

• 慢病专题:心脑血管疾病 •

基于智能康复技术的脑卒中上肢功能康复研究进展^{*}李承陈¹, 杨晓荣¹, 李佳妮², 周文智^{1△}

(1. 成都市妇女儿童中心医院康复科, 四川 成都 610031; 2. 重庆医科大学

附属第二医院神经内科, 重庆 400010)

[摘要] 脑卒中是具有极高致残率和较高死亡率的脑血管疾病。脑卒中后上肢运动功能障碍给患者的生活自理能力带来了很大影响。随着康复医学技术的持续发展, 智能康复技术应用于脑卒中上肢功能康复训练的研究越来越多。该文就脑机接口、电刺激、虚拟现实和康复机器人在上肢功能康复中的研究进展进行了综述。

[关键词] 脑卒中; 脑机接口; 电刺激; 虚拟现实; 康复机器人

DOI:10.3969/j.issn.1009-5519.2025.12.016

中图法分类号:R743.3

文章编号:1009-5519(2025)12-2807-05

文献标识码:A

**Research progress on upper limb functional rehabilitation of stroke
based on intelligent rehabilitation technology^{*}**

LI Chengchen¹, YANG Xiaorong¹, LI Jiani², ZHOU Wenzhi^{1△}

(1. Department of Rehabilitation, Chengdu Women and Children's Center Hospital, Chengdu,

Sichuan 610031, China; 2. Department of Neurology, the Second Affiliated

Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing 400010, China)

[Abstract] **Objective** Stroke is a cerebrovascular disease with extremely high disability and mortality rates. Post stroke upper limb motor dysfunction has a significant impact on patients' ability to live independently. With the continuous development of rehabilitation medicine technology, there is an increasing amount of research on the application of intelligent rehabilitation technology in upper limb functional rehabilitation training for stroke patients. The article reviews the research progress of brain computer interfaces, electrical stimulation, virtual reality, and rehabilitation robots in upper limb functional rehabilitation.

[Key words] Stroke; Brain computer interface; Electrical stimulation; Virtual reality; Rehabilitation robot

脑卒中严重影响患者的日常生活能力, 会导致长期功能障碍, 甚至使患者丧失独立生活能力。近年来, 针对脑卒中后认知及运动障碍的康复方案不断涌现, 旨在促进功能恢复。研究表明, 超过 80% 的脑卒中幸存者存在上肢运动功能障碍^[1], 需长期康复干预以改善肢体运动能力。有效的上肢功能康复依赖于高强度、重复性训练, 以增强自主运动控制能力, 同时减少异常代偿动作。本文系统综述了智能康复技术在脑卒中上肢功能康复中的应用研究进展, 并探讨了未来发展趋势与挑战。

1 脑机接口(BCI)

在过去 20 年中, 临床医生、神经科学家和工程师们齐心协力, 将机器人系统与患者试图主动产生运动

或想象运动动作的大脑信号相结合, 以提高脑卒中康复的疗效和有效性。BCI 是一种人工智能系统, 其通过解码用户意图, 直接在大脑与设备间建立通信, 绕过了外周神经系统的正常传出通路。BCI 通过测量大脑活动并将其转换为通常由计算机可执行的命令来识别用户意图^[1]。

基于 BCI 的机器人系统的康复策略是通过神经或生理信号识别患者移动或执行任务的意图, 然后使用机器人设备模仿治疗师在标准治疗过程中的动作的方式提供辅助力量, 这一过程促进了完整大脑区域内依赖使用的神经可塑性, 并依赖于启动和实现特定目标的反复经验, 使患者积极参与治疗练习并成为运动再学习过程的 1 个组成部分^[2]。一项纳入 40 例重

^{*} 基金项目: 重庆市科卫联合医学科研项目(2024QNXM043)。

作者简介: 李承陈(1992—), 本科, 主管技师, 主要从事儿童康复研究。 △ 通信作者, E-mail: 695396319@qq.com。

度上肢瘫痪患者的研究未发现 BCI 组的康复效果优于对照组^[3]。但 WANG 等^[4]在一项纳入了 296 例缺血性脑卒中患者的随机对照试验中发现,在传统康复训练的基础上,BCI 康复训练有效改善了随机分组后 1 个月的患者 Fugl-Meyer 上肢评估(FMA-UE)评分,提示 BCI 康复训练可以进一步提高上肢运动功能。LIU 等^[5]的研究也得到了相似的结果。MA 等^[6]通过功能性磁共振成像发现,FMA-UE 评分的改善与对侧中央前回的神活动增强显著相关^[6]。CARIA 等^[7]研究证实,BCI 训练不仅能增强同侧大脑活动,还能促进运动感觉皮层的功能重组。目前证据表明,虽然 BCI 在短期内可有效改善上肢功能,但其长期疗效仍需更多研究验证^[8]。未来研究应关注个体化治疗方案和长期随访,以明确 BCI 在脑卒中康复中的最佳应用策略。

