

青光眼视功能损伤进展评估方法

吴倩如 综述 张纯 审校

北京大学第三医院眼科 眼部神经损伤的重建保护与康复北京市重点实验室,北京 100191

通信作者:张纯,Email:zhangc1@yahoo.com

【摘要】 青光眼是一组具有特征性视神经结构损害的眼病,其临床治疗的目标是延缓病程进展,保持视功能的生理需要。青光眼疾病进展评估方法包括结构损伤评估和视功能损伤评估。随着青光眼疾病的进展,当视网膜神经节细胞大量死亡时,一些评估结构损伤的指标将产生地板效应。因此,视功能评估成为监测中晚期青光眼疾病进展的主要方式。本文从视野检查、视觉电生理检查、对比敏感度和视功能综合评估 4 个方面综述视功能评估方法、应用及最新进展,并分析其评估青光眼视功能损伤进展的特点及优劣。

【关键词】 青光眼; 视功能损伤; 疾病进展评估; 视野; 视觉电生理

基金项目: 北京市自然科学基金 (L234016)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20200622-00447

Advances in methods to assess progression of glaucomatous visual impairment

Wu Qianru, Zhang Chun

Department of Ophthalmology, Beijing Key Laboratory of Restoration of Damaged Ocular Nerve, Peking University Third Hospital, Beijing 100191, China

Corresponding author: Zhang Chun, Email: zhangc1@yahoo.com

[Abstract] Glaucoma is a group of ocular diseases characterized by structural damage to the optic nerve, and the goal of its clinical management is to slow disease progression and preserve the physiological need for visual function. Methods to assess glaucoma disease progression include assessment of structural damage and assessment of visual function damage. As glaucomatous disease progresses, some of the indicators used to assess structural damage have a floor effect when retinal ganglion cells die in large numbers. Therefore, visual function assessment has become the main modality to monitor the progression of mid- to late-stage glaucoma. This article reviews the visual function assessment methods, applications, and recent advances from four aspects, namely, visual field examination, visual electrophysiology examination, contrast sensitivity, and comprehensive visual function assessment, and analyzes their characteristics, advantages, and disadvantages in assessing the progression of visual function damage in glaucoma.

[Key words] Glaucoma; Visual impairment; Evaluation of disease progression; Visual field; Electrophysiology

Fund program: Natural Science Foundation of Beijing (L234016)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20200622-00447

青光眼是一组具有特征性视神经结构损害的眼病,如视网膜神经节细胞 (retinal ganglion cells, RGCs) 进行性丧失、视网膜神经纤维层 (retinal nerve fiber layer, RNFL) 变薄等,并伴有特征性视野缺损^[1]。青光眼是不可逆盲的主要原因,至 2040 年,全球患病人数将增至 1.118 亿^[2]。青光眼极大程度影响了患者的生活质量,且随疾病进展,监测和治疗难度大大增加^[3]。因此,定期随访、及时发现疾病进展并进行有效干预尤为重要。青光眼的结构损伤往往早于功能损害^[4],但随疾病进展,当 RGCs 大量死亡时,一些评估结构损伤的指标,如 RNFL 厚度、RGCs 复合体等,将产生地板效应,其数值可能不再减小,指标变异性较大,愈晚期青光眼其评估的准确性可能愈低,使其不

能继续反映视神经损伤进展^[5]。因此,视功能评估成为监测中晚期青光眼疾病进展的主要方式。视功能评估方法主要有视野及视觉电生理检查、视力、对比敏感度等。本文综述视功能检查方法,并分析其评估青光眼视功能损伤进展的特点及优劣。

1 视野检查

与测量中心视力不同,视野检测是评估整个视野的视觉能力。视野检查法以各种方式呈现视标,确定视野范围内及视觉能力的阈值^[6]。目前,视野检查仍是临床检测青光眼疾病进展的金标准。RGCs 损伤 20%,中央 30°视野检查视网膜光敏感性下降 5 dB;RGCs 损伤 40%时,其光敏感性下降 10 dB^[7],揭示

视野改变多发生于大量 RGCs 损伤后,故早期较难发现病变,因此多适用于中晚期青光眼疾病诊断及监测。

1.1 Goldmann 视野计

20 世纪 50~70 年代,Goldmann 设计的投射式半球形视野计被认为是标准视野检查仪,可分别检测动态及静态视野,也为现代视野计的发展奠定了基础^[8]。Goldmann 视野计检查速度快,应用范围广,安装及维护费用不高,但由人工参与测量和评估可能会引入主观性误差^[9]。此外,手动动态视野计不能准确测量视岛中比较平坦的区域,不易发现微小病变;动态光标较静态光标更易被发觉,易漏掉一些较小的视野缺损^[8]。因此,Goldmann 视野计逐渐被计算机自动视野计替代。

1.2 标准自动视野计

计算机自动视野计(standard automatic perimetry,SAP)的发明提高了视野检查的敏感度及特异度,随着检测程序不断优化,SAP 逐渐成为临床上监测疾病进展的重要手段。

1.2.1 标准自动视野计的判读 目前有多种 SAP 报告分析方法,主要分为趋势分析及事件分析方法。趋势分析可以根据连续随访结果,分析视野随时间改变的潜在变化趋势。线性回归模型是目前常用的趋势分析方法,逐点线性回归分析(point linear regression,PLR)将连续随访的视野结果进行逐点阈值对比分析,对每个点的阈值进行回归分析,得出其分贝数的斜率及 P 值。目前,可以应用 PROGRESSOR 软件(英国 Medisoft 公司)进行趋势分析,至少有 2 个测试位点丢失率达到 1 dB/年且 $P < 0.01$ 则评判为疾病进展^[10]。然而,PLR 分析需建立在 6~8 次可靠视野检查基础上,且对早期青光眼进展评估的敏感性较差;PLR 着重于给出每个位点的进展趋势,对于局部缺损较为敏感,但整体视野缺损及缺损位置的分析不够明确^[11]。目前,多项研究将 PLR 回归分析结合多种数学模型,如二项检验、排列分析等,以提高 PLR 分析的敏感性及其对早期青光眼视野进展的监测能力^[12-13]。

