵抗, 使患者处于“高胰岛素血症与胰岛素抵抗并存”的复杂代谢状态。这种双重机制使传统剂量调整难以准确反映真实需求[7] [10]-[12]。此外, 营养不良、贫血及自主神经功能障碍等并发症进一步干扰血糖调控, 同时 HbA1c 在透析患者中的可靠性受到限制, 使传统评估指标存在偏倚。上述因素共同决定了维持性血液透析糖尿病患者的血糖管理需要更精细化、动态化及个体化的策略, 而单纯依赖经验性调整难以满足临床需求[13]-[15]。

1.3. 人工智能在医疗健康领域应用概述

人工智能, 特别是机器学习(ML)与深度学习(DL), 已广泛渗透至医疗健康的各个层面。在医学影像识别领域, AI 模型在糖尿病视网膜病变筛查中的准确性已被证实, 获得 FDA 批准上市。在临床预后预测方面, 基于电子病历(EHR)的深度学习模型可预测死亡率、再入院率、急性肾损伤(AKI)及心血管事件, 其性能优于传统逻辑回归。在慢性病管理领域, AI 已用于 1 型和 2 型糖尿病的血糖预测、闭环胰岛素泵系统(人工胰腺)及饮食管理[4] [16]-[18]。AI 的核心优势在于能够整合来自不同模态的数据——包括 EHR 中的结构化数据(实验室检查、生命体征)、非结构化数据(病程记录、影像报告)、连续葡萄糖监测(CGM)生成的高频时序数据以及可穿戴设备的生理信号——从而实现从被动应对到主动预警、从群体统计到个体化预测的转变[8] [19] [20]。

本文旨在系统梳理人工智能在维持性血液透析糖尿病患者血糖管理中的研究现状、技术进展及临床应用。通过分析关键管理难题, 探讨机器学习通用模型如何赋能血糖预测、饮食运动干预及并发症风险防控, 进而剖析当前研究的局限性, 并展望多模态数据融合、伦理法规及临床落地路径, 以期为临床实践提供循证医学参考[21]-[24]。

2. 维持性血液透析患者血糖管理的关键问题

2.1. 血糖波动特征与监测难点

具体表现为: 日内血糖波动幅度可超过 10 mmol/L, 日间血糖变异系数(CV)常高于 40%, 远高于一般糖尿病患者(通常 CV < 36%为稳定)。透析期间, 血糖水平受饮食(尤其是透析餐)、透析液成分(葡萄糖浓度: 无糖或 1.5 g/L、2.5 g/L、4.25 g/L 不等)、胰岛素清除率变化、超滤量及应激激素波动等多重因素影响, 导致极高的血糖变异性(GV) [7] [25]。传统指尖血糖监测(SMBG)每天仅提供 4~7 个离散点, 难以捕捉到透析过程中的快速血糖下降(有时下降速度可达 0.5~1.0 mmol/L·h)或夜间无症状低血糖。CGM 虽然能够提供连续血糖曲线, 但设备成本较高、需要频繁校准, 且在透析患者中因皮下组织水肿、血流量变化可能影响准确性。此外, 透析间期(尤其是夜间)患者面临严重低血糖(<3.0 mmol/L)或高血糖(>13.9 mmol/L)的隐匿风险, 这些事件与心律失常、认知功能下降及猝死相关[25] [26]。

2.2. 影响血糖控制的主要因素(透析相关、药物、饮食等)

血糖控制不仅关乎代谢, 还受多种透析相关因素干扰。研究表明, 贫血、微炎症状态、营养不良以及自体动静脉内瘘的并发症(如血栓形成或失功)与糖尿病患者的预后紧密相关[10] [11] [27] [28]。同时, 不规范的饮食结构、体力活动不足及多药物干预(如促红细胞生成素使用)使得个体血糖反应差异巨大, 难以仅靠常规方案控制[13] [29]-[31]。

2.3. 传统血糖管理方法的局限性

传统管理模式依赖于 KDIGO、ADA 等指南推荐的标准化方案, 如根据 HbA1c 水平设定血糖目标(通

常 7.0%~8.0%), 并采用基础-餐时胰岛素方案。然而, 这种“一刀切”模式缺乏对个体动态代谢特征的响应。临床医生在调整胰岛素剂量时, 往往需要回顾患者数日的血糖日记、饮食记录及透析治疗参数, 面对大量繁杂信息, 工作负荷巨大, 且难以综合评估各因素的非线性交互作用。决策支持系统(CDSS)的缺乏使得医生只能依赖有限的经验规则(如“透析日减少餐前胰岛素 20%~30%”), 导致血糖达标率(TIR > 70%)普遍低于 50%, 且低血糖发生率居高不下[2][22][32][33]。此外, 患者自我管理能力不足(尤其是老年患者对 CGM 或胰岛素泵的操作困难)进一步限制了传统方法的有效性。

