

基于虚拟现实的调节力训练仪对调节过度型视疲劳的治疗效果分析

黄梓庭¹ 钟菁¹ 李姬静¹ 马静¹ 刘昱¹ 陈玮² 罗一鸣³ 袁进¹

¹中山大学中山眼科中心 眼病防治全国重点实验室 广东省眼科视觉科学重点实验室
广东省眼部疾病临床研究中心, 广州 510060; ²深圳市火眼睛晶医疗科技有限公司, 深圳
518000; ³广州市看见科技有限责任公司, 广州 510000

袁进现在首都医科大学附属北京同仁医院, 北京 100730

通信作者: 袁进, Email: yuanjincornea@126.com

【摘要】 目的 分析基于虚拟现实(VR)的调节力训练仪对调节过度型视疲劳的治疗效果。方法 采用病例对照研究方法,选取2022年1—12月就诊于中山大学中山眼科中心的正常受试者20人20眼和调节过度型视疲劳患者20例20眼。将本研究分为2个阶段,第1阶段评估使用VR眼镜观看视频对人眼主观和客观视功能的影响,正常受试者佩戴VR眼镜观看2D视频30 min,在观看前后进行双眼调节/辐辏功能[调节反应、调节性集合与调节比值(AC/A)]、泪膜功能(首次泪膜破裂时间)和主观症状(视觉疲劳评分)评估,以及基础视觉健康指标,包括最佳矫正视力(BCVA)、眼压的测量。第2阶段观察VR眼镜调节力训练仪对主观和客观视疲劳指标的改善作用。将视疲劳患者分为传统训练组和VR训练组,每组各10眼,分别使用传统翻转拍和VR调节力训练器进行训练。通过与传统翻转拍相比,评估VR眼镜调节力训练仪对调节灵敏度、调节反应、辐辏功能、视疲劳评分、可接受度评分、系统可用性评分、BCVA、眼压等指标的影响。结果 正常受试者使用VR眼镜连续观看2D视频30 min后首次泪膜破裂时间、远用眼位、近用眼位、AC/A、调节反应值、BCVA和眼压与观看前比较,差异均无统计学意义($t=1.155, 1.360, 4.479, 1.979, -1.249, -3.017, 2.211$, 均 $P>0.05$)。视疲劳评分观看前后均为(1.00±0.00)分。视疲劳人群使用VR调节力训练仪前后双眼调节灵敏度、主视眼调节灵敏度、BCVA总体比较差异均有统计学意义($F=8.693, 4.078, 4.942$, 均 $P<0.05$),其中训练后8周双眼调节灵敏度较训练后1周提高,训练后4周BCVA较训练前提高,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$)。VR训练组训练后平均泪膜破裂时间、首次泪膜破裂时间较训练前延长,BCVA较训练前提高,视疲劳评分较训练前降低,差异均有统计学意义(均 $P<0.05$);传统训练组训练后主导眼调节灵敏度较训练前提高,差异有统计学意义($P<0.05$)。结论 使用VR眼镜观看2D视频30 min不会导致主观和客观视疲劳症状。基于VR的调节力训练范式在调节过度型视疲劳人群中能够有效提高调节灵敏度,改善主观视疲劳症状。

【关键词】 虚拟现实; 视疲劳; 眼调节; 调节力训练; 翻转拍

DOI:10.3760/ema.j.cn115989-20240827-00243

Therapeutic effects of virtual reality-based accommodation training device on accommodative excess asthenopia

Huang Ziting¹, Zhong Jing¹, Li Jijing¹, Ma Jing¹, Liu Yu¹, Chen Wei², Luo Yiming³, Yuan Jin¹

¹State Key Laboratory of Ophthalmology, Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Ophthalmology and Visual Science, Guangdong Provincial Clinical Research Center for Ocular Diseases, Guangzhou 510060, China; ²Shenzhen Huoyanjingjing Medical Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China; ³Guangzhou Kanjian Technology Co., Ltd., Guangzhou 510000, China

Yuan Jin is working at Beijing Tongren Hospital, Capital Medical University, Beijing 100730, China

Corresponding author: Yuan Jin, Email: yuanjincornea@126.com

[Abstract] **Objective** To analyze the therapeutic effect of a virtual reality (VR)-based accommodation training device on accommodative excess visual fatigue. **Methods** A case-control study was conducted. A total of 20 normal subjects (20 eyes) and 20 patients with accommodative excess visual fatigue (20 eyes) were recruited at Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University between January and December 2022. The study consisted of two phases. In the first phase, the effect of watching videos with VR glass on the subjects' subjective and objective visual function was evaluated. Normal subjects wore VR device to watch a 2D video for 30 minutes, and assessments

were performed before and after viewing. These assessments included binocular accommodation/convergence function (accommodation response, accommodative convergence to accommodation ratio [AC/A]), tear film function (first tear film break-up time), subjective symptoms (visual fatigue score), and basic visual health parameters including best corrected visual acuity (BCVA) and intraocular pressure (IOP). In the second phase, the improvement in subjective and objective visual fatigue metrics with the VR-based accommodation training device was investigated. Patients with visual fatigue were divided into a traditional training group using traditional flipper lenses and a VR training group using the VR accommodation training device, with 10 eyes in each group. The effects of the VR accommodation training device on indicators such as accommodative sensitivity, accommodation response, convergence function, visual fatigue score, acceptability score, system usability score, BCVA, and IOP were evaluated and compared between the two groups. This study adhered to the Declaration of Helsinki. The study protocol was approved by the Ethics Committee of Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University (No. IIT2021007). Written informed consent was obtained from each subject.

Results In normal subjects, there was no statistically significant difference in first tear film break-up time, distance phoria, near phoria, AC/A, accommodative response, BCVA, or IOP before and after 30 minutes of continuous viewing of 2D video using VR glass ($t = 1.155, 1.360, 4.479, 1.979, -1.249, -3.017, 2.211$; all $P > 0.05$). The visual fatigue score remained unchanged at (1.00 ± 0.00) points before and after viewing. Among the subjects with visual fatigue, there were statistically significant differences in binocular accommodative sensitivity, dominant eye accommodative sensitivity, and BCVA before and after using the VR accommodation training device ($F = 8.693, 4.078, 4.942$; all $P < 0.05$). Ocular accommodation sensitivity at 8 weeks after training was improved compared with 1 week after training, and BCVA at 4 weeks after training was improved compared with before training, and the differences were statistically significant (both $P < 0.05$). In the VR training group, the average tear film break-up time, first tear film break-up time, and BCVA increased and the visual fatigue score decreased compared with before training, the differences were statistically significant (all $P < 0.05$). In the traditional training group, the accommodation sensitivity of the dominant eye increased after training compared with before training, with a statistically significant difference ($P < 0.05$).

Conclusions Watching 2D videos with VR glass for 30 minutes does not induce subjective or objective symptoms of visual fatigue. The VR-based accommodation training paradigm effectively improves accommodative sensitivity and alleviates subjective symptoms of visual fatigue in individuals with accommodative excess visual fatigue.