视野指数(visual field index,VFI)为视野报告判读的重要趋势分析指标。VFI 引入一种新的度量视野方法,更关注中心视野的变化,较周边视野而言,中心视野对视功能影响更大。VFI 计算中,中心点权重较周围点逐渐变大,并排除了年龄变化及可能导致整体视敏度下降的影响因素,如白内障、眼表疾病等^[14],以百分比形式给出结果,其中 100% 代表正常视野,0% 代表全盲。对 VFI 结果进行线性回归分析可以评估青光眼损害的发展趋势,有益于指导临床用药及评估降压幅度。然而,随着视野进一步恶化及随访时间的延长,VFI 线性模型监测晚期青光眼患者视野缺损的准确率逐渐降低^[15]。

基于事件分析判断是指将随访测试结果与初始基线测试结果进行比较,如视野进展指导性分析(guided progression analysis,GPA)。目前临床应用较为广泛的为 GPA,基于模式偏差概率进行分析,将每个测试位点与 2 个较早测试中同一位点平均阈值进行比较,其变异值与数据库中青光眼患者的视野数据进行对比分析,如变异超出了 95% 置信区间,则在概率图上标注此位点;如连续 2 个随访测试中超过 3 个位点阈值变异,GPA 报告会给出“可能进展(possible progression)”的提示;如

连续 3 个随访测试超过 3 个位点阈值变异,则会给出“很可能进展(likely progression)”的提示。该方法强调青光眼引起的局灶性视野缺损,排除了白内障、眼表疾病等因素带来的视敏度下降,增加了中央位点权重,可更好地反映青光眼性 RGCs 丢失及视网膜功能损伤^[16]。然而,当视野平均缺损值超过 15 dB 时,GPA 的监测能力显著下降^[17]。青光眼比率指数(glaucoma rate index,GRI)是一种事件分析新方法。对视野报告中的测试点进行逐点分析,根据其变化规律,分别应用指数衰减或指数增长模型,拟合估算逐点变化率(pointwise rate of change,PRC),并对年龄及视野位置等影响因素进行校正,绘制视野变化图。GRI 得分通过将所有测试位置的 PRC 相加得出,若视野测试位置中未发生显著变化,则该眼的 GRI 值为 0,-100 表示视野缺损极其恶化,+100 表示视野缺损极其改善。GRI 可应用于不同程度视野缺损的评估,计算 PRC 的同时绘制变化图,并对视野缺损进展进行定位。与 GPA 及 PLR 法相比,GRI 监测青光眼疾病进展更为敏感、准确,适用范围更广,对于早中晚期青光眼均有良好的监测效果^[18]。

1.2.2 晚期青光眼视野进展随访方法 临床上 SAP 监测程序大多应用静态阈值 30-2 或 24-2 检测程序,晚期青光眼患者固视不良会增加测试假阳性或假阴性率,且测试程序存在学习效应,不能完全反映患者真实的视功能。晚期青光眼视野检查中的各项指标变异性较大,在严重缺损区域可能无法检测到进一步的视野进展,当平均偏差超过 15 dB 时,敏感性将会大幅下降^[3],因此有研究者提出使用 10-2 阈值检测模式进行有针对性的中央视野测试^[19]。De Moraes 等^[19]开发了一种基于 10-2 阈值视野检测的趋势分析方法,即中心视野指数(central field index,CFI),与 VFI 原理相似,CFI 可用于确定青光眼进展及预测疾病发展趋势,赋予视野中心位点更多权重,以评估真实的视觉功能,但其临床应用尚需大量研究证实。

对于一些仅残留管状视野或颞侧视岛的终末期青光眼患者,静态视野检查已无法监测其疾病变化,可以选择动态视野检查,监测残余视野的变化。在视野丧失严重的情况下,动态视野检查较静态视野检查更可清晰地划定和监测视野缺陷的边缘变化,判定疾病进展^[3]。Nevalainen 等^[20]比较 20 例晚期青光眼患者 9 个月中 4 次随访的动态视野测试与自动静态视野测试结果及每次完成检查所用时间,结果发现动态视野计具有良好的可重复性,测试时间明显少于静态测试,且大多数晚期青光眼患者很难配合完成整个静态视野检查,说明动态视野测试可以作为晚期青光眼患者疾病进展监测的指标。

1.3 微视野计

眼底追踪视野计或微视野计使用视网膜成像系统,将眼底进行连续可视化,从而在整个测试过程中使测试刺激呈现在特定视网膜区域,并且可对某一位点进行重复评估。Leisser 等^[21]研究发现,微视野计具有良好的可重复性,其敏感性及其特异性均与 SAP 类似;Kita 等^[22]发现青光眼患者微视野计光敏感度与光学相干断层扫描(optical coherence tomography,OCT)视盘旁相关指数(RNFL 厚度、视网膜厚度、RGCs 复合体)显著相关,同时可以对视神经损伤部位进行定位。田甜等^[23]研究

发现,在半侧视野缺损的青光眼患者中,微视野计检查结果与 SAP 呈正相关,并且在 SAP 尚未检测出视野缺损时,患者即可出现固视稳定性降低,因此微视野计的固视稳定性可作为评估早期青光眼黄斑功能的指标。研究表明,微视野计可作为一种潜在视功能监测方法及视觉训练仪器^[24],如黄斑变性地图样萎缩患者绝对暗点扩大,可通过视觉训练获得良好固视及恢复部分生活视力。然而,微视野计仅能作为临床诊断青光眼的辅助指标,因其测量黄斑中心 20° 范围内的光敏感度,不能发现外围弓形视野缺损及晚期青光眼视野进展^[21]。Kulkarni 等^[25] 研究显示,在晚期青光眼患者中,尽管与 SAP 结果相比,微视野计检测结果差异无统计学意义,但其假阴性率较高,尽管将其归因于微视野计固视稳定性高,但仍表明微视野计可能无法发现晚期青光眼,尤其是一些管状视野患者的视野缺损进展,因此微视野计并不适用于监测晚期青光眼疾病进展。

1.4 短波长自动视野计

短波长自动视野计(short-wavelength automated perimetry, SWAP)根据“双色阈值理论”,针对中央视野中短波长视锥刺激通路进行检测。青光眼患者发病早期易出现蓝黄色觉异常,SWAP 使用投影在黄色背景上的蓝色视标进行检测,该背景抑制了长波长和中波长通路,优先刺激短波长通路。SWAP 在检测早期青光眼视神经损伤方面比 SAP 更为敏感^[26]。研究显示,SWAP 可以较 SAP 早 1~3 年发现视野进展,其变化率较 SAP 快^[27]。但 SWAP 测试变异性高,结果受到白内障、黄斑病变等疾病的影响,且测试时间较长,较 SAP 测试过程繁杂,患者不易配合。近年来,随着 SAP 分析软件的开发,SAP 与 SWAP 监测青光眼疾病进程的能力相当,甚至早于 SWAP 发现进展^[28],使得 SWAP 在青光眼监测领域应用受限。

