

糖尿病外周动脉疾病与足底压力的关系研究进展

朱恩芳*, 崔灏灵, 段中平, 毛 舰, 李文*

大理大学临床医学院, 云南省第三人民医院内分泌科 云南大理

【摘要】糖尿病外周动脉疾病(PAD)是糖尿病常见的严重并发症之一,以下肢动脉粥样硬化性闭塞和循环障碍为主要特征,是糖尿病足溃疡的主要病因之一。此外,足底压力异常作为糖尿病足的独立危险因素,与PAD相互影响,协同增加糖尿病足的发生风险。本文系统阐述了糖尿病PAD与足底压力相关性的最新研究进展,探讨了二者在糖尿病足发生发展中的相互作用机制。结果表明,PAD导致的组织灌注减少、足底压力升高和异常分布共同构成了糖尿病足的病理基础。综合评估下肢动脉情况和足底压力可为糖尿病患者的风险分层、预防干预和个体化治疗提供重要依据、对降低糖尿病足溃疡和截肢风险具有重要意义。

【关键词】糖尿病;糖尿病足溃疡;外周动脉疾病;足底压力;踝肱指数

【收稿日期】2026年3月17日

【出刊日期】2026年4月25日

【DOI】10.12208/j.ijcr.20260174

The association between peripheral arterial disease and plantar pressure in diabetes: A research update

Enfang Zhu*, Haoling Cui, Zhongping Duan, Jian Mao, Wen Li*

Department of Endocrinology, Clinical Medical College of Dali University, Yunnan Provincial Third People's Hospital, Dali, Yunnan

【Abstract】 Diabetic peripheral artery disease (PAD) is one of the common complications of diabetes mellitus, primarily characterized by atherosclerotic occlusion and circulatory impairment in the lower limb arteries. It is one of the main causes of diabetic foot ulcer. Abnormal plantar pressure, as an independent risk factor for diabetic foot ulcer, interacts with PAD, synergistically increasing the risk of diabetic foot ulcer. This review summarizes recent research advances on the correlation between PAD and plantar pressure in patients with diabetes mellitus, exploring the interactive mechanisms in the development of diabetic foot. Recent studies indicate that reduced tissue perfusion due to PAD, combined with elevated and abnormally distributed plantar pressure, collectively form the pathological basis for diabetic foot ulcers. Comprehensive assessment of both lower limb arterial status and plantar pressure provides crucial evidence for risk stratification, preventive interventions, and personalized treatment in diabetic PAD patients, which are significant implications for reducing the risk of diabetic foot ulcer and amputation.

【Keywords】 Diabetes mellitus; Diabetic foot ulcer; Peripheral arterial disease; Plantar pressure; Ankle-brachial index

截止到2024年,全球约有5.89亿20-79岁的成年人患有2型糖尿病^[1],34%糖尿病患者可能会发生糖尿病足溃疡(diabetic foot ulcers, DFU)。DFU是糖尿病最严重的并发症之一,50%的DFU患者发生感染和坏疽,引起创口不愈合,进而导致下肢截肢,是非创伤性截肢最常见原因,严重影响患者的健康状况和生活质量,给社会造成沉重的经济负担。糖尿病足的主要病因包括周围神经病变,周围血管病变、足底压力异常等^[2]。

外周动脉疾病(peripheral arterial disease, PAD)是由于下肢动脉粥样硬化引起下肢动脉部分或完全闭塞,是糖尿病常见而严重的并发症。全球范围内约有2.3亿人罹患PAD,随着人口老龄化进程的加快,PAD患病率持续上升^[3]。大约50%-70%DFU患者存在PAD,严重影响下肢血液灌注,造成组织长期缺血、肌肉萎缩、神经损害、皮肤溃疡、组织缺失和器官受损,从而导致DFU患者伤口感染、创面延迟愈合、坏疽、截肢、甚

*通讯作者:朱恩芳,李文

至死亡^[4]。

此外, 足底压力异常作为 DFU 的独立危险因素日益受到重视。足底压力是指静态站立或者行走时双足垂直作用于地面的力。足底压力分布反映足的结构、功能及全身姿势控制等情况。足底压力增高对糖尿病足具有预测价值, 相关性高达 79%~90%^[5]。