2.4. 维持性血液透析患者血糖管理中特有的数据类型及其应用挑战

与一般糖尿病人群相比, 维持性血液透析(maintenance hemodialysis, MHD)患者的血糖变化不仅受饮食及胰岛素治疗影响, 还受到透析过程本身的显著干预作用, 其数据特征具有明显的情境依赖性与动态变化特点[7][25][34]。因此, 在血糖管理及相关人工智能模型构建中, 需重点关注透析人群特有的数据类型及其潜在价值。

首先, 透析相关数据是该人群最具特异性的结构化信息来源。透析时长、超滤量及超滤率、血流量、透析液成分(尤其葡萄糖浓度)以及透析模式等参数, 均可通过影响葡萄糖转运及胰岛素清除过程, 直接参与血糖调控[25][35]。这些因素使患者在透析日与非透析日之间呈现不同的血糖变化模式。因此, 在人工智能建模过程中, 可将透析过程作为独立分析单元, 并结合透析过程中的时间分段信息, 有助于更准确地刻画血糖动态变化规律。

其次, 基于连续葡萄糖监测(continuous glucose monitoring, CGM)的血糖时序数据在透析患者中呈现出明显的阶段性特征。例如, 透析过程中血糖水平往往呈下降趋势, 而透析后一定时间内低血糖发生风险增加[7][25]。传统基于平均血糖或 HbA1c 的评估指标难以反映这一动态过程。通过提取透析相关血糖变化特征(如血糖下降速率、最低血糖水平及血糖变异度等), 可为血糖风险评估及预测模型提供更具临床意义的信息[4][36]。

此外, 液体状态相关数据在透析人群中具有重要意义。透析间期体重增加(interdialytic weight gain, IDWG)反映容量负荷变化, 而容量状态可通过影响组织灌注、炎症水平及胰岛素敏感性, 间接参与血糖调控[10][11][27][28]。同时, 组织水肿及液体转移亦可能影响血糖在血液与组织间液之间的交换过程, 从而对 CGM 测量结果产生影响[37]。因此, 将体重变化及相关容量指标纳入分析, 有助于提高血糖评估及预测的准确性。

另一方面, 透析过程对胰岛素及相关调糖激素的清除作用, 使胰岛素在体内的有效作用呈现动态变化[35]。这一特点提示, 在血糖管理中需考虑胰岛素作用的时间依赖性, 而非简单基于固定剂量进行评估。在人工智能模型中引入动态变化的胰岛素敏感性或相关参数, 有助于更真实地反映患者的代谢状态。

值得注意的是, CGM 在透析患者中的应用仍面临一定局限。皮下水肿、局部灌注改变及电解质波动等因素, 均可能导致 CGM 读数与实际血糖之间存在系统性偏差[26][37]。因此, 在相关数据分析或模型构建过程中, 应充分考虑这一偏差的存在, 并结合多源数据进行综合判断, 以提高结果的可靠性。

在此基础上, 针对 CGM 数据中存在的系统性偏差及噪声问题, 人工智能方法被认为具有重要应用潜力。已有研究表明, 机器学习模型可通过引入异常检测机制, 对不符合生理变化规律的血糖数据进行识别, 从而减少异常读数对模型训练及预测结果的影响[38][39]。此外, 可通过构建偏差校正模型, 将 CGM 数据与指尖血糖或透析相关参数进行联合分析, 从而对血糖测量误差进行动态修正[36][37]。在此基础上, 引入多模态数据融合方法, 将液体状态、透析处方及实验室指标等信息纳入模型, 有助于提高模型在复杂临床环境中的稳定性与泛化能力[19][21]。同时, 考虑到透析患者血糖变化的不确定性较高, 在模型中引入不确定性估计以量化预测结果的可信度, 也被认为是提高临床应用安全性的潜在方向[39]。

此外,透析患者的临床数据通常来源多样,且采样频率差异较大,如CGM为高频连续数据,而实验室检查及体重监测多为低频数据。这种多源异步数据特征增加了数据整合与分析的复杂性[39]。在研究及应用过程中,应重视数据时间对齐及缺失处理问题,以避免因数据不一致而影响模型性能评估。

综上,维持性血液透析患者血糖管理中的特有数据类型体现为透析相关参数、血糖动态特征、液体状态变化及多源异步数据等多个方面。这些数据不仅增加了血糖管理的复杂性,同时也为人工智能模型提供了更丰富的信息基础。合理整合并利用这些特有数据,有望提升血糖预测准确性,并为个体化治疗策略的制定提供支持。

3. 人工智能核心技术及其在血糖管理中的通用模型

3.1. 机器学习与深度学习模型概述

机器学习算法(如支持向量机 SVM、随机森林 RF、极端梯度提升 XGBoost)通过对历史数据进行学习,识别特征之间的非线性关系,已广泛用于血糖趋势预测[40]-[43]。深度学习(DL)作为 ML 的子集,通过多层神经网络自动提取特征。长短期记忆网络(LSTM)是一种特殊的循环神经网络(RNN),专门解决长序列依赖问题,非常适合处理 CGM 生成的时间序列数据。卷积神经网络(CNN)擅长捕捉局部空间特征,可用于心电图、脑电图信号分析以及医学影像识别。在血糖管理中,CNN 与 LSTM 常被组合使用(CNN-LSTM),以同时提取短期波动模式和长期趋势[19] [21] [43] [44]。

