

· 专家述评 ·

重视视觉科学研究,推进全面眼健康

史学锋¹ 顾宇² 黄昌兵^{3,4} 陈力群⁵ 翁史钧²

¹天津市眼科医院 天津医科大学眼科临床学院 南开大学附属天津市眼科医院 天津市眼科研究所 天津市眼科学与视觉科学重点实验室,天津 300020;²复旦大学脑科学研究院 脑功能与脑疾病全国重点实验室 教育部脑科学前沿科学中心,上海 200032;³中国科学院心理研究所 认知科学与心理健康全国重点实验室,北京 100101;⁴中国科学院大学心理学系,北京 100049;⁵天津大学医学院 医学工程与转化医学研究院,天津 300072

通信作者:史学锋,Email:shixf_tmu@163.com

【摘要】 视觉系统是人类重要的感觉系统,是中枢神经系统的重要组成部分,承载着 80% 以上的外界信息获取功能。视觉功能水平的高低是健康水平的重要标志。随着经济社会发展,人民群众对眼健康有了更高需求,眼健康事业已从以治病为中心向以公众眼健康为中心转变,相关的关键科学问题包括如何有效开展盲和视觉损伤的早期预防与诊治、如何全面提升眼病患者的视觉质量(不仅看得见,还要看得清、看得好)、如何满足人民群众多层次多样化的眼健康需求等。视觉科学是探索视觉系统发育、视觉产生机制以及与视觉相关的感知、认知和行为等脑科学问题相关的一系列交叉学科的统称。充分重视并深入开展视觉科学研究,对推进全面眼健康,落实健康中国战略具有重大意义。本文概述了视觉科学的内涵及其研究意义,并在此基础上就几类重要眼病,如近视、弱视、白内障、眼底病、青光眼、角膜病等中的视觉科学问题逐一加以探讨,回顾我国视觉科学的历史基础,择要梳理我国在这一领域取得的进展,分析我国在该研究领域所面临的态势,在此基础上提出推动视觉科学发展的具体策略和建议,以促进我国视觉科学研究水平的持续提升,为推进全面眼健康提供支撑。

【关键词】 视觉科学;眼健康;脑科学;发展策略

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(81770956);天津市 131 创新型人才团队项目(201936);天津市卫生健康科技重点项目(TJWJ2023ZD008);国家重点研发计划(2022YFF1202900);天津市医学重点学科(专科)建设项目(TJYXZDXK-3-004A-3)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20250521-00164

Advancing visual science to promote comprehensive eye health

Shi Xuefeng¹, Gu Yu², Huang Changbing^{3,4}, Chen Liqun⁵, Weng Shijun²

¹Tianjin Eye Hospital, Clinical College of Ophthalmology of Tianjin Medical University, Nankai University Affiliated Tianjin Eye Hospital, Tianjin Eye Institute, Tianjin Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science, Tianjin 300020, China; ²Institutes of Brain Science of Fudan University, State Key Laboratory of Brain Function and Disorders, MOE Frontiers Center for Brain Science, Shanghai 200032, China; ³State Key Laboratory of Cognitive Science and Mental Health, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ⁴Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁵Medical School of Tianjin University, Academy of Medical Engineering and Translational Medicine, Tianjin 300072, China

Corresponding author: Shi Xuefeng, Email: shixf_tmu@163.com

【Abstract】 Visual system is a critical sensory system in humans and a vital component of the central nervous system, which is responsible for over 80% of external information acquisition. Visual function is a key indicator of overall health. With socioeconomic development, the public has higher expectations for eye health, shifting the focus of eye health initiatives from disease treatment to comprehensive public eye health. Key scientific challenges include how to effectively prevent, diagnose, and treat blindness and visual impairment at an early stage; how to enhance the overall visual quality of patients to ensure not just sight but clear and comfortable vision; and how to meet the public's diverse and multi-tiered eye health needs. Visual science is an interdisciplinary field exploring the development of the visual

system, the mechanisms of vision, and brain-related perceptual, cognitive and behavioral processes involving sight. Prioritizing and advancing visual science research is of great significance for promoting comprehensive eye health and implementing the Healthy China Strategy. This article first outlines the concept and research significance of visual science. It then highlights the key scientific questions in visual science pertaining to several major eye diseases, such as myopia, amblyopia, cataract, fundus diseases, glaucoma, and corneal diseases, reviews the historical foundation of visual science research in China, selectively summarizes key achievements and ongoing progress in this field, analyzes the landscape and challenges faced by domestic research, and proposes, to this end, strategies to advance visual science in China. These recommendations are designed to promote visual science research in China and ultimately advance comprehensive eye health.

[Key words] Visual science; Eye health; Brain science; Development strategy

Fund program: General Program of the National Natural Science Foundation of China (81770956); Project of Tianjin 131 Innovative Talent Team (201936); Health Science Foundation of Tianjin (TJWJ2023ZD008); National Key R&D Program of China (2022YFF1202900); Tianjin Key Medical Discipline (Specialty) Construction Project (TJYXZDXK-3-004A-3)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20250521-00164

视觉科学是探索视觉系统发育、视觉产生机制以及视觉相关的感知、认知和行为等脑科学问题相关的一系列交叉学科的统称,主要包括视觉神经科学、视觉心理物理学、视觉计算科学和视觉认知心理学等^[1]。视觉作为人类重要的感知通道,承载着 80% 以上外界信息的获取功能。在数字化时代背景下,视觉健康不仅关乎个人生活质量,也是影响国民健康素质和社会经济发展的重要因素。作为一门综合性学科,视觉科学深度融合了眼科学、神经科学、心理学与计算机科学等多领域知识,其研究体系贯穿从视网膜光信号感知到大脑高级认知功能的全过程,涵盖视觉感知的神经生物学基础、心理物理学特性和神经计算模型等多个层面。在眼健康服务需求的驱动下,随着技术手段的不断进步,以上视觉科学研究范畴已在一定程度上得到拓展。虚拟现实、人工智能等新技术的引入为视觉功能评估和眼病诊疗带来了革命性变革的机遇。视觉科学与工程技术的交叉融合,催生了仿生视觉、智能助视、视觉脑机接口等创新应用的涌现,这些进展推动了广义的视觉科学的形成和发展,更为核心技术突破和产业发展提供了重要支撑。

视觉科学与眼科学既有所区别又密不可分。眼科学是临床医学学科,而视觉科学是侧重基础与应用基础研究领域的交叉学科。视觉科学侧重于对视觉系统发育和视觉功能产生机制的理解,关注视觉感知信息的产生、传导、加工以及对视觉认知和行为的影响,即关注“如何看见”的底层逻辑及其影响因素。眼科学关注视觉器官疾病的发生、发展、转归、诊断、治疗和预防,眼科学的任务是维护人们“享有看见的权利”。因此,二者具有共同的目标和使命。视觉科学作为一门