由此可见, PAD 与足底压力异常是 DFU 发生发展的两大核心驱动因素, 二者并非孤立存在, 而是通过复杂的病理生理交互作用共同加剧足部组织损伤风险。深入揭示其内在关联, 不仅有助于早期识别 DFU 高危患者, 更能为构建多维度防治体系、显著降低截肢率提供科学依据。本综述将聚焦于糖尿病 PAD 与足底压力异常的协同致病机制, 系统探讨其评估方案与综合管理策略, 旨在为优化临床实践指引新方向, 也为推动相关研究注入新动力。

1 糖尿病下肢动脉疾病与足底压力的病理生理学基础

1.1 PAD 病理生理特点

糖尿病 PAD 具有独特的病理表现。与非糖尿病患者相比, 糖尿病 PAD 发病年龄更早, 病变范围更弥漫, 多累及膝以下中小动脉且常伴有血管钙化^[3]。糖尿病 PAD 的病理特征包括动脉粥样硬化斑块形成、血管中层钙化和微循环障碍。长期高血糖状态促进晚期糖基化终产物积累, 通过激活转录因子核因子 (NF- κ B)、加剧炎症反应、增强氧化应激等机制导致血管内皮损伤和功能障碍, 引发血管内动脉粥样硬化斑块形成, 最终导致血管闭塞和血栓形成, 致使组织缺血缺氧和营养障碍, 最终引起间歇性跛行、肢体功能障碍、慢性肢体缺血和急性肢体缺血等临床表现^[6]。

1.2 足底压力异常的形成机制

足底压力升高主要与糖尿病周围神经病变、骨关节畸形、足底软组织结构改变和血管疾病等相关。

1.2.1 糖尿病周围神经病变

糖尿病周围神经病变是导致足底压力异常最关键的始动因素。高血糖引起运动神经、感觉神经和自主神经功能障碍^[7], 导致肌肉萎缩 (尤其是伸肌)、保护性感觉 (针刺痛觉、温度觉等) 缺失、感觉异常 (感觉过敏或减退)、汗液分泌减少、皮肤干燥皲裂、微血管舒缩功能障碍等, 导致难以察觉的足部轻微损伤发生, 患者足部反复受伤而不自知, 并造成伸屈肌收缩力不平衡, 足部畸形 (如拇趾外翻、爪/锤状趾), 引起足底压力异常升高和 (或) 异常分布^[7,8]。研究表明, 糖尿病并发周围神经病变患者与无周围神经病变的患者相

比, 足底压力更高, 且随着周围神经病变严重程度加深, 病人前足与后足压力比值会逐渐增大^[5]。Duan 和马君等^[9,10]研究表明糖尿病合并周围神经病变的糖尿病足患者足底除中足区域外, 大部分区域压力峰值均高于正常人, 且与神经传导速率呈负相关。赵婷丽等^[11]研究证实, 足底压力参数 (峰值压力、高压百分比、压力中心) 与胫神经 mNCV、CMAP 及腓浅神经 sNCV、SNAP 呈负相关, 接触面积与上述指标呈正相关。提示糖尿病患者足底压力改变为渐进过程, DPN 可加速该进程且对其有独立影响。

1.2.2 骨关节畸形

周围神经病变可引起踝关节背屈和第一跖趾关节活动受限以及足部结构性畸形 (如夏科关节病) 同样会引起足底压力升高及分布异常, 从而导致关节破坏和组织损伤^[12]。此外, 锤状趾畸形会导致受影响脚趾位置的压力增加, Andersen 等^[13]研究发现, 对糖尿病锤状趾患者行屈肌腱切断术可显著降低锤状趾足趾区域的平均峰值压力、最大峰值压力以及压力-时间积分, 有利于糖尿病足创口愈合。

1.2.3 足底软组织结构改变

高足底压力使足部胼胝增厚, 增加对下层软组织的压力, 使足底软组织厚度减低, 导致足底局部损伤和溃疡发生并延缓溃疡的愈合^[14]。此外, Bus 等^[15]研究发现, 与健康对照组相比, 糖尿病合并神经病变患者足跟下脂肪垫功能受损, 脂肪信号降低, 足底峰值压力升高, 可能增加糖尿病患者发生足底溃疡的风险。