1.5 倍频视野计

在 RGCs 丢失引起的青光眼性视神经损伤中,外侧膝状体腹侧大细胞层中的 RGCs 通路受损更明显^[29],倍频视野计(frequency doubling technology perimetry, FDP)基于低空间频率、高时间频率的“倍频现象”,定向检测大细胞层 RGCs 功能,因此可较早发现视神经损伤。FDP 重复检测波动性较小,检查过程便捷、时间短,受固视及眼屈光状态影响较小^[30]。FDP 可早于 SAP 诊断早期青光眼,但特异性较低^[31]。FDP 监测青光眼疾病进展的效能与 SAP 相似^[32]。仇长宇等^[33]测定不同时期青光眼患者 FDP 表现,发现 FDP 与 SAP 平均缺损值有较好相关性。还有研究者提出,FDP 可更好地预测视野缺损进展,甚至发现 SAP 不能检测到的疾病进展^[34]。因此,对于可疑或早期青光眼患者,可考虑应用 FDP 监测及预测视野缺损及疾病发展,但 FDP 对中心 10° 范围内视野的预测能力较差^[35],因此 FDP 可能不适用于监测中晚期青光眼疾病进展。

2 与青光眼相关的视觉电生理检查

视网膜接受光刺激后,感光细胞及视觉通路上的细胞依次发生点位改变,最终传导至视觉中枢系统,用电极记录下电位变化即可检测视觉传导通路上各个细胞的功能,因此与视野检查不同,视觉电生理检查可排除主观影响因素及学习效应对结

果的影响,其结果更加客观,可用于评估 RGCs 的功能,发现青光眼性视功能障碍^[36]。

2.1 视网膜电图

2.1.1 图形视网膜电图 图形视网膜电图(pattern electroretinogram, P-ERG)可以选择性地检测 RGCs 功能,应用黑白翻转图案(通常是交替的条纹或棋盘格)刺激,记录细胞反应。由于大多青光眼患者年龄较大,其外层视网膜细胞功能常有缺陷,如常伴有年龄相关性黄斑病变等,而外层视网膜细胞功能对 P-ERG 结果影响很大,且 P-ERG 对检查条件要求较高,需要准确的屈光矫正、良好固视及良好的测试环境,因此不能单独使用 P-ERG 评估 RGCs 功能^[37]。早期青光眼患者若出现 P-ERG 振幅降低,则表明 RGCs 功能开始损伤,在 RGCs 凋亡前,P-ERG 可以比 OCT 更早发现 RGCs 功能丧失,从而尽早开始治疗,在发生不可逆损害之前恢复 RGCs 功能^[38]。Elgohary 等^[39]发现各象限 RNFL 平均厚度与 P-ERG 中 N95 振幅呈负相关,与 P50-N95 振幅呈正相关;Porciatti 等^[40]发现,P-ERG 的平均振幅随疾病严重程度的增加而降低,表明 P-ERG 可用于监测可疑青光眼及评估早期青光眼性视功能损伤。然而,Bode 等^[41]研究发现,P-ERG 的异常改变在青光眼性视野损伤发生的前 4 年基本不变,表明 P-ERG 改变虽然发生较早,但保持恒定,推测 P-ERG 振幅不随疾病发展而进一步下降,不可用于监测晚期青光眼疾病进展。因此,P-ERG 可作为补充检查,帮助早期诊断青光眼,但其疾病监测能力仍需进一步研究。

2.1.2 多焦视网膜电图 多焦视网膜电图(multifocal electroretinogram, mf-ERG)通过同时刺激视网膜的不同区域,全面呈现视网膜不同部位、不同层级和不同类型神经细胞的功能,直观反映视网膜各部位功能。mf-ERG 分为 1 阶反应和 2 阶反应,分别代表外层及内层视网膜功能,每个反应分别由 P1、N1 及 N2 组分组成。研究表明,在原发性开角型、闭角型及正常眼压性青光眼患者中,mf-ERG 中 P1、N2 组分振幅降低分别与早中期各类型青光眼 OCT 中 RNFL 缺损存在相关性^[42],提示 mf-ERG 可用于监测早期青光眼视神经损害。Gölemz 等^[43]研究发现,中心区域 N2 振幅降低及潜伏期延长可早于视野改变诊断青光眼,且早期青光眼可检测到中心 5° 区域内 N2 振幅降低,晚期青光眼可检测到全视网膜 N2 振幅降低,这提示 mf-ERG 中 N2 组分会随疾病进展变化,可能成为监测疾病的指标,在临床诊疗中具有潜在价值。Brandao 等^[44]通过研究全视野闪光 mf-ERG 和黄斑区 RGCs 层厚度的关系,发现视野前青光眼及有视野损伤的原发性开角型青光眼(primary open-angle glaucoma, POAG)患者视网膜中心 10° 和 15° 的 mf-ERG 反应明显降低;Ledolter 等^[45]将视网膜分为中央、上半、下半及乳斑束区,各个区域 mf-ERG 第一诱导成分平均振幅与相对位置视野平均缺损值显著相关,且在部分未出现中心视野损害的青光眼患者中,各相应位置的平均振幅与周围视野缺损相关。mf-ERG 在早期诊断青光眼方面有较高的临床应用价值,且在中晚期青光眼疾病监测方面也有应用前景。

2.1.3 明视负波反应 明视负波反应(photopic negative response, PhNR)是 ERG 中 b 波之后的负向慢波,可反映 RGCs

功能,对 POAG 及视神经萎缩患者有一定的诊断意义^[36,46]。Cvenkel 等^[47]发现,与正常人相比,可疑青光眼患者 PhNR 振幅显著降低,且与 RNFL 缺损相关。Machida 等^[48]纳入 51 例不同分期 POAG 患者,发现视网膜中央区 PhNR 振幅与神经节细胞复合体(ganglion cell complex, GCC)的减少呈正相关,与外周区相关性较弱,这可能与光斑中心区 GCC 密度较高有关, GCC 厚度随青光眼疾病进展减少^[49],表明 PhNR 振幅下降程度与青光眼性视神经损伤呈正相关。因此,PhNR 评估早期青光眼性视神经损伤,尤其是黄斑区视神经损伤有较大的临床价值,且 PhNR 受屈光间质及屈光不正的影响较小,较 P-ERG 更便捷。但由于 PhNR 主要检测黄斑中心 RGCs 功能,因此可能无法监测周边视功能损伤较重的中晚期青光眼患者的疾病进展。

