

小脑参与认知功能机制的研究进展

段丽琴 元小冬 张萍淑 凌祺荣 曹凌云 钱洪春

063000 唐山, 华北理工大学附属开滦总医院神经内科(段丽琴、元小冬、张萍淑);

063000 唐山, 河北省神经生物机能重点实验室(段丽琴、元小冬、张萍淑、凌祺荣、曹凌云、钱洪春)

通信作者: 张萍淑, Email: 1977nana@163.com

DOI: 10.3969/j.issn.1009-6574.2024.03.010

【摘要】 认知是指人脑为获取和应用知识, 将外界信息转化成内在心理活动的复杂过程。自1998年Schmahmann和Sherman提出“小脑认知-情感综合征”起, 小脑认知功能的研究越来越受到关注。本文通过回顾国内外相关研究, 从小脑的解剖与认知功能、小脑的神经网络机制以及交叉性小脑神经机能联系不能3个角度探讨了小脑在认知神经网络中的作用及机制, 旨在提高对小脑参与认知功能的认识。

【关键词】 小脑; 认知; 视空间; 注意力; 执行; 工作记忆; 语言; 综述

基金项目: 2022年唐山市市级科技计划项目(22130212G); 2020年度河北省医学科学研究课题计划项目(20201283)

Research progress on the mechanisms of cerebellar involvement in cognitive function Duan Liqin, Yuan Xiaodong, Zhang Pingshu, Ling Qirong, Cao Lingyun, Qian Hongchun
Department of Neurology, Kailuan General Hospital, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000, China (Duan LQ, Yuan XD, Zhang PS); Hebei Provincial Key Laboratory of Neurobiological Function, Tangshan 063000, China (Duan LQ, Yuan XD, Zhang PS, Ling QR, Cao LY, Qian HC)
Corresponding author: Zhang Pingshu, Email: 1977nana@163.com

【Abstract】 Cognition refers to the complex process in which the human brain transforms external information into internal psychological activities in order to acquire and apply knowledge. Since the proposal of "cerebellar cognitive affective syndrome" by Schmahmann and Sherman in 1998, research on cerebellar cognitive function has received increasing attention. This article reviews relevant research both domestically and internationally, and explores the role and mechanism of the cerebellum in cognitive neural networks from three perspectives: the anatomy and cognitive function of the cerebellum, the neural network mechanism of the cerebellum, and the inability to connect intersecting cerebellar neural functions. The aim is to improve our understanding of the cerebellum's involvement in cognitive function.

【Key words】 Cerebellar; Cognition; Visuospatial; Attention; Execution; Working memory; Language; Review

Fund programs: 2022 Tangshan Municipal Science and Technology Plan Project (22130212G); Medical Science Research Projects in Hebei Province in 2020 (20201283)

认知是指人脑为获取和应用知识, 将外界信息转化成内在心理活动的复杂过程。研究表明, 约44%的患者在卒中后出现认知功能损害^[1]。早在1998年, Schmahmann和Sherman^[2]提出小脑也参与了认知功能, 他们发现小脑损伤可能导致视空间、注意、执行、工作记忆和语言等认知功能障碍, 这一发现对小脑功能研究有重要意义。然而, 早期研究并未深入探讨小脑在脑网络中如何参与认知功能。

现对小脑在认知功能中的作用及其神经网络机制进行综述, 以提高对小脑参与认知功能的认识。

一、小脑的解剖与认知功能关系概述

小脑是由左右两个半球及中间的蚓部组成。根据不同的沟和裂, 小脑可分为前叶、后叶及絮状结节叶。Schmahmann将小脑进一步分为10个小叶, 其中I~V小叶构成小脑的前叶, VI~IX小叶构成小脑的后叶, X小叶构成絮状结节叶。值得注意的

是, VII小叶位于小脑的后叶, 其面积占小脑皮层的48%。研究发现, 随着认知水平的提高, 小脑后叶的面积会相应增加^[3-4]。Castellazzi等^[5]认为小脑的后外侧区域与认知功能相关联。此外, Gok-Dursun等^[6]报道了1例头部MRI显示双侧小脑后叶梗死的患者, 其临床表现包括认知和情感功能障碍。小脑前叶主要参与运动功能, 而小脑后叶常涉及认知和情感功能, 因此可以使用运动-认知二分法来区分小脑的前后叶功能^[7-9]。