[Key words] Virtual reality; Asthenopia; Accommodation, ocular; Accommodation training; Accommodative flippers

DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20240827-00243

视疲劳是由于各种因素使得人的双眼在视物时超过了其所能承受的负荷,导致出现视觉障碍、眼部不适或伴有全身症状等,从而不能正常视物,甚至影响日常工作和生活的一组症候群^[1]。当今社会,数字设备与大众日常生活的联系愈发紧密,高强度的用眼行为导致越来越多人出现视疲劳^[2],进而降低人们的工作效率,甚至造成经济损失^[3-5]。对因治疗消除病因后再进行对症治疗是视疲劳的治疗原则,如对于双眼视功能异常者,建议给予相应的功能训练,改善眼的调节能力,从而减轻视疲劳症状^[6-8]。虚拟现实(virtual reality, VR)是利用计算机模拟产生一个三维空间的虚拟世界,给用户提供一个关于视觉、听觉等多感官联合的模拟环境,让用户可以即时、没有限制地观察三维空间内的事物,目前,其已与眼科临床广泛结合^[9-10]。在诸如视功能检查、视功能训练等项目中,VR技术为原本枯燥复杂的检查及训练过程增添了丰富的内容及元素,有效提升了检查效率和训练依从性,为视疲劳的治疗和训练提供了新方式^[11]。本研究拟探讨基于VR

技术的调节力训练仪对视觉健康的影响及对调节过度型视疲劳患者的临床治疗效果。

1 资料与方法

1.1 一般资料

采用病例对照研究方法,本研究分为2个阶段进行。第1阶段,通过招募正常受试者,评估使用调节力训练仪观看视频对人眼主观和客观视功能的影响。第2阶段,招募调节过度型视疲劳患者,观察VR眼镜对主观和客观视疲劳指标的改善作用。

选取2022年1—12月就诊于中山大学中山眼科中心的正常受试者20人20眼和调节过度型视疲劳患者20例20眼,均纳入受试者主导眼数据。正常受试者中男女各10人,平均年龄 (26.9 ± 4.4) 岁。正常受试者纳入标准:(1)年龄18~40岁;(2)双眼最佳矫正视力(best corrected visual acuity, BCVA)均 ≥ 0.8 ,眼压10~21 mmHg(1 mmHg = 0.133 kPa);(3)中央前房深度 ≥ 3 角膜厚度(corneal thickness, CT),周边前房深

度 $\geq 1/3$ CT; (4) 双眼等效球镜度 (spherical equivalent, SE) ≥ -6.00 D, 双眼散光度数 ≤ 2.00 D, 双眼屈光不正度数差值 ≤ 2.50 D; (5) 非侵入首次泪膜破裂时间 ≥ 10 s; (6) 远距眼位为 $1^\Delta \sim 3^\Delta$; 近距眼位为 $0 \sim 6^\Delta$; 调节反应量 $\geq +0.25$ D。排除标准: (1) 有眼部疾病史或手术史者; (2) 有影响检查的全身疾病史者, 如心血管疾病、精神疾病等。

以调节反应作为主要研究指标, 视疲劳患者样本数经过样本量计算得出目标样本量为每集约 7 例受试者, 因此第 2 阶段共纳入 20 例调节过度型视疲劳患者, 男女各 10 例, 平均年龄 (24.7 \pm 4.1) 岁。视疲劳患者纳入标准: (1) 年龄 18~40 岁; (2) 双眼 BCVA 均 ≥ 0.8 ; (3) 眼压 10~21 mmHg; (4) 中央前房深度 ≥ 3 CT, 周边前房深度 $\geq 1/3$ CT; (5) 双眼 SE ≥ -6.00 D, 双眼散光度数 ≤ 2.00 D, 双眼屈光不正度数差值 ≤ 2.50 D; (6) 单眼调节灵敏度 < 11 cpm、双眼调节灵敏度 < 8 cpm; (7) 认知能力正常, 可以理解并配合检查且主观愿意参加该临床试验。排除标准: (1) 有眼部手术史者; (2) 有影响检查的全身疾病史者, 如心血管疾病、精神疾病等。本研究遵循《赫尔辛基宣言》, 研究方案经中山大学中山眼科中心伦理委员会审核批准 (批文号: IIT2021007), 所有患者均签署知情同意书。

1.2 方法

1.2.1 眼科检查

(1) 采用 YZ24 带状光检影镜 (苏州六六视觉科技股份有限公司) 和 MEM 卡 (苏州六六视觉科技股份有限公司) 进行调节反应评估, 在 40 cm 处给予调节刺激, 用 40 cm 处调节刺激值减去测得结果即是调节反应量。采用马氏杆测量 33 cm 和 5 m 处隐斜度数, 通过远用瞳距、视近距离、近距隐斜量、远距隐斜量计算调节性集合与调节比值 (accommodation convergence/accommodation, AC/A)。(2) 采用 Keratograph 眼表综合分析仪 (德国 Oculus 公司) 进行非接触式泪膜分析, 分析首次泪膜破裂时间。(3) 通过视觉疲劳测试与评价方法第 2 部分量表评级方法 (T/CVIA 73-2019) 中《视觉疲劳症状问卷调查表》的视觉疲劳问卷进行主观视觉疲劳评分, 分数越高说明人眼的视觉疲劳程度越高。(4) 采用 EDTRS 视力表评估视力。(5) 采用非接触式眼压计 (NT-510, 日本 Nidek 株式会社) 测量眼压。(6) 采用笔式手电筒及刻度尺, 通过移近法测量近点聚合 (near point of convergence, NPC) 破裂点数值, 测量 3 次取平均值。

1.2.2 VR 对视觉健康影响的评估

评估方法及流程参考《虚拟现实技术视觉健康影响评价方法》团体标准 (编号: T/CSBME 052-2022)。每位正常受试者观

看标准测试片源 30 min, 在观看前和观看后分别对受试者进行核心和基础视觉健康指标分析, 其中核心视觉健康指标包括双眼调节/辐辏功能 (调节反应、AC/A)、泪膜功能 (首次泪膜破裂时间) 和主观症状 (视觉疲劳评分); 基础视觉健康指标包括 BCVA 和眼压。

