

• 慢病专题:代谢性疾病 •

DIY 人工胰腺在 1 例糖尿病足中的应用*

杜莹璇,王 渊,石 莹,何林翰,王 慧[△]

(陆军军医大学第二附属医院内分泌科,重庆 400037)

[摘要] 该院收治 1 例 55 岁男性患者,因血糖控制欠佳、右足破溃 3 d 入院,糖尿病病程 23 年,诊断为糖尿病足伴感染。在使用胰岛素泵联合指尖末梢血糖监测控制血糖欠佳的情况下转为 DIY 人工胰腺(DIY-APS)联合控制,葡萄糖在目标范围内时间达 94.59%,血糖波动明显减少,创面愈合良好。高低血糖波动是糖尿病足进展的关键,但传统监测血糖方法难以全面实时反应患者血糖波动,以及根据血糖情况作出及时处理,DIY-APS 通过实时闭环输注实现精准安全控糖,为糖尿病足综合管理提供了新策略。

[关键词] 糖尿病足; DIY 人工胰腺; 血糖控制; 病例报告

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2025.09.014

中图法分类号:R587.2

文章编号:1009-5519(2025)09-2081-03

文献标识码:A

The application of DIY artificial pancreas in a case of diabetic foot*DU Yingxuan, WANG Yuan, SHI Ying, HE Linhan, WANG Hui[△]

(Department of Endocrinology, The Second Affiliated Hospital of Army Medical University, Chongqing 400037, China)

[Abstract] This hospital admitted a 55-year-old male patient who was admitted due to poor blood sugar control and a broken right foot that had been open for 3 days. The patient had a 23-year history of diabetes and was diagnosed with diabetic foot with infection. When insulin pump combined with fingertip peripheral blood glucose monitoring failed to control blood sugar adequately, the treatment was changed to DIY artificial pancreas (DIY-APS) combined control. The time within the target range reached 94.59%, and the blood sugar fluctuations significantly decreased, with the wound healing well. Fluctuations in blood sugar levels are a key factor in the progression of diabetic foot disease. However, traditional methods for monitoring blood sugar levels are unable to comprehensively and real-time reflect the fluctuations of patients' blood sugar levels, nor can they enable timely treatment based on the blood sugar conditions. DIY-APS achieves precise and safe blood sugar control through real-time closed-loop infusion, providing a new strategy for comprehensive management of diabetic foot disease.

[Key words] Diabetic foot; DIY artificial pancreas; Blood sugar control; Case report

糖尿病已成为全球公共卫生面临的重大挑战,国际糖尿病联盟最新发布的全球糖尿病地图(第 11 版)显示,2024 年全球 20~79 岁成人糖尿病患者达 5.89 亿;若按现有趋势,至 2050 年这一数字将上升至 8.53 亿^[1]。糖尿病足是指糖尿病患者因合并下肢神经病变和(或)外周动脉病变导致足踝部以远组织感染、溃疡或破坏^[2],显著降低患者生活质量,甚至过早死亡。目前,糖尿病足治疗原则包括内科治疗、外科治疗、减轻压力、溃疡保护和预防工作^[2],其中控制血糖、维持内环境代谢稳定是其基础,但糖尿病足常合并心血管疾病、肾功能不全、感染等多种因素,血糖波动较大,

如何平稳有效地控制血糖一直是糖尿病足诊治中的重点和难点。本院收治 1 例糖尿病足伴感染患者,在使用胰岛素泵联合指尖末梢血糖监测控制血糖欠佳的情况下转为 DIY 人工胰腺(DIY-APS)联合控制,实现了精准安全控糖,现报道如下。

1 临床资料

患者,男,55 岁。因血糖控制欠佳、右足破溃 3 d 于 2025 年 6 月 12 日收入院。发现高血糖 23 年,右足第 1 足趾破溃 3 d。23 年前在本院门诊查随机静脉血糖 31 mmol/L,诊断为“糖尿病”,予以降糖治疗(具体描述不详),但用药欠规律,未定期复查随访。入院前

* 基金项目:陆军军医大学第二附属医院青年博士人才孵化计划重点项目(2024YQB027)。

作者简介:杜莹璇(1988—),硕士研究生,主治医师,主要从事血糖精细化管理、糖尿病、肥胖的研究工作。[△] 通信作者, E-mail: hwang1213@tmmu.edu.cn.

