·综述·

视觉功能在阅读障碍中作用的研究进展

黄美灵¹ 王艳^{2,3} 张世雯¹ 支金草¹ 裴飞²

阅读障碍(dyslexia)是最常见的学习障碍,是一种在儿童时期出现的发育性学习障碍,约80%有学习障碍的儿童伴有阅读障碍。阅读障碍者智力、视力、听力正常,但阅读水平没有达到与他们智力相匹配的水平,主要表现为阅读速度变慢、理解能力下降,甚至写作困难。一般而言,阅读障碍是一种具有遗传性的神经生物学障碍,病因尚不明确,主要包括遗传因素和环境因素,虽然多数研究者支持认知水平上的语音缺陷假说,但视觉缺陷假说也是人们一直争论的话题。迄今为止,阅读障碍者的康复干预方法主要是基于语音缺陷假说和视觉缺陷假说,包括听觉刺激的语音意识训练和视觉刺激的视觉训练。本文从视觉功能的角度去探讨其在阅读障碍中的作用。

1 阅读障碍的神经生理性机制

1.1 视觉大细胞通路异常

阅读障碍的一个重要原因可能与视觉问题相关,阅读障碍儿童进行与视觉大细胞通路相关的功能训练可以改善其阅读能力^[1]。根据细胞的大小和生理特性,10%的视网膜神经节细胞被定义为大细胞,大细胞的突触和轴突传导电信号非常迅速,它们专门用于快速的时间处理,而不是空间敏感度。因此,大细胞在检测光线变化、注意力和眼球运动的控制方面扮演着重要的角色^[2]。Livingstone MS等^[3]发现在阅读障碍者中,外侧膝状核的大细胞板层异常。Giraldo-Chica M等^[4]发现阅读障碍者的外侧膝状核总体积减小并且左侧比右侧明显。外侧膝状核的大细胞板层到后顶叶皮层(posterior parietal cortex, PPC)有解剖连接,PPC是视觉大细胞-背侧通路的主要部位,因此也认为PPC对阅读时的眼球运动控制、视觉空间注意力和周边视觉有非常重要^[5-6]。阅读中我们的注意力必须被视觉大细胞通路精确地引导到我们试图理解的特定文字上,以便我们对文字的稳定注视,这种稳定注视取决于视觉大细胞通路去减少任何不必要的眼球运动,否则会导致文字看起来到处移动^[2]。在最新的研究中,视觉大细胞通路也可以用于解释噪音排除假说^[7]。

1.2 小脑缺陷假说

Nicolson RI等^[8]推测在生物学水平上,小脑缺陷是视觉

大细胞异常的另一或平行机制。当视觉输入改变导致视觉扫视不准确时,小脑会快速地调整运动指令以减少错误视觉运动的发生^[9]。在同龄典型的阅读障碍儿童中,至少有一部分被诊断为阅读障碍儿童的扫视适应受损,这种表现可能是由于在阅读障碍儿童中观察到小脑的结构和功能与正常同龄儿童存在差异^[10]。Feng X等^[11]通过观察阅读障碍儿童在正字法任务和语音任务中的表现,发现阅读障碍越严重,小脑的激活越强,由此得出小脑通过与阅读相关的皮层区域连接进行功能代偿的结论。然而,在最新的文献中,Ashburn SM等^[12]发现在文字处理及小脑与阅读相关皮层功能连接中,阅读障碍儿童和非阅读障碍儿童无差异。Nicolson RI等^[13]在小脑缺陷假说的基础上又提出了“延迟神经承诺”理论框架,即除了较慢的获取阅读技能外,阅读障碍儿童需要更长的时间来建立支持阅读的神经网络,延迟神经承诺无疑也是对小脑缺陷假说的另一种补充。

1.3 视觉词形处理缺陷

左梭状回中部内的区域,通常被称为视觉词形区域(visual word form area, VWFA),随后的研究将VWFA的概念扩展到左腹侧枕颞皮层中的整个视觉词形系统。左腹侧枕颞皮层中的视觉词形区是阅读流畅的关键,是在阅读习得过程中不断调整而产生,左腹侧枕颞皮层不是同质结构,而是表现出高度连续的功能和空间层次结构,根据视觉信息的复杂性从后向前依次激活左侧枕颞叶^[14-15]。现在认为左腹侧枕颞皮层内有部分功能分离,内侧结构在次级词汇素水平上解读正字法信息,而外侧结构主要有助于直接解读词汇语义^[16]。在视觉词汇阅读中,梭状回中部在词汇和次级词汇信息统计的早期加工过程中起着重要作用,词汇信息从左梭状回中部向早期视觉区域(包括VWFA)的前后扩散^[17]。

VWFA与涉及语言处理(即词汇语义处理、句法处理、结构处理)的语言区域连接,这将视觉与语音处理联系在一起^[18]。阅读障碍儿童有左腹侧枕颞皮层内的词汇敏感激活减少问题,语言刺激和物体刺激可以激活包括左腹侧枕颞皮层的早期视觉区域^[15,19]。左侧颞下区和额叶之间有功能连接,包括对应Brodmann区域8和9的右侧额中回,该连接可能促进将新视觉刺激学习为新汉字的自动过程^[20]。左腹侧

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2024.03.025

1 黑龙江中医药大学,黑龙江省哈尔滨市,150040; 2 黑龙江中医药大学附属第二医院; 3 通讯作者
第一作者简介:黄美灵,女,硕士研究生; 收稿日期:2021-08-03

枕颞皮层的分层结构与视觉通路中的外侧膝状核、初级视觉皮层的分层结构相似,而且在这些结构中都有大细胞,这值得我们进一步探索二者是否有紧密关联。Heilbron M等^[21]研究发现,当字母插入单词时,VWFA的血氧水平依赖活动增加,证明单词上下文可以自上而下在早期视觉区域调节感知处理。

2 视觉训练在阅读障碍中的应用

2.1 双眼视功能训练

当我们阅读文本时,我们需要正常的双眼视功能参与其中,协调的眼球运动和良好的聚散度是相辅相成的。眼球运动包括扫视、注视和追视,扫视使眼睛从左到右,逐字逐句地注视,而斜扫视将眼睛带到下一行文本。同时,为了在文字的三维空间中获得清晰且单一的视觉文字,双眼需要持续的聚散度并保持对其进行调整以正确融合两个视网膜图像^[22]。在最新的文献中指出,阅读障碍者在扫视和聚散方面都存在细微的速度异常,扫视会促进眼球的聚散运动,眼球聚散控制不佳会改变扫视速度并且导致扫视后的非共轭漂移增加,这表明阅读障碍儿童的双眼运动控制效率低下^[23-26]。为了排除年龄对双眼视功能发育的干涉,进而影响阅读质量,Bucci MP等^[5]在11岁阅读障碍儿童与非阅读障碍儿童中进行了对比研究,发现非阅读障碍儿童的双眼协调能力与成年人一样好,但阅读障碍儿童在扫视过程中和扫视后的双眼协调能力较差。在阅读期间,验光师利用双眼的眼球运动和聚散度来评估患者的双眼协调,结果不太理想,无论是验光师还是患者的主观性,都会影响结果^[27]。因此,我们需要更加客观的评定工具和量表。

阅读障碍儿童因为眼球聚焦功能存在障碍,所以他们能看清远距离的字母,看不清近距离的字母,并推测可能与视觉注意力有关^[28]。美国眼视光医生弗雷德里克·布洛克用绳子模拟视觉轴线,用不同颜色的珠子分布在不同的距离让儿童体验视觉集合状态(双眼同时内转),这种聚散球训练不仅可以改善双眼聚散度,还可以改善阅读过程中扫视和注视的双眼协调,从而使阅读所需的注意力更加集中^[29]。通常,在进行聚散训练前需要进行眼球运动控制训练。视觉跟踪任务可以进行眼球运动控制训练,基于计算机的眼球运动控制训练是一个简单而实用的工具,可以提高阅读障碍者的阅读能力^[30]。眼球运动控制训练从单眼开始,因为大脑会向双眼发送相同的信号,一旦在注视固定距离的物体时,眼球运动控制正常,就可以改变物体距离和移动速度,以提高训练难度。

2.2 视觉注意力训练

目前,对阅读障碍儿童研究较多的视觉注意力主要包括视觉注意转移迟滞、视觉拥挤效应和视觉注意力广度缺陷3个方面。

阅读障碍儿童的视觉注意转移迟滞主要与注意返回抑制效应有关,主要包括两个方面:一是在大量信息中捕获目标时存在困难,二是不能快速地由一种视觉刺激转移到另一种刺激^[31]。阅读障碍儿童阅读文字不准确且阅读速度慢,可能与视觉注意转移迟滞有关,通过训练注意力转移可显著提高阅读技能^[32]。

其次,视觉注意力广度(VAS)缺陷被认为会妨碍阅读障碍儿童的阅读表现^[33]。应用长度估计任务来训练视觉短期记忆存储以解决视觉注意力广度中自下而上的注意问题,并使用视觉搜索和数字消除任务来对视觉注意力广度中自上而下的注意调制和控制,这些训练可以提高有视觉注意力广度功能障碍的中国阅读障碍儿童的视觉任务表现^[34]。阅读障碍儿童进行有效的动作视频游戏训练影响自上而下的前额叶网络的可塑性和自下而上的大细胞背侧通路的顶叶网络,从而改变他们多方面的视觉注意力和阅读速度和准确性^[12,35-37]。

除了阅读障碍儿童自身的视觉注意力转移迟滞和视觉注意力广度缺陷原因,还有文字也是一种极其“拥挤”的视觉刺激,这个现象在阅读障碍儿童中更为明显,极大地干扰了对文字的准确识别和解读,通过增加字母大小和字母间距,拥挤效应可以减少,从而提高阅读障碍儿童的阅读表现^[2,30,38-39]。基于这些结果,我们可以开发平板电脑或电子阅读器上的应用程序,允许改变文本大小和其他功能,帮助阅读障碍儿童改善他们的阅读能力。最新研究表明,研究者利用计算机程序将阅读的字母固定在眼球正确的位置,减少同时识别的字母数量,延长注视时间和言语开始的潜伏期,将扫视幅度与同时阅读的字母数量相适应,以此改变阅读障碍者的阅读策略,达到提高阅读障碍儿童阅读能力的目标^[40]。

2.3 视觉背景颜色

颜色可以调节阅读障碍儿童的阅读表现,例如,提高阅读流畅度和速度。最初研究表明,绿色滤光片可以作为一种辅助工具,在学校和家庭中改善阅读障碍儿童的学习表现^[30]。在最新的研究中,Jakovljević T等^[41]通过评估阅读持续时间、脑电图、心率变异性、皮肤电活动和眼动追踪测量(注视计数、注视频率、扫视计数、扫视频率、注视持续时间总计、注视持续时间平均值)等方面的差异,得出绿松石背景、绿松石覆盖和黄色背景可能对阅读障碍儿童有益,彩色覆盖层是指使用在文本上涂上颜色的透明塑料阅读纸过滤光线。当不同性别的儿童分别用彩色背景/覆盖颜色的文本阅读时,男孩阅读文本会有更多困难,然而与白色背景相比,他们在阅读彩色背景时的阅读问题较少^[42]。还有另一种观点指出,不同的颜色影响儿童的心理情绪。比如说,绿松石和蓝色可以帮助儿童保持镇静,从而改善阅读表现^[43]。而且,蓝色滤光片通常可以通过激活黑色素系统来提高注意力和

唤醒度,从而帮助儿童阅读^[44]。在生理解剖上,大细胞通路间接参与视觉颜色调节,黄色滤光片消除蓝色,可以永久改善大细胞功能,使阅读障碍儿童的阅读能力显著提高^[45]。因此,我们可以根据阅读障碍儿童的情况用绿色、黄色、蓝色这3个颜色来改善阅读表现。

2.4 视觉新颖性

新颖的刺激通常反射性地吸引注意力,从而增强视觉感知,提高阅读障碍儿童的阅读技能^[46-47]。通过对新奇物体与普通物体的观察对比,表明新颖的视觉刺激有助于背侧通路中的左楔前叶和腹侧通路中的右视觉皮层的显著激活。楔前叶是皮层间和皮层下连接的枢纽,前部具有感觉运动作用,后部支持与视觉皮层的连接,中部具有认知联想功能,有助于控制眼睛和双手运动的协调或整合,转移注意力和眼球运动^[48]。与Higuchi H等^[49]推测一致,伪日文激活左侧枕颞区参与视觉处理,可能是因为伪日文在现实中并不存在,更有新颖性。

3 小结与展望

阅读障碍儿童在阅读过程中会出现阅读速度较慢、注视持续时间较长、眼跳频繁且幅度小、单词模糊、字母四处移动、重影或出现白闪光等异常现象。眼球运动训练与视觉注意力训练两者存在密切联系。一方面,注意力的集中需要眼球的运动;另一方面,注意力又影响眼球运动。在临床上,利用视觉的生理特性对阅读障碍儿童进行干预,阅读表现确实有所改善^[47]。目前我们主要是根据阅读障碍儿童的阅读表现来确定干预效果的有效性,但缺乏更加精确和客观的指标来量化训练后的阅读提高水平,这将是未来研究的方向之一。当前的研究强调尽早识别和治疗,因为它们可能会影响学业成绩并增加儿童出现社交、情绪和心理健康问题的风险。阅读是一种基于视觉的多感官活动,通过“触觉纽带效应”将有助于在文字的视觉处理和相应声音的听觉处理之间建立联系,本体觉和前庭觉在阅读中的作用也不容忽视^[50-52]。由此可见,阅读过程中多感觉整合的重要性。本文强调视觉对阅读的重要性,但也支持其他感知觉参与阅读的过程。

参考文献

[1] Gori S, Seitz AR, Ronconi L, et al. Multiple causal links between magnocellular-dorsal pathway deficit and developmental dyslexia[J]. *Cereb Cortex*,2016,26(11):4356—4369.
[2] Stein J. The current status of the magnocellular theory of developmental dyslexia[J]. *Neuropsychologia*, 2019(130) 66—77.
[3] Livingstone MS, Rosen GD, Drislane FW, et al. Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*,1991,88(18):7943—7947.
[4] Giraldo-chica M, Hegarty II JP, Schneider KA. Morphologi-

cal differences in the lateral geniculate nucleus associated with dyslexia[J]. *Neuroimage Clin*,2015(7)830—836.
[5] Bucci MP, Brémond-gignac D, Kapoula Z. Poor binocular coordination of saccades in dyslexic children[J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*,2008,246(3):417—428.
[6] Stein J, Walsh V. To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia[J]. *Trends Neurosci*,1997,20(4):147—152.
[7] Ji Y, Bi HY. Visual dysfunction in Chinese children with developmental dyslexia: magnocellular-dorsal pathway deficit or noise exclusion deficit?[J]. *Front Psychol*,2020(11)958.
[8] Nicolson RI, Fawcett AJ, Dean P. Developmental dyslexia: the cerebellar deficit hypothesis[J]. *Trends Neurosci*,2001,24(9):508—511.
[9] Optican LM, Robinson DA. Cerebellar-dependent adaptive control of primate saccadic system[J]. *J Neurophysiol*,1980,44(6):1058—1076.
[10] Freedman EG, Molholm S, Gray MJ, et al. Saccade adaptation deficits in developmental dyslexia suggest disruption of cerebellar-dependent learning[J]. *J Neurodev Disord*, 2017,9(1):36.
[11] Feng X, Li L, Zhang M, et al. Dyslexic children show atypical cerebellar activation and cerebro-cerebellar functional connectivity in orthographic and phonological processing [J]. *Cerebellum*,2017,16(2):496—507.
[12] Ashburn SM, Flowers DL, Napoliello EM, et al. Cerebellar function in children with and without dyslexia during single word processing[J]. *Hum Brain Mapp*, 2020, 41(1): 120—138.
[13] Nicolson RI, Fawcett AJ. Development of dyslexia: the delayed neural commitment framework[J]. *Front Behav Neurosci*,2019(13)112.
[14] Vinckier F, Dehaene S, Jobert A, et al. Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system[J]. *Neuron*, 2007,55(1):143—156.
[15] Brem S, Maurer U, Kronbichler M, et al. Visual word form processing deficits driven by severity of reading impairments in children with developmental dyslexia[J]. *Sci Rep*,2020,10(1):18728.
[16] Bouhali F, Bézagu Z, Dehaene S, et al. A mesial-to-lateral dissociation for orthographic processing in the visual cortex[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*,2019,116(43):21936—21946.
[17] Woolnough O, Donos C, Rollo PS, et al. Spatiotemporal dynamics of orthographic and lexical processing in the ventral visual pathway[J]. *Nat Hum Behav*, 2021, 5(3): 389—398.
[18] Stevens WD, Kravitz DJ, Peng CS, et al. Privileged functional connectivity between the visual word form area and the language system[J]. *J Neurosci*, 2017, 37(21): 5288—5297.
[19] Higuchi H, Iwaki S, Uno A. Altered visual character and object recognition in Japanese-speaking adolescents with developmental dyslexia[J]. *Neurosci Lett*,2020(723)134841.
[20] Yeatman JD, Rauschecker AM, Wandell BA. Anatomy of

- the visual word form area: adjacent cortical circuits and long-range white matter connections[J]. *Brain Lang*, 2013, 125(2):146—155.
- [21] Heilbron M, Richter D, Ekman M, et al. Word contexts enhance the neural representation of individual letters in early visual cortex[J]. *Nat Commun*, 2020, 11(1):321.
- [22] Jainta S, Kapoula Z. Dyslexic children are confronted with unstable binocular fixation while reading[J]. *PLoS One*, 2011, 6(4):e18694.
- [23] Ward LM, Kapoula Z. Differential diagnosis of vergence and saccade disorders in dyslexia[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 22116.
- [24] Morize A, Brémond-gignac D, Daniel F, et al. Effects of pure vergence training on initiation and binocular coordination of saccades[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2017, 58(1): 329—342.
- [25] Oohira A. Vergence eye movements facilitated by saccades [J]. *Jpn J Ophthalmol*, 1993, 37(4):400—413.
- [26] Franzen L, Stark Z, Johnson AP. Individuals with dyslexia use a different visual sampling strategy to read text[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):6449.
- [27] Booth JR, Wood L, Lu D, et al. The role of the basal ganglia and cerebellum in language processing[J]. *Brain Res*, 2007, 1133(1):136—144.
- [28] Jiménez EC, Romeo A, Pérez Zapata L, et al. Eye vergence responses in children with and without reading difficulties during a word detection task[J]. *Vision Res*, 2020 (169)6—11.
- [29] Daniel F, Morize A, Brémond-gignac D, et al. Benefits from vergence rehabilitation: evidence for improvement of reading saccades and fixations[J]. *Front Integr Neurosci*, 2016(10)33.
- [30] Bucci MP. Visual training could be useful for improving reading capabilities in dyslexia[J]. *Appl Neuropsychol Child*, 2021, 10(3):199—208.
- [31] Fu W, Zhao J, Ding Y, et al. Dyslexic children are sluggish in disengaging spatial attention[J]. *Dyslexia*, 2019, 25 (2):158—172.
- [32] Gori S, Facoetti A. Perceptual learning as a possible new approach for remediation and prevention of developmental dyslexia[J]. *Vision Res*, 2014(99)78—87.
- [33] Bosse ML, Tainturier MJ, Valdois S. Developmental dyslexia: the visual attention span deficit hypothesis[J]. *Cognition*, 2007, 104(2):198—230.
- [34] Zhao J, Liu H, Li J, et al. Improving sentence reading performance in Chinese children with developmental dyslexia by training based on visual attention span[J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1):18964.
- [35] Bertoni S, Franceschini S, Puccio G, et al. Action video games enhance attentional control and phonological decoding in children with developmental dyslexia[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(2):171.
- [36] Bavelier D, Green CS. Enhancing attentional control: lessons from action video games[J]. *Neuron*, 2019, 104(1): 147—163.
- [37] Ahissar M, Hochstein S. The reverse hierarchy theory of visual perceptual learning[J]. *Trends Cogn Sci*, 2004, 8(10): 457—464.
- [38] Masulli F, Galluccio M, Gerard CL, et al. Effect of different font sizes and of spaces between words on eye movement performance: an eye tracker study in dyslexic and non-dyslexic children[J]. *Vision Res*, 2018(153)24—29.
- [39] Bertoni S, Franceschini S, Ronconi L, et al. Is excessive visual crowding causally linked to developmental dyslexia? [J]. *Neuropsychologia*, 2019(130)107—117.
- [40] Werth R. Dyslexic readers improve without training when using a computer-guided reading strategy[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(5):526.
- [41] Jakovljević T, Janković MM, Savić AM, et al. The relation between physiological parameters and colour modifications in text background and overlay during reading in children with and without dyslexia[J]. *Brain Sci*, 2021, 11(5): 539.
- [42] Jakovljević T, Janković MM, Savić AM, et al. The effect of colour on reading performance in children, measured by a sensor hub: from the perspective of gender[J]. *PLoS One*, 2021, 16(6):e0252622.
- [43] Jakovljević T, Janković MM, Savić AM, et al. The sensor hub for detecting the developmental characteristics in reading in children on a white vs. colored background/colored overlays[J]. *Sensors (Basel)*, 2021, 21(2):406.
- [44] Feder MA, Baroni A. Just let me sleep in: identifying and treating delayed sleep phase disorder in adolescents[J]. *Child Adolesc Psychiatr Clin N Am*, 2021, 30(1):159—174.
- [45] Ray NJ, Fowler S, Stein JF. Yellow filters can improve magnocellular function: motion sensitivity, convergence, accommodation, and reading[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2005, 1039:283—293.
- [46] Schomaker J, Meeter M. Novelty enhances visual perception[J]. *PLoS One*, 2012, 7(12):e50599.
- [47] Pina Rodrigues A, Rebola J, Jorge H, et al. Visual perception and reading: new clues to patterns of dysfunction across multiple visual channels in developmental dyslexia [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2017, 58(1):309—317.
- [48] Zhang H, Liu J, Zhang Q. Neural correlates of the perception for novel objects[J]. *PLoS One*, 2013, 8(4):e62979.
- [49] Higuchi H, Moriguchi Y, Murakami H, et al. Neural basis of hierarchical visual form processing of Japanese Kanji characters[J]. *Brain Behav*, 2015, 5(12):e00413.
- [50] Fredembach B, De Boisferon AH, Gentaz E. Learning of arbitrary association between visual and auditory novel stimuli in adults: the "bond effect" of haptic exploration[J]. *PLoS One*, 2009, 4(3):e4844.
- [51] Laprevotte J, Papaxanthis C, Saltarelli S, et al. Movement detection thresholds reveal proprioceptive impairments in developmental dyslexia[J]. *Sci Rep*, 2021, 11(1):299.
- [52] De Vargas Romero M, Mota HB, Nóro LA, et al. Correlation between body balance exams and schoolchildren reading assessments[J]. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*, 2020(137) 110230.