

doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2021.06.09

View this article at: <http://dx.doi.org/10.3978/j.issn.1000-4432.2021.06.09>

· 综述 ·

# 青光眼视觉功能损害导致运动行为异常的研究与康复治疗手段展望进展

刘莹<sup>1,2</sup>, 刘晶劼<sup>2</sup> 综述 王大江<sup>2</sup> 审校

(1. 首都医科大学附属北京康复医院眼科, 北京 100144; 2. 中国人民解放军总医院眼科医学部, 北京 100853)

**[摘要]** 青光眼是全世界范围内不容忽视的致盲性眼病, 其起病隐匿, 视功能损害进展迅速, 晚期预后不理想。长期发展且未行治疗的青光眼患者视神经呈进行性损害, 引起视力急剧下降、视野不可逆性缺损, 严重降低患者的生活质量。为了适应逐渐恶化的视功能, 患者注视行为发生明显变化, 由此在日常活动中引起步态行为随之改变, 意外事故频繁发生。故目前对于青光眼的研究引起国内外广泛重视, 虚拟现实技术(virtual reality, VR)作为青光眼早期诊断及康复治疗的新手段已被现代医学所尝试。本文具体阐述了青光眼的视觉损害与注视行为及运动行为间的联系, 并总结了目前国内外关于VR诊断青光眼及作为康复治疗的相关研究。

**[关键词]** 青光眼; 注视行为; 步态行为; 虚拟现实技术

## Research on abnormal movement behavior caused by damage to visual function of glaucoma and prospect of rehabilitation treatment

LIU Ying<sup>1,2</sup>, LIU Jingjie<sup>2</sup>, WANG Dajiang<sup>2</sup>

(1. Department of Ophthalmology, Beijing Rehabilitation Hospital, Capital Medical University, Beijing 100144; 2. Department of Ophthalmology, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

**Abstract** Glaucoma is a blinding eye disease that cannot be ignored worldwide. Its onset is insidious, visual impairment is progressing rapidly, and the late prognosis is not ideal. Long-term untreated glaucoma patients show progressive damage to the optic nerve, causing a sharp decline in vision, irreversible visual field defects, and severely reducing the quality of life of the patients. In order to adapt to the gradual deterioration of visual function, the patient's gaze behavior changes significantly, which causes the gait behavior to change in daily activities, and accidents occur frequently. Therefore, the current research on glaucoma has attracted wide attention in the nation and abroad,

收稿日期 (Date of reception): 2020-09-14

通信作者 (Corresponding author): 王大江, Email: glaucomawang@163.com

基金项目 (Foundation item): 北京市自然科学基金 (7162180, 7212092)。This work was supported by the Beijing Natural Science Foundation (7162180, 7212092), China.

and virtual reality (VR) technology has been tried in modern medicine as a new method for early diagnosis and rehabilitation of glaucoma. This article specifically elaborates the relationship between the visual impairment of glaucoma and the gaze behavior and movement behavior, and summarizes the current domestic and foreign research on the diagnosis of glaucoma and the rehabilitation of VR technology.

**Keywords** glaucoma, gaze behavior, gait behavior, virtual reality

青光眼是一组以视神经进行性损害为特征的、不可逆致盲性眼病。临床表现为：视网膜神经节细胞凋亡，进行性视神经损伤和特征性视野缺损。青光眼已成为全球第二位的致盲眼病。青光眼在整个疾病发展过程中可持续地对患者的视觉功能和运动产生影响。因视野、视力严重受损，引起注视行为变化，患者出现与跌倒风险相关较高的步态特征，如步幅、步速和步态变异性。本文旨在对青光眼患者因视野损害导致视觉及其运动功能异常进行详细阐述。

## 1 青光眼对患者视觉功能、运动能力及生活质量的影响

据研究<sup>[1]</sup>预测2020年世界青光眼患者将达到7960万人，其中1120万人最终可能致盲，至2040年全球将有1.118亿人受到青光眼的影响。中国原发性青光眼的患病率约为0.21%~1.75%，40岁以上人群原发性青光眼患病率为1.4%，预计2020年我国将有青光眼患者2100万，将会产生近630万盲人及超过1000万的视觉残障人士，这将给患者家庭及社会造成沉重的负担<sup>[2]</sup>。

因青光眼起病隐匿，青光眼患病人群中仅有10%~50%的病情知晓率。青光眼发病进展缓慢，即便患者从轻度视野损伤发展到中度视野损伤，仍不表现症状<sup>[3]</sup>，患者很难注意到眼睛周围视野的损伤，而且视力正常的眼睛可形成视觉补偿<sup>[4]</sup>。当青光眼患者就医时往往为时已晚，即便发现尚早，但也无法彻底逆转或阻止青光眼的病情恶化。