1.2.3 视疲劳训练

采用计算机生成随机数法将所有视疲劳受试者随机分配到 VR 训练组和传统训练组。随机分组由独立的研究助理完成, 分组过程为单盲设计, 试验研究人员在分组后不知晓受试者所属组别。视疲劳患者分为 VR 训练组和传统训练组, 每组 10 例, 其中 VR 训练组男 6 例, 女 4 例; 传统训练组男 4 例, 女 6 例。VR 训练组基于 VR 调节力训练仪 (深圳市火眼睛晶医疗科技有限公司) 以特定节律训练睫状肌, 从而达到缓解视疲劳的效果。调节力训练仪具体参数如下: 主机尺寸为 132.5 mm \times 59.0 mm \times 15.3 mm; 眼镜尺寸为 151.5 mm \times 64.5 mm \times 33.0 mm; 眼镜质量为 160 g; 该 VR 眼镜搭载的 2 片显示屏幕为 LED 材质; 屏幕物理分辨率为 1 600 \times 1 600, 实际使用分辨率为 1 600 \times 1 200; 屏幕每英寸所拥有的像素数量为 1 058; 屏幕尺寸为 2.1 寸; 焦距调节 (虚像距调节) 为 0.15 m 至无穷远; 瞳距为初始 55 mm, 自适应 50~62 mm。训练范式内容如下: (1) 进行调节力训练时使用的是条栅视标 (图 1A, B)。(2) VR 眼镜通过内置马达带动镜筒内镜片前后移动改变焦距, 变焦范围为 0~-6.00 DS, 单程用时 10 s, 20 s 为 1 个往复周期, 不间断重复。(3) 训练单眼进行, 每眼训练 7.5 min, 右眼训练结束后自动切换至左眼, 每次训练双眼共用时 15 min。(4) 被训练者需努力保持注视视标清晰, 被动且舒缓地调节刺激, 使睫状肌跟随镜筒不停进行紧张和放松调节 (图 1C)。

传统训练组进行调节灵敏度训练: (1) 用 ± 1.50 D 的翻转拍在患者屈光矫正的基础上进行训练。(2) 将视力卡放在视力架上 (距离 40 cm), 一眼用眼罩遮盖, 先进行单眼训练, 后进行双眼训练。(3) 翻转拍正镜片一侧贴近眼部置于鼻梁上, 按照视力卡上 1~40 号的顺序依次看清并大声读出每号方格里的视标。翻转 1 次翻转拍读出 1 个方格里的视标, 再翻转 1 次, 再读出下一方格的视标。(4) 每次训练双眼共用时 15 min。

1.2.4 视疲劳训练效果评价及临床随访

在训练前、训练后即刻和训练后 1、4、8 周分别对视疲劳受试者进行调节灵敏度、调节反应、辐辏功能、视疲劳评分、可接受度评分、系统可用性评分、BCVA、眼压等指标评估。试验开始后嘱受试者闭眼休息 5~10 min, 填

写视疲劳问卷,采用 Keratograph 眼表综合分析仪测试受试者的泪膜功能,分别记录双眼首次泪膜破裂时间以及平均泪膜破裂时间。采用全自动综合验光仪(CV-5000,日本 Topcon 株式会社)检查受试者的主观屈光不正度,在此基础上检查受试者的辐辏功能。用马氏杆测量受试者的远用/近用眼位,并计算 AC/A 值。将综合验光仪调整为近用模式,通过加负镜片法分别测量单眼、双眼的调节幅度;于双眼前增加正镜片,每次增加+0.25 D,直至受试者报告视标变模糊而且持续保持模糊为止,得出受试者的负相对调节幅度;于双眼前增加负镜片,每次增加-0.25 D,直至受试者报告视标变模糊而且持续保持模糊为止,记录受试者的正相对调节幅度;准备±2.00 D 的翻转拍置于受试者面前 40 cm,观看 20/40 的近用视力卡,先放置正镜片于受试者眼前,当受试者报告视标变清晰时,立即将负镜片翻转至受试者眼前,待受试者报告视标变清晰时再立即翻转镜片,重复操作 1 min 并记录翻转次数。用开窗式电脑验光仪(WAM5500,日本 Shigiya 株式会社)测得受试者的调节反应值。使用近用视标在受试者眼前 40 cm 处移近或者移远得出破裂点和恢复点;在 4 m 处分别检查受试者裸眼视力和 BCVA;并用非接触式眼压计测量眼压;采用双目视功能检查仪(59850,德国 Oculus 公司)检查单/双眼对比敏感度,

记录结果后嘱受试者佩戴 VR 眼镜现场进行视疲劳训练 20 min,结束训练后填写视疲劳问卷、可接受度量表以及 SUS 用户体验表,并重复测试受试者的泪膜功能、主观屈光不正度、辐辏功能、调节功能、聚散功能(破裂点和恢复点)、基础视功能(BCVA、眼压)以及对比敏感度,记录所有结果。

1.3 统计学方法

采用 SPSS 23.0 统计学软件进行统计分析。计量资料数据经 Shapiro-Wilk 检验证实符合正态分布,以 $\bar{x} \pm s$ 表示。采用配对 *t* 检验比较正常受试者观看 VR 设备前后视功能指标的变化。采用重复测量单因素方差分析比较训练前后不同时间点患者视功能、隐斜视、调节幅度、视疲劳和系统可用度评分,两两比较采用 Bonferroni 校正法。采用重复测量两因素方差分析比较 VR 训练组与传统训练组训练前后视功能指标的总差异,两两比较采用 LSD-*t* 检验。*P*<0.05 为差异有统计学意义,Bonferroni 校正法检验水准为 0.005。