网络首发 [https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20250912.0847.006\(2025-09-12\)](https://link.cnki.net/urlid/50.1129.R.20250912.0847.006(2025-09-12))

数月使用精蛋白重组人胰岛素混合注射液 30/70 皮下注射每天早上 17 U、每天晚上 16 U,二甲双胍 0.5 g 口服、每天 1 次控制血糖。10 年前无明显诱因出现泡沫尿,5 年前无明显诱因出现双手指尖、双足脚趾发麻、刺痛,偶有蚁行感,未治疗。4 年前无明显诱因出现右足肿胀不适,肿胀处可见黄色分泌物,伴发热,体温最高 38.5℃,于本院降糖、抗感染治疗,病情平稳后出院,但院外未规律治疗及随访复查。入院前 3 d 无明显诱因出现右足第 1 足趾皮肤破溃,不慎碰伤至创面扩大,伴疼痛、足背红肿,再次于本院内分泌科住院治疗。既往高血压数年,平素未规律服用降压药及监测血压。吸烟 40 年,每天 4~5 支。饮酒 10 年,啤酒每次 500~1 000 mL。入院查体:身高 171 cm,体重 58.7 kg,身体质量指数 20.07 kg/m²。坐位血压 121/70 mm Hg(1 mm Hg=0.133 kPa),心率 82 次/分。右足第 1、2 足趾趾尖可见 2 处 2 cm×3 cm、3 cm×4 cm 皮肤破溃,可见黑色腐肉,少量黄褐色脓性伴腥臭分泌物渗出,未见窦道、潜行、瘰管形成等,创面周围皮肤增厚、红肿。右足足背红肿,足背动脉搏动弱;左足背动脉搏动可。双下肢无凹陷性水肿。入院查糖化血红蛋白 11.3%。肾功能:尿素 11.43 mmol/L,肌酐 337 μmol/L,尿酸 452 μmol/L,肾小球清除率 17 mL/(min·L)。降钙素原 0.167 ng/mL,C 反应蛋白 21.60 mg/L,红细胞沉降率 79.0 mm/h。血常规:白细胞 9.33×10⁹ L⁻¹,中性粒细胞绝对值 6.96×10⁹ L⁻¹,清蛋白 24.6 g,前清蛋白 182 mg/L。下肢血管彩色多普勒超声:双侧腘动脉、右侧胫前动脉起始段粥样硬化斑块形成。双下肢经皮氧分压:左侧足背动脉 51 mm Hg,右侧足背动脉 37 mm Hg。创口分泌物培养:金黄色葡萄球菌。诊断为糖尿病足。予以抗感染、纠正低蛋白血症、降糖、降压、局部清创换药处理等。治疗期间给予皮下胰岛素泵联合指尖血糖监测,血糖波动在 6.3~19.8 mmol/L 之间,其后建立起由胰岛素泵、持续葡萄糖监测系统(CGM)、闭环控制系统(AndroidAPS)组成的 APS,应用全自动模式,其可支持实时血糖自动调节基础胰岛素输注,以及在进餐时予以标记,系统即可自动给予餐前大剂量输注,使血糖达到目标值。该系统建立后 CGM 报告提示血糖 4.0~11.1 mmol/L,平均(5.82±1.54)mmol/L,变异系数为 26.46%,葡萄糖在目标范围内时间(TIR)为 94.59%,葡萄糖高于目标范围时间为 4.51%,葡萄糖低于目标范围时间为 0%。血糖控制平稳、创面恢复良好,患者于 2025 年 6 月 25 日顺利出院。

2 讨 论

糖尿病足的诊断标准主要包括以下几个方面:(1)糖尿病史,患者需有明确的糖尿病史,且血糖控制不佳。长期高血糖状态会导致周围神经和血管损伤,这是糖尿病足发生的病理基础。(2)足部溃疡或坏

疽,特征性表现为足底、趾端等受力部位出现难以愈合的皮肤破损,溃疡深达真皮层以下,可能伴组织坏死或发黑。溃疡形态多呈圆形或椭圆形,边缘整齐,基底可见黄色坏死组织。(3)神经病变,表现为足部感觉异常,如蚁行感、麻木、痛觉减退等。通过 10 g 尼龙丝试验可发现保护性感觉缺失,震测定动觉阈值显示异常。神经传导速度减慢。(4)血管病变,足背动脉搏动减弱或消失,皮肤温度降低,踝肱指数小于 0.9,提示下肢缺血。多普勒超声检查可见动脉管壁钙化、管腔狭窄等,严重者出现间歇性跛行或静息痛。(5)感染迹象,局部出现红肿、皮温升高、脓性分泌物等,严重者可伴全身发热。实验室检查显示白细胞、C 反应蛋白增高,创面细菌培养常检出金黄色葡萄球菌或混合感染。本例患者糖尿病病程 23 年,既往治疗欠规范,长期血糖控制不佳,存在足部皮肤破溃,肢端针刺感、发麻等神经病变症状,血管彩色多普勒超声检查提示下肢血管动脉粥样硬化斑块形成,查体可见患侧足背动脉搏动弱,炎症标志物升高,符合糖尿病足诊断标准。