2 电刺激

能性电刺激是指用一定强度的低频脉冲电流,通过预先设定的程序来刺激一组或多组肌肉,诱发肌肉运动或模拟正常的自主运动,同时,通过长期的康复训练,能够刺激感觉和运动通路神经信号的输入,促进大脑功能的重组。功能性电刺激的各种参数(包括刺激部位、频率、波形、幅度、脉宽等)对于运动干预效果及患者的安全都是至关重要的^[9-10]。用于上肢康复的神经肌肉电刺激(NMES)可以激活受损肌肉的收缩,产生肢体运动,并有效增强脑卒中后运动再学习的肌肉力量和感觉反馈。然而,该疗法无法主动提高肌肉力量,因此常作为康复治疗辅助方案。多项研究已经报道了康复训练结合 NMES 可以改善上肢功能^[11-13]。此外,由于精细运动控制中的刺激精度有限,NMES 很难对运动进行精确控制,如运动范围(ROM)和轨迹。联合 NMES 机器人进行上肢康复比仅使用 NMES 或仅使用机器人更有效。NMES 的整合进入机器人可以触发目标肌肉的生物致动,以减少机器人部件对机械支撑的需求。NAM 等^[1]在神经外肌骨骼的设计中整合了软气动肌肉、外骨骼伸展和 NMES,以帮助慢性脑卒中患者在肘部、手腕和手指进行上肢体育锻炼。在慢性脑卒中患者的试验中发现,肘、腕和手指的自主运动功能和肌肉痉挛的缓解得到了显著改善,同时训练后整个上肢的肌肉协调性显著改善^[1]。CREMA 等^[14]将机器人手套和新型神经肌肉电刺激系统结合,结果发现通过促进感觉和运动功能的恢复可提高慢性脑卒中患者的生活质量。

经皮神经电刺激(TENES)主要刺激感觉纤维,缓解疼痛。从机制上来讲,在外周水平,TENES 可以降低伸展反射的幅度,并延长反射和伸展反射的潜伏期;在皮质水平,可以刺激与被刺激的身体部位相对

应的皮质区域,并引起受损半球的更大激活。在改善上肢功能方面,NMES 的效果似乎优于 TENES^[15]。值得注意的是,双侧电刺激策略展现出独特的治疗优势。相较于单侧刺激,双侧 TENS 可以从非轻瘫侧提供额外的感觉输入,通过重新平衡半球间抑制来减少轻瘫,激活完整和受损半球中的同源神经网络。临床研究证实,双侧 TENS 在改善 FMA-UE 评分方面显著优于单侧刺激^[16]。

除了 NMES、TENES 2 种常见的电刺激以外,近年来多种新型电刺激技术因其独特的神经调控作用而受到关注。研究表明,经皮耳迷走神经电刺激可通过激活胆碱能抗炎通路增强神经可塑性^[17-18];前庭电刺激则通过调节前庭-皮层通路改善姿势控制和运动功能^[19];而经颅电刺激包括经颅直流电刺激和经颅交流电刺激等,能够直接调节皮层兴奋性,促进运动功能重组^[20-21]。这些新兴技术为脑卒中上肢康复提供了多样化的神经调控策略。

3 虚拟现实(VR)

VR 允许用户以自然的方式与计算机生成的环境“交互”并“沉浸”其中。通过使用游戏化的方法,VR 提供了一个很好的机会,可以创造新的有益和更生态的环境,提高患者的参与度、积极性和治疗依从性^[22]。根据用户体验到的沉浸程度,至少可以区分 3 种类型的 VR 设备:非沉浸式 VR(NIVR)、半沉浸式虚拟现实(SIVR)和沉浸式虚拟现实(IVR)。NIVR 使用计算机或控制台游戏系统和 2D 接口设备(鼠标和键盘或游戏手柄/操纵杆)进行管理。在 NIVR 中,用户无需完全沉浸在虚拟环境中即可感知现实世界。SIVR 通常由 1 个投影虚拟现实的大屏幕和高级接口设备(如网络手套、触觉反馈设备或红外摄像头)组成,用户可以通过这些设备与虚拟现实交互,同时继续感知现实世界,实现部分沉浸感和强烈的临场感。IVR 系统由头戴式显示器和 3D 输入设备组成,用户可以在 VR 控制器或数据手套中与之交互。在 IVR 中,用户完全沉浸在可以与之交互的虚拟企业中,这是该技术与其他技术不同的一个特征^[23]。