小脑的左右半球在认知功能上存在一定的侧重差异, 其中左小脑主要参与注意和视空间功能, 而右小脑参与多种认知功能^[10]。Baillieux等^[11]认为左小脑主要负责调控注意和视空间功能, 而右小脑则在逻辑推理和语言功能中发挥主要作用。此外, 研究发现右小脑齿状核与大脑皮层的语言区之间存在多个小脑皮质连接, 因此认为右小脑对语言功能有影响^[12]。总体而言, 小脑主要参与视空间、注意、执行、工作记忆、语言等多个认知功能^[2, 13]。从感知到认知完成的整个过程中, 小脑几乎都参与其中, 突显了小脑在认知功能中的重要作用。

二、小脑参与认知功能的神经网络机制

一项前瞻性随访研究明确了小脑病变会导致认知功能损害^[14]。小脑参与认知功能的机制可能是通过大脑-小脑环路影响大脑的特定区域^[13]。涉及的大脑-小脑环路主要包括皮质-桥脑-小脑束和小脑-丘脑-皮质束, 这2个神经通路负责将信息从大脑皮质传递到小脑, 然后再将小脑的信息反馈到大脑皮质^[15]。因此, 深入研究小脑在认知功能中的作用及其机制, 需重点关注大脑-小脑神经网络的相互作用, 以便更全面地理解小脑对认知功能的影响。

1. 小脑与视空间功能: 视空间功能是指分析整合空间信息的能力。视空间障碍包括视空间感知、构建和记忆障碍^[16]。Molinari等^[17]研究发现, 小脑病变可能导致多维度的视空间障碍, 且小脑左右半球存在侧重差异。Oliver等^[18]通过经颅磁刺激试验发现, 在健康受试者中, 刺激左小脑半球会导致想象数字线等分任务的错误概率增加, 表明左小脑半球在视空间功能中可能起重要作用。

小脑参与视空间网络的具体机制尚不明确, 有研究表明, 小脑齿状核与大脑皮层的视觉脑区存在连接关系^[19]。此外, 出现视空间障碍的PD患者小脑蚓部VIII、IX小叶与默认网络的功能连接性明显高于健康对照组, 考虑与代偿整合视觉空间信息机制

相关^[20]。Sako等^[21]使用静息态功能磁共振成像构建了PD患者的视空间注意和执行网络, 发现小脑VII小叶在这2个网络中起关键作用, 特别是在非遗忘型PD合并痴呆患者的认知过程中。因此, 这些研究强调了小脑在视空间功能中的重要作用, 尤其是在PD患者中, 小脑极有可能被激活并与大脑脑区建立连接, 以弥补其出现的视觉空间功能障碍。

2. 小脑与注意功能: 注意功能是大脑将处理资源适当分配给相关刺激的高级认知功能^[22]。研究表明, 小脑在注意功能中发挥重要作用^[23-24]。Mannarelli等^[25]通过经颅直流电刺激和注意力网络测试, 发现小脑参与了注意执行网络。此外, 研究发现小脑损伤影响时空注意任务表现, 可能和小脑受损部位与背侧、腹侧注意网络的连接有关^[26]。研究发现小脑梗死患者在注意相关测试中表现较差, 可能与小脑与默认网络、额颞顶叶网络的连接效率降低有关^[13]。还有研究发现注意缺陷多动障碍患儿的小脑与大脑其他区域的功能连接存在差异, 可能是注意下降的一个潜在脑机制^[27]。此外, Mannarelli等^[28]报道1例左后叶小脑梗死患者早期事件相关电位P3b波幅降低, 可能是由小脑与前额叶和后顶叶皮质之间的投射功能障碍导致。这些研究结果强调了小脑在注意功能中的关键作用, 小脑损伤可能导致注意功能障碍, 机制和小脑与调控注意功能的高级皮层连接中断有关, 包括额顶叶的腹侧和背侧注意网络。