1.3 PAD 与足底压力异常的潜在交汇点

糖尿病 PAD 与足底压力异常并非孤立存在, 而是存在复杂的病理生理关联和相互作用, 而周围神经病变在此过程中扮演重要角色 (图 1)。缺血对神经的影响表现为 PAD 可引起缺血性下肢肌肉内神经-肌肉接头结构显著退化, 加剧神经营养障碍, 从而导致下肢骨骼肌功能障碍, 间接增加足底压力和改变足底压力分布^[16]。而 PAD 引起的缺血性疼痛对步态的影响表现为间歇性跛行和静息痛, 患者为减轻疼痛可能采取代偿性步态, 从而影响足底压力分布及步态模式^[17]。

图 1 中高血糖作为始动因素, 通过氧化应激、炎症反应及代谢紊乱等多种病理生理机制, 诱发周围神经病变与下肢动脉病变。其中, 神经病变导致足部保护性感觉丧失、肌肉萎缩和足部畸形; 外周动脉疾病则引起下肢血液循环障碍。这些病变共同作用, 加剧足底生物力学异常与局部压力分布失衡, 最终增加糖尿病足溃疡的发生风险。

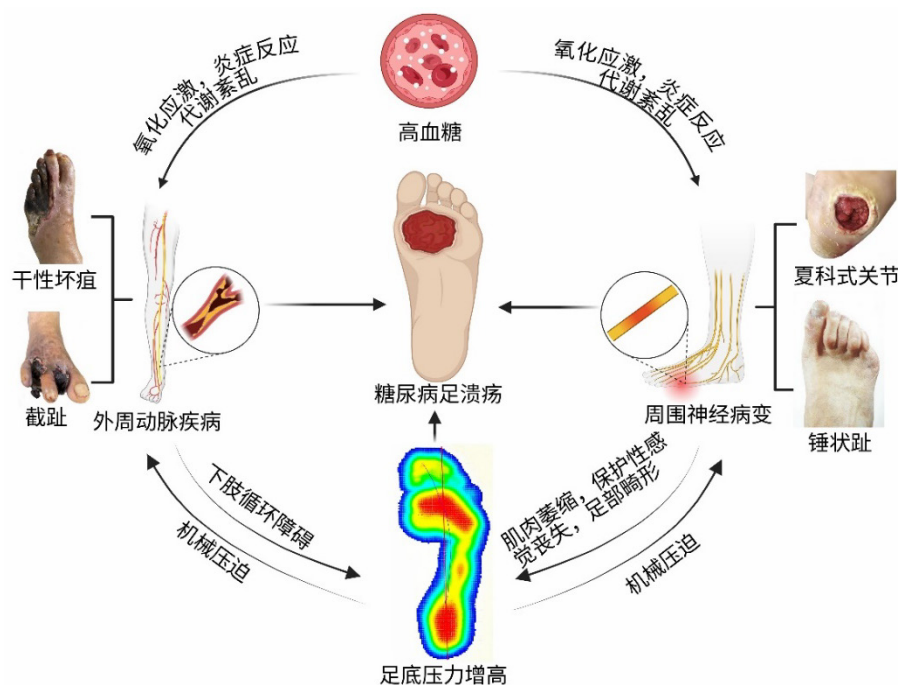


图1 糖尿病足的病因以及各病因之间的关系

图片来源: 高血糖、外周动脉疾病、糖尿病足溃疡、周围神经病变四个图源于 Biorender 网站素材库, 干性坏疽、截趾、夏科式关节、锤状趾图片源于大理大学第二附属医院内分泌科患者足部照片, 足底压力增高图片来源于大理大学第二附属医院内分泌科患者足底压力测量报告。