基于 VR 的治疗对改善上肢损伤和日常生活活动表现具有积极作用。VR 对改善身体、心理和社会功能有显著影响,同时手臂的活动水平也有所提高^[24-25]。值得注意的是,一些研究发现,就整体表现而言,VR 与传统疗法相比无显著优势。ADIE 等^[26]将 240 例手臂无力患者随机分为每天使用 VR 设备进行锻炼组、在家进行简单的手臂锻炼组,结果显示,2 组上肢运动研究量表评分和其他指标无著差异。ROSIK 等^[27]采用眩晕症状量表进行研究时发现了类似的结果,几乎没有差异。与此相反,许多研究表

明,基于 VR 的康复系统优于传统方法。HO 等^[28]在 1 项针对 100 例脑卒中患者的调查中发现,基于 VR 的治疗显著改善了美国国立卫生院卒中量表(NIH-SS)及改良的分级量表(mRS)评分。同样,JOO 等^[29]研究发现,捷成-泰勒手功能测试(JTT)和密歇根手部结果问卷(MHQ)评分有显著提高。

移动应用程序是虚拟现实的一种形式,具有移动性、提醒和视频等多功能功能,并且能够让患者自主治疗^[30]。一些具有临床有效性的脑卒中康复移动应用程序可提高手指的灵活性、运动的坚持性,用于上肢康复^[31-33]。移动应用程序与面对面治疗相结合,可用于改善脑卒中康复,特别是运动性轻瘫、失语症。而且随着智能手机的普及,设备的可访问性和技术利用的舒适性越来越高,移动应用程序也成为向患者提供干预的一种越来越受欢迎的手段^[34]。移动应用程序打破时空限制,有助于实现脑卒中患者的远程康复锻炼的实时监测、自我管理^[35]。

4 康复机器人

为了帮助脑卒中患者康复,一系列上肢康复机器人已经开发出来,而且每种机器人类型都有其独特优势。机器人灵活性和刚性的结合,以及自由度的变化,增强了这些技术的多功能性。在上肢康复领域,机器人主要分为 3 类:末端执行器、外骨骼机器人和为康复目的设计的矫形器^[36]。考虑机器人参数、训练部位及训练时间长方面存在的差异,不同的研究呈现不一致的结果。DOBKIN 等^[37]在 1 项应用外骨骼辅助拟人化运动训练(EAMT)的研究中发现,上肢机器人辅助康复与常规疗法相比,机器人的疗效并未得到充分体现。多中心随机对照研究发现,与常规自我训练相比,机器人辅助训练并未改善上肢功能,但在某些人群中,与常规治疗相结合可能是有效的^[38]。机器人辅助脑卒中上肢康复的疗效在多项研究中得到了认可。1 项单中心研究报告显示,在亚急性脑卒中中使用 Kinarm 外骨骼进行康复,可以使参与者在康复任务上取得持续改善。Kinarm 机器人治疗任务可能会改善脑卒中后的一些临床结果^[39]。CHEN 等^[40]研究发现,EAMT 可以通过重复练习类人动作对亚急性脑卒中患者发挥作用。尽管多项研究结果表明,机器人辅助在部分患者的康复过程中取得了较好疗效,但有必要进一步研究其长期效果和范式优化。而作为传统康复治疗的补充,机器人辅助能减轻康复治疗师的工作量,优化医疗资源配置,进而使更多的患者受益^[41]。

5 小 结

机器人技术、虚拟现实和功能性电刺激等康复技术已被证明可以单独有效地改善脑卒中患者上肢功

能。与传统康复匹配疗法相比,不同模式的组合可能比单独使用每种模式对脑卒中恢复的影响更大。在临床实践中,治疗师可根据初步的临床测量结果为患者开具个性化上肢锻炼处方,且结合多种模式,也许更有利于患者康复^[42]。智能康复技术的发展使医生和患者均能获益,一方面可减轻医生的工作量,另一方面某些智能康复技术如 VR、机器人等可以使患者实现家庭环境下的康复。然而智能康复技术的推广及应用依然面临挑战:智能康复技术需要借助设备完成,设备价格是其挑战之一;根据患者损伤程度评估各模式的治疗策略及治疗时间需要更多的探索。未来亟须开展更多高质量的临床研究和技术创新来实现其转化应用价值,以及验证不同技术组合在脑卒中患者上肢功能康复中的有效性,并尽可能阐明其作用机制。