3. 小脑与执行功能: 执行功能是一个抽象的概念, 关于小脑在执行功能中的作用观点尚不一致^[29]。Beuriat等^[30]对小脑损伤患者、前额叶损伤患者及健康人群分别进行了Delis-Kaplan执行功能的5个子测试, 发现小脑损伤患者的测试结果与健康对照组相似, 表明小脑在执行功能方面可能不发挥关键作用; 而前额叶损伤患者的表现较差, 表明前额叶对执行功能有调控作用。然而, 另一项研究发现, 在青少年群体中, 小脑灰质体积与执行功能测试(威斯康星卡片分类测试)结果呈正相关, 即执行功能表现越好, 小脑灰质体积越大^[31], 表明小脑在执行功能方面可能发挥重要作用, 机制可能与额-小脑通路有关^[32]。Shin等^[8]研究发现, 右后中间小脑病变患者在韩国连线A测试(用于检测额叶执行功能)中表现较差, 进一步提示了小脑在执行功能中的可能作用。Orr等^[33]分析了225名志愿者小脑后部感兴趣区与前额叶(执行功能主要集中区域)的功能连接性, 发现小脑的不同部位与前额叶的不同区域有

功能连接。目前小脑在执行功能方面的作用存在不一致的观点,但有一些研究支持小脑在执行功能中可能发挥重要作用,主要涉及额-小脑神经网络通路机制。

4. 小脑与工作记忆功能:工作记忆有两种主要功能:一种是对信息的维护,另一种是对意志控制^[34]。工作记忆在阅读、理解、学习等过程中发挥关键作用。研究表明额顶叶和小脑与工作记忆密切相关^[35-37]。一项研究观察了健康志愿者在执行延迟运动方向回忆任务时的脑部血氧依赖水平,发现额顶叶和小脑 VII b/VIII a 小叶的血氧依赖水平显著升高,表明这两个区域在工作记忆激活中有特殊作用^[38]。Ziemus 等^[39]观察了小脑梗死患者和健康志愿者在执行 N-back 工作记忆任务时的脑部激活情况,结果显示两组受试者都存在额顶叶皮质和小脑内侧等区域激活,在小脑梗死患者中,可能是为了代偿维持小脑的任务表现,楔前叶、角回和后顶叶的激活更明显。此外,有研究发现,在言语工作记忆任务中,多个小脑区域被激活,特别是小脑双侧小腿 I、右小腿 II、右小叶 VI 和 VIII,这些区域的激活呈线性增加趋势,与言语记忆负荷增加相关^[40]。这些研究结果表明,工作记忆不仅受大脑额顶叶的影响,还受小脑的调控,额顶叶和小脑在工作记忆神经网络中发挥重要作用。

5. 小脑与语言功能:小脑的损伤可能导致语言功能障碍,涉及语言感知、规划、记忆、流畅度和语法等多个方面^[41-42]。有研究表明,右侧小脑半球第 IX 小叶可能参与语言句子处理,而左侧小脑半球的病变可能导致额叶灌注不足进而影响语言功能^[43-44]。此外,先天性大脑左半球病变的患者在执行语言任务时显示了语言小脑网络的重组^[45]。因此,左右小脑半球都可能在语言功能的调控中发挥作用,而脑损伤可能导致语言网络重组。小脑的语言功能调控机制可总结为 3 个方面:整合语言相关大脑皮质信息、向大脑皮质发出调控语言信号以及通过间接调控其他认知功能来影响语言功能^[46]。这些发现表明了小脑在语言处理中的复杂作用。

三、交叉性小脑神经机能联系不能

交叉性小脑神经机能联系不能(crossed cerebellar diaschisis, CCD)是指单侧大脑病变导致对侧小脑血流和代谢降低的现象。CCD 在脑缺血患者中相对常见,一项研究报道 57.4% 的脑缺血患者出现 CCD 现象^[47]。另一项研究使用¹⁸氟脱氧葡萄糖正电子发