融合多学科的交叉领域,正在引领眼健康技术的革命性突破。本文将从我国眼健康领域的关键视觉科学问题出发,回顾我国视觉科学研究的历史基础与最新进展,剖析当前发展面临的机遇与挑战,并提出推动视觉科学发展的策略建议,为推动全面眼健康提供参考。

1 我国眼健康领域的视觉科学问题

包括盲在内的视觉功能损伤严重影响人民群众的身心健康,显著降低其生活质量,加重家庭和社会负担,是关乎民生福祉的重要公共卫生问题和社会问题^[2]。随着经济社会发展及人口老龄化进程的加剧,人民群众对眼健康有了更高需求,推动眼健康事业发展需从以治病为中心向以人民健康为中心转变,关注儿童青少年和老年人 2 个重点人群,聚焦近视等屈光不正、白内障、眼底病、青光眼、角膜盲等重点眼病,全面提升重点人群眼健康水平。当前,我国眼健康事业已进入追求高质量发展的新阶段,深入开展视觉科学研究,对推进全面眼健康工作,落实健康中国战略具有重大意义。下面就几类重点眼病研究中的视觉科学问题进行逐一探讨,所举不全,谨此抛砖引玉。

1.1 近视

近视是一个全球性的公共卫生问题,预计到 2050 年,全球 50% 的人口将患有近视,其中 9.38 亿人将患有高度近视^[3]。国家卫健委 2020 年的近视专项调查结果显示,我国儿童青少年的总体近视率为 52.7%^[4]。近视研究中的视觉科学问题涉及从光学成像异常到眼球生长调控的复杂机制,涵盖视觉信号传递、神经调控及环境交互等多层次问题^[5]。例如,周边视网膜远视性离焦信号如何被视网膜神经细胞编码

从而调控眼轴向近视化方向生长^[6]？其神经环路机制是什么^[7]？近距离工作通过什么信号途径影响视网膜神经递质释放与离焦信息的编码，从而调控眼轴生长？视网膜多巴胺能神经元如何整合光信号与离焦信息，进而调控脉络膜厚度变化及巩膜重塑^[8]？通常认为近视发展与视网膜中多巴胺水平密切相关，但值得注意的是，在不同物种中的研究结果存在差异^[8]。在小鼠形觉剥夺性近视模型中的研究发现，其视网膜多巴胺水平并未发生显著变化^[9]，这提示可能不存在依赖于多巴胺水平变化的近视发生机制^[10]，探究这些机制对于全面理解近视的发病机制至关重要。例如，自感光视网膜神经节细胞 (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGCs) 及其特有的视黑素信号如何调制屈光发育与近视形成^[11]，而上述过程是否依赖于该类细胞与多巴胺能无长突细胞的相互作用^[11-12]？昼夜节律调控近视发展的神经环路机制是什么？目前通过家系研究、全基因组关联分析等已经发现很多近视易感基因的表达富集在视网膜^[13]，但这些易感基因如何参与调控近视发展的功能验证实验及相关神经环路机制探索仍明显不足。采用近视动物模型的研究策略是目前探索近视发生机制的主流范式。然而，常用的所谓“形觉剥夺性近视”等模型存在着无法区分形觉剥夺和光剥夺等问题，相关影响因素也无法精确控制。对于近视这一复杂疾病，动物模型通常无法实现多因素精准控制和模拟，但类器官模型（或芯片等）有可能在一定程度上加以弥补。总之，围绕近视发生机制开展的视觉科学研究将有助于阐明目前相关近视防控手段的底层作用机制，建立环境与遗传因素协同调控眼球形态改变的完整机制链，为创新和优化近视防控策略提供源头支撑。

1.2 弱视

弱视是影响儿童眼健康的常见发育性眼病，我国弱视患病率约为 2.8%^[14]。弱视发病年龄早，若得不到有效治疗，可造成终生视力低下和视功能损害，严重影响患者的视觉和生活质量。弱视治疗周期长，易复发，且部分患儿利用现有手段视力难以提高。成年弱视由于视觉发育可塑性关键期关闭，目前尚无有效治疗方法。弱视研究中的视觉科学问题聚焦于视觉发育关键期内异常视觉经验导致其视觉神经系统功能与结构产生重塑的机制，并涉及关键期前经验依赖的和非经验依赖的神经环路发育的潜在影响及成年期视觉可塑性的再激活^[15-16]。弱视是一种视觉系统发育障碍性疾病，对弱视发病机制的研究始于诺贝尔奖获得者 David Hubel 和 Torsten Wiesel 的开创性工作。自他们

的工作以来，视皮层长期被认为是弱视的主要发病部位。但近年来的研究表明，弱视也存在皮层下中枢发育异常^[17-18]。此外，弱视的功能损害是多维度的，除了以形觉感知损害为特征的视力降低外，还包括立体视觉损害、“拥挤现象”（相较单个字母视力，行字母视力的下降）、运动感知能力下降、调节功能异常以及注视性眼球运动功能受损等^[19-21]。视皮层虽然是视觉信息处理的主要部位，但其功能障碍无法完全解释弱视的多维度缺陷。多数弱视患者的多维度功能缺陷即使在视力改善后仍持续存在，这也可能是部分患者在“治愈”后仍复发的原因。探究弱视的多功能和多脑区损害机制将为弱视的全面康复策略提供新的思路。在视觉发育过程中，视皮层可塑性受到多种分子的调控，这些分子通过大量平行和串联通路形成复杂网络，共同调节功能和结构的改变^[22]。整合多组学分析与神经科学技术将为揭示弱视的分子和环路机制及开发新型治疗靶点提供新的范式。

1.3 白内障

白内障是影响老年人群眼健康的主要致盲眼病，同时先天性白内障可对儿童视觉发育造成严重影响，甚至造成终生视力残疾。白内障研究中的视觉科学问题涉及晶状体混浊及人工晶状体材料光学设计对光学成像、神经信号传递及视觉感知的影响、白内障术后大脑重塑与神经适应以及先天性白内障术后视功能重建等。清晰的视觉感知离不开屈光力的动态调节以及良好的双眼协同和视觉感知的神经适应，对白内障术后调节功能丧失如何影响视觉系统神经适应，不同人工晶状体设计对对比敏感度、眩光抑制、夜间视力和波前像差等视觉质量的影响与神经适应机制，单眼白内障患者术后长期双眼不等像和/或双眼调节不平衡对视觉感知的影响，以及白内障术后双眼视觉功能重建与康复等科学问题的探究将有助于提升白内障人群术后视觉质量。随着干细胞技术的进展，晶状体再生有望成为一种消除屈光介质混浊并恢复人眼调节功能的方案^[23]，但睫状肌与囊袋生物力学的耦合以及闭环神经控制的适应仍是为实现动态清晰成像需要研究的科学问题。深入开展白内障领域的视觉科学研究将有助于进一步提升眼健康技术水平，回应患者术后“看得清、看得好、看得舒适”的个性化需求，满足人民群众日益增长的生活质量需要。