2 结果

2.1 正常受试者使用 VR 设备前后各指标比较

正常受试者使用 VR 眼镜连续观看 2D 视频后 30 min 首次泪膜破裂时间、远用眼位、近用眼位、AC/A、调节反应值、BCVA 和眼压与观看前比较,差异

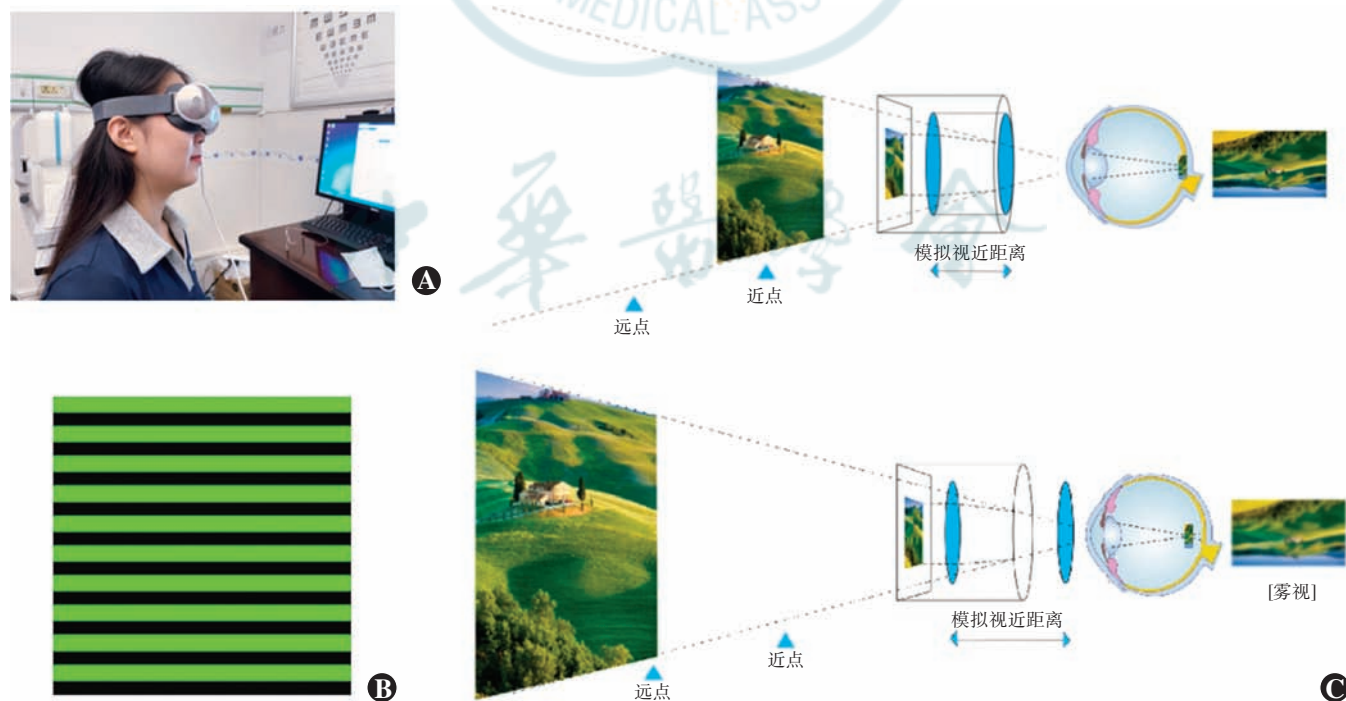


图 1 VR 调节力训练仪和训练范式示意图 A:患者佩戴 VR 眼镜 B:训练时呈现的视标 C:基于 VR 眼镜调节力训练,看远和看近范式时视标呈现原理示意图

Figure 1 Schematic diagram of a VR accommodation training device and training paradigm A:Patient wearing VR glasses B:Visual targets during training C:Schematic illustration of visual target presentation during far and near viewing paradigms based on VR glasses accommodation training

均无统计学意义 ($t = 1.155、1.360、4.479、1.979、-1.249、-3.017、2.211$, 均 $P > 0.05$) (表 1)。视疲劳评分观看前后均为 (1.00 ± 0.00) 分。

2.2 视疲劳人群使用 VR 调节力训练仪前后视功能参数比较

视疲劳人群使用 VR 调节力训练仪前后双眼调节灵敏度、主视眼调节灵敏度、BCVA 总体比较差异均有统计学意义 ($F = 8.693、4.078、4.942$, 均 $P < 0.05$), 其中训练后 8 周双眼调节灵敏度较训练后 1 周提高, 训练后 4 周 BCVA 较训练前提高, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$) (表 2)。

2.3 VR 训练组和传统训练组使用 VR 调节力训练仪前后视功能参数比较

VR 训练组和传统训练组使用 VR 调节力训练仪前后平均泪膜破裂时间、首次泪膜破裂时间、主导眼调节灵敏度、视疲劳评分、BCVA 总体比较差异均有统计学意义 ($F_{\text{时间}} = 7.078、5.891、17.230、6.709、6.944$, 均 $P < 0.05$), 其中 VR 训练组训练后平均泪膜破裂时间、首次泪膜破裂时间较训练前延长, BCVA 较训练前提高, 视疲劳评分较训练前降低, 差异均有统计学意义 (均 $P < 0.05$); 传统训练组训练后 4 周主导眼调节灵敏度较训练前提高, 差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。VR 训练组和传统训练组使用 VR 调节力训练仪前后正相对调节、NPC (6~10 cm) 破裂点、BCVA 总体比较差异均有统计学意义 ($F_{\text{组别}} = 5.738、5.055、4.287$, 均 $P < 0.05$) (表 3)。

表 1 正常受试者使用 VR 调节训练仪前后各指标比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Comparison of indicators before and after using a VR accommodation training device in normal subjects ($\bar{x} \pm s$)

时间	例数/眼数	首次泪膜破裂时间 (s)	远用眼位 (Δ)	近用眼位 (Δ)	AC/A	调节反应值	BCVA	眼压 (mmHg)
观看前	20/20	15.40±4.41	-0.54±0.87	-3.21±2.42	5.05±0.80	0.53±0.20	1.07±0.10	15.23±2.37
观看后	20/20	13.37±5.32	-0.80±0.92	-4.25±2.73	4.77±1.17	0.62±0.34	1.17±0.16	14.31±1.87
t 值		1.155	1.360	4.479	1.979	-1.249	-3.017	2.211
P 值		0.300	0.456	0.315	0.486	0.382	0.067	0.284

注: (配对 t 检验) VR: 虚拟现实; AC/A: 调节性集合与调节比值; BCVA: 最佳矫正视力 1 mmHg = 0.133 kPa

Note: (Paired t -test) VR: virtual reality; AC/A: accommodative convergence/accommodation; BCVA: best corrected visual acuity 1 mmHg = 0.133 kPa

表 2 视疲劳人群使用 VR 调节力训练仪前后视功能参数比较 ($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Comparison of visual function parameters before and after using a VR accommodation training device in individuals with visual fatigue ($\bar{x} \pm s$)

时间	例数/眼数	双眼调节灵敏度	主视眼调节灵敏度 (cpm)	调节反应值 (D)	视疲劳评分 (分)
训练前	10/10	3.57±1.51	3.67±1.37	0.62±0.36	13.50±6.28
训练后	10/10	5.14±2.54	3.83±2.14	0.77±0.26	9.50±7.23
训练后 1 周	10/10	4.57±2.57	3.83±2.56	0.89±0.35	6.33±4.97
训练后 4 周	10/10	6.29±2.87	6.33±3.72	0.59±0.22	6.83±6.94
训练后 8 周	10/10	7.00±3.11 ^a	5.71±2.87	0.71±0.43	4.86±5.30
F 值		8.693	4.078	0.890	2.608
P 值		0.002	0.040	0.454	0.130

组别	例数/眼数	可接受度评分 (分)	系统可用性评分 (分)	BCVA	眼压 (mmHg)
训练前	10/10	-	-	1.00±0.18	12.72±1.59
训练后	10/10	3.33±1.03	83.33±9.70	1.12±0.27	12.78±1.48
训练后 1 周	10/10	3.33±1.37	78.75±17.59	1.07±0.21	12.43±1.31
训练后 4 周	10/10	3.67±1.86	77.5±18.17	1.18±0.81 ^b	11.65±1.03
训练后 8 周	10/10	4.00±1.15	77.86±23.69	1.20±0.25	13.19±2.12
F 值		1.091	0.228	4.942	0.546
P 值		0.361	0.793	0.016	0.609

注: 与训练后 1 周比较, ^a $P < 0.005$; 与训练前比较, ^b $P < 0.005$ (重复测量单因素方差分析, Bonferroni 校正法) VR: 虚拟现实; BCVA: 最佳矫正视力; -: 无数据 1 mmHg = 0.133 kPa

Note: Compared with 1 week after training, ^a $P < 0.005$; compared with before training, ^b $P < 0.005$ (One-way repeated measures ANOVA, Bonferroni correction) VR: virtual reality; BCVA: best corrected visual acuity; -: no data 1 mmHg = 0.133 kPa

表 3 VR 训练组和传统训练组使用 VR 调节力训练仪前后视功能参数比较 ($\bar{x}\pm s$)
Table 3 Comparison of visual function parameters before and after using a VR accommodation training device between the VR training group and the traditional training group ($\bar{x}\pm s$)