射断层扫描(¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography, ¹⁸F-FDG PET)确认了 41.4% 的单侧幕上高代谢病变患者存在 CCD。通过代谢特征的体素分析,研究发现 CCD 患者在同侧大脑皮质(不包括枕叶)、脑白质、脑桥及对侧小脑内的代谢不对称指数显著降低。与此同时,对侧补充运动皮层和楔前叶的代谢相对增加,这可能是 CCD 患者脑网络的一种代偿机制^[48]。此外,有研究发现 AD 患者早期也可能发生 CCD。使用¹⁸F-FDG PET 评估轻度 AD 患者的脑内代谢情况时,发现这些患者左侧颞枕部和右小脑标准化摄取值较低,且左右不对称,可能与早期 tau 蛋白通过皮质-桥脑-小脑束的传播有关^[49]。

CCD 的发病机制之一是神经传导通路受抑制,主要是皮质-桥脑-小脑束^[50-51]。为了验证皮质-桥脑-小脑束在 CCD 发病中的作用,一项回顾性研究分析了 130 例 CCD 患者、424 例非 CCD 患者以及 56 名健康受试者的脑代谢情况,结果显示,在皮质-桥脑-小脑束通路中,CCD 患者的总代谢不对称体积明显大于非 CCD 患者,CCD 患者的同侧脑白质、同侧桥脑和对侧小脑白质的代谢不对称指数明显降低。然而,非 CCD 患者中,这一通路中继站同侧脑桥的代谢不对称指数无明显下降^[52]。因此,CCD 不仅发生在大脑单侧缺损性疾病中,还可能发生在代谢亢进性疾病和慢性痴呆性疾病中。皮质-桥脑-小脑束的代谢减低或中断是导致 CCD 发生发展的重要病理生理机制之一,也可能是导致认知障碍的原因之一。

综上所述,通过小脑与大脑皮层之间相互影响的研究,确认了小脑在认知功能中扮演着关键角色。小脑通过与大脑皮层的神经网络连接,对人类的视空间、注意、执行、工作记忆、语言等高级认知神经功能产生影响。深入研究小脑与大脑之间的神经网络对于更深入地理解认知功能的机制以及神经系统中的信息交流和处理机制有重要意义。

四、总结与展望

目前,关于小脑在认知功能中的神经网络机制研究逐渐增多,但脑网络的构建存在一些不确定性。这一问题有两个主要原因,首先是研究人群规模较小,其次是研究方法相对单一,主要依赖影像学方法。虽然影像学方法能提供直观的信息,但在时间维度上的分辨率相对较低。相比而言,事件相关电位方法可根据研究任务诱发相应的脑电活动,具有高时间分辨率,对分析个体差异具有可靠性和敏感

性。事件相关电位与神经影像结合使用可以更精确地构建脑网络图谱,为研究小脑参与认知功能及其神经网络机制提供客观依据,有望提高对小脑在认知过程中的作用和脑网络的理解。