随着青光眼病情进展，患者生活质量会深受其影响，当轻度视野损伤发展到中度视野损伤，可导致周围视觉丧失逐渐加重，Medeiros等<sup>[5]</sup>通过对161位青光眼患者标准自动视野计平均敏感度及视功能相关生命质量量表<sup>[6]</sup>的共同测评及分析，证实患者不同程度的视野损失会影响其日常活动，

如行走、上下楼梯、驾驶车辆、寻找物品、阅读等等，并因此导致生活质量下降。青光眼病情不断进展的患者，视觉行为也会发生改变，主要表现为患者注视行为和行走运动步态发生改变。患者因视觉障碍导致脚步位置不精确，因频繁观看障碍物、地面以及脚步位置，导致日常生活中行动迟缓、磕绊、碰撞障碍物<sup>[6]</sup>或跌倒<sup>[7]</sup>，甚至发生严重的伤害事故<sup>[8]</sup>。

青光眼引起的周围性视力下降对患者的生活还有多方面的影响，包括行走、驾驶、阅读和其他日常生活方面的困难<sup>[5]</sup>。患者行动障碍产生诸多问题，如购物以及过马路时遇到的困难、撞上障碍物等，使得摔倒风险增加<sup>[9]</sup>。另外因视觉困难导致患者对不同强度光线的适应能力减弱<sup>[10]</sup>，并出现夜视障碍<sup>[11]</sup>，难以判断距离和注视物体的方向<sup>[12]</sup>以及注视行为的变化<sup>[13]</sup>等结果。目前青光眼主要依靠药物、激光和手术治疗，而大多数药物有很多难以规避的不良反应，如毛果芸香碱会引起调节痉挛和出汗、恶心、腹泻、心动过缓和记忆力障碍等全身并发症，降眼压药物的不良反应和使用效果可能导致患者治疗满意度下降，增加了患者心理负担，使患者更易出现抑郁和焦虑。综上所述，青光眼疾病显著降低了患者的生活质量<sup>[14]</sup>。

## 2 青光眼视觉行为变化与步态行为变化

### 2.1 青光眼视觉行为变化

#### 2.1.1 眼球扫视的神经生理基础

中枢神经系统最重要的功能之一是对感觉刺激产生反应。眼球扫视运动实质上是一种感觉-运动转换的形式，其为了解运动控制和感觉运动加工提供了重要的研究模型。若能将调控产生眼球扫视的神经回路清楚识别，则可以将中枢神经系统(后面有补充具体区域)的激活与人体行为及功能障碍联系起来。记录眼球运动已被证明是研究大脑功能及其功能障碍的一个具有价值的研究工

具。神经生理研究表明,从视觉目标出现到眼球扫视启动的时间可被模拟视为一个累加器功能模型。在眼球扫视功能中,与扫视相关的活动的视觉刺激和与扫视相关的活动的增加率,都有助于达到眼球运动启动的兴奋阈值。

中央凹位于视野的中心,是视网膜中视觉最敏锐的区域<sup>[15]</sup>。人类大脑的大部分视觉区域中,以中央凹最为重要,它在视觉处理和视觉引导行为许多方面具有重要意义<sup>[16]</sup>。为了最大限度地提高中央凹视觉的效率,人体可快速地将中央凹对准视觉世界中的物体,然后在足够长的时间内保持中央凹对准这些物体,以便视觉系统对图像进行详细分析。在随后的图像分析中,扫视运动用于将中心凹从一个兴趣点转向另一个兴趣点,并使用固定机制使中心凹对准目标。这种扫视-注视眼球运动的交替行为每天重复数十万次,对于行走、阅读或驾驶汽车等复杂行为至关重要。

扫视可以由周围视觉刺激的出现而触发(例如一个新视觉刺激物的突然出现或运动),也可以在没有任何明显感官刺激的情况下,由自己的视觉目标所激发,自动触发扫视。同时扫视也可以在视觉注视时被抑制。

根据人类行为学、影像学、临床研究以及动物行为学、生理学、解剖学和药理学研究的结果,对控制眼睛扫视神经回路的理解有显著的提高。眼睛注视和扫视信号分布在大脑区域网络中,从顶叶和额叶皮质,到基底神经节和丘脑,再到上丘、小脑和脑干网状结构<sup>[17-20]</sup>。这些相互竞争的信号可能在神经轴的多个层次上相互作用。因此,很可能特定的功能并不局限于大脑的一个区域,它们可能分布在多个区域。当眼睛扫视神经元的活动积累到阈值,即触发眼动。由于大脑区域覆盖了大部分中枢神经系统,如果神经系统的成熟、神经退化或功能障碍可能会影响受试者保持视觉注视以及产生快速而准确的扫视能力。因此,许多疾病伴随有眼球运动和眼球注视障碍,通过检测眼球扫视活动可以用来确定受影响的大脑区域或者通过眼球运动的检测来探测大脑功能和功能障碍。

### 2.1.2 青光眼周围视觉丧失后视觉行为策略变化

当人行走时,通过视觉探索获得环境中的目标信息,有助于人做出反应并提前规划其运动行为。事实上,人观察环境中的物体或区域的时间

长度和观察次数,为其提供了与信息处理(反映视觉处理需求)和后续任务执行相关的指示<sup>[21]</sup>。

许多视觉因素,包括总视野、对比敏感度、视敏度和运动敏感度,对人体运动都很重要。然而大多数研究<sup>[8,22-25]</sup>发现,某些视野测量与完成一个移动过程所花费的时间、所犯的误差<sup>[8,22]</sup>、与障碍物的碰撞和绊倒的高度相关<sup>[8,23]</sup>。特别是左侧和中、下边缘视野区域有损伤的个体,其活动受限最明显<sup>[22]</sup>,跌倒风险最高<sup>[24]</sup>。虽然视野失去中心 $20^\circ$ 会导致大部分患者的行走碰撞和行走困难,但视野中心和视野度数较低的周边区域对行走速度关系更为重要<sup>[25]</sup>。

视力正常的人在行走步态中通常会提前几步进行观察<sup>[26]</sup>,包括提前观察环境中较远的区域<sup>[27-28]</sup>。这种视觉搜索行为为处理获得的视觉信息提供了足够地执行运动的响应时间,以避免所有潜在危险<sup>[29]</sup>。

迄今为止,对于周围视野缺损的个体在完成日常活动任务时的视觉搜索行为的研究相对较少。有研究<sup>[28]</sup>表明:当沿着预定路线行走并通过头戴式显示器接收环境的虚拟视图时,患有视网膜色素变性(retinitis pigmentosa, RP)的人主要是向下看,而视力正常的人则是向前看。另一方面,Geruschat等<sup>[30]</sup>报道了青光眼患者和视力正常的人在步行和过马路时的视觉搜索行为没有差异。不同研究结果的差异可以用不同视障人群中视野缺损的严重程度来解释,具有更加狭窄的视野可能会剥夺从周围获取视觉信息以指导运动的能力。

视野缺损的人可采用不同的视觉-运动策略实现中央和周边视觉充分、完整的结合。在复杂不规则地形中,周围视野缺损的人无法通过正常的视觉来调节个人行走步态,因此为满足获取充足的视觉信息的目的,其需要改变视觉搜索行为。若地面存在危险时,需要进行步态调整,在调整之前需要查看危险<sup>[31]</sup>。当跨越危险区时,从周围视野的下半部获取的视觉信息足以调节肢体的运动轨迹,保证安全通过<sup>[32-33]</sup>。

不同的视觉障碍患者可采用不同的视觉行为进行视觉搜索。模式一:可能增加注视某个特定区域的时间长度,但不增加扫视这个区域的频率(即增加注视时间);模式二:在短时间内多次扫视相同的区域,但是多次扫视将导致与前模式相同的总时间长度,这属于不同的视觉搜索行为。区分这两种

不同的视觉搜索行为很有必要, 因为注视次数的增加与注视行为效率的降低具有相关性<sup>[34]</sup>, 对RP患者在平地行走中时观察环境特征的时间长度已有研究<sup>[28]</sup>。