组别	例数/眼数	平均泪膜破裂时间 (s)		首次泪膜破裂时间 (s)		主视眼调节灵敏度 (cpm)		正相对调节 (D)	
		训练前	训练后 4 周	训练前	训练后 4 周	训练前	训练后 4 周	训练前	训练后 4 周
传统训练组	10/10	15.88±3.49	19.05±3.87	12.42±5.31	16.01±5.24	3.33±2.07	7.50±2.66 ^a	-1.58±0.85	-1.54±1.69
VR 训练组	10/10	15.71±5.82	20.52±5.38 ^a	12.29±7.23	18.49±7.40 ^a	3.67±1.37	6.33±3.72	-2.67±0.68	-2.42±1.65

组别	例数/眼数	NPC (6-10 cm) 破裂点		视疲劳评分 (分)		用户体验评分 (分)		BCVA	
		训练前	训练后 4 周	训练前	训练后 4 周	训练前	训练后 4 周	训练前	训练后 4 周
传统训练组	10/10	6.08±2.04	8.19±3.00	12.00±4.00	9.17±5.56	80.83±11.69	69.58±7.49	0.93±0.16	1.03±0.15
VR 训练组	10/10	9.93±4.80	9.83±4.84	13.50±6.28	6.83±6.94 ^a	83.33±9.70	77.5±18.17	1.00±0.18	1.18±0.18 ^a

注:平均泪膜破裂时间: $F_{\text{组别}}=0.188, P=0.668; F_{\text{时间}}=7.078, P=0.012; F_{\text{交互作用}}=0.299, P=0.588$ 。首次泪膜破裂时间: $F_{\text{组别}}=0.340, P=0.564; F_{\text{时间}}=5.891, P=0.020; F_{\text{交互作用}}=0.419, P=0.522$ 。主导眼调节灵敏度: $F_{\text{组别}}=0.254, P=0.617; F_{\text{时间}}=17.230, P<0.001; F_{\text{交互作用}}=0.842, P=0.365$ 。正相对调节: $F_{\text{组别}}=5.738, P=0.022; F_{\text{时间}}=0.124, P=0.726; F_{\text{交互作用}}=0.065, P=0.800$ 。NPC (6-10 cm) 破裂点: $F_{\text{组别}}=5.055, P=0.031; F_{\text{时间}}=0.678, P=0.416; F_{\text{交互作用}}=0.819, P=0.372$ 。视疲劳评分: $F_{\text{组别}}=0.052, P=0.820; F_{\text{时间}}=6.709, P=0.014; F_{\text{交互作用}}=1.096, P=0.302$ 。BCVA: $F_{\text{组别}}=4.287, P=0.046; F_{\text{时间}}=6.944, P=0.012; F_{\text{交互作用}}=0.567, P=0.456$ 。与各自训练前比较,^a $P<0.05$ (重复测量两因素方差分析, LSD- t 检验) VR: 虚拟现实; NPC: 近点聚合; BCVA: 最佳矫正视力

Note: Mean tear film break-up time: $F_{\text{group}}=0.188, P=0.668; F_{\text{time}}=7.078, P=0.012; F_{\text{interaction}}=0.299, P=0.588$. First tear film break-up time: $F_{\text{group}}=0.340, P=0.564; F_{\text{time}}=5.891, P=0.020; F_{\text{interaction}}=0.419, P=0.522$. Dominant eye accommodation sensitivity: $F_{\text{group}}=0.254, P=0.617; F_{\text{time}}=17.230, P<0.001; F_{\text{interaction}}=0.842, P=0.365$. Positive relative accommodation: $F_{\text{group}}=5.738, P=0.022; F_{\text{time}}=0.124, P=0.726; F_{\text{interaction}}=0.065, P=0.800$. NPC (6-10 cm) break point: $F_{\text{group}}=5.055, P=0.031; F_{\text{time}}=0.678, P=0.416; F_{\text{interaction}}=0.819, P=0.372$. Visual fatigue score: $F_{\text{group}}=0.052, P=0.820; F_{\text{time}}=6.709, P=0.014; F_{\text{interaction}}=1.096, P=0.302$. BCVA: $F_{\text{group}}=4.287, P=0.046; F_{\text{time}}=6.944, P=0.012; F_{\text{interaction}}=0.567, P=0.456$. Compared with respective pre-training, ^a $P<0.05$ (Two-factor repeated measures ANOVA, LSD- t test) VR: virtual reality; NPC: near point of convergence; BCVA: best corrected visual acuity

3 讨论

视疲劳是长时间用眼造成的疲劳和不适感,在长时间使用电子设备(如计算机、智能手机等)的人群中更为常见,主要症状表现为眼睛干涩、胀痛及视物模糊等^[12]。目前,不断有新的技术和方法用于改善和防控视疲劳,如使用护眼滤光器、调整屏幕亮度和对比度、视疲劳管理应用程序、眼保健操和眼部按摩等^[1,13-14]。然而,人群个体的视疲劳感受和应对方法存在差异,因此个体化和新型解决方案的提出非常重要。

VR 设备凭借其在成像复杂度、双目追踪、模拟仿真以及人机交互等方面的技术优势在斜弱视训练、低视力患者辅助及近视防控等方面有着广泛的应用和发展潜能,其广泛运用能够有效推进眼科自动化诊疗的发展,大幅降低诊治与康复训练过程中的人力和时间成本^[11]。辐辏调节冲突是长期使用 VR 设备造成视疲劳的主要原因,由于辐辏调节冲突的存在,大脑必须被迫接受视线和焦点不在同一位置的信息,而长久接收存在辐辏调节冲突的视觉信息引起了视疲劳的发生。无论短时间和长时间使用 VR 设备对双眼调节和辐辏功能均有一定程度的影响,但长时间使用可能引起调节辐辏功能的障碍^[15]。通过测评,本研究发

用 VR 眼镜后 30 min,泪膜功能、调节辐辏功能等指标未受到明显影响,说明短时间使用 VR 眼镜并不会引起干眼、视疲劳等的发生,视力、眼压等基础视功能也未发生波动,因此本研究认为使用 VR 眼镜进行视疲劳范式的建立是安全的。眼部安全性测评可为进一步用于建立视疲劳训练范式提供理论支撑^[16]。

通过对第 1 阶段试验结果的解读可以发现,使用 VR 眼镜后 30 min 首次泪膜破裂时间下降。但使用更长时间的 VR 设备后是否会影响使用者泪膜稳定性,甚至引发干眼症状,目前研究观点尚不一致。VR 设备对使用者泪膜及眼表状态的影响是多方面且复杂的,既往一些研究表明,头戴式 VR 设备可能通过屏蔽外界较高速度气流^[17-18],以及改变眼表温度与改善泪膜的质和量,起到改善干眼症状的作用^[19];然而,也有研究表明 VR 设备的沉浸式体验特性导致瞬目频率下降,可能加重干眼症状^[19-20]。相关研究在相对湿度剖面曲线的分析中检测到了显著的设备效应,表明在 VR 眼镜内部相对湿度较低,这之前报道的加热加湿护目镜的研究结果形成对比,且表明 VR 眼镜内部水蒸发梯度更高,加重了泪膜的不稳定性^[21]。但也有一些研究展现了不同的结果。Marshev 等^[22]进行的类似试验表明,VR 头戴式设备使用者的泪膜脂质层厚