利益冲突 文章所有作者共同认可文章无相关利益冲突

作者贡献声明 论文撰写为段丽琴,课题构思、论文修订为张萍淑,文献收集为段丽琴、凌祺荣、曹凌云、钱洪春,元小冬审校

参 考 文 献

- [1] Lo JW, Crawford JD, Desmond DW, et al. Profile of and risk factors for poststroke cognitive impairment in diverse ethnoregional groups[J]. *Neurology*, 2019, 93(24): e2257-e2271. DOI: 10.1212/WNL.0000000000008612.
- [2] Schmahmann JD, Sherman JC. The cerebellar cognitive affective syndrome[J]. *Brain*, 1998, 121(Pt 4): 561-579. DOI: 10.1093/brain/121.4.561.
- [3] Lehman VT, Black DF, DeLone DR, et al. Current concepts of cross-sectional and functional anatomy of the cerebellum: a pictorial review and atlas[J]. *Br J Radiol*, 2020, 93(1106): 20190467. DOI: 10.1259/bjr.20190467.
- [4] Stoodley CJ, Schmahmann JD. Functional topography of the human cerebellum[J]. *Handb Clin Neurol*, 2018, 154: 59-70. DOI: 10.1016/B978-0-444-63956-1.00004-7.
- [5] Castellazzi G, Bruno SD, Toosy AT, et al. Prominent changes in cerebro-cerebellar functional connectivity during continuous cognitive processing[J]. *Front Cell Neurosci*, 2018, 12: 331. DOI: 10.3389/fncel.2018.00331.
- [6] Gok-Dursun E, Gultekin-Zaim OB, Tan E, et al. Cognitive impairment and affective disorder: a rare presentation of cerebellar stroke[J]. *Clin Neurol Neurosurg*, 2021, 206: 106690. DOI: 10.1016/j.clineuro.2021.106690.
- [7] Schmahmann JD. The cerebellum and cognition[J]. *Neurosci Lett*, 2019, 688: 62-75. DOI: 10.1016/j.neulet.2018.07.005.
- [8] Shin MA, Park OT, Shin JH. Anatomical correlates of neuropsychological deficits among patients with the cerebellar stroke[J]. *Ann Rehabil Med*, 2017, 41(6): 924-934. DOI: 10.5535/arm.2017.41.6.924.
- [9] Stoodley CJ, MacMore JP, Makris N, et al. Location of lesion determines motor vs. cognitive consequences in patients with cerebellar stroke[J]. *Neuroimage Clin*, 2016, 12: 765-775. DOI: 10.1016/j.nicl.2016.10.013.
- [10] Starowicz-Filip A, Prochwicz K, Kłosowska J, et al. Cerebellar functional lateralization from the perspective of clinical neuropsychology[J]. *Front Psychol*, 2021, 12: 775308. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.775308.
- [11] Baillieux H, De Smet HJ, Dobbelaire A, et al. Cognitive and affective disturbances following focal cerebellar damage in adults: a neuropsychological and SPECT study[J]. *Cortex*, 2010, 46(7): 869-879. DOI: 10.1016/j.cortex.2009.09.002.
- [12] Starowicz-Filip A, Chrobak AA, Moskała M, et al. The role of the cerebellum in the regulation of language functions[J]. *Psychiatr Pol*, 2017, 51(4): 661-671. DOI: 10.12740/PP/68547.
- [13] 王多浩,姚群,于淼,等.急性小脑梗死患者认知功能评估及其与大脑结构网络的关系研究[J]. *中华神经医学杂志*, 2021, 20(4): 356-363. DOI: 10.3760/cma.j.cn115354-20200730-00612.
- [14] Erdal Y, Perk S, Keskinclik C, et al. The assessment of cognitive functions in patients with isolated cerebellar infarctions: a follow-up study[J]. *Neurosci Lett*, 2021, 765: 136252. DOI: 10.1016/j.neulet.2021.136252.
- [15] Baumann O, Borra RJ, Bower JM, et al. Consensus paper: the role of the cerebellum in perceptual processes[J]. *Cerebellum*, 2015, 14(2): 197-220. DOI: 10.1007/s12311-014-0627-7.
- [16] Salimi S, Irish M, Foxe D, et al. Can visuospatial measures improve the diagnosis of Alzheimer's disease[J]. *Alzheimers Dement (Amst)*, 2018, 10: 66-74. DOI: 10.1016/j.dadm.2017.10.004.
- [17] Molinari M, Petrosini L, Misciagna S, et al. Visuospatial abilities in cerebellar disorders[J]. *J Neurol Neurosurg Ps*, 2004, 75(2): 235-240.
- [18] Oliver R, Opavsky R, Vyslouzil M, et al. The role of the cerebellum in 'real' and 'imaginary' line bisection explored with 1-Hz repetitive transcranial magnetic stimulation[J]. *Eur J Neurosci*, 2011, 33(9): 1724-1732. DOI: 10.1111/j.1460-9568.2011.07664.x.
- [19] Guell X, D'Mello AM, Hubbard NA, et al. Functional territories of human dentate nucleus[J]. *Cereb Cortex*, 2020, 30(4): 2401-2417. DOI: 10.1093/cercor/bhz247.
- [20] Yin K, Zhou C, Yin L, et al. Resting-state functional magnetic resonance imaging of the cerebellar vermis in patients with Parkinson's disease and visuospatial disorder[J]. *Neurosci Lett*, 2021, 760: 136082. DOI: 10.1016/j.neulet.2021.136082.
- [21] Sako W, Abe T, Matsumoto Y, et al. The cerebellum is a common key for visuospatial execution and attention in Parkinson's disease[J]. *Diagnostics (Basel)*, 2021, 11(6): 1042. DOI: 10.3390/diagnostics11061042.
- [22] Fiebelkorn IC, Kastner S. Functional specialization in the attention network[J]. *Annu Rev Psychol*, 2020, 71: 221-249. DOI: 10.1146/annurev-psych-010418-103429.
- [23] Esterman M, Thai M, Okabe H, et al. Network-targeted cerebellar transcranial magnetic stimulation improves attentional control[J]. *Neuroimage*, 2017, 156: 190-198. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2017.05.011.
- [24] Striemer CL, Cantelmi D, Cusimano MD, et al. Deficits in reflexive covert attention following cerebellar injury[J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 428. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00428.
- [25] Mannarelli D, Pauletti C, Currà A, et al. The cerebellum modulates attention network functioning: evidence from a cerebellar transcranial direct current stimulation and attention network test study[J]. *Cerebellum*, 2019, 18(3): 457-468. DOI: 10.1007/s12311-019-01014-8.
- [26] Craig BT, Morrill A, Anderson B, et al. Cerebellar lesions disrupt spatial and temporal visual attention[J]. *Cortex*, 2021, 139: 27-42. DOI: 10.1016/j.cortex.2021.02.019.
- [27] 江凯华,董选,周金金,等.注意缺陷多动障碍患儿静息态下小脑功能连接的特征[J]. *中华实用儿科临床杂志*, 2018, 33(24): 1855-1858. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-428X.2018.24.004.
- [28] Jiang KH, Dong X, Zhou JJ, et al. Characteristics of functional connectivity based on cerebellum at resting state on children with attention deficit hyperactivity disorder[J]. *Chin J Appl Clin Pediatr*, 2018, 33(24): 1855-1858.