2 PAD 与足底压力的相关性研究

目前对于二者的相关性研究较少, 但既往研究已证实糖尿病 PAD 与足底压力之间存在复杂的相互作用关系。一方面, PAD 导致的血流灌注减少降低组织对机械应力的抵抗能力和修复能力; 另一方面, 异常增高的足底压力压迫微血管, 加重局部缺血, 形成了恶性循环^[18]。PAD 所致慢性缺血加速足底软组织退变。当胫后动脉、腓动脉等远端血管闭塞时, 足底脂肪垫因营养匮乏而逐渐萎缩, 失去缓冲震荡的弹性功能, 导致足底直接承受的峰值压力较健康人升高。Cao 等^[19]研究显示 PAD 患者前足外侧区域的峰值压力显著增加。PAD 导致氧气和营养物质的供应减少, 引起第 1、5 跖骨头下方足底软组织厚度减小。升高的重复性机械应力反过来又增加了微血管的脆性, 使血流量减少, 形成恶性循环。此外, 缺血还会削弱足弓韧带的力学稳定性, 使中足接触面积减少, 进一步放大前足负荷。Zhang 等^[20]报道了糖尿病患者第一跖骨头的峰值压力达到 20N (254.6 kPa) 时足底软组织血流即出现下降, 反映了糖尿病患者足底皮肤对压力的抵抗能力减弱。此外, Duan 等^[21]人研究发现, 糖尿病患者不同的足底时间-压力积分对足底皮肤血流的影响不同, 在低时间-压力积分运动条件下, 足底血流反应正常; 在高时间-压力积分运

动条件下, 足底血流反应受损。因此, 推荐糖尿病患者采用低时间-压力积分的运动方式, 同时注意休息, 使血管有充分的舒张反应, 从而降低 DFU 的发生风险。

3 评估与检测方法

3.1 PAD 的评估

对糖尿病 PAD 的全面评估是管理糖尿病足风险的基础, 评估包括详细的病史询问、体格检查和辅助检查。体格检查至关重要, 主要包括足背动脉和胫后动脉的触诊、皮肤颜色、皮温、毛发脱落情况等^[22]。PAD 的辅助检查包括下肢动脉数字减影血管造影 (DSA)、计算机断层扫描血管造影 (CTA)、磁共振血管造影 (MRA)、下肢动脉彩色多普勒、踝肱指数 (ankle-brachial index, ABI)、趾肱指数 (TBI)、经皮氧分压等^[23]。ABI 是一种通过测量踝部动脉 (胫后动脉或足背动脉) 收缩压与肱动脉收缩压之比评估 PAD 的无创检测方法。临床上因 ABI 的可操作性、无创性和经济性高, 敏感度和特异度均 >90%, 故被用作筛查 PAD 的首选方法。ABI 的正常值为 1.0~1.4, 当 ABI ≤ 0.9 时可诊断为 PAD, 当 ABI > 1.4 时提示合并血管钙化^[24]。

3.2 足底压力的测量

测量和分析足底压力可以获取人体在各体态和运动下的生理、病理力学参数和机能参数, 对临床医学诊

断、疾病程度测定、术后疗效评价、康复研究及生物力学均有重要意义^[25,26]。足底压力测量主要采用足底压力步态评估系统和鞋内压力系统。压力平板用于实验室环境下分析步态周期中的压力分布,而鞋内系统可用于日常活动中的长期监测^[27]。常用的足底压力参数包括峰值压力(足底特定区域在步态周期中的最高压力值)、峰值力(足底表面受到的接触力)、峰值压强(垂直作用于单位面积上的最大力)、接触时间(足部与支撑面接触的持续时间)、接触面积(足部与支撑面接触的总面积)、压力-时间积分(压力随时间的累积值)等,这些参数共同反映足部在静态和动态状态下的生物力学特征,为评估糖尿病患者的足部负荷提供量化指标^[28]。

4 治疗与预防

4.1 改善下肢血流

目前, PAD 的治疗包括生活方式干预(有监督的功能锻炼、戒烟、地中海饮食等)、药物治疗(抗血小板聚集药、调脂药、降糖药、降压药等),以及血运重建手术(血管内介入治疗、开放手术)等。对于严重 PAD 患者,血运重建手术是改善下肢动脉灌注的根本措施^[23]。

4.2 减轻足底压力

足底卸压是预防和治疗足溃疡的核心策略,减压鞋垫或减压鞋具对高足底压力的有效卸压可以改变压力-时间积分和足底压力分布,使 DFU 复发风险降低 46%-65%,有效预防 DFU 的发生和复发,且有助于 DFU 的愈合^[29]。外科手术减压在降低足底压力和 DFU 发生率方面同样发挥重要作用。手术方式包括骨矫形术、周围神经松解术和血管重建术等。其中,周围神经松解术可以缓解糖尿病周围神经病变,进而缓解糖尿病患者足底压力^[30]。