度在使用后显著高于传统电子屏幕使用者;Wolkoff 等^[19]通过对比受试者使用相同时长的普通计算机显示器与 VR 头戴设备之后各项干眼相关指标发现,VR 头戴式设备使用者的外眼睑、角膜温度上升,这可能与泪膜脂质层厚度和无创泪膜破裂时间的显著改善相关。干眼症状的发生和发展是多方面因素综合作用的结果。因此,更长的 VR 设备使用时间是否会引起干眼及其原因仍有待进一步研究。

VR 技术能够通过生成虚拟的三维场景使用户全方位获取该虚拟场景中的相关信息,近年来在视功能评估与重建研究领域显示了重要的应用前景。在视功能评估方面,本研究团队前期基于裸眼 VR 建立了安全、高效的视功能筛查系统,与传统检查进行了一致性、准确性及受欢迎程度的评估,结果显示基于裸眼 VR 的视功能筛查系统并不会产生明显的视疲劳,且与传统检查相比准确性高、可重新好、效率更高^[23-24]。在视功能重建方面,VR 技术在弱视训练、立体视重建、近视防控和低视力人群助视中均有广泛应用^[11]。本范式是在屏幕中模拟出延伸段的延伸内容,产生 0 m 至无穷远的画面深度,进而通过画面内容的变化来实现双眼视远视近的规律性运动,进行睫状肌的有效锻炼,提升睫状肌调节力。传统翻转拍是缓解视疲劳常用的训练工具之一,可以改善调节灵敏度(调节速度)和调节滞后^[25],但需要手动进行翻转,且只有 2 档调节级数,需要在专业眼科医师的指导下使用。贝茨训练器是一种用于改善视功能的光学调节方法,通过一系列眼球运动、放松和调整视觉习惯的方法来恢复或改善视功能,但调节距离一般为数十米,且只有数档^[26]。传统视光直线机通过机械方式调焦,调节距离在 1~2 m。本研究开发的 VR 智能调节力训练仪整合了 VR 成像算法、机械和光学方式调焦,在原理上具有智能、交互、灵活、调节档数多等优势。

依照形成原因分类,调节过度型视疲劳在视疲劳中占较大部分^[1,27]。在视疲劳相关临床研究中,甄毅等^[28]提出了台式 VR 显示器对数字视疲劳的预防作用,台式 VR 显示器将眼前 28 cm 处 6 英寸屏幕中的图像变成了 3 m 处 63 英寸的图像,结果发现应用台式虚拟显示器可以预防近距离观看视频引起的数字视疲劳。与手机相比,可降低调节负荷和调节滞后,使用过程中不会引起主观视疲劳评分的升高。但该研究仅测试了观看视频 5 min 前后视觉健康指标波动的情况,长时间观看视频对视觉健康指标的影响仍有待进一步证实。王静等^[6]发现,系统视觉训练可使多数视功能异常的成年视疲劳患者的视功能体征和症状改善,提

示成人视功能依然有较强的可塑性。

人眼可以根据不同距离的视觉需求,通过自动实时改变眼的屈光力,使不同距离的目标均能在视网膜上清晰成像,以达到明视的作用,称之为“调节”。调节功能在近距离工作中扮演着非常重要的角色^[29],调节功能异常易引发多种视觉症状,造成视疲劳。调节功能训练是一种处理调节功能异常的有效方法,通过一定方式的刺激和放松调节来完成视觉任务,从而达到提高人眼调节幅度、调节持久力和调节灵敏度的目的。本研究结果表明,在 VR 调节力训练仪训练 30 min 前后,调节反应、调节灵敏度和主观视疲劳评分均得到明显改善,说明基于 VR 的调节力训练仪能够通过特定的节律对睫状肌起到良好调节作用,并减轻眼部的疲劳感。具体的作用过程是通过软件和硬件结合,软件带动马达,伸缩镜筒和镜片之间的距离,计算镜片距离到虚像距,达到-1.5~+1.5 D 拉缩对睫状肌进行锻炼;同时 VR 自带的沉浸感可以更好地提高训练期间的专注度和依从性,达到更好的训练效果。

本研究结果显示,传统训练组与 VR 训练组调节功能指标和视疲劳评分指标组间比较差异无统计学意义,但传统训练组调节灵敏度提高幅度更大,VR 训练组视疲劳症状改善更为明显,其原因可能在于传统翻转拍是由患者自主操作,在训练中在正镜的情况下看清楚才会翻转为负镜,可能对调节力以及灵敏度的训练强度更大,而 VR 训练组训练范式则是按照一定的节律进行自行翻转,未来可考虑将观看范式改良为交互性范式,进一步提高 VR 训练范式对调节力的改善效果。但 VR 训练组较传统训练组更受患者欢迎且主观视疲劳的改善更明显,这是因为翻转拍训练时,翻转拍的度数从高到低,近用视力卡的视标需从大到小,操作难度系数更高,基于 VR 的调节力训练仪以特定节律、沉浸式、自动高效的方法对睫状肌进行训练,改善调节力,更为简单易用、可以随时随地进行训练,所以可能更受患者欢迎。

既往研究表明,近视儿童相较于正常儿童而言,调节灵敏度明显下降^[30]。而一项随访观察研究结果提示,调节灵敏度下降的非近视儿童在 1 年内有 58% 最终进展为近视^[31]。而已有的研究结果显示,相较于正常儿童,近视患儿具有更大的调节滞后量,这会导致视网膜远视离焦并最终使近视进展^[32]。而在近视防控领域,调节力训练对近视发生和发展的控制效果及其影响的具体机制一直存在争议。但 Vasudevan 等^[33]的临床研究表明,使用翻转拍进行调节灵敏度训练能治疗假性近视。因此在未来的试验规划中,可考虑从

缓解青少年假性近视、近视防控等方面入手,更加全面、严谨地评估基于 VR 的调节力训练仪对视疲劳、近视防控等的治疗作用。

传统方式手动翻转拍训练的临床效果已得到大量试验的证实,随着科技的进步,各种新型智能调节力训练设备不断问世。Guo 等^[34]使用 VR 设备对视疲劳患者进行调节力训练,结果显示 1 个月后受试者的调节幅度和调节灵敏度均得到提升,但这类新型设备的训练有效性还有待进一步探讨。智能穿戴设备在眼视光学领域的应用实践愈发广泛,基于头戴式 VR 设备的眼视光相关设备在智能化、信息化等方面较传统设备有明显优势^[34-35],未来有待更多的临床试验进一步证实其有效性。但该方法在人群中进行广泛推广前,还需注意 VR 技术相关的法律法规、医学伦理及行业标准规范性等潜在问题^[36]。