2.2 视觉诱发电位

2.2.1 图形视觉诱发电位

视觉诱发电位(visual evoked potentials, VEP)主要通过头皮电极检测大脑枕叶皮质对光刺激的电响应,作为客观测试,VEP 可评估从视网膜到枕叶皮质的视觉通路完整性。VEP 的光刺激可以不同方式呈现,常见的是闪光或图案反转。闪光 VEP 主要用于评估低视力、配合度差患者的视觉潜能,图形 VEP(pattern VEP, P-VEP)应用翻转黑白棋盘作为视觉刺激。Parisi 等^[50]研究指出,P-VEP 可在视盘及视野出现损伤之前检测出青光眼性视神经损害,其中,P100 波潜伏期延迟具有诊断意义,在高眼压人群中也可观察到 P-VEP 异常,提示高眼压可能造成视神经损伤。Horn 等^[51]对视野前青光眼及视野缺损青光眼患者进行为期 2 年的随访,发现有视神经损伤进展的患者蓝黄 P-VEP 峰时显著延长,无病情进展的患者 P-VEP 结果保持不变。因此 P-VEP 可用于监测青光眼疾病进展,但目前 P-VEP 多用于早期青光眼的诊断及监测,其中在晚期青光眼患者诊疗中的应用仍需进一步探讨。

2.2.2 多焦视觉诱发电位

多焦视觉诱发电位(multifocal VEP, mf-VEP)通过同时检测多点位视网膜反应及电极记录来自视网膜不同部位传导至视皮质的刺激,可评估视网膜功能的完整性,检测损伤部位。mf-VEP 与 SAP 具有良好的对应关系,因此 mf-VEP 具有检测青光眼 RGCs 损害的潜能,甚至可以较 SAP 更早发现疾病进展^[52]。Fortune 等^[53]研究指出,mf-VEP 可发现部分 SAP 未发现的视神经损伤,反之亦然,二者检测的一致性为 80%,诊断及监测青光眼性视神经损伤的能力相当。然而,有研究者提出,mf-VEP 诊断青光眼假阳性率高,这可能是由不同个体视皮质解剖特异性所导致^[54]。Hood 等^[55]研究提出,mf-VEP 检测青光眼损害的能力取决于测试信噪比(signal-to-noise ratio, SNR),结合 SNR 分析 mf-VEP 结果可降低重复波动性及假阳性率,缩小不同患者间的检测差异,使结果更加准确。Inoue 等^[56]研究比较了 mf-VEP 在不同人群中的测试可重复性,发现在正常人中,其可重复性及结果稳定性较好,与 SAP 结构相似,然而在 POAG 患者中,其结果的变异系数随疾病进展而逐渐增加。因此,mf-VEP 监测 POAG 疾病进展能力较差,目前仅可用于早期辅助诊断青光眼。

2.2.3 分离格栅模式视觉诱发电位

近年来,许多研究提出,分离格栅模式视觉诱发电位(isolated-check VEP, icVEP)能够

更早发现 RGCs 损伤,早期诊断青光眼^[57-58]。icVEP 基于青光眼早期大细胞层 RGCs 通路更易受损的特点^[29],采用分离格栅图形的刺激方式,检测 SNR 值,可特异性评估青光眼性神经细胞损伤。然而,针对诊断青光眼的截断值,不同研究提出不同结论。Kolomeyer 等^[59]提出,SNR 值应设置为 0.95,此时 icVEP 检测青光眼的敏感性为 82%,特异性为 76%。但目前认为 icVEP 与传统 SAP 诊断青光眼一致性不高^[60],仅可作为辅助诊断早期青光眼设备,其独立诊断青光眼的准确性及其与传统检查指标的相关性有待进一步研究。

目前,尽管视觉电生理检查对早期青光眼诊断及病情进展监测具有一定价值,但电生理检查对检查人员专业要求较高,且对检查环境要求严格,如严格的暗室环境、保持环境安静等;对患者眼部条件要求也较高,如多数电生理检查对屈光介质要求较高,这使得视觉电生理检查的临床应用受限,且各类视觉电生理检查多适用于早期青光眼的诊断及筛查,在中晚期青光眼的疾病监测方面具有一定局限性。

3 对比敏感度

视力并不能全面反映视功能及视觉质量,空间对比敏感度是在不同照明环境及空间频率下测试眼的感知能力,可更加真实地反映视功能。研究表明,空间对比敏感度降低可能与早期青光眼性视神经损害有关,即使视野尚未出现缺损,青光眼患者视功能也较正常人下降^[61-62]。研究发现,中频率空间对比敏感度与黄斑区厚度及中心视野平均缺损值显著相关,且空间对比敏感度测试结果与 RNFL 厚度呈线性相关^[63-64],提示空间对比敏感度可用于临床辅助诊断青光眼,预测青光眼性视神经损害。空间对比敏感度可用于评估青光眼疾病进展。Waisbourd 等^[65]研究发现,视野缺损进展迅速的青光眼患者,其视野平均缺损、对比敏感度评分、视力的基线测量值均较低。1 年后视野、RNFL 厚度,视觉生活质量评估得分显著进展的患者空间对比敏感度评分也随之降低,表明空间对比敏感度可以纵向观察青光眼损伤,可以作为潜在随访指标。空间对比敏感度还可以用于评估青光眼患者的生活视力及视功能。Tatham 等^[66]利用模拟器测试不同对比度下青光眼患者发生机动车辆碰撞的风险,发现易发生车辆碰撞的患者年龄较大、视野缺损较严重且空间对比敏感度评分较低;而在低对比度环境下,易发生车辆碰撞的青光眼患者反应时间显著延长,提示环境对比度对青光眼患者视觉功能有严重影响。此外,时间对比敏感度也可用于诊断青光眼,埃朗根闪烁测试(erlangen flicker test, EFT)是一种新型电生理检查方法,利用时间对比敏感度监测青光眼 RGCs 功能。在正常情况下,25 Hz 的时间对比度适应最为敏感,且由于视神经细胞的自我保护机制,在特定高频率刺激后,细胞膜电位发生超极化,被测眼在一定时间之后才能感知下一次低频刺激^[67]。EFT 利用 25 Hz 下的时间对比度,定向刺激大 RGCs 通路,测定 2 次连续刺激之间 RGCs 的反应时间,从而监测青光眼性视神经损害。Hohberger 等^[68]对 EFT 结果进行分析,发现与正常人相比,青光眼患者不同对比度下的 RGCs 反应时间均显著延长,而各个青光眼亚型之间没有显著

