

近视相关视觉功能损伤及视觉训练效果的研究进展

黄健华^{1,2}, 隗菱², 李炫^{2,3}, 舒昱文^{1,2}, 马子琰³, 李政霖³, 龚波², 吴峥峥², 邓铂林²

1. 川北医学院眼视光医学院, 四川 南充 637100; 2. 四川省医学科学院·四川省人民医院(电子科技大学附属医院)眼科医学中心, 四川 成都 610072; 3. 电子科技大学医学院, 四川 成都 610054

【摘要】 近视已成为全球性的重大公共卫生问题。传统研究多聚焦于眼球屈光系统与结构的改变, 而近年来, 越来越多的证据表明近视与一系列视觉功能损伤密切相关。本综述系统梳理了近视在立体视觉、调节功能、对比敏感度及注视稳定性等领域的视觉功能异常表现及其神经机制。临床研究发现, 近视者, 尤其是高度近视者, 在这些功能上普遍存在缺陷。神经影像学证据进一步揭示, 这些行为缺陷与从初级视觉皮层到高级认知与眼动控制脑网络的功能与连接异常有关。这提示近视相关的视觉功能障碍不仅源于眼球的光学状态, 也涉及中枢视觉系统的适应性重塑。此外, 综述探讨了针对近视人群的视觉训练的应用与效果, 现有研究表明这些干预可在一定程度上改善部分视觉功能并诱发中枢神经系统的可塑性改变。最后, 本文强调了将视觉功能评估与干预整合到近视临床诊疗及屈光手术个性化方案中的重要性。理解并干预近视相关的“眼-脑”整体功能异常, 是未来提升近视人群视觉质量的重要方向。

【关键词】 近视; 视觉功能; 立体视; 注视稳定性; 调节

【中图分类号】 R778.1⁺1

【文献标志码】 A

【文章编号】 1672-6170(2026)02-0048-05

Research progress on myopia related visual impairment and efficacy of visual training

HUANG Jian-hua^{1,2}, WEI Ling², LI Xuan^{2,3}, SHU Yu-wen^{1,2}, MA Zi-yan³, LI Zheng-lin³, GONG Bo², WU Zheng-zheng², DENG Bo-lin² 1. School of Optometry and Ophthalmology, North Sichuan Medical College, Nanchong 637100, China; 2. Department of Ophthalmology, Sichuan Academy of Medical Sciences & Sichuan Provincial People's Hospital (Affiliated Hospital of University of Electronic Science and Technology of China), Chengdu 610072, China; 3. School of Medicine, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China

【Corresponding author】 WU Zheng-zheng

【Abstract】 Myopia has become a major global public health issue. Traditional research often focuses on changes in the refractive system and structure of the eye. In recent years, however, more and more evidence has shown that myopia is closely related to a series of visual function impairments. This review systematically summarizes the visual functional abnormalities and their neural mechanisms of myopia in the fields of stereoscopic vision, accommodation function, contrast sensitivity and fixation stability. Clinical

- [6] Deeks ED, Lamb YN. Cenegegermin; a review in neurotrophic keratitis[J]. *Drugs*, 2020, 80(5): 489-494.
- [7] Ullrich A, Gray A, Berman C, et al. Human beta-nerve growth factor gene sequence highly homologous to that of mouse[J]. *Nature*, 1983, 303(5920): 821-825.
- [8] Lambiase A, Rama P, Bonini S, et al. Topical treatment with nerve growth factor for corneal neurotrophic ulcers[J]. *N Engl J Med*, 1998, 338(17): 1174-1180.
- [9] Bonini S, Lambiase A, Rama P, et al. Topical treatment with nerve growth factor for neurotrophic keratitis[J]. *Ophthalmology*, 2000, 107(7): 1347-1351.
- [10] Pflugfelder SC, Massaro-Giordano M, Perez VL, et al. Topical recombinant human nerve growth factor (cenegegermin) for neurotrophic keratopathy: a multicenter randomized vehicle-controlled pivotal trial[J]. *Ophthalmology*, 2020, 127(1): 14-26.
- [11] Bonini S, Lambiase A, Rama P, et al. Phase I trial of recombinant human nerve growth factor for neurotrophic keratitis[J]. *Ophthalmology*, 2018, 125(9): 1468-1471.
- [12] Bonini S, Lambiase A, Rama P, et al. Phase II randomized, double-masked, vehicle-controlled trial of recombinant human nerve growth factor for neurotrophic keratitis[J]. *Ophthalmology*, 2018, 125(9): 1332-1343.
- [13] Mastropasqua L, Lanzini M, Dua HS, et al. In Vivo Evaluation of corneal nerves and epithelial healing after treatment with recombinant nerve growth factor for neurotrophic keratopathy[J]. *Am J Ophthalmol*, 2020, 217: 278-286.
- [14] Paoletti F, Malerba F, Ercole BB, et al. A comparative analysis of the structural, functional and biological differences between mouse and human nerve growth factor[J]. *Biochim Biophys Acta*, 2015, 1854(3): 187-197.
- [15] Pedrotti E, Bonacci E, Chierigo C, et al. Eight months follow-up of corneal nerves and sensitivity after treatment with cenegegermin for neurotrophic keratopathy[J]. *Orphanet J Rare Dis*, 2022, 17(1): 63.
- [16] Balbuena-Pareja A, Bogen CS, Cox SM, et al. Effect of recombinant human nerve growth factor treatment on corneal nerve regeneration in patients with neurotrophic keratopathy[J]. *Front Neurosci*, 2023, 17: 1210179.
- [17] Bruscolini A, Marengo M, Albanese GM, et al. Long-term clinical efficacy of topical treatment with recombinant human nerve growth factor in neurotrophic keratopathy: a novel cure for a rare degenerative corneal disease [J]. *Orphanet J Rare Dis*, 2022, 17(1): 57.

(收稿日期:2026-01-04;修回日期:2026-01-28)

(本文编辑:林 贇)

studies have found that myopic individuals, especially those with high myopia, generally have deficiencies in these functions. Neuro-imaging evidence further reveals that these behavioral defects are related to abnormal functions and connections of brain networks ranging from primary visual cortex to advanced cognition and eye movement control. This suggests that visual impairments related to myopia are not only caused by the optical state of the eye, but also involve adaptive remodeling of the central visual system. Furthermore, this review discusses the application and efficacy of visual training for the myopic population. Current research indicates that these interventions can, to some extent, improve the certain visual functions and induce the plasticity within the central nervous system. Finally, this article emphasizes the importance of integrating visual function assessment and intervention into the clinical diagnosis and treatment of myopia and personalized refractive surgery plans. Understanding and intervening in the overall functional abnormalities of the "eye-brain" related to myopia is an important direction for improving the visual quality of myopic populations in the future.

【Key words】 Myopia; Visual function; Stereopsis; Fixation stability; Accommodation

近视的患病率在过去数十年中持续上升,已成为重要的公共卫生问题。流行病学研究预测,到本世纪中叶,近视将影响全球近一半人口^[1]。传统的研究主要关注近视患者的屈光状态和眼球结构变化,例如眼轴延长、脉络膜与视网膜退行性改变^[2,3]。然而,仅从眼球结构层面难以全面解释近视患者在复杂视觉任务中的功能受限。

随着视觉科学、神经生理学及神经影像学的发展,越来越多的研究开始关注近视对中枢视觉系统的潜在影响。已有证据表明,近视与视觉功能的受损密切相关,包括立体视觉、调节功能、对比敏感度以及注视稳定性。这些视觉功能依赖于从视网膜到皮层的神经加工机制,提示近视相关的视觉功能损伤可能不仅源于屈光系统的改变,还涉及视觉通路及视觉皮层层面的功能重塑。相应地,神经影像学研究也发现,近视患者在与视觉加工密切相关的脑区存在功能连接、代谢活动或神经活动模式的异常。因此,从“眼-脑整体”的视角系统理解近视相关视觉功能异常,并探索有效的功能干预策略,已成为当前研究的重要方向。本综述将围绕近视相关视觉功能损伤,系统梳理不同视觉功能异常的研究进展,并重点综述视觉训练的干预效果及其可能机制,以期对近视视觉功能的综合评估与干预提供参考。

1 近视的视觉功能异常

1.1 立体视觉 立体视觉是视觉系统整合双眼视差以感知深度信息的高级功能^[4]。临床研究显示,

高度近视患者的立体视觉低于低度近视者和非近视者。在一项屈光手术术前评估中,高度近视组的立体视觉显著恶化^[5]。另一项对空军飞行员候选人的回顾性研究也发现,正视者的立体视觉优于近视者^[6]。进一步的多因素分析表明,影响立体视觉的独立因素并非“近视本身”,而是屈光参差等其他因素。可能的机制是屈光参差导致双眼成像大小不等,从而增加双眼融合的负担,最终导致立体视觉下降。这提示光学条件和双眼视觉一致性在立体视觉形成中具有更关键作用。因此,近视尤其合并屈光参差患者需要重点评估其立体视觉状态。

目前暂无高度近视直接导致立体视觉相关皮层的损伤报道。既往在斜视患者的研究中发现,右侧视觉第三区 A 部分 (Visual Area V3A)、左侧视觉第七区和左侧顶内沟激活程度与立体视水平相关^[7]。考虑到 V3A 是深度觉加工的核心节点,猜测:在近视患者中,尤其是合并屈光参差的情况下,视网膜图像质量的下降可干扰早期视觉皮层对精细特征的编码,导致上游脑区(如 V3A 和中颞叶视觉区)的神经响应减弱或异常,最终导致立体视觉下降^[8]。然而,这一假设在近视人群中尚缺乏直接神经影像证据支持^[9]。未来需结合任务态影像学进一步验证。

1.2 调节功能 调节是眼球通过改变晶状体形态确保物像准确聚焦于视网膜的过程^[10]。如今普遍认为,近视群体较正视者表现出更加明显的调节滞后。高度近视患者常出现调节幅度降低、调节反应迟滞^[11]。但也有研究指出:近视发生前的调节滞后并无明显升高。近视发病当年,调节滞后仍未普遍增加^[12,13]。这提示调节滞后更可能是近视的结果,而非其致病因素。该观点挑战了“调节滞后-远视性离焦-眼轴增长”的经典模型,为理解调节与近视关系提供了新视角。

神经影像研究显示,高度近视者在额叶、顶叶及丘脑等多个与视觉注意及眼动控制相关的脑区存在功能连接或自发活动的变化。例如,额上回眶部、中额叶回与额叶眼区部分重叠的区域呈现出连

【基金项目】四川省科技厅科研基金资助项目(编号:2026JDKP0062);四川省人民医院科研基金资助项目(编号:2024HX024,2023HX022);成都市科技局科研基金资助项目(编号:2024-YF05-01741-SN)

【通讯作者简介】吴峥峥,女,硕士,主任医师。中国医师协会眼科分会委员,中华医学会眼科视光学组及防盲与流行病学组委员,中国医疗保健国际交流促进会视觉健康分会常务委员,中国医药教育协会眼科装备发展促进分会副主任委员,海峡两岸医药卫生交流协会眼科学专业委员会眼屈光及视功能疾患学组副组长,四川省医学会白内障学组组长,四川省医学会眼科专委会候任主任委员,四川省医师协会眼科医师分会会长。主要研究方向:白内障手术,近视手术。

接或灌注降低^[14];中央旁小叶与顶内沟等顶叶区域的活动亦有所改变;部分丘脑区域也观测到自发活动下降^[15,16]。这些脑区与视觉注意、眼动调节相关,因此上述变化可能与高度近视者在调节反应中的行为差异有关。目前尚缺乏基于调节任务的任务态影像学证据,调节功能下降与视觉中枢受损需要进一步的研究。

1.3 对比敏感度 对比敏感度是衡量视觉系统在不同空间频率下区分目标与背景的能力,是评价视觉质量的核心指标^[17]。对比敏感度与生活质量密切相关。对比敏感度的下降会导致日常活动表现不佳,视觉依赖任务成功率降低^[18]。因此,对比敏感度是一个比最佳矫正视力更敏感、更真实反应视觉质量的指标。研究表明,与正视者相比,近视者尤其是高度近视者的对比敏感度函数(contrast sensitivity function, CSF)曲线整体下移,高空间频率处下降最为明显;部分研究还提示低、中、高度近视的 CSF 曲线存在“阶梯性”下降趋势^[18]。这可能与高度近视的眼镜厚度所产生的光学改变(如像差与周边畸变)有关^[19,20]。然而,即便在最佳矫正条件下,高度近视者的对比敏感度仍低于正视者。

对比敏感度的感知涉及从视网膜经外侧膝状体至视觉皮层的多级平行加工通路^[21]。其中包括对高空间频率信息高度敏感的 P 通路以及对低频和动态信息敏感的 M 通路。临床研究显示,高度近视者在高空间频率段对比敏感度下降更为明显,这一表现与 P 通路加工特征相一致^[18]。部分影像学研究亦提示高度近视者在初级视觉皮层区域的自发神经活动降低^[22,23]。在形觉剥夺性近视大鼠模型中,包括丘脑外侧膝状体在内的多个视觉相关脑区出现结构体积减小,提示在发育时期视觉通路的中继环节因异常视觉经验可发生结构性重构^[24]。综合现有证据,近视相关对比敏感度下降可能涉及不同视觉通路加工效率的改变,但具体通路层级的损伤机制仍有待进一步电生理的研究验证。

1.4 注视稳定性 注视稳定性是指眼球保持稳定注视目标位置的能力。正常注视过程中包含微扫视、微震颤和漂移等微小眼动,其协调与节律性由复杂的眼动控制网络维持。近视患者特别是高度近视个体在注视稳定性方面普遍表现较差,表现为微扫视振幅增大、注视漂移范围扩大以及注视点波动增强。多篇研究显示近视度数越高,注视稳定性越差,微扫视振幅增大,扫视椭圆面积增大^[25-27]。

神经影像研究提示,高度近视者在额顶叶调控

网络及小脑网络中存在功能连接异常。额顶叶网络(包括顶内沟及额叶眼区)参与主动注视控制和注意调节,其连接改变可能降低注视维持的精度。小脑则在扫视校准及微扫视调节中发挥关键作用,其功能异常可能影响微小眼动的稳定性^[22]。现有证据主要来源于静息态研究,对于任务态眼动调控的网络机制仍需进一步探索。

此外,注视异常可能也是高度近视患者对比敏感度下降的原因之一。已有研究指出,个体能够通过主动调节眼动幅度来优化对不同空间频率信息的提取^[28]。前文中提到高度近视患者的注视稳定性下降,其对眼球运动的精细控制能力亦有所减弱。这意味着其眼动幅度可能在无意识中偏大,从而扰动正常的眼球微小运动模式,最终削弱视觉系统对关键信息的整合能力,导致对比敏感度下降。

2 视觉训练在近视人群的应用

近年来,视觉训练在改善近视相关视觉功能中的作用逐渐受到关注。按训练目标可分为双眼视觉训练、视觉感知训练、基于 3D 的数字化训练以及神经调控辅助方法。现有研究在不改变屈光状态的前提下,已在不同程度上证实近视人群的部分脑视觉功能具有可塑性^[29,30]。

2.1 双眼视觉训练 双眼训练最早应用于弱视治疗,其核心在于减少双眼不平衡与抑制,从而恢复立体觉与双眼融合。Hess 等提出的双眼治疗模式表明,即使超过发育敏感期,双眼视觉仍具有可塑性^[31,32]。该理论同样为近视相关功能改善提供了依据。研究显示,近视者的双眼协同与立体视可随训练改善^[33]。Gao 等利用 3D 立体任务发现,短期训练后近视参与者的调节-集合功能改善,同时前额叶与顶叶区域的神经血流响应发生适应性变化,提示双眼调控网络具有可训练性^[34]。整体而言,双眼训练已具备改善近视人群立体视与双眼协同能力的实证支持,但作用强度随屈光程度不同而异。

2.2 视觉感知训练 感知学习通过重复视觉任务提升皮层处理效率,是目前近视视觉加工改善证据较为充分的方向之一^[35]。Yan 等发现在轻中度近视者中,高空间频率对比任务训练可显著提高对比敏感度与视觉分辨能力,并伴随皮层神经信噪比及处理效率的提升^[36]。Camilleri 等进一步结合经颅随机噪声刺激(transcranial random noise stimulation, tRNS)与感知学习,发现训练后裸眼视力和对比敏感度改善,而该变化并非源自屈光度改变,而是皮层加工效率增强^[37]。

2.3 基于 3D 的视觉训练与数字化康复 3D 视觉训练通过动态视差和深度线索刺激视觉系统。Gao 等的研究显示,短期 3D 训练可引发前额叶-顶叶区域神经血流的适应性变化,并与调节功能改善同步出现^[34]。部分临床研究在儿童近视干预中观察到,基于裸眼 3D 技术的训练在裸眼视力及调节相关指标上优于对照组,但其对近视进展的长期影响仍需进一步验证^[37]。

2.4 神经调控辅助训练 非侵入性脑刺激(如 tRNS)可提升视觉皮层兴奋性,并增强训练诱发的可塑性效应。现有研究表明,神经调控并非独立干预方式,而是通过放大感知学习等训练效果,加速近视者视觉功能改善^[34]。

2.5 神经影像证据 尽管相关神经影像研究数量有限,现有证据也充分证明视觉训练可引起视觉功能可塑性变化。关于特定皮层区连接变化及白质结构可塑性的证据仍不足,需进一步的研究。

3 临床应用

视觉功能不仅是新兴的科研方向,还更多地应用于临床。临床医生可以更加准确判断视觉质量,而非依赖最佳矫正视力这个单一指标。立体视觉可以预测双眼视觉质量、评估视觉疲劳风险。对比敏感度反映夜间视觉、阅读质量。调节能力可以评估近距离视觉需求。注视稳定性可以评估注意力、眼动控制能力,以及是否存在视疲劳倾向。这些指标在临床诊疗中具有重要价值^[38,39]。

在手术方面,2023《成人白内障手术临床实践指南》尚未将视觉功能作为屈光和白内障手术术前的必选检查项目,但许多临床研究已建议:在白内障手术或屈光手术前,评估立体视觉、对比敏感度等视觉功能可帮助预测术后视觉质量^[40]。而在多焦点人工晶体选择中,部分研究把对比敏感度作为晶体选择的关键参考指标之一^[41]。此外视觉功能异常可能是术后“视觉不适应”的潜在风险因素^[42]。因此,将视觉功能评估纳入术前流程,有助于个性化人工晶体选择,预测视觉满意度,减少术后主观视觉困扰。

在可以预见的将来,视觉功能检查不仅将在临床上被广泛使用,还会出现在疾病的纵向研究当中,包括白内障,近视,斜视等伴有视觉障碍的疾病。视觉功能的研究将更加依赖影像学参与的多模态整合研究^[43]。功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI),功能性近红外光谱技术(functional near-infrared spectroscopy, fNIRS),弥散张量成像(diffusion tensor imaging, DTI)等技术将成为脑视觉功能研究中研究功能连

接,脑网络改变的关键手段^[44]。而随着机制的深入研究,视觉功能的康复干预也将成为研究热点。

综上所述,视觉功能损伤不仅是因为眼球光学状态的改变,还涉及到视觉皮层与相关脑区网络的适应性重塑。理解近视的视觉功能损伤,需要将提升眼部成像质量与重塑脑部信息加工能力放在同等重要的位置。

【参考文献】

- [1] Holden BA, Fricke TR, Wilson DA, et al. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050[J]. *Ophthalmology*, 2016, 123(5): 1036-1042.
- [2] Jonas JB, Jonas RA, Panda-Jonas S. Clinical and histological aspects of the anatomy of myopia, myopic macular degeneration and myopia-associated optic neuropathy[J]. *Progress in Retinal and Eye Research*, 2025, 109: 101402.
- [3] Ostrin LA, Harb E, Nickla DL, et al. IMI-the dynamic choroid: new insights, challenges, and potential significance for human Myopia[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2023, 64(6): 4.
- [4] Sprague WW, Cooper EA, Tošić I, et al. Stereopsis is adaptive for the natural environment[J]. *Science Advances*, 2015, 1(4): e1400254.
- [5] Qiao S, Chen J, Zhang J, et al. Study on the impact of refractive anisometropia on strabismus, stereopsis, and amblyopia in children[J]. *Medicine*, 2024, 103(44): e40205.
- [6] Armarnik S, Kozlov Y, Yahalomi T, et al. The influence of refractive state and heterophorias on visual acuity and stereoacuity in healthy young adults[J]. *Journal of AAPOS*, 2022, 26(4): 207-211.
- [7] Xi S, Zhou Y, Yao J, et al. Cortical deficits are correlated with impaired stereopsis in patients with strabismus[J]. *Neuroscience Bulletin*, 2023, 39(7): 1039-1049.
- [8] Mirzajani A, Sarlaki E, Kharazi HH, et al. Effect of lens-induced myopia on visual cortex activity: a functional MR imaging study[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2011, 32(7): 1426-1429.
- [9] Alvarez I, Hurley SA, Parker AJ, et al. Human primary visual cortex shows larger population receptive fields for binocular disparity-defined stimuli[J]. *Brain Struct Funct*, 2021, 226(9): 2819-2838.
- [10] Pu Y, Hoshino M, Uesugi K, et al. Age-related changes in lens elasticity contribute more to accommodative decline than shape change[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2025, 66(1): 16.
- [11] Semenova Y, Urazhanova M, Lim L, et al. Refractive errors, amplitude of accommodation, and myopia progression in kazakhstani medical students: 5-year follow-up[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2024, 13(13): 3985.
- [12] Mutti DO, Mitchell GL, Hayes JR, et al. Accommodative lag before and after the onset of myopia[J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2006, 47(2): 837-843.
- [13] Chen Y, Drobe B, Zhang C, et al. Accommodation is unrelated to myopia progression in Chinese myopic children[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 12056.
- [14] Wei B, Huang X, Ji Y, et al. Analyzing the topological properties

- of resting-state brain function network connectivity based on graph theoretical methods in patients with high myopia [J]. *BMC Ophthalmology*, 2024, 24(1): 281.
- [15] Zhang X, Liu L, Yang F, et al. Neurovascular coupling dysfunction in high myopia patients: Evidence from a multi-modal magnetic resonance imaging analysis [J]. *Journal of Neuroradiology*, 2024, 51(4): 101174.
- [16] Zhou L, Yuan HY, Chai H, et al. Alterations in dynamic effective connectivity of brain functional networks in patients with high myopia: a Granger causality analysis [J]. *Neuroreport*, 2025, 36(7): 461-468.
- [17] Wang J, Liu X, Huang J, et al. Reduced contrast sensitivity function is correlated with changes to cone photoreceptors in simple high myopia [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2024, 18: 1274651.
- [18] Paulsen AJ, Schubert CR, Johnson LJ, et al. Association of cadmium and lead exposure with the incidence of contrast sensitivity impairment among middle-aged adults [J]. *JAMA Ophthalmology*, 2018, 136(11): 1282-1290.
- [19] Ye Y, Xian Y, Liu F, et al. Characteristics and related parameters of quick contrast sensitivity function in chinese ametropia children [J]. *Eye & Contact Lens*, 2023, 49(5): 208-213.
- [20] Ye Y, Aruma A, Zhao W, et al. A novel quick contrast sensitivity function test in Chinese adults with myopia and its related parameters [J]. *Graefes' s Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 2023, 261(6): 1659-1667.
- [21] Masri RA, Grünert U, Martin PR. Analysis of parvocellular and magnocellular visual pathways in human retina [J]. *Journal of Neuroscience*, 2020, 40(42): 8132-8148.
- [22] Ji Y, Shi L, Cheng Q, et al. Abnormal large-scale neuronal network in high myopia [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2022, 16: 870350.
- [23] Poudel S, Jin J, Rahimi-Nasrabadi H, et al. Contrast sensitivity of ON and OFF Human retinal pathways in myopia [J]. *Journal of Neuroscience*, 2024, 44(3): e1487232023.
- [24] Liu J, Lei Y, Diao Y, et al. Altered whole-brain gray matter volume in form-deprivation myopia rats based on voxel-based morphometry: A pilot study [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2023, 17: 1113578.
- [25] Zhu X, He W, Zhang K, et al. Fixation characteristics in highly myopic eyes: the shanghai high myopia study [J]. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 6502.
- [26] 王瑶, 邓铂林, 牟英, 等. 低度近视青少年知觉眼位和注视稳定性的临床研究 [J]. *国际眼科杂志*, 2024, 24(9): 1491-1495.
- [27] 杨必, 谭芬, 徐舒展, 等. 不同程度的青年近视患者眼动行为特征分析研究 [J]. *四川大学学报(医学版)*, 2022, 53(5): 911-915.
- [28] Casile A, Victor JD, Rucci M. Contrast sensitivity reveals an oculomotor strategy for temporally encoding space [J]. *eLife*, 2019, 8: e40924.
- [29] Sabel BA, Thut G, Hauelsen J, et al. Vision modulation, plasticity and restoration using non-invasive brain stimulation - An IFCN-sponsored review [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2020, 131(3): 887-911.
- [30] Collignon O, Dormal G, De Heering A, et al. Long-lasting cross-modal cortical reorganization triggered by brief postnatal visual deprivation [J]. *Current Biology*, 2015, 25(18): 2379-2383.
- [31] Hess RF, Thompson B. Amblyopia and the binocular approach to its therapy [J]. *Vision Research*, 2015, 114: 4-16.
- [32] Hess RF, Mansouri B, Thompson B. A new binocular approach to the treatment of amblyopia in adults well beyond the critical period of visual development [J]. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 2010, 28(6): 793-802.
- [33] Lv Z, Tao Z, Chu H, et al. Efficacy of naked-eye 3D technology in mitigating myopia progression among children [J]. *Translational Pediatrics*, 2025, 14(4): 628-638.
- [34] Gao C, Huang H, Zhan J, et al. Adaptive changes in neurovascular properties with binocular accommodation functions in myopic participants by 3D visual training: an EEG and fNIRS study [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2024, 32: 2382-2391.
- [35] Chang M, Suzuki S, Kurose T, et al. Pretraining alpha rhythm enhancement by neurofeedback facilitates short-term perceptual learning and improves visual acuity by facilitated consolidation [J]. *Frontiers in Neuroergonomics*, 2024, 5: 1399578.
- [36] Yan FF, Zhou J, Zhao W, et al. Perceptual learning improves neural processing in myopic vision [J]. *Journal of Vision*, 2015, 15(10): 12.
- [37] Camilleri R, Pavan A, Campana G. The application of online transcranial random noise stimulation and perceptual learning in the improvement of visual functions in mild myopia [J]. *Neuropsychologia*, 2016, 89: 225-231.
- [38] Gao Y, Lim EW, Yang A, et al. The impact of spectacle lenses for myopia control on visual functions [J]. *Ophthalmic Physiol*, 2021, 41(3): 10-41.
- [39] Janarthanan SD, Ballae Ganeshrao S, Watt K, et al. Comparison of visual functions among early and late onset myopia [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 15756.
- [40] 中华医学会眼科学分会白内障及屈光手术学组. 成人白内障手术临床实践指南(2023) [J]. *中华眼科杂志*, 2023, 59(12): 977-987.
- [41] Garob Bio S, Zuche H, Hall U, et al. To what extent do cataracts and cataract surgery change perception [J]. *Journal of Vision*, 2025, 25(10): 13.
- [42] 靳梅, 杨宗玲, 陈培莉. 立体视觉在外伤性白内障术后视功能评价中的价值 [J]. *眼外伤职业眼病杂志*, 2001, 23(4): 415-416.
- [43] Lin H, Zhang L, Lin D, et al. Visual restoration after cataract surgery promotes functional and structural brain recovery [J]. *EBio Medicine*, 2018, 30: 52-61.
- [44] Scaffei E, Bosetti C, Battini R, et al. fNIRS as a biomarker for X-linked neurodevelopmental disorders: leveraging visual processing to assess brain function [J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2025, 19: 1560786.

(收稿日期:2026-02-14;修回日期:2026-02-26)

(本文编辑:林 贇)