本研究仍存在一定局限性:本研究为单中心研究,且目前仅招募了成年志愿者进行测评。尽管多项测试结果比较差异无统计学意义,但数据依然存在改善趋势,且视疲劳评分明显下降。VR 训练范式的互动性及趣味程度更高,使得训练者依从性更好。传统的调节训练通常需要在眼科医师的专业指导下进行,而 VR 调节力训练仪可以通过网络进行监测和调整,并将训练过程及结果上传至数据平台,为训练者提供个性化的治疗方案。因此,其可能在提供更具趣味性和互动性的训练体验、个性化定制训练方案以及实现更复杂的视觉刺激等方面展现出独特的优势。鉴于本研究目前取得的结果,下一步本课题组将考虑开展多中心、大样本量临床研究以进一步探讨其临床效果。

综上所述,基于 VR 眼镜的调节力训练范式在调节过度型视疲劳人群中具有治疗效果,其可改善调节功能和主观症状,为其在临床上的应用提供了可靠的参考,为临床调节过度型视疲劳的治疗提供了新的选择。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

作者贡献 黄梓庭:试验设计、数据统计分析、文章撰写;钟菁:试验设计、研究指导;李姬静、刘昱:文章撰写、作图;马静:数据收集、数据整理;陈玮:数据收集和分析;罗一鸣:试验范式设计;袁进:试验设计、研究指导、论文审阅及定稿

参考文献

- [1] 中华医学会眼科学分会眼视光学组,中国医师协会眼科医师分会眼视光学组. 中国视疲劳诊疗专家共识(2024 年)[J]. 中华眼科杂志, 2024, 60(4): 322-329. DOI: 10. 3760/cma. j. cn112142-20231226-00309. Chinese Optometric Association of Chinese Ophthalmological Society, Optometry Group of Chinese Ophthalmologist Association. Chinese expert consensus on the diagnosis and treatment of asthenopia (2024)

- [J]. Chin J Ophthalmol, 2024, 60(4): 322-329. DOI: 10. 3760/cma. j. cn112142-20231226-00309.
- [2] Sheedy JE, Hayes JN, Engle J. Is all asthenopia the same? [J]. Optom Vis Sci, 2003, 80(11): 732-739. DOI: 10. 1097/00006324-200311000-00008.
- [3] Rosenfield M. Computer vision syndrome: a review of ocular causes and potential treatments [J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2011, 31(5): 502-515. DOI: 10. 1111/j. 1475-1313. 2011. 00834. x.
- [4] Daum KM, Clore KA, Simms SS, et al. Productivity associated with visual status of computer users [J]. Optometry, 2004, 75(1): 33-47. DOI: 10. 1016/s1529-1839(04)70009-3.
- [5] Fujita H, Sano K, Baba T, et al. Blind working time in visual display terminal users [J]. J Occup Health, 2019, 61(2): 175-181. DOI: 10. 1002/1348-9585. 12027.
- [6] 王静,江洋琳,芦文丽,等. 视觉训练对成年人视功能异常所致视疲劳的改善作用[J]. 中华实验眼科杂志, 2021, 39(6): 543-549. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20200511-00329. Wang J, Jiang YL, Lu WL, et al. Improvement of asthenopia caused by abnormal visual functions via visual training in adult patients [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2021, 39(6): 543-549. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20200511-00329.
- [7] 李丽华,南莉,江洋琳,等. 对视视觉训练对双眼视功能参数的影响[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2013, 15(3): 178-180. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1674-845X. 2013. 03. 012. Li LH, Nan L, Jiang YL, et al. A study of oculomotor parameters before and after vision therapy [J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2013, 15(3): 178-180. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1674-845X. 2013. 03. 012.
- [8] Sterner B, Abrahamsson M, Sjoström A. Accommodative facility training with a long term follow up in a sample of school aged children showing accommodative dysfunction [J]. Doc Ophthalmol, 1999, 99(1): 93-101. DOI: 10. 1023/a: 1002623107251.
- [9] 赵峰,任彦新. 虚拟现实及增强现实技术在眼视光学的研究进展[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2018, 20(7): 445-448. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1674-845X. 2018. 07. 011. Zhao F, Ren YX. Progress of virtual reality and augmented reality and its effect on the optometric field [J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2018, 20(7): 445-448. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1674-845X. 2018. 07. 011.
- [10] 刘旭辉,边靖芳,崔浩然,等. 虚拟现实/增强现实设备在眼科的应用及其对眼健康影响的研究进展[J]. 中华医学杂志, 2022, 102(2): 158-162. DOI: 10. 3760/cma. j. cn112137-20210723-01647.
- [11] 李姬静,袁进. 基于虚拟现实技术的视功能评估与重建[J]. 中华实验眼科杂志, 2022, 40(6): 576-581. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20210924-00534. Li JJ, Yuan J. Evaluation and reconstruction of visual function based on virtual reality technology [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2022, 40(6): 576-581. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20210924-00534.
- [12] 邓如芝,朱昱,张嘉璠,等. 中国普通群众视疲劳现状调查与影响因素[J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2019, 21(9): 668-676. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1674-845X. 2019. 09. 005. Deng RZ, Zhu Y, Zhang JF, et al. Investigation of asthenopia and related factors in the general public in China [J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2019, 21(9): 668-676. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 1674-845X. 2019. 09. 005.
- [13] 伏思奇,严永红. 滤蓝光片对 VDT 光环境作业者影响研究进展[J]. 照明工程学报, 2022, 33(4): 107-114. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-440X. 2022. 04. 015. Fu SQ, Yan YH. Research progress on the influence of BLFL on VDT light environment operators [J]. Chin Illumin Eng J, 2022, 33(4): 107-114. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-440X. 2022. 04. 015.
- [14] Wolffsohn JS, Lingham G, Downie LE, et al. TFOS lifestyle: impact of the digital environment on the ocular surface [J]. Ocul Surf, 2023, 28: 213-252. DOI: 10. 1016/j. jtos. 2023. 04. 004.
- [15] 中国医学装备协会眼科专业委员会眼科检验检测学组联合中国医学装备协会眼科专业委员会眼科创新诊疗技术及装备学组. 虚拟现实与增强现实设备基于视觉健康使用的专家共识(2022)[J]. 中华眼科医学杂志(电子版), 2022, 12(2): 125-128. DOI: 10. 3877/cma. j. issn. 2095-2007. 2022. 02. 012.