差异,因此,时间对比敏感度适应反应具有潜在诊断青光眼能力。目前,对比敏感度测试在青光眼诊断及随访领域有较大应用价值,但仍只作为辅助检查项目,需结合传统青光眼检查项目,如视野、OCT,共同评估患者视功能。

4 视功能综合评估

视功能需要进行多元、多方面的评估,而不应仅是对视力的测量,尤其是晚期青光眼患者,视力不能直接反映患者的视觉质量。大量研究试图准确评估青光眼对患者生活质量的影响,然而,青光眼性视觉功能障碍的评估及其对日常生活影响的评估十分复杂,难以运用单一或少量指标评判。Lombardi 等^[69]为青光眼患者设置不同生活场景,如在模拟街道躲避障碍、抓取不同大小物品、人物定位及面部朝向识别等,记录其反应时间,并同时测量视力、对比敏感度及视野,发现单眼视野评分、平均缺损值、较差单眼视力与不同生活场景任务反应时间显著相关,提出单眼视野评分更能反映青光眼性视神经损伤对患者生活功能的影响。Zhang 等^[70]通过欧卡斯视觉质量分析系统测定青光眼患者客观视觉质量,发现视觉质量与视野平均缺损值呈负相关,且与视觉相关主观量表评分显著相关,提示客观视觉质量分析可作为辅助检查设备,评估青光眼患者视功能。Shakarchi 等^[71]研究提出,视功能评估参数因所评估的项目而异,视力及视野可对阅读和驾驶能力进行较准确评估,对比敏感度则对平均单目步数及视觉质量量表的结果影响更大。青光眼性视功能损伤不可通过单一检查评定,而临床检查又仅能部分反映患者生活视觉质量,因此,应综合考虑患者各项检查结果,关注患者的生活视功能,以提高患者生活质量。

5 展望

由于青光眼性视功能损伤评估方法尚缺少金标准,检测手段各有优劣,近年来,不断有研究者开发新型检测方法,以提高疾病监测效率及准确度。Zhou 等^[72]通过研究 POAG 患者核磁共振(magnetic resonance imaging, MRI)扩散张量成像,发现其视神经、视交叉、视束、视辐射及初级视皮层体积及容量明显减小,提示青光眼性视神经损害涉及全部视觉通路,此结论可对青光眼发病机制研究提供帮助,但 MRI 检查耗时长、价格昂贵,不适于常规随访检查。传统视野检查耗时长,对环境要求高,仪器难以搬运,一些无法坐位检查的患者,如行动不便、全身情况较差的患者无法进行检查,因此,近年来便携式视野计逐渐投入应用,取得良好效果^[73]。Nakanishi 等^[74]提出一种可评估视觉功能的便携式人机接触头戴式设备,该设备集便携、无线、脑电图系统及头戴式显示器为一体,收集视觉刺激从而获取多焦点稳态 VEP 信号,其受试者工作特征曲线下面积为 0.924,且具有良好的可重复性,可用于诊断和检测青光眼进行性视野丧失。同时,该设备的良好便携性为家庭自我监测青光眼疾病进展提供可能。Schulz 等^[75]提出新型程序,可在 iPad 上进行视野检测,更加便捷迅速,与 SAP 类似,也可提供平均缺损、模式标准差及 VFI,还可以依据多次检测结果进行线性回归分析,其检测能力与 SAP 相当,但对于特定定位视野缺损检测能力一

般,且固视评估系统有待加强。

随着青光眼疾病的进展,青光眼患者的社会经济负担增加、生活质量下降,监测疾病进展的各种方法可靠性也越来越差。对于青光眼患者的视功能评估及监测,我们不仅需要及时发现疾病进展,还应准确判断其进展速度,以便及早进行治疗,防止视功能不可逆损伤。因此,我们需要了解每种检查方法的局限性,以提高监测的准确性、及时性。同时,对于新兴的检测项目,也应积极进行大样本、前瞻性、多中心临床试验,以使其更好地应用于临床诊疗。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Weinreb RN, Aung T, Medeiros FA. The pathophysiology and treatment of glaucoma: a review [J]. *JAMA*, 2014, 311 (18): 1901-1911. DOI: 10.1001/jama.2014.3192.
- [2] Tham YC, Li X, Wong TY, et al. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis [J]. *Ophthalmology*, 2014, 121 (11): 2081-2090. DOI: 10.1016/j.ophtha.2014.05.013.
- [3] de Moraes CG, Liebmann JM, Medeiros FA, et al. Management of advanced glaucoma: characterization and monitoring [J]. *Surv Ophthalmol*, 2016, 61 (5): 597-615. DOI: 10.1016/j.survophthal.2016.03.006.
- [4] Werkmeister RM, Cherecheanu AP, Garhofer G, et al. Imaging of retinal ganglion cells in glaucoma: pitfalls and challenges [J]. *Cell Tissue Res*, 2013, 353 (2): 261-268. DOI: 10.1007/s00441-013-1600-3.
- [5] Nouri-Mahdavi K, Fatehi N, Caprioli J. Longitudinal macular structure-function relationships in glaucoma and their sources of variability [J]. *Am J Ophthalmol*, 2019, 207: 18-36. DOI: 10.1016/j.ajo.2019.04.034.
- [6] Anderson DR. Standard perimetry [J]. *Ophthalmol Clin North Am*, 2003, 16 (2): 205-212. DOI: 10.1016/s0896-1549(03)00005-1.
- [7] Quigley HA, Dunkelberger GR, Green WR. Retinal ganglion cell atrophy correlated with automated perimetry in human eyes with glaucoma [J]. *Am J Ophthalmol*, 1989, 107 (5): 453-464. DOI: 10.1016/0002-9394(89)90488-1.
- [8] 王兰,刘磊,林丁.视野计的原理及发展[J].*国外医学(眼科学分册)*, 1999, (5): 309-314.
- [9] Trope GE, Britton R. A comparison of Goldmann and Humphrey automated perimetry in patients with glaucoma [J]. *Br J Ophthalmol*, 1987, 71 (7): 489-493. DOI: 10.1136/bjo.71.7.489.
- [10] Nouri-Mahdavi K, Caprioli J, Coleman AL, et al. Pointwise linear regression for evaluation of visual field outcomes and comparison with the advanced glaucoma intervention study methods [J]. *Arch Ophthalmol*, 2005, 123 (2): 193-199. DOI: 10.1001/archophth.123.2.193.
- [11] Nouri-Mahdavi K. Selecting visual field tests and assessing visual field deterioration in glaucoma [J]. *Can J Ophthalmol*, 2014, 49 (6): 497-505. DOI: 10.1016/j.jejo.2014.10.002.
- [12] O'Leary N, Chauhan BC, Artes PH. Visual field progression in glaucoma: estimating the overall significance of deterioration with permutation analyses of pointwise linear regression (PoPLR) [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2012, 53 (11): 6776-6784. DOI: 10.1167/iovs.12-10049.
- [13] Karakawa A, Murata H, Hirasawa H, et al. Detection of progression of glaucomatous visual field damage using the point-wise method with the binomial test [J/OL]. *PLoS One*, 2013, 8 (10): e78630 [2023-09-15]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24205283/>. DOI: 10.1371/journal.pone.0078630.
- [14] Cohen SL, Rosen AI, Tan X, et al. Improvement of the visual field index in clinical glaucoma care [J]. *Can J Ophthalmol*, 2016, 51 (6): 445-451. DOI: 10.1016/j.jejo.2016.10.001.