5 总结与展望

糖尿病 PAD 与异常足底压力密切相关,二者共同促进 DFU 发生发展。PAD 导致的组织灌注减少降低皮肤和组织对机械应力的抵抗能力,而足底压力异常进一步加重足底局部组织损伤,形成恶性循环。综合评估 PAD 和足底压力为预防 DFU 的发生和复发提供重要依据。尽管如此,糖尿病 PAD 患者足底压力管理仍面临诸多挑战:1)足底压力检测结果的一致性欠佳:不同测量仪器的敏感性和特异性的差异性大,使用不同仪器测量及多次测量的结果可能不一致;2)中国人群数据缺乏:虽然足底压力的重要性逐渐得到糖尿病足相关临床科室的重视,但是尚未建立我国人群足底压力正常参考值和溃疡发生截点值;3)测量设备及治疗

用具的普及性不足:足底压力检测设备及治疗性鞋具因价格昂贵,在基层医院的临床应用受到限制。因此,未来的研究方向可能包括以下几个方面:1)技术创新:开发低成本、高精度的足底压力检测设备;2)多学科协作:建立整合内分泌科、骨科、血管外科和康复治疗师的综合管理团队;3)个体化治疗:基于 PAD 风险分层和足底压力特征的精准干预策略;4)长期随访:建立患者信息库,评估长期疗效。总之,深入了解糖尿病 PAD 与足底压力的相关性,开发有效的预防和干预策略,对降低 DFU 的发生率和截肢风险、改善患者生活质量具有重要临床意义。

参考文献

- [1] IDF diabetes atlas 11th edition 2025 Source Nephrol Dial Transplant SO 2025[EB/OL]. (2025-08-29)[2025-12-30]. <https://diabetesatlas.org/resources/idf-diabetes-atlas-2025/>.
- [2] ARMSTRONG D G, TAN T W, BOULTON A J M, et al. Diabetic Foot Ulcers: A Review[J]. JAMA, 2023, 330(1): 62-75.
- [3] CRIQUI M H, MATSUSHITA K, ABOYANS V, et al. Lower Extremity Peripheral Artery Disease: Contemporary Epidemiology, Management Gaps, and Future Directions: A Scientific Statement From the American Heart Association[J]. Circulation, 2021, 144(9): e171-e191.
- [4] FITRIDGE R, CHUTER V, MILLS J, et al. The intersocietal IWGDF, ESVS, SVS guidelines on peripheral artery disease in people with diabetes and a foot ulcer[J]. Diabetes/Metabolism Research and Reviews, 2024, 40(3): e3686.
- [5] 张敏娜, 周佩如. 糖尿病病人足底压力的相关研究进展[J]. 循证护理, 2021, 7(10): 1323-1327.
- [6] ATHAVALE A, FUKAYAE, LEEPER N J. Peripheral Artery Disease: Molecular Mechanisms and Novel Therapies[J]. Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology, 2024, 44(6): 1165-1170.
- [7] SLOAN G. Pathogenesis, diagnosis and clinical management of diabetic sensorimotor peripheral neuropathy[J]. Nature Reviews Endocrinology, 2021, 17(7): 400-420.
- [8] JEONG H J. Midfoot and ankle motion during heel rise and gait are related in people with diabetes and peripheral neuropathy[J]. Gait & Posture, 2021, 84(2021): 38-44.
- [9] DUAN Y, REN W, LIU W, et al. Relationship Between