1.4 眼底病

近年来，我国糖尿病视网膜病变 (diabetic retinopathy, DR)、年龄相关性黄斑变性 (age-related macular degeneration, AMD) 等眼底疾病的患病人数明显增多，

已成为主要的致盲原因之一^[24]。早期筛查、规范治疗和长期管理是减少眼底病致盲风险的关键。眼底病直接影响视觉信号的初始加工,开展眼底病领域的视觉科学研究对认识眼底病视功能损害的机制、开发新的有效干预和治疗手段至关重要。例如,在光感受器损伤与视觉信号输入层面,黄斑变性中视锥细胞结构和功能紊乱对黄斑区能量代谢的影响^[25],DR 中视杆细胞在高血糖条件下对血管生成的作用^[26],早期 DR 中光感受器病变与血管病变发展间的关系;在视网膜神经网络层面,视网膜双极细胞在光感受器死亡后或视网膜干细胞、类器官移植后如何改变突触连接,视网膜多巴胺能无长突细胞如何调控视神经再生与视功能恢复,以及 Müller 细胞在视网膜疾病中的作用和机制;在高级视觉通路重塑层面,黄斑病变患者的旁中心注视训练如何诱导视皮层功能重组,视网膜大面积损伤后外侧膝状体、上丘及视皮层神经元是否转向接受健康视网膜区域的输入;视觉功能评估方面,多焦视网膜电图的 N1/P1 波潜伏期延长及振荡电位异常能否预测早期 DR 的进展;在治疗和干预方面,如何提高腺相关病毒载体在视网膜疾病基因治疗中的转染效率,如何提高干细胞衍生的视网膜类器官与宿主视网膜的突触连接效能,人工视网膜假体的刺激模式如何匹配 RGCs 的感受野特性,视皮层脑机接口如何实现对复杂形状和运动感知的高精度实时编码及对视皮层结构和功能的重塑。眼底病方向的视觉科学研究不仅涉及视网膜各级神经细胞以及视觉中枢结构和功能损伤与重塑机制,而且涉及神经与血管相互作用、神经与免疫相互调节以及“肝-眼轴”等内脏器官调控作用等多方位视角。当前需重点关注通过视觉康复训练等手段,实现对患者残余视觉功能的有效利用,同时需开发更有效的康复技术手段,以实现视觉系统功能的修复与重塑。面对不可逆盲的挑战,开发新的,甚至颠覆性的治疗手段,使低视力者“看得更清和更好”、使盲者拥有“有用”的生活视力和视觉功能是该领域研究的长期重任。当前该领域研究的方向将高度集成从基因编辑到类脑器官、从神经工程到认知科学等前沿交叉学科,强化多学科协同创新,以加速眼底病诊疗技术的革新。

1.5 青光眼

青光眼是全球首位不可逆性致盲眼病,其对视功能的损害具有隐匿性、进行性和不可逆性的特点。2020 年,我国青光眼患病人数达 2 100 万,其中致盲人数达 567 万^[27]。青光眼作为一种神经性致盲眼病,其研究涉及一系列的视觉科学问题,包括从 RGCs 损伤

到大脑视觉通路重塑的复杂过程,涵盖结构、功能、感知及代偿等多个层面。比如,跨筛板压力差及筛板微结构力学特性如何影响轴突运输;高眼压与正常眼压性青光眼神经血管功能障碍的发生机制,视网膜血流与 RGCs 功能的时空关联;青光眼早期特定 RGCs 亚型的脆弱性及其受损机制;视网膜胶质细胞在青光眼所致 RGCs 损伤中的作用;细胞焦亡在青光神经损伤中的作用机制;青光眼视神经损伤后的视觉代偿与神经可塑性;青光眼对视觉中枢各脑区功能的影响、微环路重塑的机制以及提升青光眼患者残余视觉功能的途径等。在视神经保护与修复策略方面,除传统的降压治疗外,神经营养因子补充、胶质细胞活性调控、氧化应激抑制等策略在动物模型中也显示出一定的视神经保护效果,基因治疗、干细胞修复或替代疗法等也展现出一定治疗潜力。随着疾病进展,青光眼不仅损害视神经和 RGCs,还可引起中枢视觉系统的重塑,甚至青光眼患者在视神经轴突丢失前已出现突触连接受损和视皮层功能障碍。通过视觉康复训练和基于视觉可塑性原理的非侵入性脑刺激等技术,有望重塑突触连接,激活残余视觉功能,改善患者对比敏感度、视野利用效率及生活质量。相关视觉科学研究将有助于为青光眼手术及降眼压药物治疗后的视功能康复和精准干预提供依据,提升青光眼人群全程眼健康水平。

1.6 角膜病

角膜提供了全眼 70% 的屈光力,其透明性、曲面几何规则性与神经支配完整性共同构成高质量视觉的重要物理基础。角膜病是我国主要的致盲眼病之一,患病人数高达 3 000 多万,与此同时,随着人民群众眼健康意识的不断提升和现代社会职业需求的驱动,我国对眼表健康和角膜屈光手术的需求不断增多。角膜病研究中的视觉科学问题主要围绕角膜结构与功能改变如何影响视觉质量、光信号传递及神经感知等。角膜相关的视觉功能障碍不仅源于光学成像质量下降,更涉及神经感知调控、眼表微环境稳态及中枢适应机制等多个层面^[28-29]。在光学层面,角膜表面不规则引入的高阶像差是影响术后视觉质量的关键因素。人眼具有复杂的像差补偿机制^[28],涵盖角膜前后表面之间、角膜与眼内像差之间的相互补偿,以及神经系统对长期像差的适应能力。角膜生物力学特性亦直接决定其光学性能的稳定性,角膜术后弹性模量与角膜滞后的变化与高阶像差增加及视觉质量波动具有明确相关性。融合生物力学特性和光学建模,预测并优化术后视觉质量,是角膜屈光手术领域的重要研究方向。在神经与感知层面,三叉神经角膜分支损伤可引发角膜

知觉减退与神经营养障碍,加剧干眼症状,影响泪膜稳定性和视觉质量^[29]。角膜神经支配的精确模式如何调控上皮屏障功能,神经与上皮细胞、免疫细胞间的相互作用机制,以及神经对黏蛋白分泌和泪膜形成的精细调控,均为理解角膜微环境稳态与视觉质量关系的核心科学问题。在术后康复层面,角膜移植术后神经再支配的时空动态及其与视觉质量恢复的关系亟待研究。探索促进神经再生的策略并评估其对视觉质量的影响具有重要临床意义。视觉系统具有神经可塑性,能够部分补偿外周光学缺陷。这种神经适应机制在角膜与屈光手术术后是否重构及其对主观视觉质量的影响,也是未来值得探索的方向。此外,传感技术的快速发展正推动柔性智能角膜接触镜拓展其功能边界^[30],有望催生下一代眼部精准医疗器件。未来角膜病方向的视觉科学研究需整合多学科技术手段,系统揭示角膜结构功能改变对视觉系统的多尺度影响机制,为开发新型治疗策略与视觉康复方案提供理论依据,最终实现从“看得见”到“看得清、看得舒适”的视觉健康目标。

2 我国视觉科学研究的基础与进展

2.1 我国视觉科学研究的歷史基础

我国在视觉科学研究领域拥有深厚的历史基础。在视中枢研究方面,李朝义团队从 20 世纪 80 年代末到 90 年代,对视网膜、外侧膝状体和视皮层神经元的非传统感受野进行了系统性研究,证明了这些区域的活动对于传递图形的总体亮度和亮度梯度信息起决定性作用,并提出了初级视皮层神经元“整合野”的概念及感受野“三重结构”的新理论模型^[31]。寿天德团队揭示了视皮层细胞对方位和运动方向的选择性以及图形适应特性并非视皮层所特有,而是均有皮层下起源^[32],并首次发现了急性眼压升高时视网膜及外侧膝状体 X 型细胞(小细胞)比 Y 型细胞(大细胞)更敏感,以及大面积的视皮层内方位功能图的变化,为国际青光眼研究提供了新的视角^[33]。

在视网膜研究方面,杨雄里团队长期以来在视网膜中视觉信号的传递和调制及其机制方面进行了较系统的研究,如在水平细胞所接收的光感受器信号及其相互作用方面取得了新发现,修正了传统观点;其与合作者首先报道了视杆-视锥间电耦合因背景光而增强,是上世纪 80 年代视网膜研究中一项重要成果^[34];并率先发现了视锥信号在黑暗中受到压抑的新现象^[35],对网间细胞及几种神经调质的参与机制进行了系统性分析。苏国辉团队长期从事哺乳动物视觉系统

的发育、可塑性及再生研究,发现了双眼视网膜在其靶区投射的重要规律,并创建了外周神经视网膜移植模型,首次实现成年哺乳动物的 RGCs 长距离轴突再生^[36-37]。

在视觉认知研究方面,陈霖团队通过一系列研究,围绕“知觉过程从哪里开始”及“什么是认知基本单元”等根本问题,向半个多世纪以来占统治地位的“局部首先”理论提出挑战,全面系统地发展了“大范围首先”的拓扑性质视知觉理论^[38]。

2.2 当前研究进展与突破

近年来,我国在视觉科学的基础研究、应用基础研究及转化研究方面均取得了一系列进展与突破。例如,在视觉神经编码与信息处理和调控机制研究方面,杨雄里团队近年集中关注近视的视网膜多巴胺依赖性 & 非依赖性机制^[9-11],系统揭示了 ipRGCs 在近视发生和发展中扮演的重要角色,阐明了该类细胞的视黑素信号和视杆、视锥信号分别调控眼轴长度和角膜曲率,推动了近视神经调控机制的解析^[11],为近视干预新策略的建立提供了重要线索。此外,在褪黑素对视网膜神经元的神经调制作用方面也开展了系统研究,围绕胶质细胞与微环境在青光眼病理过程中的作用开展工作也取得了一定进展^[39]。中国科学院神经科学研究所王伟团队在灵长类高级视觉皮层(V4 区)发现了高保真局部视觉信息编码的神经元集群,揭示了视觉系统“整体-局部”协同处理的新途径^[40],为人工智能的视觉模型优化提供了生物学依据。在神经界面与人工视觉方面,中国科学技术大学薛天团队通过纳米材料修饰视网膜感光细胞,使小鼠获得裸眼红外光感知能力,首次实现视觉波谱范围的扩展,为人工视觉技术开辟了新方向^[41]。复旦大学张嘉漓团队开发了基于金纳米颗粒涂层二氧化钛纳米线阵列(AuTiO₂-x NW)的人工光感受器以及碲纳米线网络(TeNWNs)视网膜假体,成功恢复盲小鼠和猕猴、食蟹猴等非人灵长类动物模型的光感知、视觉敏锐度及运动检测能力,其空间分辨率接近正常水平,并推进首例人体临床试验,为视网膜退行性疾病患者提供无源、创伤度低的视觉修复方案^[42-43]。在神经损伤修复领域,香港大学与暨南大学苏国辉团队研究了各种细胞成分眼内移植及不同神经生长因子球内注射对 RGCs 再生的影响,在 6 种神经营养因子中,仅睫状神经营养因子(ciliary neurotrophic factor, CNTF)能促进 RGCs 轴突再生。随后联合首都医科大学李晓光和杨朝阳团队、首都医科大学附属北京同仁医院王宁利团队,开发了生物活性材料 CNTF 壳聚糖,证明其能促进成年大鼠完全离断的视神经长

距离再生,并恢复视觉功能^[44]。在视觉认知研究方面,中国科学院心理研究所黄昌兵团队通过大规模多任务知觉学习研究,首次揭示跨任务存在的“通用学习能力”^[45],发现感知学习中存在任务特异性前向干扰现象,构建了整合重加权理论框架^[46],为优化视觉训练序列设计、提升视觉康复效率提供了重要理论依据。

与此同时,近年来我国眼科临床研究者充分借鉴相关学科的前沿进展与最新成果开展跨学科交叉研究,在视觉科学领域也不断取得新发现,提出新理论,推动临床诊疗的底层突破。如首都医科大学附属北京同仁医院王宁利团队创新性地提出了青光眼视神经损伤的“跨筛板压力差”学说^[47],突破了传统“眼压中心论”的局限,首次将眼球内部压力与颅腔脑脊液压力的失衡确立为导致视神经损伤的关键动力学因素,为青光眼的早期诊断、靶向治疗与高危人群预警提供了全新的理论框架和临床干预路径。陆军军医大学西南医院阴正勤团队针对干细胞移植治疗视网膜变性疾病开展了一系列基础及临床转化研究,首次证实了干细胞治疗对视网膜色素变性患者视力修复的长期安全性和可行性,成功开展了世界首例胚胎干细胞来源的色素上皮细胞视网膜下移植术治疗湿性 AMD,取得了从基础研究向临床应用的突破^[48]。天津市眼科医院史学锋团队揭示了感觉运动整合与控制中枢上丘视觉感知层神经元方向选择性形成的底层机制^[49],与复旦大学顾宇团队合作首次揭示了上丘双神经元眼优势可塑性的发育关键期及其调控机制^[17],更新了自 Hubel 和 Wiesel 在视皮层的工作以来长期形成的对弱视发病部位的认识,为探究弱视多功能损害的机制与全面康复策略提供了理论依据。温州医科大学附属眼视光医院周翔天团队创新性地提出了“近视巩膜缺氧学说”^[50-51],首次揭示缺氧诱导因子 1 α 信号通路在近视发展中驱动巩膜成纤维细胞向肌成纤维细胞转分化、导致细胞外基质重塑的核心机制,并发现抗缺氧药物水溶性红景天苷和芒柄花素可有效延缓动物模型近视进展,为近视防控指出了新的研究方向与干预策略。复旦大学附属眼耳鼻喉科医院孙兴怀团队和脑科学研究院王中峰团队合作首次揭示了在实验性青光眼中,肿瘤坏死因子 α 通过上调 Nav1.6 钠通道诱发 RGCs 超兴奋性并促进其凋亡,提出了神经炎症导致青光眼视神经损伤的新机制^[52],为开发青光眼视神经保护靶向药物提供了关键理论基础。中山大学中山眼科中心林浩添团队创新性地将人工智能与视觉行为分析相结合,研发了基于视频分析的人工智能婴幼儿视功能筛查系统,实现了对先天性白内障等致盲眼病的无创、高

效早期诊断,开创了婴幼儿视觉发育障碍智能评估新范式,为揭示早期视觉发育异常并实施早期干预提供了新路径,推动了儿童眼病筛查模式的变革^[53]。

3 我国视觉科学研究的发展机遇与挑战

随着我国综合国力的持续提升,目前我国视觉科学领域的发展面临着难得的重大机遇。在老一辈科学家数十年的努力下,我国已经建立起一支高水平的视觉科学基础研究人才队伍;在眼科学领域,面向眼健康的视觉科学应用基础及转化研究也得到了长足发展,各地眼科医疗机构纷纷建立起眼科学与视觉科学重点实验室,推动了面向临床的视觉科学研究与人才队伍建设,相关研究条件日臻完善。随着我国相关基础研究领域整体水平的提升,眼科与视觉科学领域不断得到先进技术的加持和学科融合的助力,基因编辑、干细胞、类器官、神经化学、纳米技术、人工智能和脑机接口的融合应用正推动视觉功能损伤修复的策略创新、概念验证及加速落地。

同时,我们也应看到,视觉科学领域仍面临着众多挑战。在技术层面,尽管在部分领域已取得突破,但在超高分辨率神经成像和大规模神经元活动的同步记录和解析等前沿技术上,我国仍落后于欧美发达国家。此类底层支撑技术的差距,可能成为制约我国脑机接口等相关技术应用突破的瓶颈。例如,在高通量单神经元活动记录技术方面,国外已研发出可实现长期稳定记录、包括超过 5 000 个记录位点的微型高密度探针^[54],但国内尚缺少相关替代产品。在理论层面,基于人工视觉技术的视觉康复策略的落地面临计算神经科学领域的技术瓶颈,目前国际领先团队已建立多层级视觉信息处理的统一数学模型,而国内研究多聚焦于局部机制,尚未形成系统性理论框架。视觉神经系统的多模态信息处理需要海量多维度数据支持,而国内在大规模神经数据集的构建和动态环境下的模型泛化能力上仍需加强。例如在对运动视觉信息加工的仿生实现上,目前多停留在功能仿真层面,难以复现生物系统中“局部提取-全局整合”的层级计算机制,而揭示大规模神经元群体在复杂光场和复杂刺激条件下的动态协同规律及其高效性与鲁棒性编码的来源是强化人工视觉系统功能泛化能力的关键科学问题。在跨学科融合方面,我国在眼科-生物-工程交叉领域的团队协作仍较为分散,制约了创新技术的集成应用,如类器官、脑接口技术具备视觉科学领域应用的巨大潜力,国内部分团队已处于国际领先水平,但与眼科临床的交叉融合仍需加强。最后,需要指出的是,视觉科学作

为一门交叉学科,发达国家众多高校设立眼科学与视觉科学系,重视视觉科学交叉学科人才体系对眼科学临床与基础研究的支撑,而国内虽有部分高校建立了眼科学与视觉科学系,但目前以培养眼科学与视光学研究生为主,缺乏视觉科学交叉学科人才培养体系。

4 推动视觉科学发展的策略建议

4.1 推动技术融合与交叉创新

先进技术要素的交叉融合将推动视觉科学的跨越式发展。整合人工智能与神经编码研究,基于视觉神经系统的多层级信息处理机制,结合深度学习算法构建动态计算模型,建立仿生视觉数字孪生模型,优化视觉信息处理的理论框架。联合神经科学、电子信息、材料与工程科学等多学科力量,构建从视觉神经机制解析到仿生视觉软硬件实现的跨层交叉融合研究体系。开展脑机接口的视觉重建应用,利用脑机接口打通外界光至脑视知觉的通路。在视网膜退行性疾病的研究中,利用 CRISPR-Cas9 技术靶向修复致病基因,并借助人源类器官特性开展视觉修复研究,结合纳米材料增强基因递送效率,提高神经元的响应水平,促进视觉功能修复。人是决定技术融合的关键,鼓励和支持交叉领域的团队协作,建立交叉学科人才培养体系是破解问题的核心。例如是否可考虑长期设立“视觉与智能感知”等交叉研究专项,鼓励不同学科团队联合申报;鼓励眼科机构研究人员与高校相关基础学科研究团队建立长期稳定的联合课题组;在研究生培养方案中增设“视觉信息处理与计算建模”等跨学科课程等。

4.2 构建跨学科协作平台

建立神经科学-工程学联合实验室,围绕视觉神经环路解析、视觉计算机数字孪生模型构建、视觉脑接口技术、仿生视觉系统开发等方向,联合神经生物学家、材料学家与计算科学家,形成技术闭环。结合 RGCs 的电生理特性与纳米材料技术,研发高分辨率人工视网膜器件;利用类器官技术与片上脑机接口技术建立人源生物视觉类器官芯片器件。推动大规模神经数据共享,参照国际开放数据库(如 Allen 脑科学研究所)标准,构建涵盖多物种(小鼠、猕猴等)的视觉神经数据集,借助人源类器官建立人的体外神经数据集,包括电生理记录、钙成像和光遗传学干预数据等,为算法训练提供生物验证基础。建议有条件的顶尖高校与眼科机构共建“视觉科学与智能工程中心”等,提供稳定的平台支持。建议国家自然科学基金委或科技部设立视觉科学交叉研究重大专项,推动跨学科协作的发展与成果产出。

4.3 强化基础研究与转化衔接

面向眼健康重点关注疾病,聚焦视觉系统功能的分子和环路机制及结构-功能关联,深化对视网膜感光细胞光信号转导、视觉中枢信息加工环路机制与可塑性等核心问题的研究,结合单细胞测序技术解析疾病相关基因的表达网络。通过动物模型研究视神经再生中的基因调控通路,为神经损伤修复提供新靶点。加速仿生视觉技术的临床前验证,在动物模型中系统性评估纳米人工光感受器的长期稳定性,在人源类器官中评估临床应用可行性,推动无源视觉修复器件向产业化转化。可借鉴国外经验,如美国“脑计划”(BRAIN Initiative)推动构建“从创意到病房”的神经技术临床转化模式,串联基础研究、器械与药物研发、临床验证与产业落地。

4.4 加强国际对标与自主突破

突破超高分辨率成像技术瓶颈,实现视皮层神经元活动的亚毫秒级实时动态捕捉,支撑精细神经编码机制研究与仿生视觉模型优化;研发国产高端多光子显微成像设备与微型高密度神经探针,促进高通量神经记录等先进技术手段的普及,推动视觉信息加工的神经元群微环路机制及弱视等疾病条件下神经元群视觉神经编码异常机制的解析。开展视觉脑接口技术的生物应用研究,解析光-电转换的编解码机制,建立“有用”的外部眼-脑视觉通路。参与国际相关标准的制定,在视觉神经数据集构建、类脑计算模型评价等方向主导国际标准,提升我国在脑-视觉融合领域的话语权。

视觉科学作为一门交叉学科,为眼健康事业发展提供了理论创新源头和技术革新支撑。当前,我国眼健康事业正面临从“治病为中心”向“健康为中心”的转型,视觉科学研究成果将为眼病防治提供突破性思路。尽管我国视觉科学在基础研究与应用转化上已取得显著进展,但仍面临技术瓶颈、学科交叉协作不足等挑战。未来需通过技术融合、平台构建、强化衔接等,推动视觉科学系统性发展,提升我国在全球视觉科学领域的影响力。视觉科学与眼科学的协同发展是实现“全面眼健康”目标的核心驱动力。通过深化机制研究、推动技术转化并完善人才培养体系,视觉科学将为健康中国战略的落实提供重要支撑,最终实现从“看得见”到“看得清、看得好”的跨越,提升全民视觉健康水平。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

致谢 杨雄里院士为本文的撰写提供了重要信息,赵堪兴教授对本文核心概念的表述提供了专业指导,张嘉漪教授为本文的修订完善提出了宝贵修改建议,其他师长和专家对本文进行了审阅和指导,在此致以诚挚感谢

参考文献

- [1] 赵堪兴, 杨培增. 眼科学(第8版)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 1-3.
- [2] 国家卫生健康委员会. 国家卫生健康委关于印发“十四五”全国眼健康规划(2021—2025年)的通知(国卫医发[2022]1号)[EB/OL]. (2022-01-04) [2025-05-20]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/17/content_5668951.htm.
- [3] Sankaridurg P, Tahhan N, Kandel H, et al. IMI impact of myopia[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2021, 62(5): 2. DOI: 10.1167/iov.62.5.2.
- [4] 国家卫生健康委员会. 2020 年我国儿童青少年总体近视率为 52.7% 近视低龄化问题仍突出[EB/OL]. (2021-07-13) [2025-05-20]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-07/13/content_5624709.htm.
- [5] Tkatchenko TV, Tkatchenko AV. Pharmacogenomic approach to antimyopia drug development: pathways lead the way[J]. Trends Pharmacol Sci, 2019, 40(11): 833-852. DOI: 10.1016/j.tips.2019.09.009.
- [6] Smith Earl L, 谢培英. 视网膜对比度信号对近视控制作用的研究进展[J]. 中华眼科杂志, 2023, 59(6): 488-491. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20230207-00042.
Smith Earl L, Xie PY. Research updates on a role for retinal contrast in myopia control[J]. Chin J Ophthalmol, 2023, 59(6): 488-491. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20230207-00042.
- [7] Mani A, Schwartz GW. Circuit mechanisms of a retinal ganglion cell with stimulus-dependent response latency and activation beyond its dendrites[J]. Curr Biol, 2017, 27(4): 471-482. DOI: 10.1016/j.cub.2016.12.033.
- [8] Zhou X, Pardue MT, Iuvone PM, et al. Dopamine signaling and myopia development: what are the key challenges[J]. Prog Retin Eye Res, 2017, 61: 60-71. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.06.003.
- [9] Wu XH, Li YY, Zhang PP, et al. Unaltered retinal dopamine levels in a C57BL/6 mouse model of form-deprivation myopia[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2015, 56(2): 967-977. DOI: 10.1167/iov.13-13362.
- [10] Wu XH, Qian KW, Xu GZ, et al. The role of retinal dopamine in C57BL/6 mouse refractive development as revealed by intravitreal administration of 6-hydroxydopamine[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2016, 57(13): 5393-5404. DOI: 10.1167/iov.16-19543.
- [11] Liu AL, Liu YF, Wang G, et al. The role of ipRGCs in ocular growth and myopia development[J]. Sci Adv, 2022, 8(23): eabm9027. DOI: 10.1126/sciadv.abm9027.
- [12] Ling Y, Wang Y, Ye J, et al. Changes in intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, dopaminergic amacrine cells, and their connectivity in the retinas of lid suture myopia[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2024, 65(11): 8. DOI: 10.1167/iov.65.11.8.
- [13] Tedja MS, Haarman A, Meester-Smoor MA, et al. IMI - myopia genetics report[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2019, 60(3): M89-M105. DOI: 10.1167/iov.18-25965.
- [14] 张伟, 史学锋, 李晓彤. 进一步提升我国弱视防治水平[J]. 中华眼科杂志, 2025, 61(1): 1-6. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20241014-00451.
Zhang W, Shi XF, Li XT. Further raising prevention and treatment for amblyopia in China[J]. Chin J Ophthalmol, 2025, 61(1): 1-6. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20241014-00451.
- [15] Shi X, Wei W, Deng Z, et al. Connectivity, computation, and plasticity of the early visual system[J]. J Neurosci, 2025, 45(46): e1317252025[2025-11-22]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/41224666/>. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1317-25.2025.
- [16] Birch EE, Duffy KR. Leveraging neural plasticity for the treatment of amblyopia[J]. Surv Ophthalmol, 2024, 69(5): 818-832. DOI: 10.1016/j.survophthal.2024.04.006.
- [17] Hu G, Chen A, Ye J, et al. A developmental critical period for ocular dominance plasticity of binocular neurons in mouse superior colliculus[J]. Cell Rep, 2024, 43(1): 113667. DOI: 10.1016/j.celrep.2023.113667.
- [18] Pan M, Ye J, Yan Y, et al. Experience-dependent plasticity of multiple receptive field properties in lateral geniculate binocular neurons during the critical period[J]. Front Cell Neurosci, 2025, 19: 1574505. DOI: 10.3389/fncel.2025.1574505.
- [19] Xi J, Jia WL, Feng LX, et al. Perceptual learning improves stereoacuity in amblyopia[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2014, 55(4): 2384-2391. DOI: 10.1167/iov.13-12627.
- [20] Huang Y, Liu Z, Chen Z, et al. Visual crowding reveals field- and axis-specific cortical miswiring after long-term axial misalignment in strabismic patients without amblyopia[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2023, 64(1): 10. DOI: 10.1167/iov.64.1.10.
- [21] Shi XF, Xu LM, Li Y, et al. Fixational saccadic eye movements are altered in anisometric amblyopia[J]. Restor Neurol Neurosci, 2012, 30(6): 445-462. DOI: 10.3233/RNN-2012-129000.
- [22] Qin Y, Wang W, Gu Y, et al. Recent advances in the molecular mechanisms of ocular dominance plasticity in the visual cortex[J]. Neurosci Bull, 2025, 41(9): 1645-1655. DOI: 10.1007/s12264-025-01448-7.
- [23] Lin H, Ouyang H, Zhu J, et al. Lens regeneration using endogenous stem cells with gain of visual function[J]. Nature, 2016, 531(7594): 323-328. DOI: 10.1038/nature17181.
- [24] 中华医学会眼科学分会眼底病学组, 中国医师协会眼科医师分会眼底病学组. 我国主要眼底病慢病管理专家共识: 基于改良版德尔非法制订[J]. 中华眼底病杂志, 2024, 40(4): 253-263. DOI: 10.3760/cma.j.cn11434-20240220-00076.
- [25] Fundus Disease Group of Ophthalmological Society of Chinese Medical Association, Fundus Disease Group of Ophthalmologist Branch of Chinese Medical Doctor Association. National consensus on the management of major chronic fundus diseases in China: a modified Delphi approach[J]. Chin J Ocul Fundus Dis, 2024, 40(4): 253-263. DOI: 10.3760/cma.j.cn11434-20240220-00076.
- [25] Eckmiller MS. Defective cone photoreceptor cytoskeleton, alignment, feedback, and energetics can lead to energy depletion in macular degeneration[J]. Prog Retin Eye Res, 2004, 23(5): 495-522. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2004.04.005.
- [26] Tonade D, Kern TS. Photoreceptor cells and RPE contribute to the development of diabetic retinopathy[J]. Prog Retin Eye Res, 2021, 83: 100919. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2020.100919.
- [27] 中华医学会眼科学分会青光眼学组, 中国医师协会眼科医师分会青光眼学组. 中国青光眼指南(2020年)[J]. 中华眼科杂志, 2020, 56(8): 573-586. DOI: 10.3760/cma.j.cn112142-20200313-00182.
- [28] 赵新恒, 王雁, 张琳. 人眼像差补偿特性与视觉质量的关系[J]. 中华实验眼科杂志, 2021, 39(12): 1115-1118. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20191126-00512.
Zhao XH, Wang Y, Zhang L. Relationship between human eye aberration compensation and visual quality[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2021, 39(12): 1115-1118. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20191126-00512.
- [29] 林琳, 冯云, 傅瑶, 等. 眼表微环境与泪膜稳态对视觉质量影响的新认识[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2022, 24(12): 881-887. DOI: 10.3760/cma.j.cn115909-20220325-00111.
Lin L, Feng Y, Fu Y, et al. New understanding of the influence of ocular surface microenvironment and tear film homeostasis on visual quality[J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2022, 24(12): 881-887. DOI: 10.3760/cma.j.cn115909-20220325-00111.
- [30] Yao G, Li P, Liu M, et al. Smart contact lenses: catalysts for science fiction becoming reality[J]. Innovation (Camb), 2024, 5(6): 100710. DOI: 10.1016/j.xinn.2024.100710.
- [31] Li CY, Li W. Extensive integration field beyond the classical receptive field of cat's striate cortical neurons—classification and tuning properties[J]. Vision Res, 1994, 34(18): 2337-2355. DOI: 10.1016/0042-6989(94)90280-1.
- [32] 寿天德, 周逸峰. 视觉系统皮层下细胞的方位和方向敏感性[J]. 生理学报, 1996, 48(2): 105-112. DOI: CNKI:SUN:SLXU.0.1996-02-000.