- [15] Rabiolo A, Morales E, Mohamed L, et al. Comparison of methods to detect and measure glaucomatous visual field progression [J/OL]. *Transl Vis Sci Technol*, 2019, 8(5): 2 [2023-09-15]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31555493/>. DOI: 10.1167/tvst.8.5.2.
- [16] Artes PH, Nicolela MT, LeBlanc RP, et al. Visual field progression in glaucoma: total versus pattern deviation analyses [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2005, 46(12): 4600-4606. DOI: 10.1167/iovs.05-0827.
- [17] Wesselink C, Heeg GP, Jansonius NM. Glaucoma monitoring in a clinical setting: glaucoma progression analysis vs nonparametric progression analysis in the Groningen Longitudinal Glaucoma Study [J]. *Arch Ophthalmol*, 2009, 127(3): 270-274. DOI: 10.1001/archophthol.2008.585.
- [18] Salazar D, Morales E, Rabiolo A, et al. Pointwise methods to measure long-term visual field progression in glaucoma [J]. *JAMA Ophthalmol*, 2020, 138(5): 536-543. DOI: 10.1001/jamaophthol.2020.0647.
- [19] De Moraes CG, Hood DC, Thenappan A, et al. 24-2 visual fields miss central defects shown on 10-2 tests in glaucoma suspects, ocular hypertensives, and early glaucoma [J]. *Ophthalmology*, 2017, 124(10): 1449-1456. DOI: 10.1016/j.ophtha.2017.04.021.
- [20] Nevalainen J, Paetzold J, Krapp E, et al. The use of semi-automated kinetic perimetry (SKP) to monitor advanced glaucomatous visual field loss [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2008, 246(9): 1331-1339. DOI: 10.1007/s00417-008-0828-1.
- [21] Leisser C, Palkovits S, Hirschall N, et al. Reproducibility of microperimeter 3 (MP-3) microperimetry in open-angle glaucoma patients [J]. *Ophthalmic Res*, 2020, 63(3): 302-308. DOI: 10.1159/000501693.
- [22] Kita Y, Holló G, Murai A, et al. Circumpapillary structure-function relationships with microperimetry and spectral domain optical coherence tomography in glaucoma: a pilot study [J]. *Clin Ophthalmol*, 2018, 12: 2535-2544. DOI: 10.2147/OPHT.S186739.
- [23] 田甜, 才瑜, 潘英姿, 等. 微视野计对半侧视野损害的青光眼固视稳定性改变的评估价值 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2017, 35(4): 332-338. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.04.010.
Tian T, Cai Y, Pan YZ, et al. Assessment of microperimetry on fixation stability changes in glaucomatous eyes with hemifield defect [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2017, 35(4): 332-338. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2017.04.010.
- [24] Ramírez Estudillo JA, León Higuera MI, Rojas Juárez S, et al. Visual rehabilitation via microperimetry in patients with geographic atrophy: a pilot study [J/OL]. *Int J Retina Vitreous*, 2017, 3: 21 [2023-09-16]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28536656/>. DOI: 10.1186/s40942-017-0071-1.
- [25] Kulkarni SV, Coupland SG, Stitt DM, et al. Efficacy of SLO-Microperimetry and Humphrey for evaluating macular sensitivity changes in advanced glaucoma [J]. *Can J Ophthalmol*, 2013, 48(5): 406-412. DOI: 10.1016/j.cej.2013.08.001.
- [26] Johnson CA, Adams AJ, Casson EJ, et al. Blue-on-yellow perimetry can predict the development of glaucomatous visual field loss [J]. *Arch Ophthalmol*, 1993, 111(5): 645-650. DOI: 10.1001/archophth.1993.01090050079034.
- [27] Johnson CA, Adams AJ, Casson EJ, et al. Progression of early glaucomatous visual field loss as detected by blue-on-yellow and standard white-on-white automated perimetry [J]. *Arch Ophthalmol*, 1993, 111(5): 651-656. DOI: 10.1001/archophth.1993.01090050085035.
- [28] van der Schoot J, Reus NJ, Colen TP, et al. The ability of short-wavelength automated perimetry to predict conversion to glaucoma [J]. *Ophthalmology*, 2010, 117(1): 30-34. DOI: 10.1016/j.ophtha.2009.06.046.
- [29] Ito Y, Shimazawa M, Chen YN, et al. Morphological changes in the visual pathway induced by experimental glaucoma in Japanese monkeys [J]. *Exp Eye Res*, 2009, 89(2): 246-255. DOI: 10.1016/j.exer.2009.03.013.
- [30] Artes PH, Nicolela MT, McCormick TA, et al. Effects of blur and repeated testing on sensitivity estimates with frequency doubling perimetry [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2003, 44(2): 646-652. DOI: 10.1167/iovs.02-0532.
- [31] Medeiros FA, Sample PA, Zangwill LM, et al. A statistical approach to the evaluation of covariate effects on the receiver operating characteristic curves of diagnostic tests in glaucoma [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2006, 47(6): 2520-2527. DOI: 10.1167/iovs.05-1441.
- [32] Hu R, Wang C, Racette L. Comparison of matrix frequency-doubling technology perimetry and standard automated perimetry in monitoring the development of visual field defects for glaucoma suspect eyes [J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12(5): e0178079 [2023-09-17]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28542536/>. DOI: 10.1371/journal.pone.0178079.
- [33] 仇长宇, 余敏斌, 郭疆, 等. 早期原发性开角型青光眼倍频视野的改变 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2005, 23(1): 72-74. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2005.01.023.
Qiu CY, Yu MB, Guo J, et al. Presentation of frequency doubling perimetry in patients with primary open-angle glaucoma [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2005, 23(1): 72-74. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2005.01.023.
- [34] Meira-Freitas D, Tatham AJ, Lisboa R, et al. Predicting progression of glaucoma from rates of frequency doubling technology perimetry change [J]. *Ophthalmology*, 2014, 121(2): 498-507. DOI: 10.1016/j.ophtha.2013.09.016.
- [35] Kogure S, Toda Y, Tsukahara S. Prediction of future scotoma on conventional automated static perimetry using frequency doubling technology perimetry [J]. *Br J Ophthalmol*, 2006, 90(3): 347-352. DOI: 10.1136/bjo.2005.077065.
- [36] Senger C, Moreto R, Watanabe S, et al. Electrophysiology in glaucoma [J]. *J Glaucoma*, 2020, 29(2): 147-153. DOI: 10.1097/IJG.0000000000001422.
- [37] Wilsey LJ, Fortune B. Electroretinography in glaucoma diagnosis [J]. *Curr Opin Ophthalmol*, 2016, 27(2): 118-124. DOI: 10.1097/ICU.0000000000000241.
- [38] Turkey E, Elsanabary Z, Elshazly L, et al. Role of pattern electroretinogram in ocular hypertension and early glaucoma [J]. *J Glaucoma*, 2019, 28(10): 871-877. DOI: 10.1097/IJG.0000000000001325.
- [39] Elgohary AM, Elbedewy HA, Saad HA, et al. Pattern electroretinogram changes in patients with primary open-angle glaucoma in correlation with visual field and optical coherence tomography changes [J]. *Eur J Ophthalmol*, 2020, 30(6): 1362-1369. DOI: 10.1177/1120672119872606.
- [40] Porciatti V, Bosse B, Parekh PK, et al. Adaptation of the steady-state PERG in early glaucoma [J]. *J Glaucoma*, 2014, 23(8): 494-500. DOI: 10.1097/IJG.0b013e318285fd95.
- [41] Bode SF, Jehle T, Bach M. Pattern electroretinogram in glaucoma suspects; new findings from a longitudinal study [J]. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2011, 52(7): 4300-4306. DOI: 10.1167/iovs.10-6381.
- [42] Rao A, Singh AK, Mukherjee S, et al. Comparing focal and global responses on multifocal electroretinogram with retinal nerve fibre layer thickness by spectral domain optical coherence tomography in glaucoma [J]. *Br J Ophthalmol*, 2015, 99(4): 500-507. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2014-305323.
- [43] Gölemez H, Yıldırım N, Özer A. Is multifocal electroretinography an early predictor of glaucoma? [J]. *Doc Ophthalmol*, 2016, 132(1): 27-37. DOI: 10.1007/s10633-016-9524-3.
- [44] Brandao LM, Ledolter AA, Monhart M, et al. Ganglion cell layer segmentation and the two-flash multifocal electroretinogram improve structure function analysis in early glaucoma [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2017, 255(10): 1991-2000. DOI: 10.1007/s00417-017-3722-x.
- [45] Ledolter AA, Monhart M, Schoetzau A, et al. Structural and functional changes in glaucoma: comparing the two-flash multifocal electroretinogram to optical coherence tomography and visual fields [J].