3.2. 时序数据分析与预测模型

针对 CGM 产生的每 5 分钟一个数据点的高频时序数据,传统统计方法(如 ARIMA 模型)难以应对非线性、非平稳性及多变量干扰。AI 算法通过以下技术路径实现精准预测:

1) 函数数据分析(FDA): 将离散的血糖测量点视为连续光滑曲线的观测值,利用基函数展开(如 B 样条、傅里叶基)降维后输入机器学习模型。

2) LSTM 及变体: 输入窗口通常为最近 30~60 分钟的历史血糖值、胰岛素剂量、碳水化合物摄入量、透析时间点及生命体征,输出未来 30~120 分钟的血糖预测值。研究表明, LSTM 在预测误差(RMSE)和临床可接受误差(如 Parkes 误差网格分析)上均优于传统模型[38] [44] [45]。

3) 注意力机制及 Transformer: 近期研究引入 Transformer 架构中的自注意力机制,能够动态赋予不同时间步不同的权重,显著提升了长时间跨度的预测能力,尤其适合捕捉透析日与非透析日之间的周期模式[40] [46] [47]。

3.3. 计算机视觉在相关指标识别中的应用

计算机视觉主要应用于糖尿病眼底筛查(DR)及血管通路影像评估。深度学习算法能通过分析眼底照片自动分级病变程度,并在血管通路监控中识别狭窄或血栓形成的征象,减少了眼科与透析护理的工作负担[48]-[51]。

3.4. 自然语言处理在电子病历分析中的应用

自然语言处理(NLP)技术通过解析医生书写的临床记录和患者症状描述,将非结构化文本转化为可量化的特征向量,协助临床医生从海量临床病史中识别潜在风险,如感染征兆或心血管异常,从而优化血糖及透析治疗策略[5] [21] [24]。

4. 人工智能在维持性血液透析患者血糖管理中的具体应用进展

人工智能在透析患者血糖管理中的应用主要集中于血糖预测预警与个体化胰岛素剂量优化等核心环

节。基于机器学习与深度学习的预测模型能够整合患者透析前后血糖数值及相关生理指标,对透析过程中低血糖或严重高血糖风险进行提前识别[17][18]。部分系统(如 Guardian Connect)通过云端算法对连续血糖监测数据进行实时分析,实现动态预警,从而为临床干预提供时间窗口,降低透析相关急性并发症的发生风险[20]。在此基础上,强化学习与决策支持算法进一步拓展了 AI 在治疗决策中的应用,通过刻画患者动态胰岛素敏感性及透析相关参数变化,实现胰岛素剂量的个体化推荐与动态调整[29]。相关研究显示,该类方法在降低低血糖风险的同时,可显著提高目标范围内时间(time in range, TIR),从而改善整体血糖控制水平[17][52]。

在综合管理层面,人工智能还可应用于生活方式干预、风险分层及远程管理支持。基于移动医疗平台的 AI 系统可通过图像识别等技术分析患者膳食结构,并结合透析状态与个体体能水平,生成个性化饮食与运动建议[23][46]。相关干预模式在改善营养状态及降低炎症水平方面具有积极作用,从而间接促进血糖代谢稳定[31][33]。在风险评估方面, AI 算法在糖尿病视网膜病变、糖尿病足及慢性肾病进展等并发症预测中表现出良好性能,可通过整合多维临床数据实现患者分层管理,并辅助医疗资源优化配置[53]-[55]。此外,依托物联网与可穿戴设备构建的远程监测系统,使患者在透析间期仍可接受持续管理支持,医生端能够实时获取关键健康数据并动态调整治疗方案,从而提高血糖管理的连续性与安全性[40][56]。

5. 技术有效性及临床效益证据

尽管人工智能在糖尿病管理领域已展现出良好的应用前景,其在透析患者中的临床推广仍面临多方面挑战。从技术有效性来看,现有研究已证实 AI 模型在糖尿病筛查、并发症诊断及血糖精准管理方面具有较高准确性,部分模型在预测效能(AUC)上甚至优于传统统计学方法[29][57]-[59]。然而,相关证据多来源于回顾性研究或小样本验证,缺乏大规模随机对照试验(RCT)的支持,限制了其循证医学等级及临床推广基础。

数据层面的问题同样制约着 AI 模型的进一步发展。不同透析中心之间存在明显的的数据异质性与“数据孤岛”现象,数据采集标准、变量定义及质量控制体系尚未统一,导致模型在跨中心应用时泛化能力下降[19][39][60][61]。同时,医疗数据具有高度敏感性,在数据共享与模型训练过程中,患者隐私保护与合规要求构成重要限制因素,对数据利用与模型开发提出更高要求。