目前,智能康复技术的临床研究主要采用医生主导的康复方案制定模式,以评估其在脑卒中上肢功能康复中的疗效。然而,随着人工智能技术的突破性进展,通过将智能评估系统整合至现有康复平台,可实现康复过程的多维度参数实时监测,并基于这些参数动态优化治疗方案,形成动态处方系统,最终实现个性化康复。未来也需要更多的临床研究来深入探究智能评估系统及动态处方系统在康复过程中的应用价值。

参考文献

- [1] NAM C, RONG W, LI W, et al. An exoneuromusculoskeletal for self-help upper limb rehabilitation after stroke [J]. *Soft Robotics*, 2022, 9(1): 14-35.
- [2] BANIQUED P D E, STANYER E C, AWAI S M, et al. Brain-computer interface robotics for hand rehabilitation after stroke: A systematic review [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1): 15.
- [3] BRUNNER I, LUNDQUIST C B, PEDERSEN A R, et al. Brain computer interface training with motor imagery and functional electrical stimulation for patients with severe upper limb paresis after stroke: a randomized controlled pilot trial [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1): 10.
- [4] WANG A, TIAN X, JIANG D, et al. Rehabilitation with brain-computer interface and upper limb motor function in ischemic stroke: A randomized controlled trial [J]. *Med*, 2024, 5(6): 559-569.
- [5] LIU X, ZHANG W, LI W, et al. Effects of motor imagery based brain-computer interface on upper limb function and attention in stroke patients with hemiplegia: A randomized controlled trial [J]. *BMC Neurology*, 2023, 23(1): 136-136.
- [6] MA Z Z, WU J J, CAO Z, et al. Motor imagery-based

brain-computer interface rehabilitation programs enhance upper extremity performance and cortical activation in stroke patients[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2024, 21(1):91.

[7] CARIA A, DA ROCHA J L D, GALLITTO G, et al. Brain-machine interface induced morpho-functional remodeling of the neural motor system in severe chronic stroke[J]. *Neurotherapeutics*, 2020, 17(2):635-650.

[8] BAI Z, FONG K N K, ZHANG J J, et al. Immediate and long-term effects of BCI-based rehabilitation of the upper extremity after stroke: A systematic review and meta-analysis[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2020, 17(1):57.

[9] 王瑶, 李雨涵, 崔红岩, 等. 基于脑机接口的功能性电刺激研究综述[J]. *生物医学工程学杂志*, 2024:1-6.

[10] SENTANDREU-MANÓ T, TOMÁS J M, RICARDO SALOM TERRÁDEZ J. A randomised clinical trial comparing 35 Hz versus 50 Hz frequency stimulation effects on hand motor recovery in older adults after stroke[J]. *Scie Rep*, 2021, 11(1):9131.

[11] 陈露, 华隽, 俞青. 悬吊训练结合功能电刺激对脑卒中偏瘫上肢功能的影响[J]. *空军军医大学学报*, 2024, 45(8):935-939.

[12] 郭博远, 吴丹, 王畅, 等. 功能性电刺激联合体感模拟训练对脑卒中后偏瘫患者上肢功能的影响[J]. *中南医学科学杂志*, 2023, 51(6):876-878.

[13] 张露丁, 唐艳. 神经肌肉电刺激联合强制性运动疗法在脑卒中偏瘫患者中的应用效果[J]. *医疗装备*, 2024, 37(11):56-59.

[14] CREMA A, BASSOLINO M, GUANZIROLI E, et al. Neuromuscular electrical stimulation restores upper limb sensory-motor functions and body representations in chronic stroke survivors[J]. *Med*, 2022, 3(1):58-74.

[15] 盛治进, 刘九玉, 常春, 等. 神经肌肉电刺激和经皮神经电刺激对脑卒中患者偏瘫肩痛及上肢运动功能康复影响的对比研究[J]. *中国康复医学杂志*, 2020, 35(5):604-607.

[16] CHEN P, LIU T W, KWONG P W H, et al. Bilateral transcutaneous electrical nerve stimulation improves upper limb motor recovery in stroke: A randomized controlled trial[J]. *Stroke*, 2022, 53(4):1134-1140.