- Plantar Tissue Hardness and Plantar Pressure Distributions in People With Diabetic Peripheral Neuropathy[J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 10: 836018.
- [10] 马君, 吴燕林, 杜延芬, 等. 糖尿病合并周围神经病变患者足底压力变化与神经传导及代谢指标的关系[J]. *西部医学*, 2022, 34(10): 1492-1496.
- [11] 赵婷丽, 高妍, 贾兴泽, 等. 糖尿病周围神经病变患者足底压力参数变化与神经传导速度的关系[J]. *卒中与神经疾病*, 2023, 30(4): 388-394.
- [12] MSC, ANASTASIA STERGIOTI, MD, KONSTANTINOS MANGANAS, MD, EVANGELIA TZERAVINI, et al. Charcot Neuro-Osteoarthropathy in Diabetes: Implications for Diabetic Foot Ulcers, Amputations, and Survival[J]. *The International Journal of Lower Extremity Wounds*, 2025, 24(4): 781-788.
- [13] ANDERSEN J A, RASMUSSEN A, ENGBERG S, et al. Effect of flexor tendon tenotomy of the diabetic hammertoe on plantar pressure: a randomized controlled trial[J]. *BMJ Open Diabetes Res Care*, 2024, 12(6): e004398.
- [14] ALLAN D. Increased exposure to loading is associated with increased plantar soft tissue hardness in people with diabetes and neuropathy[J]. *Diabetes Res Clin Pract*, 2022, 187: 109865.
- [15] BUS S A. Changes in sub-calcaneal fat pad composition and their association with dynamic plantar foot pressure in people with diabetic neuropathy[J]. *Clinical Biomechanics*, 2021, 88: 105441.
- [16] TU H, HAKIM A H, KIM J K, et al. Neuromuscular Junction Damage in the Calf Muscles of Patients With Advanced Peripheral Artery Disease[J]. *Neuropathology and Applied Neurobiology*, 2025, 51: e70008.
- [17] BAPAT G M, BASHIR A Z, MALCOLM P, et al. A biomechanical perspective on walking in patients with peripheral artery disease[J]. *Vascular Medicine*, 2023, 28(1): 77-84.
- [18] ZHANG Z, CHEN M, YANG G, et al. Dynamic Microcirculation Characteristics of Plantar Skin Under Metatarsal Head of Human Foot in Response to Life - Like Pressure Stimulus[J]. *Microcirculation*, 2024, 31(5): e12860.
- [19] CAO Z, WANG F, LI X, et al. Characteristics of Plantar Pressure Distribution in Diabetes with or without Diabetic Peripheral Neuropathy and Peripheral Arterial Disease[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022, 2022: 1-8.
- [20] ZHANG Z. Dynamic microcirculation characteristics of plantar skin in response to life-like pressure in diabetes patients[J]. *Journal of Tissue Viability*, 2025, 34(4): 100933-100941.
- [21] DUAN Y. The effects of different accumulated pressure-time integral stimuli on plantar blood flow in people with diabetes mellitus[J]. *BMC Musculoskelet Disord*, 2021, 22(1): 21-27.
- [22] MANDAGLIO-COLLADOS D, MARÍN F, RIVERA-CARAVACA J M. Peripheral artery disease: Update on etiology, pathophysiology, diagnosis and treatment[J]. *Medicina Clínica (English Edition)*, 2023, 161(8): 344-350.
- [23] ABOYANS V, CANONICO, MARIO ENRICO, CHASTAINGT, LUCIE, et al. Peripheral artery disease[J]. *Nature Reviews Disease Primers*, 2025, 11(1): 1-19.
- [24] YANAMANDALA M, GOUDOT G, GERHARD-HERMAN M D. Peripheral artery disease and outcomes: how can we improve risk prediction?[J]. *European Heart Journal*, 2024, 45(19): 1750-1752.
- [25] ARZEHGAR A. An overview of plantar pressure distribution measurements and its applications in health and medicine[J]. *Gait & Posture*, 2025, 117: 235-244.
- [26] GARCÍA-MADRID M, GARCÍA-ÁLVAREZ Y, SANZ-CORBALÁN I, et al. Predictive value of forefoot plantar pressure to predict reulceration in patients at high risk[J]. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 2022, 189: 109976.
- [27] CASTRO-MARTINS P, MARQUES A, COELHO L, et al. Plantar pressure thresholds as a strategy to prevent diabetic foot ulcers: A systematic review[J]. *Heliyon*, 2024, 10(4): e26161.
- [28] 杨佳英, 卢熊伟, 宋雅伟. Footscan 测量正常青年人足底压力参数的可靠性分析[J]. *中国皮革*, 2024, 53(2): 77-87.
- [29] MARTIN J K, DAVIS B L. Diabetic Foot Considerations Related to Plantar Pressures and Shear[J]. *Foot and Ankle Clinics*, 2023, 28(1): 13-25.
- [30] 鹿亮, 孙怡宁, 马祖长. 糖尿病足底压力研究进展[J]. *中华骨与关节外科杂志*, 2024, 17(6): 566-572.
- 版权声明:** ©2026 作者与开放获取期刊研究中心 (OAJRC) 所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS