

虚拟现实技术在弱视视觉训练中的应用研究进展

王 康,王 俏,李鹏斐,张芸帆,秦子凡,李 静

引用:王康,王俏,李鹏斐,等. 虚拟现实技术在弱视视觉训练中的应用研究进展. 国际眼科杂志, 2026,26(8):1411-1416.

基金项目:中国中医科学院科技创新工程项目(No.CI2021A03219);中国中医科学院眼科医院中央高水平医院资助项目(No.GSP5-05)

作者单位:(100040)中国北京市,中国中医科学院眼科医院
作者简介:王康,在读硕士研究生,研究方向:眼部疾病的中西医结合研究。

通讯作者:李静,硕士,主任护师,副院长,硕士研究生导师,研究方向:中西医结合眼科. Lijing9969@163.com

收稿日期:2026-01-01 修回日期:2026-06-17

摘要

弱视治疗理念已由单纯提升弱视眼视力逐步转向双眼视功能重建。传统遮盖及常规视觉训练存在治疗周期长、趣味性不足及依从性差等问题,疗效稳定性受限。虚拟现实(VR)技术凭借沉浸性、交互性及刺激参数可调控等特点,已逐步应用于弱视视觉训练。现有研究显示,VR视觉训练可在一定程度上改善弱视患者视力及双眼视功能,其游戏化交互和反馈激励机制还有助于提高参与积极性与治疗依从性。文章从弱视相关机制与视觉训练理论出发,综述VR在弱视视觉训练中的优势、系统与训练形式、临床疗效、常用评价指标、安全性与可接受度,以期为其规范化、临床转化和推广应用提供参考。

关键词:虚拟现实技术;弱视;视觉训练

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2026.8.18

Research progress on the application of virtual reality technology in amblyopia visual training

Wang Kang, Wang Qiao, Li Pengfei, Zhang Yunfan, Qin Zifan, Li Jing

Foundation items:Science and Technology Innovation Project of the China Academy of Chinese Medical Sciences (No.CI2021A03219); Central High-level Hospital Fund of Eye Hospital, China Academy of Chinese Medical Sciences (No.GSP5-05)

Eye Hospital China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100040, China

Correspondence to: Li Jing. Eye Hospital China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100040, China. Lijing9969@163.com

Received:2026-01-01 Accepted:2026-06-17

Abstract

• The therapeutic concept of amblyopia has gradually shifted from improving the visual acuity of the amblyopic eye to restoring binocular visual function. Conventional occlusion therapy and routine visual training have issues such as long treatment cycles, insufficient entertainment value and poor patient compliance, which limits the stability of therapeutic effects. Virtual reality (VR) technology, characterized by immersion, interactivity, and adjustable stimulus parameters, has been increasingly applied to visual training for amblyopia. Current evidence suggests that VR-based training can improve visual acuity and binocular visual function in amblyopia patients to a certain extent. Moreover, its gamified interactions and feedback-driven design may also enhance patient motivation and treatment adherence. This review begins with the mechanisms and theoretical basis of VR training for amblyopia, proceeds to summarize its advantages over conventional methods, current systems, training modes, clinical efficacy, commonly used outcome measures, as well as safety and acceptability, aiming to provide a reference for its standardization, clinical translation, and widespread adoption.

• **KEYWORDS:** virtual reality technology; amblyopia; visual training

Citation: Wang K, Wang Q, Li PF, et al. Research progress on the application of virtual reality technology in amblyopia visual training. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2026, 26(8): 1411-1416.

0 引言

弱视是视觉发育异常导致的视功能障碍,也是导致儿童单眼视力受损的常见原因之一,全球儿童弱视患病率为0.72%-2.90%^[1]。弱视患者可伴残余视功能缺陷、眼球运动异常和精细运动能力不足,并面临复发和永久性视力损伤的风险^[2],同时影响日常生活、学习和心理健康^[3-4]。早发现与规范治疗是预防永久性视功能损害的关键^[5]。传统屈光矫正、遮盖疗法及常规视觉训练是临床常用的治疗手段,但受治疗周期长、趣味性不足和依从性差等因素影响^[6]。随着沉浸式交互技术的发展,虚拟现实(virtual reality, VR)技术可实现双眼刺激的精准分离与参数化调控,并与游戏、视频及传统疗法结合,为患者提供相对安全、可控的训练环境,有望提高训练的参与度和依从性,促进视功能恢复,并成为传统治疗的重要补充手段^[7]。但VR视觉训练并非对传统治疗的简单替代,其临床价值体

现在双眼视觉重建、依从性改善及个体化训练方案。本文综述VR在弱视视觉训练中的应用模式、疗效、安全性和依从性,以期为其临床推广及后续研究提供参考。

1 日间抑制与视觉皮层可塑性

传统弱视治疗多在屈光矫正基础上遮盖优势眼,并辅以视觉训练,但其核心仍偏重单眼矫正,难以直接解决优势眼对弱视眼的抑制及双眼整合异常。Gong等^[8]从眼优势改变的角度指出,日间抑制是影响双眼输入平衡的重要基础,当降低优势眼刺激强度时,部分患者仍可维持一定的双眼视功能。正常情况下,两眼输入在视觉皮层内相对平衡,共同完成融合与立体视觉^[9]。因屈光参差、斜视或形觉剥夺导致单眼长期接受模糊或不足刺激时,视觉系统为避免复视与冲突会优先依赖优势眼,进而在皮层水平抑制弱视眼输入,造成融合受限和立体视下降^[10]。Narasimhan等^[11]基于分视任务量化了这种抑制,发现弱视患者通常需更大幅度降低优势眼刺激才能达到双眼输出平衡。由此可见,弱视治疗不仅要以弱视眼视力提高为目标,还应关注双眼输入是否重新趋于平衡。

神经可塑性是神经系统通过结构与功能重塑适应环境和行为变化的能力,视觉皮层尤为明显。研究显示,弱视眼相关V1、V2、V3、V3a、Vp和V4的神经适应性较差。在单眼剥夺幼鼠模型中,视觉刺激可调节V1内表达小清蛋白阳性的中间神经元与兴奋性神经元反应,重新激活眼优势可塑性并促进成年弱视小鼠视力恢复^[12]。这表明弱视的形成、疗效维持与复发均与皮层可塑性密切相关。儿童视觉系统在关键期可塑性更强,并随年龄增长而减弱^[13]。长期接受清晰、稳定输入的眼可获得更强突触权重,而模糊、低频输入的眼,其传入通路逐渐减弱,最终形成眼优势和日间抑制^[14-15]。因此,无论遮盖还是视觉训练,本质上都是通过改变视觉输入来诱导视觉神经活动重塑^[16]。若干预停止后日常输入仍失衡,疗效仍可能下降或复发。

不同类型弱视的双眼失衡模式不完全相同。屈光参差性弱视多与长期清晰度输入失衡相关,通常仍保留一定程度的双眼对应关系,但中央及周边视野内可存在不同程度的双眼不平衡;斜视性弱视因视轴不一致导致长期异常竞争,更易出现融合受限、立体视受损和明显抑制^[14]。剥夺性或重度弱视还可合并更复杂的视觉加工异常,如运动定义形觉受损^[10]。因此,弱视并非单纯视力下降,而是包含双眼整合障碍、日间抑制增强和皮层重塑异常的异质性神经发育问题。VR视觉训练的意义在于通过调控两眼刺激强度、呈现时序和任务分配,对不同双眼失衡模式进行针对性干预。对仍保留一定融合能力的屈光参差性弱视,分视训练更易恢复双眼协同,而对伴明显眼位偏斜、长期抑制或视觉剥夺者,则往往需在屈光矫正、眼位控制及传统治疗基础上进行更长程训练,才能获得更稳定的重塑效果^[14,16-20]。这也表明临床应用VR训练时,应根据弱视类型和双眼视功能选择方案。

2 视感知学习与分视训练

视觉感知学习通过重复、渐进和任务驱动训练,使视觉系统在分辨率、对比敏感度(contrast sensitivity, CS)、空间定位和运动追踪等方面发生可塑性改变^[21]。动作电位

时序依赖可塑性(spike-timing dependent plasticity, STDP)是赫布型突触修饰的重要形式,指突触前后活动存在短暂时间差时可诱导突触强度改变,当突触前神经元放电在时间上先于突触后神经元放电时,可诱导突触传递增强^[22]。STDP更多提供了时序性视觉刺激可能影响突触权重的理论解释,并不能直接等同于弱视临床训练效果。电生理研究表明,多种视觉刺激可改变V1神经元感受特性并伴随知觉变化,提示视觉训练能够通过神经环路重塑影响感知表现^[23]。在弱视训练中,感知学习通常围绕空间分辨、CS、位置辨别及方向/运动追踪等基础视觉能力展开,通过重复训练和难度递进改善信息提取效率并减轻日间抑制^[15]。相较传统方法,VR可将感知学习游戏化,并借助即时反馈、难度自适应和参数调控实现个体化训练^[7]。Molina-Martín等^[24]采用沉浸式VR对4例屈光参差性弱视患儿进行18次训练,3例近距离视力提高,全部患儿立体视至少提升1级,其中3例达60",且3c/d处CS提高约0.5 Log。Tan等^[17]将145例屈光性弱视患儿随机分为VR组和AR组进行短期训练,结果两组最佳矫正视力(best corrected visual acuity, BCVA)和精细立体视均改善,CS改善则存在平台差异。上述研究表明VR训练具有一定短期获益,但由于样本量、弱视类型和训练平台不同,其结果仍需进一步验证。

分视训练与感知学习不同,感知学习多在双眼同时或单眼观看条件下完成特定视觉任务,而分视训练则将互补刺激分别呈现给双眼,使双眼必须协同完成识别、追踪或游戏任务,从而在训练弱视眼的同时降低优势眼的相对输入,逐步解除抑制并恢复输入平衡^[18]。分视训练的发展经历了光栅/全息显示、红绿滤镜到VR游戏等阶段。核心策略是在任务可完成的前提下调低优势眼刺激强度,将关键目标更多分配给弱视眼,并随着训练进展逐步减少双眼输入差异^[19-20]。VR分视训练可分为同步和异步两类,同步训练常与感知学习结合;异步训练因双眼刺激存在微小时序差,可能产生更强神经驱动。有研究显示,若一眼刺激较另一眼提前8.3 ms,约10.5 min的不同步双眼刺激即可显著改变眼优势,而若让弱视眼刺激更早到达,可能有助于重新平衡皮层突触输入并持续改善视敏度^[25]。这表明异步分视训练对屈光参差性弱视患儿具有潜在价值,但其最佳时序差、训练频率和适用人群尚未形成统一。

3 安全性与依从性

VR视觉训练可在双眼睁开状态下实现左右眼刺激的精确分离与动态参数调节,从机制上更有针对性地缓解日间抑制与双眼输入失衡,促进融合与立体视重建。同时,VR将训练嵌入电影、游戏等沉浸式交互载体,通过反馈和奖励增强趣味性与可接受度,从而有助于维持治疗依从性。多项研究^[26-32]通过依从性记录或满意度问卷发现,多数参与者能维持较高依从性,仅少数因注意力不集中等原因退出。Li等^[29]采用交叉设计纳入76例弱视患儿,比较智能手机VR训练与传统遮盖训练的依从性,结果显示VR训练在患儿和家长依从性相关行为及态度方面更具优势。Wyganski-Jaffe等^[19]纳入149例4-9岁患儿进行多中心随机对照研究,双眼分视家庭治疗组中位依

从性为 94.0%, 高于遮盖组的 83.9%。部分研究^[27-28,30]进一步证实, VR 较传统治疗更易被患儿及家属接受。但现有研究居家训练依从性的评价仍多依赖家属书面记录或系统使用时长, 不能完全反映患儿注视的持续性以及是否规范完成训练任务, 未来宜结合系统后台自动记录的训练频次、时长、有效注视时间、家属记录及门诊复评结果进行综合评估^[27-29]。

不良反应方面, 部分研究^[24,26-28,30,33]通过不良事件记录或模拟器病症问卷评估参与者不适反应。结果显示, 疲乏、焦虑、眼部干涩及异物感等为常见不良反应, 可能与头显近距离注视、动态画面引发的晕动反应以及长时间训练造成的视觉负荷增加有关, 但多数研究未见晕厥、明显疼痛等严重不良反应, 表明在规范控制训练时长和强度的前提下, 多数患者可安全完成沉浸式 VR 训练^[34]。但现有研究对不良反应的定义、分级和记录时间点尚不统一, 部分仅作描述性报告, 限制了横向比较。因此临床或居家训练前, 宜对患儿年龄、配合度、屈光矫正情况及家属监督能力进行适用性筛查。对低龄儿童、重度屈光参差或伴明显斜视者, 更应采用短时、低复杂度、渐进式方案, 并在早期加强随访, 如出现持续头晕、恶心、眼部不适或拒绝配合, 应及时暂停训练并重新评估训练方案。

4 国内外应用形式及特点

国内外 VR 弱视训练均以分视、双眼平衡调控和任务化训练为核心, 目的是通过差异化视觉刺激减轻优势眼对弱视眼的抑制, 促进双眼视觉重建。但在设备、分视方式、研究设计及适用场景等方面仍存在差异。国内研究起步较早, 多依托计算机软件、动画视频及目力精细训练系统, 并强调与传统治疗和屈光矫正相结合。2004 年, 杨素红等^[35]基于视觉感知学习及视觉皮层可塑性理论, 开发“增视能视觉训练系列”软件, 将弱视训练与动画游戏融合。自 2011 年起又陆续出现维视顿系统^[36]、明视虚拟现实多媒体训练软件等平台^[37]。此外, “童视达”视觉 VR 训练系统^[38-39]、基于推拉模型的 VR 系统^[40-41]及自制开源程序^[42]等进一步丰富了国内应用场景。总体来看, 国内平台类型较多、临床可及性较好, 但刺激参数、任务设计及结局指标差异较大, 且部分研究样本量较小、随机和盲法设计不足, 研究间可比性有限。

国外研究更多建立在专门的分视平台或沉浸式头显基础上, 强调通过更标准化的双眼分离刺激实现训练目标。多项研究^[26-27,43-46]以双眼分视二色刺激为主要方向, 常采用并持续优化交互式双眼治疗 (interactive binocular treatment, I-BiT) 系统原型。其中 Cleary 等^[44]基于 I-BiT 系统原型开发专用软件, Herbison 等^[26]将 3D 快门眼镜与红外发射器结合用于双眼分视刺激。Rajavi 等^[45]则分别以红绿滤镜和自主设计程序开展试验, 其 2021 年的研究^[46]进一步自主设计专属训练程序。近几年, 有研究依托 Leonar3D 设备^[47]、3DS XL 平台与 MATLAB 软件^[48]、智能手机联合 Gear VR 头显^[30]、NEIVATECH 系统结合 HTC Vive Pro 头显^[24,28]以及 Oculus Rift 头显联合 Vivid Vision 软件^[31-32,49]构建沉浸式训练环境。国外研究在分视刺激控制、设备一体化、随机对照设计、依从性记录和用户体验评估方面相对更加规范, 但设备成本较高, 对年龄、配合度

和家庭监管的要求也更高。

国内研究对象主要为学龄前及学龄期儿童, 多用于门诊或康复阶段的辅助训练, 国外除儿童外, 还纳入残余性弱视、大龄儿童甚至成人^[26,43]。现有研究均表明 VR 训练可在一定程度上改善视力和立体视, 但尚无充分证据证明某类设备或模式具有绝对优势。相较地区差异, 弱视类型、是否联合遮盖或屈光矫正、训练时长及依从性等因素, 可能是影响疗效的关键因素^[29-31,44-45,50]。因此, 临床方案选择应综合患儿年龄、弱视类型、双眼视功能情况及家庭情况, 选择具有可行性和持续性的训练方案, 对于依从遮盖困难或需要双眼功能训练的患儿, VR 可作为重要补充, 而对重度斜视、融合功能差或不能配合头显训练者, 则需谨慎应用。

5 视觉训练形式

多数研究基于伦理考量, 在常规治疗基础上联合 VR 训练, 与精细目力训练、遮盖治疗、屈光矫正或其他视功能训练联合使用。VR 视觉训练的主要形式可归纳为游戏化任务训练和视频影像训练两类, 训练内容将游戏或视频嵌入任务, 通过视听刺激与动作操作增强参与感。游戏化训练主要借助沉浸与交互优势, 将训练内容设计为关卡、积分与奖励等可进阶任务, 以提升趣味性与依从性。包括侧重视动整合与注意力持续性的互动驾驶游戏^[44]、飞行模拟^[50]; 强调即时反馈与视觉追踪的“Nux”互动游戏^[26-27]、“吃豆人 (Pac-Man) 游戏系列”^[45-46,51]; 通过动作节律与身体参与增强参与感的“VR 舞蹈”^[52]; 偏重锻炼视觉搜索、空间定位或手眼协调能力的多任务性游戏, 如“跑马神灯系列”^[33]、“鸟捉毛毛虫”^[47]、“Diplopia Game”^[17]、“掷雪球”^[31]、“太积木闯关系列”^[32]、“主题岛系列”^[24]等。需要注意的是, 游戏化并不等同于疗效的增强, 其作用更多体现在提高训练参与度和增加有效训练剂量, 疗效仍取决于刺激参数、任务难度的递进和治疗依从性。

视频影像训练多以动画或双眼分视视频为载体, 按照双眼差异化刺激原则, 在锻炼弱视眼的同时降低优势眼的相对输入, 以促进双眼平衡和视觉恢复, 其中大部分为动画^[29-30,35-36,38-39,48]。除训练外, VR 还可用于视功能检查与评估, 并据此生成个性化的视觉训练方案^[36,53]。梁彩红等^[42]在研究中尝试构建视知觉解析探针库和脑认知感知图形库, 提示 VR 训练未来有望由相对单一的标准化方案向更精准、个体化的刺激训练发展。与游戏化训练相比, 视频影像训练对操作能力要求较低, 可能更适用于低龄儿童或注意力维持困难者, 但其互动性较弱, 如何兼顾可接受度与有效刺激强度仍需进一步研究。

6 评价指标和测量工具

VR 视觉训练研究中, 同一评价指标常对应不同测量工具, 这既丰富了评估维度, 也增加了研究异质性。多数研究以视力变化作为核心指标。国内研究多依据 1996 年全国儿童斜视弱视防治学组制定的标准^[54]和 2011 年《弱视诊断专家共识》^[55]作为患儿纳入、排除及疗效判定标准, 并常采用国际标准视力表测量。国外多以 BCVA、立体视锐度、CS 和眼间抑制程度为核心指标, 常用工具包括最小分辨角对数 (logarithm of the minimum angle of

resolution, LogMAR) 视力表、Titmus 和 TNO 立体视觉检查图及双眼分视对比度平衡试验。总体而言,国内更强调视力改善,国外更重视单眼视力与双眼视觉功能的联合评价。由于纳入标准、记录方式和疗效判定不一,不同研究在疗效大小、功能改善维度及持续性方面的横向比较受到限制,也容易造成疗效“均有改善”与“优于传统治疗”之间的概念混淆。

LogMAR 视力更适合量化比较,常作为随机对照和随访研究的主要结局,但其主要反映单眼视力变化,因此仍需结合立体视和眼间抑制等指标评价双眼整合能力。Titmus 操作简便,适合儿童筛查与随访;TNO 更能反映双眼真实融合能力,但对患儿理解和配合度要求更高。除视力和立体视外,视觉诱发电位、双眼分视对比度平衡试验及 CS 测量也可从不同层面反映视觉功能变化。视觉诱发电位可提示早期皮层视觉处理的改变,双眼分视对比度平衡试验有助于量化眼间抑制,而 CS 则可补充反映高对比视力表之外的功能改善。对低龄或注意力较差的患儿,相关指标宜重复测量后综合判断。后续研究宜预先明确主要结局指标,统一 BCVA 记录方式、立体视测量工具和随访时间点,以减少测量工具差异对疗效判断的影响。

此外,VR 训练的持续时间、频率和单次时长差异较大,受年龄、训练内容及设备条件等多因素影响。不同研究在弱视类型、年龄、既往治疗、是否为联合疗法以及单次训练时长、训练频率和总疗程等方面均不一致,因此疗效大小和可重复性差异明显。同一方向的研究也可能因干预时间不同而得出不同结论。如 Rajavi 等^[51]对 40 例 3-10 岁单眼弱视患儿进行随机对照试验,1 mo 后 I-BiT 游戏组和遮盖联合安慰游戏组 BCVA 均较治疗前改善,但组间差异不显著 ($P=0.52$),两组依从性分别为 87.5% 和 76%。而 Xiao 等^[30]开展多中心随机对照研究,纳入 105 例 4-7 岁患儿,治疗组在全日戴镜基础上居家使用分视数字治疗系统,每日 1 h,每周 6 d,持续 12 wk;与单纯戴镜相比,治疗组视力改善更明显,且未报告严重不良事件。Jost 等^[48]纳入 65 例 3-7 岁弱视患儿,比较居家分视电影训练与每日 2 h 遮盖治疗,2 wk 时两组 BCVA 分别改善 0.07 ± 0.02 LogMAR 和 0.06 ± 0.01 LogMAR,组间差异无统计学意义 ($P=0.48$),但继续分视电影训练至 6 wk 后仍可观察到进一步改善。可见,VR 训练的疗效并非在所有研究中均优于传统治疗,干预持续时间、训练剂量、对照方式和依从性可能共同影响结论。由于研究设计、随访时点及结局工具尚未统一,现阶段仍难提出一致的短期或长期疗效阈值。

7 VR 视觉训练的有效性

基于 VR 的视觉训练可在一定程度上改善弱视患者视力。多数研究以单眼或双眼视力变化作为主要结局^[24,26-28,31,33,35-44,49-50,52-53,56-60],其中有研究^[28,30,32,45-48,60]采用 BCVA(LogMAR)变化反映最小可分辨角的改善。多项研究^[24,27-28,30-32,40,47-49,57,59-60]对训练后立体视进行评估,其中部分研究^[31-32,47-49,59]进一步检测立体视敏锐度变化。结果总体显示,VR 训练在改善视力的同时,对双眼融合与立体视觉恢复亦具有潜在价值。但应区分“治疗后较基线改善”和“较传统治疗具有优势”两个层面的研究证

据,前者在多数研究中较为一致,后者则受对照设计、样本量和依从性影响较大。此外,一些研究^[39,41-42,52,58]还对同时视、融合和立体视等三级视功能进行系统检查,提示 VR 训练可促进三级视功能的阶段性恢复。

视觉诱发电位可反映早期皮层视觉信息处理与传导速度。Blavakis 等^[49]发现,其变化可能先于视力改善,对早期疗效具有一定敏感性。多项研究^[33,49,52]亦显示,VR 训练可在不同程度上改善弱视眼 P100 潜伏期和振幅。由于 VR 能够提供可调的对比度等视觉刺激,一些研究^[24,28,31,47]进一步将 CS 作为指标,结果表明随着干预进展,弱视儿童的 CS 及视觉感知能力可持续提高。除此之外,有研究还评估了调节功能、知觉眼位、屈光状态、眼轴长度、双眼视觉处理能力、中央角膜厚度及融合辐辏等指标。总体而言,VR 训练在多项研究中均显示出对视力及双眼视功能的积极改善作用,但目前仍缺少能够同时解释视力、立体视、抑制程度和神经电生理改变之间关系的统一评价模式。

与传统治疗相比,VR 训练在最终视觉改善幅度上未必具有显著优势,但可能在更短时间内发挥作用^[61]。Herbison 等^[26-27]通过两次研究评估 I-BiT 治疗,其随机对照研究显示 3 组患儿 6 wk 后弱视眼视力均约改善 0.07 LogMAR,但 I-BiT 视频或游戏与对照组之间差异并不显著,表明早期 VR 或分视训练系统的优势可能主要体现在可接受度而非绝对疗效。Rajavi 等^[45-46,51]通过连续试验逐步从联合传统治疗过渡到独立验证虚拟训练的有效性,其中 2019 年的研究显示 I-BiT 游戏与遮盖治疗 1 mo 后 BCVA 改善相近,而 2021 年关于虚拟现实游戏的研究则显示虚拟游戏在部分结局上可优于或与遮盖治疗效果相当。Cleary 等^[44]研究显示仅 3 h 的短时 I-BiT 治疗即可提高视力,8 wk 100 min 治疗效果可与数月 100-200 h 遮盖治疗相比,Kadhun 等^[31]亦得到相近结论。Wynanski-Jaffe 等^[19]在 149 例患儿中比较眼动追踪式家庭双眼治疗与遮盖治疗,16 wk 时双眼治疗在改良意向性分析中达到非劣效,在符合方案分析中优于遮盖,且依从性更高,但两组立体视改善幅度无显著差异。这些研究结果一定程度表明,VR 视觉训练的优势并非体现在所有的结局指标,其临床价值更可能源自视力获益相近或略优,但依从性更好、治疗体验更佳的综合效应。

不同年龄阶段的治疗效果尚存差异。多项研究认为 VR 视觉训练对于 8 岁以下、视觉正处于关键发育期的患儿治疗效果最好,年龄与疗效间呈负相关,这与传统疗法研究结果一致。另一方面,Cleary 等^[44]和 Herbison 等^[27]在传统治疗失败的大龄儿童及残余性弱视患儿中也观察到一定改善,提示 VR 对可塑性下降人群仍具潜在价值。有研究^[32,35-36,38,56-57]就弱视程度与治疗效果之间的关系进行评估,结果表明,程度越轻,治疗效果越好。而就视力改善效果的持续性而言,Huang 等^[25]通过长期随访表明,部分患儿弱视改善在 2 a 内可得到良好维持。Jost 等^[48]随访至 6 wk 亦显示视力改善仍可继续增加。相反,Rajavi 等^[45]认为在脱离训练之后,视力改善效果难以持续提升。这些差异亦表明,视觉训练效果的维持可能与训练后双眼输入是否继续保持平衡、是否继续戴镜矫正和弱视类型有

关。VR 视觉训练效果的持续性仍需更多高质量研究加以验证,如设置停止训练后的随访节点,以进一步判断其是否真正降低了复发风险。

8 小结

现有研究表明,VR 视觉训练可通过分视呈现、双眼平衡调控和任务化交互,在一定程度上改善弱视患者视力、立体视及部分双眼视觉功能,并在趣味性和依从性方面显示出较传统治疗的优势,可作为屈光矫正和遮盖治疗之外的重要补充手段。然而,目前研究仍普遍存在样本量小、干预周期较短、长期随访不足,以及训练模式、结局指标和疗效判定标准不统一等问题,限制了不同研究结果的横向比较,也影响了对疗效持续性和最佳训练方案的判定。此外,居家训练依从性的客观评估、安全性监测的标准化以及不同年龄和不同弱视类型患者的个体化适配仍需进一步完善。未来应在统一主要结局指标和随访时点的基础上,进一步优化训练内容和设备参数,强化依从性管理与安全性评估,并探索更适合不同年龄段及不同弱视亚型患者的精准化训练方案。随着眼动追踪、远程监测和数字疗法的发展,VR 视觉训练有望从单一训练工具逐步转向评估、训练、反馈和随访一体化的弱视管理新模式。

利益冲突说明:本文不存在利益冲突。

作者贡献说明:王康论文选题,撰写与修改;王俏、李鹏斐论文指导;张芸帆、秦子凡资料收集与整理;李静选题指导,论文修改及审阅。所有作者阅读并同意最终的版本。

参考文献

[1] Fu ZJ, Hong H, Su ZC, et al. Global prevalence of amblyopia and disease burden projections through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Br J Ophthalmol*, 2020,104(8):1164-1170.

[2] Stults CD, Liang SY, Wilcox J, et al. Amblyopia care trends following widespread photoscreener adoption. *JAMA Ophthalmol*, 2024, 142(3):188-197.

[3] Koc I, Bagheri S, Chau RK, et al. Cost-effectiveness analysis of digital therapeutics for amblyopia. *Ophthalmology*, 2025, 132(6):654-660.

[4] Mao DY, Liu CY, Yin ZA, et al. Effects of anisometropic amblyopia on visual cognitive functions in children. *Clin Exp Ophthalmol*, 2025, 53(4):344-355.

[5] Zhou SQ, Zhou JW. New advances in amblyopia therapy: early patching is more effective than extended optical treatment. *Lancet*, 2024, 403(10438):1725-1727.

[6] Chen DM, Han S, Summers A, et al. Interventions for improving adherence to amblyopia treatments in children. *Cochrane Database Syst Rev*, 2025,7(7):CD015820.

[7] Ming XL, Huang GT, Chen XH, et al. A systematic review and meta-analysis of perceptual learning and video game training for adults with monocular amblyopia. *Ophthalmol Ther*, 2025,14(5):857-881.

[8] Gong L, Reynaud A, Hess RF, et al. The suppressive basis of ocular dominance changes induced by short-term monocular deprivation in normal and amblyopic adults. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2023, 64(13):2.

[9] Candy TR, Cormack LK. Recent understanding of binocular vision in the natural environment with clinical implications. *Prog Retin Eye Res*, 2022,88:101014.

[10] Giaschi DE, Asare AK, Jost RM, et al. Motion-defined form perception in deprivation amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2024,

65(4):13.

[11] Narasimhan S, Harrison ER, Giaschi DE. Quantitative measurement of interocular suppression in children with amblyopia. *Vision Res*, 2012,66:1-10.

[12] Huang YR, Liu ZT, Zhan ZY, et al. Interactions between excitatory neurons and parvalbumin interneurons in V1 underlie neural mechanisms of amblyopia and visual stimulation treatment. *Commun Biol*, 2024,7(1):1564.

[13] Chen ZB, Cai YC. An anti-Hebbian model for binocular visual plasticity and its attentional modulation. *Commun Biol*, 2025,8(1):418.

[14] Wiecek E, Kosovicheva A, Ahmed Z, et al. Peripheral binocular imbalance in anisometropic and strabismic amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2024,65(4):36.

[15] Heitmann C, Zhan MY, Linke M, et al. Early visual experience refines the retinotopic organization within and across visual cortical regions. *Curr Biol*, 2023,33(22):4950-4959.e4.

[16] Birch EE, Duffy KR. Leveraging neural plasticity for the treatment of amblyopia. *Surv Ophthalmol*, 2024,69(5):818-832.

[17] Tan F, Yang XB, Fan YC, et al. The study of short-term plastic visual perceptual training based on virtual and augmented reality technology in amblyopia. *J Ophthalmol*, 2022,2022:2826724.

[18] Wygnanski-Jaffe T, Moshkovitz A, Kushner BJ, et al. Binocular home treatment for amblyopia: gains stable for one year. *Am J Ophthalmol*, 2024,262:199-205.

[19] Wygnanski-Jaffe T, Kushner BJ, Moshkovitz A, et al. High-adherence dichoptic treatment versus patching in anisometropic and small angle strabismus amblyopia: a randomized controlled trial. *Am J Ophthalmol*, 2025,269:293-302.

[20] Zhou SQ, Weng LQ, Zhou CY, et al. Reduced monocular luminance promotes fusion but not mixed perception in amblyopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2024,65(4):15.

[21] Huang HC, Cho WH, Fang PC, et al. Add-on perceptual learning on refractive amblyopia in children. *Int J Ophthalmol*, 2024, 17(10):1850-1856.

[22] Sexton CM, Burkitt AN, Hogendoorn H. Spike-timing dependent plasticity partially compensates for neural delays in a multi-layered network of motion-sensitive neurons. *PLoS Comput Biol*, 2023, 19(9):e1011457.

[23] Carlson BM, Mitchell BA, Dougherty K, et al. Does V1 response suppression initiate binocular rivalry? *iScience*, 2023,26(8):107359.

[24] Molina-Martin A, Leal-Vega L, de Fez D, et al. Amblyopia treatment through immersive virtual reality: a preliminary experience in anisometropic children. *Vision (Basel)*, 2023,7(2):42.

[25] Huang X, Xia HK, Zhang Q, et al. New treatment for amblyopia based on rules of synaptic plasticity: a randomized clinical trial. *Sci China Life Sci*, 2022,65(3):451-465.

[26] Herbison N, Cobb S, Gregson R, et al. Interactive binocular treatment (I-BiT) for amblyopia: results of a pilot study of 3D shutter glasses system. *Eye (Lond)*, 2013,27(9):1077-1083.

[27] Herbison N, MacKeith D, Vivian A, et al. Randomised controlled trial of video clips and interactive games to improve vision in children with amblyopia using the I-BiT system. *Br J Ophthalmol*, 2016, 100(11):1511-1516.

[28] Leal Vega L, Piñero DP, Hernández Rodríguez CJ, et al. Study protocol for a randomized controlled trial of the NEIVATECH virtual reality system to improve visual function in children with anisometropic amblyopia. *BMC Ophthalmol*, 2022,22(1):253.

[29] Li L, Xue HL, Lai TC, et al. Comparison of compliance among patients with pediatric amblyopia undergoing virtual reality-based and traditional patching method training. *Front Public Health*, 2022, 10:

1037412.

[30] Xiao S, Angjeli E, Wu HC, et al. Randomized controlled trial of a dichoptic digital therapeutic for amblyopia. *Ophthalmology*, 2022, 129(1):77-85.

[31] Kadhum A, Tan ETC, Fronius M, et al. Supervised dichoptic gaming versus monitored occlusion therapy for childhood amblyopia: Effectiveness and efficiency. *Acta Ophthalmol*, 2024,102(1):38-48.

[32] Meqdad Y, El-Basty M, Awadein A, et al. Randomized controlled trial of patchingversus dichoptic stimulation using virtual reality for amblyopia therapy. *Curr Eye Res*, 2024,49(2):214-223.

[33] 李超颖, 杨成明, 聂晓梅. 虚拟现实训练在弱视患儿中的应用效果及其对视觉诱发电位的影响. *中外医学研究*, 2022,20(5):28-31.

[34] Leal-Vega L, Piñero DP, Molina-Martín A, et al. Pilot study assessing the safety and acceptance of a novel virtual reality system to improve visual function. *Semin Ophthalmol*, 2024,39(5):394-399.

[35] 杨素红, 甘晓玲, 庞琳, 等. 利用视觉虚拟现实训练软件治疗弱视的疗效分析. *中国斜视与小儿眼科杂志*, 2004,1:9-13.

[36] 谢明丽. 视觉虚拟现实训练软件治疗弱视的疗效分析. *现代预防医学*, 2011,38(24):5081-5082.

[37] 张勇. 虚拟现实软件训练与传统方法治疗弱视疗效分析. *中外医疗*, 2011,30(33):32-33.

[38] 张威, 余爱华, 蔡小军. 视觉虚拟现实训练与传统训练方法治疗儿童弱视的比较. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2020,22(11):842-846.

[39] 宿娟. 视觉虚拟现实训练与传统训练法治疗3-6岁轻度屈光性弱视患儿效果比较. *河南医学高等专科学校学报*, 2021,33(6):669-672.

[40] 韦仕岗, 蓝剑青, 谢文娟, 等. 虚拟现实视感知觉平台在近视性屈光参差性弱视患者立体视功能可塑性的临床应用研究. *中国斜视与小儿眼科杂志*, 2019,27(4):13-15.

[41] 魏聪. 基于推拉模型的虚拟现实技术在弱视患者的临床应用研究. *河南大学*, 2021.

[42] 梁彩红, 欧春蓓, 邱悦, 等. 虚拟现实技术对弱视儿童视功能的影响. *护理实践与研究*, 2021,18(1):35-38.

[43] Waddingham PE, Butler TK, Cobb SV, et al. Preliminary results from the use of the novel Interactive binocular treatment (I-BiT) system, in the treatment of strabismic and anisometropic amblyopia. *Eye (Lond)*, 2006,20(3):375-378.

[44] Cleary M, Moody AD, Buchanan A, et al. Assessment of a computer-based treatment for older amblyopes; the Glasgow Pilot Study. *Eye (Lond)*, 2009,23(1):124-131.

[45] Rajavi Z, Sabbaghi H, Amini Sharifi E, et al. The role of Interactive Binocular Treatment system in amblyopia therapy. *J Curr Ophthalmol*, 2016,28(4):217-222.

[46] Rajavi Z, Soltani A, Vakili A, et al. Virtual reality game playing in amblyopia therapy: a randomized clinical trial. *J Pediatr Ophthalmol Strabismus*, 2021,58(3):154-160.

[47] Bankó ÉM, Barboni MTS, Markó K, et al. Fixation instability, astigmatism, and lack of Stereopsis as factors impeding recovery of binocular balance in amblyopia following binocular therapy. *Sci Rep*, 2022,12(1):10311.

[48] Jost RM, Hudgins LA, Dao LM, et al. Randomized clinical trial of streaming dichoptic movies versus patching for treatment of amblyopia in children aged 3 to 7 years. *Sci Rep*, 2022,12(1):4157.

[49] Blavakis E, Spaho J, Chatzea M, et al. Dichoptic game training in strabismic amblyopia improves the visual evoked response. *Cureus*, 2023,15(9):e45395.

[50] 邢文肖. 虚拟现实训练在儿童弱视治疗中的应用研究. *中文科技期刊数据库(文摘版)医药卫生*, 2023,15(7):35-37.

[51] Rajavi Z, Sabbaghi H, Amini Sharifi E, et al. Comparison between patching and interactive binocular treatment in amblyopia: a randomized clinical trial. *J Curr Ophthalmol*, 2019,31(4):426-431.

[52] 李荣需, 梁婉红, 叶志桃, 等. 虚拟现实训练在儿童弱视治疗中的应用研究. *特别健康*, 2020,(17):111-112.

[53] 杜玲芳, 高娜, 何芳, 等. 虚拟现实技术视觉训练联合家庭训练治疗大龄弱视儿童的效果观察. *当代医学*, 2022,28(14):103-106.

[54] 甘晓玲. 弱视的定义、分类及疗效评价标准. *中国斜视与小儿眼科杂志*, 1996,4(3):3.

[55] 中华医学会眼科学分会斜视与小儿眼科学组. 弱视诊断专家共识(2011年). *中华眼科杂志*, 2011,47(8):768.

[56] 潘美华, 任小军, 庄建福, 等. 增视能训练软件治疗儿童弱视的疗效分析. *临床眼科杂志*, 2008,16(2):179-181.

[57] 刘津津. 弱视患儿应用精细训练联合虚拟现实视觉训练治疗的效果观察. *中国实用医药*, 2021,16(24):196-198.

[58] 刘兰英, 韦新, 杨胜富. 虚拟现实视感知觉训练治疗屈光参差性弱视的效果. *保健文汇*, 2021,22(28):245-246.

[59] 陈珊珊. 目力精细训练联合虚拟现实视觉训练治疗弱视患儿的临床疗效. *当代医学*, 2022,28(22):3.

[60] 徐莺歌, 张欣星, 钱锦芳, 等. 虚拟现实视觉训练对斜视性弱视患儿病情的影响分析. *中国医学工程*, 2023,31(7):80-83.

[61] Halabi MH, Aldhahwani B. The efficacy and safety of dichoptic therapy in comparison to patching in children with amblyopia: a systematic review and meta-analysis. *Acta Ophthalmol*, 2026,104(2):e139-e151.