[17] 马丽, 封亮, 赵曦, 等. 经皮耳迷走神经电刺激对缺血性卒中患者的康复疗效观察[J]. *同济大学学报(医学版)*, 2024, 45(3):404-410.

[18] BADRAN B W, PENG X, BAKER-VOGEL B, et al. Motor activated auricular vagus nerve stimulation as a potential neuromodulation approach for post-stroke motor rehabilitation: A pilot study[J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2023, 37(6):374-383.

[19] 代永利, 王利凯, 王亚娟, 等. 前庭电刺激联合闭链功能训练对脑卒中患者下肢运动和平衡功能的影响[J]. *中国康复*, 2024, 39(5):259-263.

[20] HSU S P, LU C F, LIN B F, et al. Effects of bihemispheric transcranial direct current stimulation on motor recovery in subacute stroke patients: a double-blind, randomized sham-controlled trial[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1):27.

[21] SOLANKI D, REZAAE Z, DUTTA A, et al. Investigating the feasibility of cerebellar transcranial direct current stimulation to facilitate post-stroke overground gait performance in chronic stroke: A partial least-squares regression approach [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1):18.

[22] ADERINTO N, OLATUNJI G, ABDULBASIT M O, et al. Exploring the efficacy of virtual reality-based rehabilitation in stroke: A narrative review of current evidence [J]. *Ann Med*, 2023, 55(2):2285907.

[23] SALATINO A, ZAVATTARO C, GAMMERI R, et al. Virtual reality rehabilitation for unilateral spatial neglect: A systematic review of immersive, semi-immersive and non-immersive techniques [J]. *Neurosci Biobehav R*, 2023, 152(1):105248.

[24] LEONG S C, TANG Y M, TOH F M, et al. Examining the effectiveness of virtual, augmented, and mixed reality (VAMR) therapy for upper limb recovery and activities of daily living in stroke patients: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1):93.

[25] DEMECO A, ZOLA L, FRIZZIERO A, et al. Immersive virtual reality in post-stroke rehabilitation: A systematic review[J]. *Sensors (Basel)*, 2023, 23(3):1712.

[26] ADIE K, SCHOFIELD C, BERROW M, et al. Does the use of Nintendo Wii Sports™ improve arm function? Trial of Wii™ in Stroke: a randomized controlled trial and economics analysis[J]. *Clin Rehabil*, 2017, 31(2):173-185.

[27] ROSIAK O, KRAJEWSKI K, WOSZCZAK M, et al. Evaluation of the effectiveness of a virtual reality-based exercise program for unilateral peripheral vestibular deficit[J]. *J Vestib Res*, 2018, 28(5):409-415.

[28] HO T H, YANG F C, LIN R C, et al. Impact of virtual reality-based rehabilitation on functional outcomes in patients with acute stroke: a retrospective case-matched study[J]. *J Neurol*, 2019, 266(3):589-597.

[29] JOO S Y, CHO Y S, LEE S Y, et al. Effects of virtual reality-based rehabilitation on burned hands: A prospective, randomized, single-blind study [J]. *J Clin Med*, 2020, 9(3):731.

[30] CHUNG B P H, CHIANG W K H, LAU H, et al. Pilot study on comparisons between the effectiveness of mobile video-guided and paper-based home exercise programs on improving exercise adherence, self-efficacy for exercise and functional outcomes of patients with stroke with 3-month follow-up: A single-blind randomized controlled trial[J]. *Hong Kong Physiother J*, 2020, 40(1):63-73.

[31] GRAU-PELLICER M, LALANZA J F, JOVELL-FERNÁNDEZ E, et al. Impact of mHealth technology on adherence to healthy PA after stroke: A randomized study [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2020, 27(5):354-368.

[32] SZETO S G, WAN H, ALAVINIA M, et al. Effect of mobile application types on stroke rehabilitation: A systematic review[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2023, 20(1):12.

[33] ZHOU X, DU M X, ZHOU L S. Use of mobile applications in post-stroke rehabilitation: A systematic review [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2018, 13:1-11.

[34] MIRALLES I, GRANELL C, DÍAZ-SANAHUJA L, et al. Smartphone apps for the treatment of mental disorders: Systematic review[J]. *Jmir Mhealth Uhealth*, 2020, 8(4):e14897.

[35] 王佳佳, 李会, 林蓓蕾, 等. 移动与智能技术在脑卒中患者远程康复锻炼中的应用进展[J]. *护理与康复*, 2024, 23(5):83-86.

[36] TSENG K C, WANG L, HSIEH C, et al. Portable robots for upper-limb rehabilitation after stroke: A systematic review and meta-analysis [J]. *Ann Med*, 2024, 56(1):2337735.

[37] DOBKIN B H, BUSZA A. Upper extremity robotic-assisted rehabilitation: Results not yet robust [J]. *Stroke*, 2023, 54(6):1474-1476.

[38] TAKASHI T, TAKAHASHI K, AMANO S, et al. Robot-assisted training as self-training for upper-limb hemiplegia in chronic stroke: A randomized controlled trial [J]. *Stroke*, 2022, 53(7):2182-2191.

[39] KEELING A B, PIITZ M, SEMRAU J A, et al. Robot enhanced stroke therapy optimizes rehabilitation (RESTORE): A pilot study[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1):10.

[40] CHEN Z J, HE C, XU J, et al. Exoskeleton-assisted anthropomorphic movement training for the upper limb after stroke: The eamt randomized trial[J]. *Stroke*, 2023, 54(6):1464-1473.

[41] 王付涛, 常立国, 吕运良, 等. 基于康复机器人技术的脑卒中后偏瘫上肢功能及生活能力训练的研究进展[J]. *上海医药*, 2024, 45(13):44-47.

[42] NOROUZI-GHEIDARI N, ARCHAMBAULT P S, MONTESILVA K, et al. Feasibility and preliminary efficacy of a combined virtual reality, robotics and electrical stimulation intervention in upper extremity stroke rehabilitation[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2021, 18(1):61.

(收稿日期:2025-03-26 修回日期:2025-08-28)

(上接第 2806 页)

[10] 胡文立, 李譔婷, 黄勇华. 中国脑小血管病诊治专家共识 2021[J]. *中国卒中杂志*, 2021, 16(7):716-726.

[11] INKERI J, TYNJÄLÄ A, FORSBLOM C, et al. Carotid intima-media thickness and arterial stiffness in relation to cerebral small vessel disease in neurologically asymptomatic individuals with type 1 diabetes[J]. *Acta Diabetol*, 2021, 58(7):929-937.

[12] HUANG Y, SONG C, HE J, et al. Research progress in endothelial cell injury and repair[J]. *Front Pharmacol*, 2022, 13:997272.

[13] LV Y, CHENG X, DONG Q. SGLT1 and SGLT2 inhibition, circulating metabolites, and cerebral small vessel disease: A mediation mendelian randomization study[J]. *Cardiovasc Diabetol*, 2024, 23(1):157.

[14] TENG Z, FENG J, XIE X, et al. A nomogram including total cerebral small vessel disease burden score for predicting mild vascular cognitive impairment in patients with type 2 diabetes mellitus[J]. *Diabetes Metab Syndr Obes*, 2024, 17:1553-1562.

[15] INKERI J, ADESHARA K, HARJUTSALO V, et al. Glycemic control is not related to cerebral small vessel disease in neurologically asymptomatic individuals with type 1 diabetes[J]. *Acta Diabetol*, 2022, 59(4):481-490.

[16] SACKS F M, JENSEN M K. From high-density lipoprotein cholesterol to measurements of function: prospects for the development of tests for high-density lipoprotein functionality in cardiovascular disease [J]. *Arterioscler Thromb Vasc Biol*, 2018, 38(3):487-99.

[17] GARBUZOVA-DAVIS S A O, WILLING A E, BORLONGAN C V. Apolipoprotein A1 enhances endothelial cell survival in an in vitro model of ALS[J]. *eNeuro*, 2022, 9(4):140.

[18] NAPOLITANO G A O, FASCILOLO G, TOMAJOLI M T M, et al. Effects of superoxide anion attack on the lipoprotein HDL[J]. *Mol Cell Biochem*, 2022, 478(5):1059-1066.

[19] BHALE A S, VENKATARAMAN K. Leveraging knowledge of HDLs major protein ApoA1: Structure, function, mutations, and potential therapeutics [J]. *Biomed Pharmacother*, 2022, 154:113634.

[20] POBOZHEVA I A, DRACHEVA K V, PCHELINA S N, et al. AdipoRon effect on expression of lipid metabolism genes in cultured human primary macrophages[J]. *Mol Biol*, 2023, 57(4):623-631.

(收稿日期:2025-03-26 修回日期:2025-08-23)