- Doc Ophthalmol, 2015, 130(3) : 197–209. DOI: 10. 1007/s10633-015-9482-1.
- [46] 李璐. 视网膜电图明视负向反应研究进展[J]. 中华实验眼科杂志, 2011, 29(3) : 276–279. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2011. 03. 021.
- Li L. Advanced progress of the electroretinogram photopic negative response[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2011, 29(3) : 276–279. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2011. 03. 021.
- [47] Cvenkel B, Sustar M, Perovšek D. Ganglion cell loss in early glaucoma, as assessed by photopic negative response, pattern electroretinogram, and spectral-domain optical coherence tomography [J]. Doc Ophthalmol, 2017, 135(1) : 17–28. DOI: 10. 1007/s10633-017-9595-9.
- [48] Machida S, Kaneko M, Kurosaka D. Regional variations in correlation between photopic negative response of focal electroretinograms and ganglion cell complex in glaucoma [J]. Curr Eye Res, 2015, 40(4) : 439–449. DOI: 10. 3109/02713683. 2014. 922196.
- [49] Zhang X, Dastiridou A, Francis BA, et al. Comparison of glaucoma progression detection by optical coherence tomography and visual field [J]. Am J Ophthalmol, 2017, 184 : 63–74. DOI: 10. 1016/j. ajo. 2017. 09. 020.
- [50] Parisi V, Miglior S, Manni G, et al. Clinical ability of pattern electroretinograms and visual evoked potentials in detecting visual dysfunction in ocular hypertension and glaucoma [J]. Ophthalmology, 2006, 113(2) : 216–228. DOI: 10. 1016/j. ophtha. 2005. 10. 044.
- [51] Horn FK, Jonas JB, Budde WM, et al. Monitoring glaucoma progression with visual evoked potentials of the blue-sensitive pathway [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2002, 43(6) : 1828–1834.
- [52] Kanadani FN, Mello PA, Dorairaj SK, et al. Frequency-doubling technology perimetry and multifocal visual evoked potential in glaucoma, suspected glaucoma, and control patients [J]. Clin Ophthalmol, 2014, 8 : 1323–1330. DOI: 10. 2147/OPHTH. S64684.
- [53] Fortune B, Demirel S, Zhang X, et al. Comparing multifocal VEP and standard automated perimetry in high-risk ocular hypertension and early glaucoma [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2007, 48(3) : 1173–1180. DOI: 10. 1167/iovs. 06-0561.
- [54] Hood DC, Zhang X. Multifocal ERG and VEP responses and visual fields: comparing disease-related changes [J]. Doc Ophthalmol, 2000, 100(2–3) : 115–137. DOI: 10. 1023/a: 1002727602212.
- [55] Hood DC, Greenstein VC. Multifocal VEP and ganglion cell damage: applications and limitations for the study of glaucoma [J]. Prog Retin Eye Res, 2003, 22(2) : 201–251. DOI: 10. 1016/s1350-9462(02) 00061-7.
- [56] Inoue Y, Kato K, Kamata S, et al. Reproducibility in the global indices for multifocal visual evoked potentials and Humphrey visual fields in controls and glaucomatous eyes within a 2-year period [J]. Doc Ophthalmol, 2015, 131(2) : 115–124. DOI: 10. 1007/s10633-015-9506-x.
- [57] Fan X, Wu LL, Di X, et al. Applications of isolated-check visual evoked potential in early stage of open-angle glaucoma patients [J]. Chin Med J (Engl), 2018, 131(20) : 2439–2446. DOI: 10. 4103/0366-6999. 243564.
- [58] Xu LJ, Zhang L, Li SL, et al. Accuracy of isolated-check visual evoked potential technique for diagnosing primary open-angle glaucoma [J]. Doc Ophthalmol, 2017, 135(2) : 107–119. DOI: 10. 1007/s10633-017-9598-6.
- [59] Kolomeyer NN, Drinkwater OJ, Drivas E, et al. Utility of the modified isolated-check visual evoked potential technique in functional glaucoma assessment [J]. J Glaucoma, 2020, 29(4) : 258–263. DOI: 10. 1097/IJG. 0000000000001439.
- [60] Chen XW, Zhao YX. Comparison of isolated-check visual evoked potential and standard automated perimetry in early glaucoma and high-risk ocular hypertension [J]. Int J Ophthalmol, 2017, 10(4) : 599–604. DOI: 10. 18240/ijo. 2017. 04. 16.