持续高血糖状态是糖尿病足溃疡发生的重要危险因素,高血糖会导致血管内皮细胞功能障碍,使血管舒张和收缩功能异常,影响下肢血液循环;同时,高血糖还会促使糖基化终末产物形成,其可与细胞表面受体结合,激活一系列信号通路,导致氧化应激和炎症反应,损伤神经和血管^[3];此外,高血糖环境有利于细菌繁殖,增加了感染的风险。糖化血红蛋白水平每升高 1%糖尿病足溃疡的发生风险增加约 25%^[4]。因此,控制血糖可降低发生糖尿病足溃疡的风险,但过度降糖易导致低血糖,增加发生心血管事件的风险^[5]。

糖尿病足患者易出现血糖波动、难以控制,主要由于足病疼痛、手术清创、睡眠剥夺激活下丘脑-垂体-肾上腺轴,使皮质醇、胰高血糖素升高,肝糖输出增加;同时,夜间交感兴奋下降后外源性胰岛素未及时减量,导致“黎明现象”与夜间低血糖交替出现。40%的糖尿病足患者合并 3 期及以上的糖尿病肾病,使胰岛素清除率下降 30%~50%,蓄积风险高;应激期蛋白尿又可使胰岛素结合蛋白丢失,游离胰岛素骤升、骤降^[6]。患足免负重,使每天能量消耗减少 300~500 kcal,而创面愈合需“补营养”,碳水化合物摄入增加,外周胰岛素敏感性下降 20%^[7]。自主神经功能减退使神经内分泌对低血糖的拮抗作用减弱,降低激发拮抗低血糖机制的血糖阈值,导致未察觉低血糖或严重低血糖^[8]。因此,如何平衡糖尿病足患者的血糖控制,使其可兼顾创面愈合且最大限度地减少低血糖成为其综合治疗的基础。对于糖尿病足患者推荐 TIR≥70%,而 TIR 每增加 10%截肢风险下降 6%^[9]。

近年来,胰岛素输注技术发展迅速。结合 CGM,根据血糖水平自动进行胰岛素输注的 APS(又称为

“闭环系统”或“自动胰岛素输送系统”)逐渐成熟,在糖尿病治疗中发挥优势。目前,线上社区开发并开源了 3 套 APS 装置,包括 OpenAPS、AndroidAPS 和 Loop & FreeAPS,统称为 DIY-APS,可基于现有胰岛素泵和 CGM 自行搭建并使用。2022 年 BOUGHTON 等^[10]肯定了 DIY-APS 的安全、有效性,真实世界研究及计算机仿真平台数据均表明,开源 DIY-APS 可增加不同年龄层、性别及社会、经济地位的糖尿病患者葡萄糖 TIR,同时,可减少高、低血糖及血糖波动。鉴于 APS 的显著有效性和安全性,美国糖尿病学会和欧洲糖尿病研究协会 A 类推荐 APS 用于 1 型糖尿病以改善血糖控制和患者生活质量^[11-12]。一项针对儿童 1 型糖尿病患者的研究采用了闭环式胰岛素泵输注系统,TIR 高于标准治疗^[13]。另一项临床研究提到,在家庭中使用 DIY-APS,其安全性与单独使用胰岛素泵相当,但 TIR 更长^[14]。

迄今,APS 用于糖尿病足的研究仍较少见,尽管 APS 显著改善了本例患者的血糖波动,但需强调的是,患者糖尿病足创面在出院时仍未完全愈合,此外,本例患者接受了多种综合治疗,这些治疗均可能在症状改善中起到作用。因此,血糖控制仅是治疗的基础,不能等同于治愈糖尿病足。

DIY-APS 具有可获取性高、设备和平台可交互、可个性化设置参数等优势,成为许多患者的治疗选择。DIY-APS 依赖实时数据驱动的决策算法,促进学科从传统经验医学向人工智能辅助的精准医学转型,推动动态血糖预测模型、自适应调节算法等核心技术的研发。通过开源社区与患者参与式创新,推动“以患者为主导”的医疗模式,促进个体化治疗方案的普及,如基于生活模式(如运动、饮食等)的动态剂量调整。长期稳定控糖可减少微血管病变(如视网膜病变、肾病等)及大血管事件(如心肌梗死、脑卒中等)发生,降低医疗系统远期负担。通过实时反馈与数据可视化,提升患者依从性,减少急诊与住院需求,尤其适用于脆性糖尿病等难治性群体。在疾病诊断相关分组(DRG)付费模式下,DIY-APS 的应用直接影响糖尿病相关病组的资源消耗与费用结构;减少糖尿病酮症酸中毒(E10.1)、严重低血糖(E16.2)等高风险分组的入院率,缩短平均住院时间,优化医保基金使用效率。拓展慢性病管理 DRG 内涵;推动“糖尿病综合管理”病组向医院外延伸,纳入远程监测与闭环系统维护费用,重构成本核算模型。通过开展 DIY-APS 技术,医院可吸引复杂病例并建立技术壁垒,扩大优势病种规模,同时,通过减少并发症相关支出提升 DRG 结余率。

参考文献

[1] International Diabetes Federation. IDF diabetes atlas[Z/

- OL]. 11th ed. Brussels: International Diabetes Federation, 2025. (2025-09-14). <https://diabetesatlas.org>.
- [2] 中华医学会糖尿病学分会糖尿病足与周围血管病学组. 中国糖尿病足诊治临床路径(2023 版)[J]. 中华内分泌代谢杂志, 2023, 39(2): 93-102.
- [3] GOLDIN A, BECKMAN J A, SCHMIDT A M, et al. Advanced glycation end products: sparking the development of diabetic vascular injury[J]. Circulation, 2006, 114(6): 597-605.
- [4] STRATTON I M, ADLER A I, NEIL H A, et al. Association of glycaemia with macrovascular and microvascular complications of type 2 diabetes(UKPDS 35): prospective observational study[J]. BMJ, 2000, 321(7258): 405-412.
- [5] HOLMAN R R, PAUL S K, BETHEL M A, et al. 10-year follow-up of intensive glucose control in type 2 diabetes[J]. N Engl J Med, 2008, 359(15): 1577-1589.
- [6] American Diabetes Association Professional Practice Committee. Standards of medical care in diabetes-2024: glycemic targets and hypoglycemia[J]. Diabetes Care, 2024, 47(Suppl 1): S111-S127.
- [7] ARMSTRONG D G, LAVERY L A, ROBBINS J M, et al. How off-loading changes energy expenditure and substrate utilization in patients with diabetic foot ulcers: a calorimetry study[J]. J Foot Ankle Res, 2022, 15: 52.
- [8] CRYER P E. Hypoglycaemia in Clinical Diabetes[M]. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2007: 75-82.
- [9] XIE P G, DENG B, ZHANG X, et al. Time in range in relation to amputation and all-cause mortality in hospitalised patients with diabetic foot ulcers[J]. Diabetes Metab Res Rev, 2022, 38(2): e3498.
- [10] BOUGHTON C K, HOVORKA R. Open-source automated insulin delivery: international consensus statement and practical guidance for health-care professionals[J]. Lancet, 2022, 399(10333): 1267-1276.
- [11] American Diabetes Association Professional Practice Committee. Introduction and methodology: standards of care in diabetes-2024[J]. Diabetes Care, 2024, 47(Suppl 1): S1-S4.
- [12] PHILLIP M, NIMRI R, BERGENSTAL R M, et al. Consensus recommendations for the use of automated insulin delivery technologies in clinical practice[J]. Endocr Rev, 2023, 44(2): 254-280.
- [13] WADWA R P, REED Z W, BUCKINGHAM B A, et al. Trial of hybrid closed-loop control in young children with type 1 diabetes[J]. N Engl J Med, 2023, 388(11): 991-1001.
- [14] NANAYAKKARA N, SHARIFI A, BURREN D, et al. Hybrid closed loop using a do-it-yourself artificial pancreas system in adults with type 1 diabetes[J]. J Diabetes Sci Technol, 2024, 18(4): 889-896.

(收稿日期: 2025-08-12 修回日期: 2025-09-03)