目前为止, 青光眼患者的视觉行为变化相关研究只有少量报道。Lamirel等<sup>[35]</sup>记录了8例原发性开角型青光眼(primary open-angle glaucoma, POAG)患者和4例健康老年对照者的眼球运动情况。与对照组相比, POAG患者对静态和动态目标的扫视均延迟, 并且随着疾病向晚期逐步发展, 扫视的幅度与精确度也大大降低。Smith等<sup>[36]</sup>则是比较了40名具有视野缺损的青光眼患者与视力正常人, 通过使用眼动仪记录下他们搜索一系列目标物体时的眼球运动, 记录试验的平均每秒扫视次数, 平均扫视幅度和平均搜索持续时间。结果表明青光眼患者每秒平均扫视次数(平均扫视率)明显少于年龄相近的正常人, 视野缺损严重者在任务执行过程中眼球运动幅度减少, 所用平均搜索时间增加, 且与平均扫视率呈正相关。Tatham<sup>[37]</sup>在此基础上进行了检测方法的改良, 他调查了31例青光眼患者和23例正常人, 使用标准自动视野检查和眼动跟踪视野检查测量受试者视觉敏感度、扫视延迟和扫视精度(包括方向偏差和幅度偏差), 以验证眼球运动参数与青光眼严重程度之间的关系。其结果同样证明青光眼患者的扫视速度显著变慢, 扫视精度降低, 并且随视野缺损的严重而加重。而注视方面, Lajoie等<sup>[38]</sup>观察了20名青光眼患者和20名正常视力对照者, 让他们在一系列不规则摆放的障碍物周围行走, 同时记录他们的注视模式和障碍物接触的数量。从测量结果可以看出, 青光眼受试者在越过障碍物时注视点更接近其所在位置。这表明他们优先考虑近处, 难以规划通往目标的路线。行走过程中, 他们更早期将注视点固定于障碍物, 且较常人持续时间更长, 注视次数更多。以上研究结果均说明, 青光眼会造成患者的眼球运动模式发生变化, 且与视野改变密切相关。但目前研究尚不全面, 未来在分析青光眼患者视觉行为策略时, 应同时考虑其对环境中特定区域的注视时间长度和搜索次数。

## 2.2 青光眼步态行为变化与跌倒风险关联

### 2.2.1 青光眼步态行为变化

当人在环境中行走时能够调整视线的方向

直视物体, 这有助于从视网膜的中央凹获得视觉信息, 从而获得最高水平的视觉敏锐度。进而利用视觉搜索的环境信息来规划做出合适的运动反应, 例如躲避障碍物和步态调整等<sup>[39]</sup>。

对于视障人员的行走步态研究的也有少量报道, 如在笔直通畅的道路的行走速度比视力正常的人慢<sup>[40]</sup>。Klein等<sup>[41]</sup>报道了利用在3米步行路线测试, 大部分轻度或中度视力障碍的人, 视觉测评和步行速度变化之间并无联系。Mihailovic等<sup>[42]</sup>是首次利用步态的空间和时间特征对青光眼患者进行视野损伤严重程度影响的研究, 其发现青光眼患者视野的敏感度和正常行走的步态速度没有相关性, 但在进行托盘任务行走测试时, 青光眼患者的步伐速度却显著降低。另外青光眼的病情越严重, 患者仍会继续以同样的速度行走, 但降低了步态规律性的控制能力<sup>[43]</sup>。

对于青光眼患者, 根据视野敏感性判断, 与跌倒风险相关较高的步态特征(如步幅评估-步幅变异性等)与青光眼严重程度呈正相关<sup>[43]</sup>。有研究<sup>[6]</sup>表明, 青光眼患者在挑战行走通过障碍物训练时, 步态速度下降。

### 2.2.2 青光眼步态行为变化与跌倒风险

因步态具有维持人体平衡的功能, 所以步态成为跌倒的预报信号。对老年人进行的步态研究发现, 老年人在步幅时间、步幅长度、步幅速度和支撑时间方面的较大变异性, 这些参数与老人跌倒风险具有显著相关性<sup>[42]</sup>。

此外, 注意力也会对步态有所影响。研究<sup>[42]</sup>发现在比较复杂的行走条件下, 如障碍躲避或双任务测试情况下, 视野缺损也与速度和步长中较大的跨步变异性有关。这些发现表明青光眼的行走更不规律, 故推测视野缺损的患者可能在保持正常步态方面付出了更大的认知努力。当进行双任务测试时, 认知能力需要重新分配到第二项任务时, 青光眼患者表现出无法保持他们正常步态。事实上, 在注意力不集中的情况下, 视野损伤严重程度也与左右漂移有关, 这表明除了保持恒定的速度和步幅, 较严重的青光眼患者在走路时也很难保持直线。在注意力分散的情况下, 可能会引起步态的改变, 因为维持人体正确和规律的步态需要更多的认知努力投入<sup>[44]</sup>。许多步态变化只与双任务条件下的综合视野敏感性有关, 这表明视野丧失的个体在步态方面动用了更多的