- Ophthalmic Assessment Group within the Ophthalmological Committee of China Association of Medical Equipment and Ophthalmic Innovative Diagnosis & Treatment Technology and Equipment Group of Ophthalmology Committee of China Association of Medical Equipment. Expert consensus for the application of virtual reality and augmented reality devices based on visual health (2022) [J]. Chin J Ophthalmol Med (Electronic Edition), 2022, 12(2): 125-128. DOI: 10.3877/cma.j.issn.2095-2007.2022.02.012.
- [16] 朱正元, 钟菁, 张哲, 等. 虚拟现实产品视觉健康影响评价方法标准解读 [J]. 电视技术, 2022, 46(5): 215-218. DOI: 10.16280/j.videoe.2022.05.054.
- Zhu ZY, Zhong J, Zhang Z, et al. Interpretation of visual health impact assessment method for virtual reality product [J]. Video Eng, 2022, 46(5): 215-218. DOI: 10.16280/j.videoe.2022.05.054.
- [17] Waduthantri S, Tan CH, Fong YW, et al. Specialized moisture retention eyewear for evaporative dry eye [J]. Curr Eye Res, 2015, 40(5): 490-495. DOI: 10.3109/02713683.2014.932389.
- [18] Gokul A, Wang M, Craig JP. Tear lipid supplement prophylaxis against dry eye in adverse environments [J]. Cont Lens Anterior Eye, 2018, 41(1): 97-100. DOI: 10.1016/j.clae.2017.09.013.
- [19] Wolkoff P, Nøjgaard JK, Troiano P, et al. Eye complaints in the office environment: precorneal tear film integrity influenced by eye blinking efficiency [J]. Occup Environ Med, 2005, 62(1): 4-12. DOI: 10.1136/oem.2004.016030.
- [20] Wang M, Chan E, Ea L, et al. Randomized trial of desktop humidifier for dry eye relief in computer users [J]. Optom Vis Sci, 2017, 94(11): 1052-1057. DOI: 10.1097/OPX.0000000000001136.
- [21] Ren Y, Chen J, Zheng Q, et al. Short-term effect of a developed warming moist chamber goggle for video display terminal-associated dry eye [J/OL]. BMC Ophthalmol, 2018, 18(1): 33 [2024-08-21]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29415667/>. DOI: 10.1186/s12886-018-0700-y.
- [22] Marshev V, Bolloch J, Pallamin N, et al. Impact of virtual reality headset use on eye blinking and lipid layer thickness [J]. J Fr Ophthalmol, 2021, 44(7): 1029-1037. DOI: 10.1016/j.jfo.2020.09.032.
- [23] Li X, Zhong J, Wang Y, et al. Rapid, accurate, multifunctional and self-assisted vision assessment and screening with interactive desktop autostereoscopy [J/OL]. Ann Transl Med, 2021, 9(1): 23 [2024-08-20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33553316/>. DOI: 10.21037/atm-20-3555.
- [24] Wang Y, Zhong J, Cheng M, et al. A novel clinical dynamic stereopsis assessment based on autostereoscopic display system [J/OL]. Ann Transl Med, 2022, 10(12): 656 [2024-08-20]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35845544/>. DOI: 10.21037/atm-21-6700.
- [25] 钱一峰, 戴锦晖, 褚仁远. 调节与辐辏因素导致视疲劳的诊断和治疗 [J]. 中华眼视光学与视觉科学杂志, 2012, 14(6): 381-384. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2012.06.016.
- Qian YF, Dai JH, Chu RY. Diagnosis and treatment of accommodative insufficiency and convergence insufficiency in asthenopia [J]. Chin J Optom Ophthalmol Vis Sci, 2012, 14(6): 381-384. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-845X.2012.06.016.
- [26] Elliott DB. The Bates method, elixirs, potions, and other cures for myopia: how do they work? [J]. Ophthalmic Physiol Opt, 2013, 33(2): 75-77. DOI: 10.1111/opo.12034.
- [27] 熊玲, 宋雨桐, 杨必. 视疲劳患者双眼视和调节功能分析 [J]. 中国实用眼科杂志, 2018, 36(6): 460-462. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-4443.2018.06.013.
- Xiong L, Song YT, Yang B. Analysis of binocular visual function and accommodative function in patients with asthenopia [J]. Chin J Pract Ophthalmol, 2018, 36(6): 460-462. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1006-4443.2018.06.013.
- [28] 甄毅, 高杰, 张伟, 等. 台式虚拟现实显示器对数字眼疲劳预防作用的初步研究 [J]. 眼科, 2022, 31(3): 225-230. DOI: 10.13281/j.cnki.issn.1004-4469.2022.03.011.
- Zhen Y, Gao J, Zhang W, et al. Prevention efficacy of desktop virtual reality display on digital eye strain [J]. Ophthalmol CHN, 2022, 31(3): 225-230. DOI: 10.13281/j.cnki.issn.1004-4469.2022.03.011.
- [29] 徐丹, 陈曦, 阎静, 等. 近视者持续近距离工作时的调节反应波动 [J]. 中华眼科杂志, 2009, 45(1): 50-55. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2009.01.011.
- Xu D, Chen X, Yan J, et al. Accommodation response fluctuation in myopia during sustained near work [J]. Chin J Ophthalmol, 2009, 45(1): 50-55. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2009.01.011.
- [30] Pandian A, Sankaridurg PR, Naduvilath T, et al. Accommodative facility in eyes with and without myopia [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2006, 47(11): 4725-4731. DOI: 10.1167/iovs.05-1078.
- [31] Allen PM, O'Leary DJ. Accommodation functions; co-dependency and relationship to refractive error [J]. Vision Res, 2006, 46(4): 491-505. DOI: 10.1016/j.visres.2005.05.007.
- [32] Gwiazda J, Thorn F, Bauer J, et al. Myopic children show insufficient accommodative response to blur [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 1993, 34(3): 690-694.
- [33] Vasudevan B, Ciuffreda KJ, Ludlam DP. Accommodative training to reduce nearwork-induced transient myopia [J]. Optom Vis Sci, 2009, 86(11): 1287-1294. DOI: 10.1097/OPX.0b013e3181bb44cf.
- [34] Guo DY, Shen YY, Zhu MM, et al. Virtual reality training improves accommodative facility and accommodative range [J]. Int J Ophthalmol, 2022, 15(7): 1116-1121. DOI: 10.18240/ijo.2022.07.11.
- [35] Xiao S, Angjeli E, Wu HC, et al. Randomized controlled trial of a dichoptic digital therapeutic for amblyopia [J]. Ophthalmology, 2022, 129(1): 77-85. DOI: 10.1016/j.ophtha.2021.09.001.
- [36] 黄梓庭, 袁进. 虚拟现实技术与视觉健康 [J]. 中华实验眼科杂志, 2024, 12(12): 1155-1162. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20230425-00148.
- Huang ZT, Yuan J. Virtual reality technology and visual health [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2024, 12(12): 1155-1162. DOI: 10.3760/cma.j.cn115989-20230425-00148.

(收稿日期:2024-11-04 修回日期:2024-12-27)

(本文编辑:刘艳 施晓萌)

读者·作者·编者

本刊对基金项目的证明和著录要求

文稿所涉及的课题如为国家级、部级、省级等基金资助项目,请分别用中英文表述并分别列于文章中中英文摘要关键词之下,“基金项目:”进行标识,并注明基金项目名称,并在圆括号内注明项目编号。基金项目名称应按国家有关部门规定的正式名称填写,多个基金资助的项目请全部列出,按资助机构的等级顺序排列,并以“;”隔开。如:基金项目:国家自然科学基金(30271269);国家重点基础研究发展规划(973计划)(2013CB532002);Fund program:National Natural Science Foundation of China(30271269);National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB532002)。获得基金项目资助的论文投稿时请提供基金项目资助证明的复印件或扫描后发至编辑部信箱。

(本刊编辑部)