- [28] Mannarelli D, Pauletti C, De Lucia MC, et al. Insights from ERPs into attention during recovery after cerebellar stroke: a case report[J]. *Neurocase*, 2015, 21(6): 721-726. DOI: 10.1080/13554794.2014.977922.
- [29] Cristofori I, Cohen-Zimmerman S, Grafman J. Executive functions[J]. *Handb Clin Neurol*, 2019, 163: 197-219. DOI: 10.1016/B978-0-12-804281-6.00011-2.
- [30] Beuriat PA, Cohen-Zimmerman S, Smith G, et al. A new insight on the role of the cerebellum for executive functions and emotion processing in adults[J]. *Front Neurol*, 2020, 11: 593490. DOI: 10.3389/fneur.2020.593490.
- [31] Jung KI, Park MH, Park B, et al. Cerebellar gray matter volume, executive function, and insomnia: gender differences in adolescents[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 855. DOI: 10.1038/s41598-018-37154-w.
- [32] Bellebaum C, Daum I. Cerebellar involvement in executive control[J]. *Cerebellum*, 2007, 6(3): 184-192. DOI: 10.1080/14734220601169707.
- [33] Orr JM, Jackson TB, Imburgio MJ, et al. Dissociable prefrontal-cerebellar networks underlying executive function: evidence from resting state functional connectivity in the human connectome project[J]. Cold Spring Harbor Laboratory, 2018. DOI: 10.1101/431593.
- [34] Miller EK, Lundqvist M, Bastos AM. Working Memory 2.0 [J]. *Neuron*, 2018, 100(2): 463-475. DOI: 10.1016/j.neuron.2018.09.023.
- [35] D'Esposito M, Postle BR. The cognitive neuroscience of working memory[J]. *Annu Rev Psychol*, 2015, 66: 115-142. DOI: 10.1146/annurev-psych-010814-015031.
- [36] Zhao Y, Kuai S, Zanto TP, et al. Neural correlates underlying the precision of visual working memory[J]. *Neuroscience*, 2020, 425: 301-311. DOI: 10.1016/j.neuroscience.2019.11.037.
- [37] Seese RR. Working memory impairments in cerebellar disorders of childhood[J]. *Pediatr Neurol*, 2020, 107: 16-23. DOI: 10.1016/j.pediatrneurol.2020.02.005.
- [38] Brissenden JA, Tobyne SM, Halko MA, et al. Stimulus-specific visual working memory representations in human cerebellar lobule VII b/VIII a[J]. *J Neurosci*, 2021, 41(5): 1033-1045. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1253-20.2020.
- [39] Ziemus B, Baumann O, Luerding R, et al. Impaired working-memory after cerebellar infarcts paralleled by changes in BOLD signal of a cortico-cerebellar circuit[J]. *Neuropsychologia*, 2007, 45(9): 2016-2024. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.02.012.
- [40] Ashida R, Cerminara NL, Edwards RJ, et al. Sensorimotor, language, and working memory representation within the human cerebellum[J]. *Hum Brain Mapp*, 2019, 40(16): 4732-4747. DOI: 10.1002/hbm.24733.
- [41] Tani T, Sakai Y. Stuttering after right cerebellar infarction: a case study[J]. *J Fluency Disord*, 2010, 35(2): 141-145. DOI: 10.1016/j.jfludis.2010.03.001.
- [42] Mariën P, Ackermann H, Adamaszek M, et al. Consensus paper: language and the cerebellum: an ongoing enigma[J]. *Cerebellum*, 2014, 13(3): 386-410. DOI: 10.1007/s12311-013-0540-5.
- [43] Geva S, Schneider LM, Roberts S, et al. The effect of focal damage to the right medial posterior cerebellum on word and sentence comprehension and production[J]. *Front Hum Neurosci*, 2021, 15: 664650. DOI: 10.3389/fnhum.2021.664650.
- [44] Murdoch BE, Whelan BM. Language disorders subsequent to left cerebellar lesions: a case for bilateral cerebellar involvement in language?[J]. *Folia Phoniatri Logop*, 2007, 59(4): 184-189. DOI: 10.1159/000102930.
- [45] Lidzba K, Wilke M, Staudt M, et al. Reorganization of the cerebro-cerebellar network of language production in patients with congenital left-hemispheric brain lesions[J]. *Brain Lang*, 2008, 106(3): 204-210. DOI: 10.1016/j.bandl.2007.11.003.
- [46] 张晓彤, 丘卫红. 小脑调控语言功能的机制及其应用[J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2022, 44(5): 455-458. DOI: 10.3760/ema.j.issn.0254-1424.2022.05.016.
- [47] Zhang M, Cao Y, Wu F, et al. Characteristics of cerebral perfusion and diffusion associated with crossed cerebellar diaschisis after acute ischemic stroke[J]. *Jpn J Radiol*, 2020, 38(2): 126-134. DOI: 10.1007/s11604-019-00898-0.
- [48] Zhu Y, Ruan G, Zou S, et al. Voxel-based analysis of the metabolic asymmetrical and network patterns in hypermetabolism-associated crossed cerebellar diaschisis[J]. *Neuroimage Clin*, 2022, 35: 103032. DOI: 10.1016/j.nicl.2022.103032.
- [49] Tripathi SM, Murray AD, Wischik CM, et al. Crossed cerebellar diaschisis in Alzheimer's disease[J]. *Nucl Med Commun*, 2022, 43(4): 423-427. DOI: 10.1097/MNM.0000000000001531.
- [50] Kim JS, Kim SH, Lim SH, et al. Degeneration of the inferior cerebellar peduncle after middle cerebral artery stroke: another perspective on crossed cerebellar diaschisis[J]. *Stroke*, 2019, 50(10): 2700-2707. DOI: 10.1161/STROKEAHA.119.025723.
- [51] Lu J, Liu H, Zhang M, et al. Focal pontine lesions provide evidence that intrinsic functional connectivity reflects polysynaptic anatomical pathways[J]. *J Neurosci*, 2011, 31(42): 15065-15071. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2364-11.2011.
- [52] Zhu Y, Ruan G, Cheng Z, et al. Lateralization of the crossed cerebellar diaschisis-associated metabolic connectivities in cortico-ponto-cerebellar and cortico-rubral pathways[J]. *Neuroimage*, 2022, 260: 119487. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2022.119487.

(收稿日期: 2023-08-17)

(本文编辑: 郑圣洁)