在模型层面,可解释性不足是当前人工智能应用中的关键瓶颈。多数基于深度学习的模型呈现“黑箱”特征,其决策过程缺乏透明性,使临床医生难以理解模型推荐的内在逻辑,从而影响其在实际诊疗中的接受度[18][20][48]。尤其在复杂病例或高风险决策情境下,医生仍需在 AI 建议基础上进行综合判断,以确保治疗的安全性与人关怀,这在一定程度上限制了 AI 系统的独立应用空间[52]。

此外,人工智能技术与临床工作流程之间的适配问题亦不容忽视。当前多数 AI 系统尚未实现与医院电子病历系统(electronic health record, EHR)的无缝整合,增加了临床使用的操作复杂性[23][26]。同时,新兴技术如数字孪生及智能监测设备在实际应用中仍受限于基础设施建设及成本因素,在资源受限地区的推广面临挑战[47][62]。上述问题共同构成了人工智能在透析患者血糖管理中实现广泛应用的主要障碍。

6. 未来研究方向与展望

人工智能在透析糖尿病患者血糖管理中的应用仍处于发展阶段,未来研究需围绕数据整合能力、动态决策模型及临床转化路径等方面进一步深化。多模态数据融合被认为是提升模型性能的重要方向,通过联邦学习等技术整合电子病历、基因及多组学数据、医学影像以及可穿戴设备采集的连续监测数据,有望构建更加全面的患者数字画像,从而实现个体健康轨迹的精准预测[19][21][63]。在此基础上,强化学习算法在动态干预策略中的应用前景值得关注,该类方法能够模拟临床决策过程,根据患者实时生

理反馈对治疗方案进行持续优化, 有望推动透析与血糖管理向闭环自适应系统发展[8] [20] [64]。

在数据与证据体系建设方面, 跨中心协作及高质量数据库的构建是提升模型泛化能力的关键。以 AI-READI 等开源数据库为代表的多中心数据平台, 可通过标准化数据采集与共享机制, 促进模型在不同人群中的验证与优化, 从而提高其临床通用性[65] [66]。同时, 当前 AI 研究多集中于回顾性分析或模拟验证, 未来需进一步加强基于真实世界证据的研究, 并开展高质量随机对照试验, 以评估 AI 干预在改善生存质量、降低医疗成本及缩短住院时间等方面的实际效果, 为临床应用及监管决策提供坚实依据[20] [21] [58]。

此外, 人工智能的临床应用仍需与伦理与监管框架下推进。随着技术不断发展, 建立完善的法律法规体系及责任界定机制至关重要, 以确保数据安全与患者隐私得到有效保护[17] [24] [55]。在此基础上, 应进一步探索 AI 与临床专家决策的协同模式, 使技术优势与临床经验形成互补, 从而推动人工智能在透析患者血糖管理中的安全、规范及可持续应用[67]。

7. 结论

人工智能在维持性血液透析糖尿病患者血糖管理中展现出重要应用潜力。在血糖预测、并发症风险预警及个体化干预策略制定等方面, 基于机器学习与深度学习的模型已能够从复杂临床数据中提取潜在规律, 对血糖变化趋势进行动态建模, 并实现对异常血糖事件的提前识别。这类技术为改善患者代谢控制水平、降低低血糖及高血糖风险以及提升透析过程安全性提供了新的技术路径。

与传统基于经验的管理模式相比, 人工智能的应用推动血糖管理由经验驱动向数据驱动转变。通过整合连续血糖监测数据、实验室指标及透析相关参数, AI 系统能够实现患者风险分层与状态评估, 并在此基础上生成个体化干预策略与决策支持建议, 从而提高临床决策效率并增强治疗的连续性与一致性。同时, 在医疗资源配置层面, AI 有助于优化管理流程, 减少不必要的干预与住院负担, 在一定程度上改善患者生活质量与长期预后。

目前人工智能在透析人群中的应用仍处于探索阶段, 其临床转化尚面临多方面挑战。当前研究多以回顾性数据或模拟验证为主, 缺乏大规模、多中心及前瞻性研究的支持; 模型在不同人群中的泛化能力仍有待验证。此外, 模型可解释性不足、数据标准化程度不高以及隐私与伦理问题, 均在一定程度上制约了其在实际临床环境中的应用。

未来研究应进一步加强多模态数据整合与动态决策模型的构建, 通过结合连续血糖监测、透析参数及长期随访数据, 提高模型对复杂代谢状态的刻画能力。同时, 应推动多中心协作与高质量数据集建设, 并开展随机对照试验与真实世界研究, 以系统评估人工智能在透析患者血糖管理中的临床价值。在完善伦理规范与监管体系的基础上, 促进人工智能与临床实践的深度融合, 有望推动透析患者血糖管理向更加个体化、精细化及智能化方向发展。

作者贡献

本文作者独立完成了选题设计、文献检索与筛选、资料提取与分析、论文撰写与修订的全部工作, 对论文整体内容负责。

利益冲突

本文无利益冲突。

参考文献

- [1] 梁晓, 王婧一, 王华敏, 等. 怀柔区单中心血液透析患者临床资料分析[J]. 国际移植与血液净化杂志, 2022, 20(5):

- 25-29.
- [2] 余少斌, 曾筱茜, 付平. 一体化管理改善糖尿病肾病血液透析患者生活质量1例[J]. 中华肾脏病杂志, 2023, 39(4): 291-293.
- [3] 雷莹, 钟碧贤, 王琦, 等. 363例维持性血液透析患者心脏结构及功能改变特点分析[J]. 中国医师杂志, 2023, 25(2): 216-219.
- [4] Parab, R., Feeley, J.M., Valero, M., Chadalawada, L., Garcia, G.P., Kar, S.S., *et al.* (2025) Artificial Intelligence in Diabetes Care: Applications, Challenges, and Opportunities Ahead. *Endocrine Practice*, **31**, 1615-1625. <https://doi.org/10.1016/j.eprac.2025.07.008>
- [5] Hasanzad, M., Aghaei Meybodi, H.R., Sarhangi, N. and Larijani, B. (2022) Artificial Intelligence Perspective in the Future of Endocrine Diseases. *Journal of Diabetes & Metabolic Disorders*, **21**, 971-978. <https://doi.org/10.1007/s40200-021-00949-2>
- [6] 肖雨, 周阳. 人工智能在肾脏病学中的应用进展[J]. 中华肾脏病杂志, 2025, 41(11): 880-888.
- [7] 尹韬, 李月红, 温雯. 合并2型糖尿病的血液透析患者血糖控制水平与血压变异度的相关性及其预后研究[J]. 中国血液净化, 2025, 24(12): 969-974.
- [8] Nobakht, E., Raru, W., Dadgar, S. and El Shamy, O. (2024) Precision Dialysis: Leveraging Big Data and Artificial Intelligence. *Kidney Medicine*, **6**, Article ID: 100868. <https://doi.org/10.1016/j.xkme.2024.100868>
- [9] Chaudhry, T.Z., Yadav, M., Bokhari, S.F.H., Fatimah, S.R., Rehman, A., Kamran, M., *et al.* (2024) Artificial Intelligence and Machine Learning in Predicting Intradialytic Hypotension in Hemodialysis Patients: A Systematic Review. *Cureus*, **16**, e65334. <https://doi.org/10.7759/cureus.65334>
- [10] 刘玉双, 林文军, 朱奕蛟, 等. 合并与不合并糖尿病的维持性血液透析患者临床及内瘘声学特征比较[J]. 中华医学杂志, 2026, 106(8): 733-739.
- [11] 王再红, 范素青, 郑建玲, 等. 百令胶囊在糖尿病肾病维持性血液透析患者中的应用[J]. 中国基层医药, 2026, 33(2): 239-244.
- [12] 陈亚菲, 李旭, 朱丽, 等. 血液透析患者心脏自主神经功能障碍的影响因素分析[J]. 中华肾脏病杂志, 2024, 40(2): 94-100.
- [13] 郭志梅, 王明明. 多学科协作下路径护理对老年糖尿病肾病维持性血液透析肌少症患者的效果[J]. 国际医药卫生导报, 2025, 31(2): 208-213.
- [14] 王亭亭, 田兴, 张娟, 等. 糖尿病肾病维持性血液透析患者皮肤瘙痒发生的影响因素分析[J]. 中国实用医刊, 2024, 51(11): 49-52.
- [15] 胡春燕, 李雅婧, 耿同会, 等. HITH-4 远红外线治疗仪联合多磺酸粘多糖乳膏对糖尿病血液透析患者动静脉内瘘功能的保护效果研究[J]. 中国全科医学, 2023, 26(8): 951-954.
- [16] 周鸿明, 李云逸, 李伟龙, 等. 机器学习在血液透析治疗中的应用进展[J]. 国际医药卫生导报, 2023, 29(13): 1777-1781.
- [17] Kohli, M., Pandey, P., Jakhmola, V., Saha, S., Chaudhary, M., Ansori, A.N.M., *et al.* (2025) Revolutionizing Diabetes Care: The Role of Artificial Intelligence in Prevention, Diagnosis, and Patient Care. *Journal of Diabetes & Metabolic Disorders*, **24**, Article No. 132. <https://doi.org/10.1007/s40200-025-01648-y>
- [18] Iftikhar, M., Saqib, M., Qayyum, S.N., Asmat, R., Mumtaz, H., Rehan, M., *et al.* (2024) Artificial Intelligence-Driven Transformations in Diabetes Care: A Comprehensive Literature Review. *Annals of Medicine & Surgery*, **86**, 5334-5342. <https://doi.org/10.1097/ms9.0000000000002369>
- [19] Yuan, S., Guo, L. and Xu, F. (2025) Artificial Intelligence in Nephrology: Predicting CKD Progression and Personalizing Treatment. *International Urology and Nephrology*. <https://doi.org/10.1007/s11255-025-04878-4>
- [20] Anwar, A., Rana, S. and Pathak, P. (2025) Artificial Intelligence in the Management of Metabolic Disorders: A Comprehensive Review. *Journal of Endocrinological Investigation*, **48**, 1525-1538. <https://doi.org/10.1007/s40618-025-02548-x>
- [21] Clement David-Olawade, A., Ogunbona, M.A., Olawuyi, O.F., Makanjuola, B.D., Alabi, J.O. and Olawade, D.B. (2026) Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in Dialysis: Current Applications, Challenges, and Future Directions. *Clinica Chimica Acta*, **586**, Article ID: 120908. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2026.120908>
- [22] 邱晓乔, 郑乐瑶, 王谨, 等. 基于 i-PARIHS 的糖尿病肾病血液透析患者血糖管理审查指标制订及障碍因素分析[J]. 中华现代护理杂志, 2025, 31(32): 4428-4436.
- [23] Li, W. and Li, L. (2026) Artificial Intelligence in Mobile Health Applications: A Comprehensive Review of Its Role in Diabetes Care. *World Journal of Methodology*, **16**, Article ID: 107488. <https://doi.org/10.5662/wjm.v16.i1.107488>

- [24] Petrov, S., Donkov, D. and Orbetzova, M. (2025) AI and Telemedicine in Management of Diabetes. *Folia Medica*, **67**, e153728. <https://doi.org/10.3897/folmed.67.e153728>
- [25] 刘倩影, 刘雪彦, 周佩如, 等. 糖尿病肾病患者血液透析期间低血糖管理的证据总结[J]. 中华肥胖与代谢病电子杂志, 2023, 9(1): 22-27.
- [26] Doherty, T., Kelley, A., Kim, E. and Salik, I. (2025) Use of Continuous Glucose Monitoring Systems in Pediatric Patients in the Perioperative Environment: Challenges and Machine Learning Opportunities. *World Journal of Clinical Pediatrics*, **14**, Article ID: 107127. <https://doi.org/10.5409/wjcp.v14.i4.107127>
- [27] 郭紫晴, 赵梦寒, 张冰, 等. 维持性血液透析中心静脉导管相关血流感染信息化监测及其危险因素[J]. 中华医院感染学杂志, 2025, 35(5): 752-757.
- [28] 张少青, 吕玉凤, 董海霞. 中性粒细胞百分比/白蛋白比值对维持性血液透析患者全因死亡的预测作用[J]. 中华肾病研究电子杂志, 2024, 13(6): 321-326.
- [29] Lim, L., Lin, M., Hsu, C., Ku, C., Chen, Y., Kang, Y., *et al.* (2025) Computer-Assisted Prescription of Erythropoiesis-Stimulating Agents in Patients Undergoing Maintenance Hemodialysis: A Randomized Control Trial for Artificial Intelligence Model Selection. *JAMIA Open*, **8**, ooaf020. <https://doi.org/10.1093/jamiaopen/ooaf020>
- [30] 吴伟莉, 马春园, 谢蒙蒙, 等. 维持性血液透析人群功能性便秘相关因素分析[J]. 中华肾脏病杂志, 2025, 41(12): 997-1002.
- [31] 朱冉, 凌楠. 五步协同营养方案对糖尿病肾病维持性血液透析患者的影响[J]. 国际移植与血液净化杂志, 2022, 20(6): 42-44.
- [32] 霍愿愿, 闫洁, 刘荣丽. Teach back 干预模式对糖尿病肾病维持性血液透析患者的影响[J]. 国际护理学杂志, 2024, 43(22): 4089-4092.
- [33] 冯净莉, 李攀攀, 谢晓攀. 认知负荷理论对糖尿病肾病维持性血液透析患者营养状态、微炎症状态及肾功能的影响[J]. 国际移植与血液净化杂志, 2024, 22(1): 30-33.
- [34] Williams, M.E., Steenkamp, D. and Wolpert, H. (2022) Making Sense of Glucose Sensors in End-Stage Kidney Disease: A Review. *Frontiers in Clinical Diabetes and Healthcare*, **3**, Article ID: 1025328. <https://doi.org/10.3389/fcdhc.2022.1025328>
- [35] Takao, N., Maruyama, T., Kobayashi, H., Kitai, M., Yoshida, Y., Takashima, H., *et al.* (2023) Kinetics of Glucoregulatory Peptide Hormones during Hemodialysis with Cellulose Triacetate and Polysulfone Dialyzers in Patients with Diabetes and End-Stage Kidney Disease. *International Journal of Molecular Sciences*, **24**, Article No. 10604. <https://doi.org/10.3390/ijms241310604>
- [36] Klonoff, D.C., Bergenstal, R.M., Cengiz, E., Clements, M.A., Espes, D., Espinoza, J., *et al.* (2025) Continuous Glucose Monitoring Data Analysis 2.0: Functional Data Pattern Recognition and Artificial Intelligence Applications. *Journal of Diabetes Science and Technology*, **19**, 1515-1527. <https://doi.org/10.1177/19322968251353228>
- [37] Zhang, Y., Singh, P., Ganapathy, K., Suresh, V., Karamat, M.A., Baharani, J., *et al.* (2024) Efficacy of Continuous Glucose Monitoring in People Living with Diabetes and End Stage Kidney Disease on Dialysis: A Systematic Review. *BMC Nephrology*, **25**, Article No. 379. <https://doi.org/10.1186/s12882-024-03763-z>
- [38] Fera, N., Procopio, A., Zaffino, P., Cutruzzola, A., Irace, C. and Cosentino, C. (2026) Modeling Strategies for CGM Data: A Scoping Review of Mechanistic, Machine Learning, and Hybrid Approaches in Diabetes Management. *Computers in Biology and Medicine*, **205**, Article ID: 111601. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2026.111601>
- [39] Jacobs, P.G., Herrero, P., Facchinetti, A., Vehi, J., Kovatchev, B., Breton, M.D., *et al.* (2024) Artificial Intelligence and Machine Learning for Improving Glycemic Control in Diabetes: Best Practices, Pitfalls, and Opportunities. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, **17**, 19-41. <https://doi.org/10.1109/rbme.2023.3331297>
- [40] Maqbool, S., Bajwa, I.S., Maqbool, S., Ramzan, S. and Chishty, M.J. (2023) A Smart Sensing Technologies-Based Intelligent Healthcare System for Diabetes Patients. *Sensors*, **23**, Article No. 9558. <https://doi.org/10.3390/s23239558>
- [41] 罗业华, 周鸿明, 郭齐, 等. 基于机器学习透析内低血压预测模型的研究[J]. 国际医药卫生导报, 2024, 30(17): 2856-2862.
- [42] Lee, H., Moon, S.J., Kim, S.W., Min, J.W., Park, H.S., Yoon, H.E., *et al.* (2023) Prediction of Intradialytic Hypotension Using Pre-Dialysis Features—A Deep Learning-Based Artificial Intelligence Model. *Nephrology Dialysis Transplantation*, **38**, 2310-2320. <https://doi.org/10.1093/ndt/gfad064>
- [43] Teruna, M., Razak, T., Yasin, S., *et al.* (2026) The artificial Intelligence Driven on the Development of Diabetic Retinopathy Prognostic Scoring Tool among Type 2 Diabetes Mellitus Patients: A Review. *The Medical Journal of Malaysia*, **81**, 158-162.
- [44] Zhang, H., Nandorine Ban, A. and Kotanko, P. (2025) Intermittent Hypoxemia during Hemodialysis: AI-Based

- Identification of Arterial Oxygen Saturation Saw-Tooth Pattern. *BMC Nephrology*, **26**, Article No. 214. <https://doi.org/10.1186/s12882-025-04133-z>
- [45] Marchetti, A., Sasso, D., D'Antoni, F., Morandin, F., Parton, M., Matarrese, M.A.G., *et al.* (2025) Deep Reinforcement Learning for Type 1 Diabetes: Dual PPO Controller for Personalized Insulin Management. *Computers in Biology and Medicine*, **191**, Article ID: 110147. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2025.110147>
- [46] 庄梦怡, 符雪磊, 姜燕, 等. 人工智能赋能 1 型糖尿病自我管理的可视化文献计量分析[J]. 中华糖尿病杂志, 2026, 18(3): 285-292.
- [47] González-Rivas, J.P., Seyedi, S.A. and Mechanick, J.I. (2025) Artificial Intelligence Enabled Lifestyle Medicine in Diabetes Care: A Narrative Review. *American Journal of Lifestyle Medicine*. <https://doi.org/10.1177/15598276251359185>
- [48] 李京珂, 张妍春, 武佳懿, 等. 深度学习在糖尿病视网膜病变筛查、评级及管理中的研究进展[J]. 中华眼科医学杂志(电子版), 2023, 13(4): 241-246.
- [49] Chundi, R., G., S., Basivi, P.K., Tippana, A., Hulipalled, V.R., N., P., *et al.* (2025) Exploring Diabetes through the Lens of AI and Computer Vision: Methods and Future Prospects. *Computers in Biology and Medicine*, **185**, Article ID: 109537. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2024.109537>
- [50] 董力, 李赫妍, 魏文斌. 人工智能在糖尿病视网膜病变中的应用进展[J]. 中华眼科医学杂志(电子版), 2024, 14(1): 57-61.
- [51] 董秀清, 杜绍林, 刘华秀, 等. 人工智能在社区糖尿病视网膜病变诊断及转诊中的应用[J]. 中华实验眼科杂志, 2022, 40(12): 1158-1163.
- [52] 张磊, 蔡璟浩, 周健. 人工智能在糖尿病管理中的应用现状和挑战[J]. 中华医学杂志, 2025, 105(15): 1140-1144.
- [53] Tao, Y., Hou, J., Zhou, G. and Zhang, D. (2025) Artificial Intelligence Applied to Diabetes Complications: A Bibliometric Analysis. *Frontiers in Artificial Intelligence*, **8**, Article ID: 1455341. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1455341>
- [54] Fu, Z., Wang, Z., Clemente, K., Jaisinghani, M., Poon, K.M.T., Yeo, A.W.T., *et al.* (2024) Development and Deployment of a Nationwide Predictive Model for Chronic Kidney Disease Progression in Diabetic Patients. *Frontiers in Nephrology*, **3**, Article ID: 1237804. <https://doi.org/10.3389/fneph.2023.1237804>
- [55] Pescol, F., Bosoni, P., Ghilotti, S., De Cata, P., Sacchi, L. and Bellazzi, R. (2025) Artificial Intelligence for Diabetes Complication Prediction: A Systematic Review of Current Applications and Future Directions. *Journal of Diabetes Science and Technology*. <https://doi.org/10.1177/19322968251384314>
- [56] Ji, C., Jiang, T., Liu, L., Zhang, J. and You, L. (2025) Continuous Glucose Monitoring Combined with Artificial Intelligence: Redefining the Pathway for Prediabetes Management. *Frontiers in Endocrinology*, **16**, Article ID: 1571362. <https://doi.org/10.3389/fendo.2025.1571362>
- [57] Basuli, D., Kavcar, A. and Roy, S. (2024) From Bytes to Nephrons: AI's Journey in Diabetic Kidney Disease. *Journal of Nephrology*, **38**, 25-35. <https://doi.org/10.1007/s40620-024-02050-2>
- [58] Lalani, B., Herur, R., Zade, D., Collins, G., Dishong, D.M., Mehta, S., *et al.* (2025) Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Prediabetes: A Systematic Review. *Journal of Diabetes Science and Technology*. <https://doi.org/10.1177/19322968251351995>
- [59] Wang, X., Sun, Z., Xue, H. and An, R. (2025) Artificial Intelligence Applications to Personalized Dietary Recommendations: A Systematic Review. *Healthcare*, **13**, Article No. 1417. <https://doi.org/10.3390/healthcare13121417>
- [60] Tahir, F. and Farhan, M. (2023) Exploring the Progress of Artificial Intelligence in Managing Type 2 Diabetes Mellitus: A Comprehensive Review of Present Innovations and Anticipated Challenges Ahead. *Frontiers in Clinical Diabetes and Healthcare*, **4**, Article ID: 1316111. <https://doi.org/10.3389/fcdhc.2023.1316111>
- [61] 热孜完古力·阿木提, 杨兵全. 数字医疗在糖尿病管理中的应用进展[J]. 中华糖尿病杂志, 2024, 16(3): 352-355.
- [62] Sandys, V., Sexton, D. and O'Seaghda, C. (2022) Artificial Intelligence and Digital Health for Volume Maintenance in Hemodialysis Patients. *Hemodialysis International*, **26**, 480-495. <https://doi.org/10.1111/hdi.13033>
- [63] 杨燕菱, 林倍思, 刘芷谷, 等. 基于 Web of Science 数据库的 2 型糖尿病机器学习可视化文献计量分析[J]. 中华糖尿病杂志, 2025, 17(3): 360-368.
- [64] Giorgini, F., Di Dalmazi, G. and Diciotti, S. (2023) Artificial Intelligence in Endocrinology: A Comprehensive Review. *Journal of Endocrinological Investigation*, **47**, 1067-1082. <https://doi.org/10.1007/s40618-023-02235-9>
- [65] Owsley, C., Matthes, D.S., McGwin, G., Edberg, J.C., Baxter, S.L., Zangwill, L.M., *et al.* (2025) Cross-Sectional Design and Protocol for Artificial Intelligence Ready and Equitable Atlas for Diabetes Insights (AI-READI). *BMJ Open*, **15**, e097449. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-097449>

- [66] Koye, D.N., Kwok, R., Tham, Y., Zafari, T., Kishore, K. and Ekinci, E.I. (2026) Limitation of Existing GFR Estimating Equations and Application of Artificial Intelligence in Improving GFR Estimation and Chronic Kidney Disease Progression in People with Diabetes. *Diabetes Research and Clinical Practice*, **233**, Article ID: 113152. <https://doi.org/10.1016/j.diabres.2026.113152>
- [67] Oikonomou, E.K. and Khera, R. (2023) Machine Learning in Precision Diabetes Care and Cardiovascular Risk Prediction. *Cardiovascular Diabetology*, **22**, Article No. 259. <https://doi.org/10.1186/s12933-023-01985-3>