- [61] Richman J, Zangalli C, Lu L, et al. The Spaeth/Richman contrast sensitivity test (SPARCS): design, reproducibility and ability to identify patients with glaucoma [J]. Br J Ophthalmol, 2015, 99(1) : 16–20. DOI: 10. 1136/bjophthalmol-2014-305223.
- [62] Velten IM, Korth M, Horn FK, et al. Temporal contrast sensitivity with peripheral and central stimulation in glaucoma diagnosis [J]. Br J Ophthalmol, 1999, 83(2) : 199–205. DOI: 10. 1136/bjo. 83. 2. 199.
- [63] Fatehi N, Nowroozizadeh S, Henry S, et al. Association of structural and functional measures with contrast sensitivity in glaucoma [J]. Am J Ophthalmol, 2017, 178 : 129–139. DOI: 10. 1016/j. ajo. 2017. 03. 019.
- [64] Amanullah S, Okudolo J, Rahmatnejad K, et al. The relationship between contrast sensitivity and retinal nerve fiber layer thickness in patients with glaucoma [J]. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol, 2017, 255(12) : 2415–2422. DOI: 10. 1007/s00417-017-3789-4.
- [65] Waisbourd M, Sanvicente CT, Coleman HM, et al. Vision-related performance and quality of life of patients with rapid glaucoma progression [J]. J Glaucoma, 2019, 28(3) : 216–222. DOI: 10. 1097/IJG. 0000000000001179.
- [66] Tatham AJ, Boer ER, Gracitelli CP, et al. Relationship between motor vehicle collisions and results of perimetry, useful field of view, and driving simulation in drivers with glaucoma [J/OL]. Transl Vis Sci Technol, 2015, 4(3) : 5 [2023-09-17]. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26046007/. DOI: 10. 1167/tvst. 4. 3. 5.
- [67] Hohberger B, Rössler CW, Jünemann AG, et al. Frequency dependency of temporal contrast adaptation in normal subjects [J]. Vision Res, 2011, 51(12) : 1312–1317. DOI: 10. 1016/j. visres. 2011. 04. 006.
- [68] Hohberger B, Mißlinger S, Horn F, et al. Recovery time as a potential new progression parameter for patients with advanced glaucomatous optic atrophy [J]. Ophthalmologie, 2017, 114(6) : 543–548. DOI: 10. 1007/s00347-016-0385-7.
- [69] Lombardi M, Zenouda A, Azoulay-Sebban L, et al. Correlation between visual function and performance of simulated daily living activities in glaucomatous patients [J]. J Glaucoma, 2018, 27(11) : 1017–1024. DOI: 10. 1097/IJG. 0000000000001066.
- [70] Zhang Y, Bian A, Hang Q, et al. Optical quality assessed by optical quality analysis system in Chinese primary open-angle glaucoma patients and its correlations with psychological disturbances and vision-related quality of life [J]. Ophthalmic Res, 2021, 64(1) : 15–21. DOI: 10. 1159/000507220.
- [71] Shakarchi AF, Mihailovic A, West SK, et al. Vision parameters most important to functionality in glaucoma [J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2019, 60(14) : 4556–4563. DOI: 10. 1167/iovs. 19-28023.
- [72] Zhou W, Muir ER, Chalfin S, et al. MRI study of the posterior visual pathways in primary open angle glaucoma [J]. J Glaucoma, 2017, 26(2) : 173–181. DOI: 10. 1097/IJG. 0000000000000558.
- [73] 赵灿. 便携式视野计在青光眼中的应用进展 [J]. 中华实验眼科杂志, 2019, 37(6) : 472–476. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2019. 06. 014.
- Zhao C. Advances in the application of portable perimetry in glaucoma [J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2019, 37(6) : 472–476. DOI: 10. 3760/cma. j. issn. 2095-0160. 2019. 06. 014.
- [74] Nakanishi M, Wang YT, Jung TP, et al. Detecting glaucoma with a portable brain-computer interface for objective assessment of visual function loss [J]. JAMA Ophthalmol, 2017, 135(6) : 550–557. DOI: 10. 1001/jamaophthalmol. 2017. 0738.
- [75] Schulz AM, Graham EC, You Y, et al. Performance of iPad-based threshold perimetry in glaucoma and controls [J]. Clin Exp Ophthalmol, 2018, 46(4) : 346–355. DOI: 10. 1111/ceo. 13082.

(收稿日期: 2023-09-20 修回日期: 2024-05-05)

(本文编辑: 刘艳 施晓萌)