认知能力与视觉努力。

在增加老年人支撑力的训练研究中发现, 支撑力增加可以改善老人动态稳定性。这表明支撑力可以作为高跌倒风险的标志, 增强支撑仍是降低跌倒风险的有效方法<sup>[45]</sup>。此外, 老年人在经历步态扰动时, 会把他们的重心转移到离身体支撑点更近的地方, 这表明老人在受到扰动时更难以“保持重心”, 将面临更大的跌倒风险<sup>[46]</sup>。

对于青光眼患者步态的研究, 未来需要更多工作来确定与跌倒相关步态特征和参数, 对于患有更严重神经退行性疾病人群的跌倒风险相关的步态行为也需要关注。另外, 对于周边视野缺损者的视觉搜索行为会随着地形复杂程度的变化而发生改变, 从而增加跌倒风险之间联系也需要深入研究。

### 3 虚拟现实与青光眼医疗康复创新性展望

目前, 降低眼内压是治疗青光眼的唯一有效方法。主要包括降眼压药物和手术治疗, 但二者均有局限性<sup>[47]</sup>。此外, 在一些青光眼患者中, 即使降低了眼压, 视野丧失仍持续进展。眼压的波动和神经退行性病变等非眼压因素可能会促进病情发展<sup>[48]</sup>。故目前我们迫切寻找一种新的无创的康复治疗方法, 用来维持甚至挽救青光眼患者的视力, 提高其生活质量。

#### 3.1 虚拟现实技术在青光眼研究中的运用

虚拟现实技术(virtual reality, VR)是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统, 它利用计算机生成一种模拟环境, 使用户沉浸到该环境中。VR技术具有人所具有的感知功能。特别是传感技术的应用, 使VR技术所具有的感知功能赋予视觉、听觉、触觉、运动等多种感知性能。

德国学者Sabel等<sup>[49]</sup>开发了一种基于计算机的培训方法, 称为视觉康复治疗(visual restoration therapy, VRT), 目前已在德国应用, 并逐步进入到其他欧洲国家和美国推广使用。VRT的理论基础是“残留视觉激活理论”, 其认为视觉训练可能诱发神经网络可塑性, 从而改善大脑皮层和皮层下2个半球的神经元活性, 相关视觉功能的改善与训练年龄、病变的病因和病变部位无关<sup>[50]</sup>。眼部神经系统具有很强的可塑性, 在动物视神经损伤

模型中, 只要有10%~30%的视网膜神经节细胞存活, 2~3周内可通过自身修复能力恢复80%的视功能<sup>[51]</sup>。青光眼的视力损害过程是从视网膜神经节细胞凋亡、视神经损害发展到外侧膝状体、视辐射和大脑皮层的神经损伤。故而视觉传导通路中神经元的自我重塑和再生的能力是决定视觉可塑性的基础<sup>[52]</sup>。视力残留区主要位于视野缺损的边缘, 具有可塑性, 是治疗干预的靶区。VRT通过检测发现患者的视力残留区, 并给予大量重复的视觉刺激训练, 使患者对感知到的刺激做出反应, 提高大脑神经系统的信号处理能力, 以达到治疗的目的。该方法用于青光眼患者1个月后发现视野平均缺损值明显低于训练前, 3个月后平均缺损值继续下降。这说明青光眼患者通过训练可以在一定程度上改善弥漫性视野缺损, 同时视野平均敏感度在训练后也有明显增加, 可以推测出脑视觉训练同样可以提高视网膜的光敏感度<sup>[49]</sup>。

VR技术已应用在医学的多个领域。在眼科学领域, 大多VR的研究还处于早期阶段, 尚未经过严格的临床测试, 但对VR的设计和医学实验结合的验证过程正在快速推进。VR技术在青光眼研究主要应用领域: 1)对青光眼进行客观评估: 使用定向光刺激, 来恢复的视网膜神经节细胞功能, 改善患者视力功能。2)检测视野缺失: 杜克大学视觉性能实验室正在研发——nGoggle诊断系统, 其研发目标是创造一个可穿戴的虚拟现实系统, 可以检测和量化视野失的自动化视野测量系统, 克服目前视野检测主观性强和评估标准不精确的弊端<sup>[53]</sup>。3)评估生活质量: 使用多种VR技术, 可以更好地了解眼病导致的视力丧失如何影响患者的日常生活<sup>[54]</sup>。4)分析跌倒的风险和心理恐惧: 通过VR设备, 模拟虚拟隧道中行走时人体姿势反应的变化, 分析人在现实生活中摔倒的风险概率。此外, 还可以在VR环境中研究患者对视觉刺激的姿势反应与跌倒的心理恐惧关系<sup>[55]</sup>。

视野检测已成为VR技术最成功的应用, VR可以模拟更复杂的基于视觉现实的任务, 实现更好地评估疾病对患者生活的影响, 有助于确定预防残疾的管理性战略, 从而开发更多新的辅助技术来帮助患者。由于参与者的风险系数最小, 能最大速度推进基础研究进入临床测试, 未来VR的应用前景将会更加广阔。

### 3.2 VR 在青光眼医学领域最新研究成果

2020年3月, *JAMA Ophthalmology*和*Cyberpsychology, Behavior, and Social Networking*分别发表利用VR技术对青光眼患者进行视觉训练的研究成果。研究者利用VR技术进行患者预防跌倒训练<sup>[56]</sup>和青光眼视觉可塑性康复的前瞻应用性研究<sup>[57]</sup>。研究发现通过对于日常活动的虚拟现实模拟可以提供一种更为直观的方法, 帮助临床医生进行可视化分析, 评估残疾患者在现实世界的视觉障碍, 从而进行更科学地康复指导。通过虚拟现实训练后, 患者的视野损害的周边区域得到明显的改善, 研究结果进一步证实了“残余视觉激活理论”<sup>[58]</sup>。但研究者尚不清楚青光眼患者在不同时期从视网膜到视觉皮层的大脑视觉神经网络系统的损害, 亟待后续研究。上述最新的研究成果都表明, VR模拟可以进行青光眼患者的临床医疗和康复的视觉残疾的评估, 为临床医生了解青光眼患者视力障碍及与视觉相关的运动障碍提供了一个新的分析视角。

总之, 青光眼的视野缺损导致患者的视觉行为以及步态行为异常, 增加患者跌倒的风险, 其严重影响了患者的生活质量。视觉行为异常是由于眼球运动模式发生了改变, 与视野改变密切相关。VRT理论在青光眼患者视觉康复方面应该得到更多的关注。

### 参考文献

1. Quigley HA, Broman AT. The number of people with glaucoma worldwide in 2010 and 2020[J]. *Br J Ophthalmol*, 2006, 90(3): 262-267.
2. Cheng JW, Cheng SW, Ma XY, et al. The prevalence of primary glaucoma in mainland China: a systematic review and meta-analysis[J]. *J Glaucoma*, 2013, 22(4): 301-306.
3. Nelson P, Aspinall P, O'Brien C. Patients' perception of visual impairment in glaucoma: a pilot study[J]. *Br J Ophthalmol*, 1999, 83(5): 546-552.
4. De Moraes CG, Liebmann JM, Levin LA. Detection and measurement of clinically meaningful visual field progression in clinical trials for glaucoma[J]. *Prog Retin Eye Res*, 2017, 56: 107-147.
5. Medeiros FA, Gracitelli CPB, Boer ER, et al. Longitudinal changes in quality of life and rates of progressive visual field loss in glaucoma patients[J]. *Ophthalmology*, 2015, 122(2): 293-301.
6. Friedman DS, Freeman E, Munoz B, et al. Glaucoma and mobility performance. The salisbury eye evaluation project[J]. *Ophthalmology*, 2007, 114(12): 2232-2237.
7. Yuki K, Asaoka R, Tsubota K. Investigating the influence of visual function and systemic risk factors on falls and injurious falls in glaucoma using the structural equation modeling[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): e0129316.
8. Turano KA, Rubin GS, Quigley HA. Mobility performance in glaucoma[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 1999, 40(12): 2803-2809.
9. Haymes SA, Leblanc RP, Nicoleta MT, et al. Risk of falls and motor vehicle collisions in glaucoma[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2007, 48(3): 1149-1155.
10. Janz NK, Wren PA, Lichter PR, et al. The collaborative initial glaucoma treatment study[J]. *Ophthalmology*, 2001, 108(11): 1954-1965.
11. Turano KA, Massof RW, Quigley HA, et al. A self-assessment instrument designed for measuring independent mobility in RP patients: generalizability to glaucoma patients[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2002, 43(9): 2874-2881.
12. Nelson P, Aspinall P, Pappasouliotis O, et al. Quality of life in glaucoma and its relationship with visual function[J]. *J Glaucoma*, 2003, 12(2): 139.
13. Miller AB, Lajoie K, Strath RA, et al. Coordination of gaze behavior and foot placement during walking in persons with glaucoma[J]. *J Glaucoma*, 2018, 27(1): 55-63.
14. Quaranta L, Riva I, Gerardi C, et al. Quality of life in glaucoma: a review of the literature[J]. *Adv Ther*, 2016, 33(6): 959-981.
15. Perry VH, Cowey A. The ganglion cell and cone distributions in the monkey's retina: implications for central magnification factors[J]. *Vision Res*, 1985, 25(12): 1795-1810.
16. Van Essen DC, Newsome WT, Maunsell JH. The visual field representation in striate cortex of the macaque monkey: asymmetries, anisotropies, and individual variability[J]. *Vision Res*, 1984, 24(5): 429-448.
17. Hikosaka O, Takikawa Y, Kawagoe R. Role of the basal ganglia in the control of purposive saccadic eye movements[J]. *Physiol Rev*, 2000, 80(3): 953-978.
18. Munoz DP, Everling S. Look away: the anti-saccade task and the voluntary control of eye movement[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2004, 5(3): 218-228.
19. Sparks, David L. The brainstem control of saccadic eye movements[J]. *Nat Rev Neurosci*, 2002, 3(12): 952-964.
20. Scudder CA, Kaneko CS, Fuchs AF. The brainstem burst generator for

- saccadic eye movements: a modern synthesis[J]. *Exp Brain Res*, 2002, 142(4): 439-462.
21. Mann DTY, Williams AM, Ward P. Perceptual-cognitive expertise in sport: a meta-analysis[J]. *J Sport Exerc Psychol*, 2007, 29(4): 457.
  22. Lovie-Kitchin JE, Mainstone JC, Robinson J. What areas of the visual field are important for mobility in low vision patients[J]. *Clin Vis Sci*, 1990, 8(3): 57-69.
  23. Mills RP, Drance SM. Esterman disability rating in severe glaucoma[J]. *Ophthalmology*, 1986, 93(3): 371-378.
  24. Black AA, Wood JM, Lovie-Kitchin JE. Inferior field loss increases rate of falls in older adults with glaucoma[J]. *Optom Vis Sci*, 2011, 88(11): 1275-1282.
  25. Murata H, Hirasawa H, Aoyama Y, et al. Identifying areas of the visual field important for quality of life in patients with glaucoma[J]. *PLoS One*, 2013, 8(3): e58695.
  26. Patla AE, Vickers JN. How far ahead do we look when required to step on specific locations in the travel path during locomotion?[J]. *Exp Brain Res*, 2003, 148(1): 133-138.
  27. Land M, Horwood J. Which parts of the road guide steering?[J]. *Nature*, 1995, 377(6547): 339-340.
  28. Turano KA. Direction of gaze while walking a simple route: persons with normal vision and persons with retinitis pigmentosa[J]. *Optom Vis Sci*, 2001, 78(9): 667.
  29. Patla AE. Understanding the roles of vision in the control of human locomotion[J]. *Gait Posture*, 1997, 5(1): 54-69.
  30. Geruschat DR, Hassan SE, Turano KA, et al. Gaze behavior of the visually impaired during street crossing[J]. *Optom Vis Sci*, 2006, 83(8): 550-558.
  31. Patla AE, Vickers JN. Where and when do we look as we approach and step over an obstacle in the travel path?[J]. *Neuroreport*, 1997, 8(17): 3661-3665.
  32. Marigold DS, Patla AE. Gaze fixation patterns for negotiating complex ground terrain[J]. *Neuroscience*, 2007, 144(1): 302-313.
  33. Timmis MA, Buckley JG. Obstacle crossing during locomotion: Visual exproprioceptive information is used in an online mode to update foot placement before the obstacle but not swing trajectory over it[J]. *Gait Posture*, 2012, 36(1): 160-162.
  34. Janelle CM. Anxiety, arousal and visual attention: a mechanistic account of performance variability[J]. *J Sports Sci*, 2002, 20(3): 237-251.
  35. Lamirel C, Milea D, Cochereau I. Impaired saccadic eye movement in primary open-angle glaucoma[J]. *J Glaucoma*, 2014, 23(1): 23-32.
  36. Smith ND, Glen FC, Crabb DP. Eye movements during visual search in patients with glaucoma[J]. *BMC Ophthalmol*, 2012, 12:45.
  37. Tatham AJ, Murray IC, McTrusty AD, et al. Speed and accuracy of saccades in patients with glaucoma evaluated using an eye tracking perimeter[J]. *BMC Ophthalmol*, 2002, 20(1): 259.
  38. Lajoie K, Miller AB, Strath RA, et al. Glaucoma-Related Differences in Gaze Behavior When Negotiating Obstacles[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2018, 7(4): 10.
  39. Timmis MA, Jon A, Mohammad B. Visual search behavior in individuals with retinitis pigmentosa during level walking and obstacle crossing[J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2017, 58(11): 4737-4746.
  40. Hallemans A, Ortibus E, Truijien S. Development of independent locomotion in children with a severe visual impairment[J]. *Res Dev Disabil*, 2011, 32(6): 2069-2074.
  41. Klein BEK, Moss SE, Klein R. Associations of visual function with physical outcomes and limitations 5 years later in an older population: the Beaver Dam eye study[J]. *Ophthalmology*, 2003, 110(4): 644-650.
  42. Mihailovic A, Swenor BK, Friedman DS. Gait implications of visual field damage from glaucoma[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2017, 6(3): 23.
  43. Hausdorff JM, Rios DA, Edelberg HK. Gait variability and fall risk in community-living older adults: a 1-year prospective study[J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 2001, 82(8): 1050-1056.
  44. Kressig RW, Herrmann FR, Grandjean R. Gait variability while dual-tasking: fall predictor in older inpatients?[J]. *Aging Clin Exp Res*, 2008, 20(2): 123-130.
  45. Bierbaum S, Peper A, Arampatzis A. Exercise of mechanisms of dynamic stability improves the stability state after an unexpected gait perturbation in elderly[J]. *Age*, 2013, 35(5): 1905-1915.
  46. Bierbaum S, Peper A, Karamanidis K. Adaptational responses in dynamic stability during disturbed walking in the elderly[J]. *J Biomech*, 2010, 43(12): 2362-2368.
  47. Conlon R, Saheb H, Ahmed, II. Glaucoma treatment trends: a review[J]. *Can J Ophthalmol*, 2017, 52(1): 114-124.
  48. Meier-Gibbons F, Berlin MS, Töteberg-Harms M. Influence of new treatment modalities on adherence in glaucoma[J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2019, 30(2): 104-109.
  49. Romano JG, Schulz P, Kenkel S. Visual field changes after a rehabilitation intervention: Vision restoration therapy[J]. *J Neurol Sci*, 2008, 273(1-2): 70-74.
  50. Sabel BA, Flammer J, Merabet LB. Residual vision activation and the brain-eye-vascular triad: Dysregulation, plasticity and restoration in low vision and blindness—a review[J]. *Restor Neurol Neurosci*, 2018, 36(6): 767-791.

51. Sabel BA, Gao Y, Antal A. Reversibility of visual field defects through induction of brain plasticity: vision restoration, recovery and rehabilitation using alternating current stimulation[J]. *Neural Regen Res*, 2020, 15(10): 1799-1806.
52. Gall C, Schmidt S, Schittkowski MP, et al. Alternating current stimulation for vision restoration after optic nerve damage: a randomized clinical trial[J]. *PLoS One*, 2016, 11(6): e0156134.
53. Thompson AC, Jammal AA, Medeiros FA. A review of deep learning for screening, diagnosis, and detection of glaucoma progression[J]. *Transl Vis Sci Technol*, 2020, 9(2): 42.
54. Kamińska MS, Miller A, Rotter I, et al. The effectiveness of virtual reality training in reducing the risk of falls among elderly people[J]. *Clin Interv Aging*, 2018, 13: 2329-2338.
55. Phu S, Vogrin S, Al Saedi A, et al. Balance training using virtual reality improves balance and physical performance in older adults at high risk of falls[J]. *Clin Interv Aging*, 2019, 14: 1567-1577.
56. Lam AKN, To E, Weinreb RN, et al. Use of virtual reality simulation to identify vision-related disability in patients with glaucoma[J]. *JAMA Ophthalmol*, 2020, 138(5): 490-498.
57. Li B, Chu H, Yan L, et al. Individualized visual reality training improves visual acuity and visual field defects in patients with glaucoma: a preliminary study report[J]. *Cyberpsychol Behav Soc Netw*, 2020, 23(3): 179-184.
58. Sabel BA, Henrich-Noack P, Fedorov A, et al. Vision restoration after brain and retina damage: The "residual vision activation theory"[J]. *Prog Brain Res*, 2011, 192(8): 199-262.

**本文引用:** 刘莹, 刘晶劼, 王大江. 青光眼视觉功能损害导致运动行为异常的研究与康复治疗手段展望进展[J]. *眼科学报*, 2021, 36(6): 478-485. doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2021.06.09

**Cite this article as:** LIU Ying, LIU Jingjie, WANG Dajiang. Research on abnormal movement behavior caused by damage to visual function of glaucoma and prospect of rehabilitation treatment[J]. *Yan Ke Xue Bao*, 2021, 36(6): 478-485. doi: 10.3978/j.issn.1000-4432.2021.06.09