- Shou TD, Zhou YF. Orientation and direction selectivity of cells in subcortical structures of the visual system[J]. Acta Physiol Sin, 1996, 48(2): 105–112. DOI: CNKI: SUN: SLXU. 0. 1996-02-000.
- [33] Shou T, Liu J, Wang W, et al. Differential dendritic shrinkage of alpha and beta retinal ganglion cells in cats with chronic glaucoma[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2003, 44(7): 3005–3010. DOI: 10. 1167/iov. 02-0620.
- [34] Yang XL, Wu SM. Modulation of rod-cone coupling by light[J]. Science, 1989, 244(4902): 352–354. DOI: 10. 1126/science. 2711185.
- [35] Yang XL, Wu SM. Response sensitivity and voltage gain of the rod- and cone-horizontal cell synapses in dark- and light-adapted tiger salamander retina[J]. J Neurophysiol, 1996, 76(6): 3863–3874. DOI: 10. 1152/jn. 1996. 76. 6. 3863.
- [36] So KF, Aguayo AJ. Lengthy regrowth of cut axons from ganglion cells after peripheral nerve transplantation into the retina of adult rats[J]. Brain Res, 1985, 328(2): 349–354. DOI: 10. 1016/0006-8993(85) 91047-9.
- [37] So KF. Regeneration of retinal ganglion cell axons in adult mammals[J]. Prog Brain Res, 1988, 74: 277–283. DOI: 10. 1016/s0079-6123(08)63025-3.
- [38] Chen L. Topological structure in visual perception[J]. Science, 1982, 218(4573): 699–700. DOI: 10. 1126/science. 7134969.
- [39] Miao Y, Zhao GL, Cheng S, et al. Activation of retinal glial cells contributes to the degeneration of ganglion cells in experimental glaucoma[J]. Prog Retin Eye Res, 2023, 93: 101169. DOI: 10. 1016/j. pretyeres. 2023. 101169.
- [40] Lu Y, Yin J, Chen Z, et al. Revealing detail along the visual hierarchy: neural clustering preserves acuity from V1 to V4[J]. Neuron, 2018, 98(2): 417–428. DOI: 10. 1016/j. neuron. 2018. 03. 009.
- [41] Ma Y, Bao J, Zhang Y, et al. Mammalian near-infrared image vision through injectable and self-powered retinal nanoantennae[J]. Cell, 2019, 177(2): 243–255. DOI: 10. 1016/j. cell. 2019. 01. 038.
- [42] Yang R, Zhao P, Wang L, et al. Assessment of visual function in blind mice and monkeys with subretinally implanted nanowire arrays as artificial photoreceptors[J]. Nat Biomed Eng, 2024, 8(8): 1018–1039. DOI: 10. 1038/s41551-023-01137-8.
- [43] Wang S, Jiang C, Yu Y, et al. Tellurium nanowire retinal nanoprosthesis improves vision in models of blindness[J]. Science, 2025, 388(6751): eadu2987. DOI: 10. 1126/science. adu2987.
- [44] Liu X, Hao F, Hao P, et al. Regeneration and functional recovery of the completely transected optic nerve in adult rats by CNTF-chitosan[J]. Signal Transduct Target Ther, 2023, 8(1): 81. DOI: 10. 1038/s41392-022-01289-0.
- [45] Yang J, Yan FF, Chen L, et al. General learning ability in perceptual learning[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2020, 117(32): 19092–19100. DOI: 10. 1073/pnas. 2002903117.
- [46] Yang J, Yan FF, Wang T, et al. Anterograde interference in multitask perceptual learning[J]. NPJ Sci Learn, 2025, 10(1): 23. DOI: 10. 1038/s41539-025-00312-7.
- [47] Ren R, Jonas JB, Tian G, et al. Cerebrospinal fluid pressure in glaucoma: a prospective study[J]. Ophthalmology, 2010, 117(2): 259–266. DOI: 10. 1016/j. ophtha. 2009. 06. 058.
- [48] Liu Y, Xu HW, Wang L, et al. Human embryonic stem cell-derived retinal pigment epithelium transplants as a potential treatment for wet age-related macular degeneration[J]. Cell Discov, 2018, 4: 50. DOI: 10. 1038/s41421-018-0053-y.
- [49] Shi X, Barchini J, Ledesma HA, et al. Retinal origin of direction selectivity in the superior colliculus[J]. Nat Neurosci, 2017, 20(4): 550–558. DOI: 10. 1038/nn. 4498.
- [50] Wu H, Chen W, Zhao F, et al. Scleral hypoxia is a target for myopia control[J/OL]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2018, 115(30): E7091–E7100[2025-05-10]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29987045/>. DOI: 10. 1073/pnas. 1721443115.
- [51] Wu H, Zhang G, Shen M, et al. Assessment of choroidal vascularity and choriocapillaris blood perfusion in anisomyopic adults by SS-OCT/OCTA[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2021, 62(1): 8. DOI: 10. 1167/iov. 62. 1. 8.
- [52] Cheng S, Wang HN, Xu LJ, et al. Soluble tumor necrosis factor-alpha-induced hyperexcitability contributes to retinal ganglion cell apoptosis by enhancing Nav1.6 in experimental glaucoma[J]. J Neuroinflamm, 2021, 18(1): 182. DOI: 10. 1186/s12974-021-02236-6.
- [53] Chen W, Li R, Yu Q, et al. Early detection of visual impairment in young children using a smartphone-based deep learning system[J]. Nat Med, 2023, 29(2): 493–503. DOI: 10. 1038/s41591-022-02180-9.
- [54] Steinmetz NA, Aydin C, Lebedeva A, et al. Neuropixels 2.0: a miniaturized high-density probe for stable, long-term brain recordings[J]. Science, 2021, 372(6539): eabf4588. DOI: 10. 1126/science. abf4588.

(收稿日期: 2025-05-21 修回日期: 2025-11-22)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)

读者·作者·编者

本刊对来稿中计量单位的使用要求

计量单位 计量单位的使用执行 GB 3100/3101/3102-1993《国际单位制及其应用/有关量、单位和符号的一般原则/(所有部分)量和单位》的有关规定,具体执行可参照中华医学会杂志社编写的《法定计量单位在医学上的应用》第3版(人民军医出版社2001年出版)。作者在撰写论文时应注意单位名称与单位符号不可混用。组合单位符号中表示相除的斜线为2条时本刊采用 $\text{ng}/(\text{kg} \cdot \text{min})$ 的形式,而不用 $\text{ng}/\text{kg}/\text{min}$ 的形式。应尽可能使用单位符号,也可以与非物理单位(如:人、次、台等)的汉字构成组合形式的单位,如:次/min。在叙述中请先列出法定计量单位数值,括号内写旧制单位数值;如果同一计量单位反复出现,可在首次出现时注明法定计量单位与旧制单位的换算系数,然后只列出法定计量单位数值。参量及其公差均需附单位,当参量与其公差的单位相同时,单位可只写1次,即加圆括号将数值组合,置共同单位符号于全部数值之后。例如:“ $75.4 \text{ ng}/\text{L} \pm 18.2 \text{ ng}/\text{L}$ ”可以表示为“(75.4 \pm 18.2) ng/L ”。量的符号一律用斜体字,如吸光度(旧称光密度)的符号为*A*。

根据国家质量技术监督局和卫生部联合发出的质技监局量函[1998]126号文件《关于血压计量单位使用规定的补充通知》,凡是涉及人体及动物体内的压力测定,可以使用毫米汞柱(mmHg)或厘米水柱(cmH_2O)为计量单位,但首次使用时应注明 mmHg 或 cmH_2O 与 kPa 的换算系数($1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$, $1 \text{ cmH}_2\text{O} = 0.098 \text{ kPa}$)。

(本刊编辑部)