

模型眼及光学分析软件在眼部疾病的应用进展

李雪卉, 宋 慧

引用: 李雪卉, 宋慧. 模型眼及光学分析软件在眼部疾病的应用进展. 国际眼科杂志, 2024, 24(11): 1774-1778.

作者单位: (300384) 中国天津市, 天津医科大学眼科医院 眼视光学学院 眼科研究所 国家眼耳鼻喉疾病临床医学研究中心天津市分中心 天津市视网膜功能与疾病重点实验室

作者简介: 李雪卉, 天津医科大学在读硕士研究生, 研究方向: 白内障、眼视光。

通讯作者: 宋慧, 毕业于天津医科大学, 博士, 硕士研究生导师, 主任医师, 研究方向: 白内障、眼视光. songh221@hotmail.com

收稿日期: 2024-02-27 修回日期: 2024-09-27

摘要

模型眼是用于研究眼球解剖结构和光学特性的一种眼模型, 在光学分析软件的协助下可以计算和分析生理或病理状态下的视觉质量。通过光学分析软件调整模型眼各种生物参数(如眼轴、角膜曲率半径等)改变模型眼屈光状态, 可以为眼科手术规划和治疗方案的制定提供可靠的实验平台, 使得视觉质量的评估更加准确和客观。既往模型眼主要用于光学和眼科学的理论学习, 近年来, 随着计算机领域的进步, 模型眼及光学分析软件已在白内障、屈光不正等眼科疾病的诊断和治疗中开展相关应用。作为一种新型评估方法, 模型眼在眼科学领域展现出了重要的诊疗价值。文章旨在总结目前应用广泛的模型眼及光学分析软件, 阐述模型眼在视觉质量评估方面的应用, 为眼科疾病的诊断和治疗提供新视角。

关键词: 模型眼; 分析软件; 眼部疾病; 视觉质量

DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2024.11.16

Research progress of model eyes and optical analysis software in ocular diseases

Li Xuehui, Song Hui

Tianjin Medical University Eye Hospital; School of Optometry & Eye Institute; Tianjin Branch of National Clinical Research Center for Ocular Disease; Tianjin Key Laboratory of Retinal Functions and Diseases, Tianjin 300384, China

Correspondence to: Song Hui. Tianjin Medical University Eye Hospital; School of Optometry & Eye Institute; Tianjin Branch of National Clinical Research Center for Ocular Disease; Tianjin Key Laboratory of Retinal Functions and Diseases, Tianjin 300384, China. songh221@hotmail.com

Received: 2024-02-27 Accepted: 2024-09-27

Abstract

• A model eye is used to study the anatomical structure and optical properties of the eye, and to analyze visual

quality under different conditions using optical analysis software. By adjusting biological parameters such as axial length and corneal curvature radius and modifying its refractive state, the model eye can be used for ophthalmic surgical planning and treatment program development, leading to more accurate and objective assessments of visual quality. While previously used mainly for theoretical studies in optics and ophthalmology, model eyes and optical analysis software are now being applied to various ocular diseases, with their accuracy confirmed through comparison with clinical trials. This article aims to summarize the widely used model eyes and optical analysis software, as well as their applications, to offer new perspectives for diagnosing and treating ocular diseases and evaluating visual quality.

• KEYWORDS: model eye; analysis software; ocular disease; visual quality

Citation: Li XH, Song H. Research progress of model eyes and optical analysis software in ocular diseases. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2024, 24(11): 1774-1778.

0 引言

模型眼已有几百年历史, 既往模型眼主要应用于探究光在眼内的传播和眼球解剖结构^[1], 在17世纪, 模型眼也被用于探讨晶状体结构及眼球调节的机制。同时, 为了获得更准确的眼球解剖数据从而建立更精确的模型, 模型眼也促进了角膜曲率测量仪等眼科精密测量仪器的发展^[2]。后来随着计算机领域兴起, 有学者关注到了模型眼在评估视觉质量方面的优势。

目前, 模型眼在不同领域内得到广泛的应用。在光学分析软件内建立的模型眼可以模拟生理和病理条件下的屈光状态, 探究视觉质量的影响因素, 并通过变化瞳孔直径、眼轴长度等生物学参数讨论相关疾病对视觉质量的影响并探索其机制^[3], 利于眼科临床疾病诊治和科学研究的开展。在眼科学领域中, 模型眼已经在圆锥角膜、白内障、屈光不正等疾病方面开展相关应用, 本文总结几种经典模型眼及相关光学分析软件、模型眼在眼科学中的应用领域进行综述。

1 模型眼起源及分类

古希腊学者早期就开始探索图像形成的原理, 随后, 欧洲学者进一步深入研究, 将焦点放在晶状体上, 认为它是图像形成的关键。尽管有少数学者支持视网膜是光感受器的理论, 但缺乏实证证据。直到17世纪早期, 席耐尔通过解剖动物眼睛, 观察到了物体在视网膜的倒置成像, 证明了视网膜是光感受器的观点, 并绘制了初步的眼球解剖图。此后, 学者们一直在利用模型眼探索光学成像原理。早期研究受到像差的影响, 计算过程复杂, 直到1841年高斯提出了近轴光学理论, 简化了光学分析过程, 从而

加速了模型眼的研究进程^[1]。

1.1 近轴模型眼 1844年, Moser 提出了第一个理论模型眼,但是该模型的折射率不正确,是远视眼模型。直到1851年, Listing 才设计出了历史上第一个模型眼, Listing 模型眼的缺点在于其折射面是旋转对称的而真实人眼在视轴与光轴之间通常存在生理性夹角^[4],并且在 Listing 模型眼中,并未考虑到晶状体是一不均匀折射率的光学介质这一特点。1920年, Tsherning^[5]首次测量出角膜后表面,并提出了第一个包含角膜后表面的模型眼。

1911年,瑞典科学家 Gullstrand 在 Listing 模型眼的基础上设计出了包括六个折射球面的模型眼,即 Gullstrand 精密眼模型,该模型眼设计包含晶状体的不规则折射率,同时 Gullstrand 还提出了一个简略模型眼,该模型眼只有一个折射面,简化了复杂的眼球结构,侧重于研究光在眼内的传播。1945年, Le Grand 将 Gullstrand 模型眼四个折射面均设置为球面,同时晶状体的折射率分布也简化成均匀分布即 Le Grand 精密模型眼。1948年 Emsley 提出了一个以 Gullstrand 简易眼模型为基础的模型眼,该模型眼只有一个折射面,被称 Gullstrand-Emsley 模型眼^[1]。

由于旋转对称的球形表面,视轴与光轴重合等特点,上述模型眼都属于近轴模型眼,对于离轴物体、小瞳孔、大视场的视觉质量评估有一定局限性。所以为了提高评估的准确性,学者们提出了宽视场模型眼的概念。

1.2 宽视场模型眼 1851年, Navarro 等^[6]提出了角膜前表面、晶状体前后表面用圆锥曲面系数表示的非球面的人眼调节依赖型模型,在2006年又提出了个性化眼模型的建立方法^[7];1971年 Lotmar^[8]提出了一个具有七层结构的晶状体模型;1980年 Blaker^[9]提出 Gullstrand 模型眼眼轴长度超过平均水平呈现远视状态,基于此 Blaker 将眼轴缩短并提出了一种梯度折射率结构的晶状体模型;1983年 Kooijman^[10]在 Gullstrand-LeGrand 模型眼的基础上提出了一个分析视网膜照度的模型眼;1999年, Escudero-Sanz 等^[11]提出了基于解剖数据的宽视场模型眼。

1.3 临床应用模型眼 1997年, Liou 等^[12]提出了一种基于解剖数据的眼模型。该模型由四个非球面折射面和一个梯度折射率晶状体组成,并考虑了人眼视轴与光轴不重合的情况,在视轴和光轴之间增加了一个5°的倾斜角,是目前为止在光学和物理学上最符合真实人眼屈光系统的模型眼^[13],该模型也是现在应用最为广泛的模型眼。

2004年, Siedlecki 等^[14]提出了一种具有非球面结构和径向变化折射率晶状体的模型眼,该模型能在显著提高视网膜成像质量的同时降低球差,可以较好应用于设计眼内植入。2006年, Atchison^[15]基于光线追踪梯度折射率物体的复杂性,把人眼晶状体视为具有恒定折射率的壳结构,并提出了近视模型眼。

近年来不断有学者提出不同类型的模型眼。Li 等^[16]提出了一种新的晶状体模型用于预测6-15岁儿童晶状体的年龄相关性变化,该研究强调了构建类生理结构模型眼对视觉研究的重要性。Tabernero 等^[17]通过测量角膜几何形状、轴向距离和中心光学质量建立模型以预测眼睛的外周光学质量。

模型眼的选择对于体外视觉质量评估至关重要。随着计算机和人工智能技术的发展,未来模型眼的设计应趋于个性化和精确化,以便更好的模拟光学系统和视觉过程,从而获得更准确的评估结果。现有的模型眼都是近似

人眼模型,各光学折射面参数是基于人眼内参数的平均值,不能完全适用所有个体,并且,不同种族、性别具有不同的眼球参数,晶状体厚度、眼轴长度、前房深度也会随着年龄增长发生相应改变^[18]。在实际应用中,为了提升准确度,需要进行个性化调整。

2 模型眼评估优势及相关光学分析软件

2.1 模型眼评估的优势

2.1.1 复合光源的应用 临床常用检查设备光源设置多为单光源^[19],模型眼可以配合不同波长或光源组合形成的复合光源,可以结合多个参数进行更全面的评估,并更接近自然光状态下的视觉质量,有效减少检查误差并增加检查结果的准确性。

2.1.2 结合光学分析软件 目前,光学生物测量仪、超声生物显微镜、眼前节光学相干断层扫描仪(AS-OCT)、iTrace 像差分析仪^[20-22]等仪器已经广泛应用于发现眼内异常改变、各类眼科手术术前评估等。但是检查结果会因为光源的明暗度、瞳孔直径、屈光介质、操作者主观因素的影响而出现误差^[23-24],并且上述检查对于术后患者的视觉质量并不能实时体现,应用模型眼可以实现连续重复监测,动态评估视觉质量变化,同时模型眼是非侵入性的检测方法,减少了患者主观因素对检查结果的影响。

同时,模型眼可以联合光线追踪(Ray-Trace)及AI技术对术眼进行参数计算,获得个性化手术设计方案。合理应用模型眼可以预测术后视觉质量,探讨视觉质量影响因素,辅助医生进行疾病诊断和手术方案的制定,提高患者术后视觉质量。

2.2 光学分析软件 光学分析软件经过数十年的发展,目前应用较多的软件包括 Zemax、Code-V、Light Tools、OSLO 等。在光学分析软件中,建立眼模型,根据研究目的更改相关眼球参数,模拟光学传播情况,并导出 Zernike 多项式、调制传递函数、点列图等分析视觉质量^[25]。在应用时,针对不同研究方向所需要的分析功能、设备、操作人员等因素,各个软件有不同的特点与优势,适宜的选择可以获得最佳评估结果。

2.2.1 Zemax Zemax 光学分析软件现已被广泛用于人眼屈光系统成像质量的评估^[26]。Zemax 可以通过光线追踪进行光学系统的仿真、优化,通过照明模拟进行光学性能、电子元件、透镜优化等功能。

Zemax 界面直观,易于操作,可以快速建立及调整光学系统,并对光学系统实时评估,进行相关研究。Zemax 是目前应用最广泛的光学分析软件,在 Zemax 中可以直接评估人工晶状体光学性能并评估植入后视觉质量,同时, Zemax 有广泛的光学元件库,可以评估不同材料镜片的成像性质^[27-28]。

由于建立模型眼的便利性和客观性,模型眼能够发现潜在的视觉质量影响因素以改善手术效果, Labuz 等^[29]通过建模发现渐进式散光矫正性人工晶状体可减少术后残余散光,提高视觉质量。Yuan 等^[30]在研究中发现了在白内障手术前考虑个性化的 Kappa 角的重要性。在 Zemax 中计算晶状体度数^[31]并带入人工晶状体数据以预测术后视觉质量,有助于提前了解术后视觉效果。此外,在 Zemax 中可以导入检查仪器数据,联合应用探讨角膜以及视网膜疾病引起的视觉质量改变,讨论进一步治疗方案。

2.2.2 Code-V Code-V 是成像设计软件,在医学、物理、机械各个领域应用广泛,在医疗仪器、军事技术等领域都

做出了重大的贡献,该软件可以进行成像系统的设计、分析、优化,继而进行产品开发、模拟实验等。

Code-V 的功能包括光束传播分析、独特的人工智能玻璃库、图形功能如 3D 可视化和基于衍射的图像模拟、快速二维图像模拟可视化光学系统等,并且 Code-V 可以和 Light Tools 联合使用,将光学图像传递至 Light Tools 进行鬼像、照明、杂散光分析等,可以有效减少光线追踪时间,提高工作效率。Code-V 可以进行各类复杂成像系统设计,在各类显微镜头和眼镜设计中,研究人员通过 Code-V 软件可以验证推导公式并评估相关设计。Zangoulos 等^[32]利用软件探讨针对老年人的视网膜成像仪器的最佳成像参数,改善检查效果,减少误差。Chen 等^[33]结合 Code-V 和 ASAP 通过函数进行优化,设计了一个基于生物统计学的人眼模型,并利用该模型生成了白内障的失能眩光曲线,该模型在探讨眩光光源下的视觉性能有一定优势。Code-V 目前多用于镜头和透镜设计,结合其强大的优化功能,如果能用于人工晶状体、镜片优化、手术方案优化,将利于术后视觉质量改善,发现更多治疗方案。

2.2.3 Light Tools

Light Tools 有独特的照明系统设计功能,可用于照明工程和光学元件设计,也擅长光学系统的精确模拟和分析。Light Tools 功能包括 3D 实体建模、从任何几何模型创建光源,并模拟现实世界条件如散射、折射、材料效果等,并且能够与 Code-V 和 SOLIDWORKS 交互式、动态链接优化光学系统。

Light Tools 的照明设计可用于任何照明环境模拟,适用于探讨不良光学现象的产生条件,避免了临床中的其他干扰因素以及不同患者主观感受差异的影响,Kawamorita 等^[34]利用 Light Tools 软件,建立 Liou-Brennan 模型眼并更改晶状体参数,探讨人工晶状体屈光度与屈光障碍等光学现象的关系,通过模拟发现较低折射率的人工晶状体可以减少不良光学现象的发生。该软件目前在眼科学方面的应用较少,如果能利用该软件在杂散光、照明方面的优势,模拟现实环境下眼球成像质量,则利于人工晶状体、眼镜等的优化以及探讨不良光学现象的产生因素。

2.2.4 OSLO

OSLO (Optics Software for Layout and Optimization) 是一套处理光学系统布局和优化的光学设计软件,集设计、分析、优化为一体,被广泛用于镜头、透镜设计,并确定光学系统中光学元件的大小与外型以及激光、照明系统等光学设计。OSLO 强调交互式光学设计,对于分析优化、界面设计应用更加灵活,并且该软件包含独特的 CCL 编程语言,能够显著提高优化效率。

OSLO 操作具有很强灵活性,允许用户自定义各种光学系统的性质,包括光学元件的特性和形状等。在研究方面,Lacort 等^[35]使用 OSLO 设计了三种非球面人工晶状体,这些人工晶状体具有不同的球面像差(SA),并分析了人工晶状体翻转和错位对光学质量的影响。Pérez-Gracia 等^[36]研究发现,与球面人工晶状体相比,非球面人工晶状体对偏心或倾斜更为敏感,对于负球差较大的人工晶状体设计而言,人工晶状体的偏心会引起成像质量的下降。此外,Schmucker 等^[37]利用 OSLO 结合动物实验建立了小鼠的模型眼,以探讨小鼠在生长过程中视觉功能的发展,研究认为小鼠模型有望成为研究近视防控以及遗传等方面的重要模型。由于 OSLO 的优化性能和应用广泛性,可以探讨 OSLO 在不规则眼表、非球面人工晶状体设计、角膜疾病等方面的应用。

3 模型眼结合光学分析软件在眼科学中的应用领域

3.1 模型眼在近视防控的应用

近视是一种常见的眼部疾病^[38],近年来,在患病率不断上升的同时患者年龄呈现日益低龄化趋势,对于儿童患者如果不及时矫正和治疗近视,随着年龄增长近视程度逐渐加深,可能导致黄斑病变、视网膜脱离,最终造成视力的严重损害,并带来生活和工作的不便利^[39]。目前,框架眼镜^[40]、软性角膜接触镜^[41]、角膜塑形镜等方法可以有效延缓近视进展。此外,飞秒激光技术、有晶状体眼人工晶状体植入术等^[42]治疗方法的出现也可以改善近视人群的生活质量。随着近年来近视人群增多,对于眼镜等近视防控手段的要求也逐渐增高,利用模型眼可以对近视患者戴镜前后的视觉进行定量分析,客观反映治疗之后的视觉质量改变,以便更好的优化相关产品^[27]。

目前模型眼多用于评估眼镜材质以及设计对视觉质量的影响以便更好优化设计。有研究显示,不同材料的隐形眼镜会产生像差并降低视觉质量,Alshakhli 等^[28]基于此观点探讨了硅胶隐形眼镜对屈光不正患者的视觉质量影响。Shaker 等^[43]探讨了掺杂不同二氧化钛纳米粒子(TiO₂ NPs)含量隐形眼镜的视觉质量分析。Ji 等^[44]探讨了单焦点和多焦点软性隐形眼镜对屈光不正患者的视觉质量的影响,发现双焦软性隐形眼镜对周边屈光不正诱导近视偏移的影响相对较小,但显著增加了焦深。利用模型眼评估戴镜后的视觉质量,可以减少像差和光学畸形并提升治疗后的视觉质量,将有助于延缓学龄期儿童的近视进展,并减少远期并发症的发生。

3.2 模型眼在角膜疾病的应用

模型眼可以模拟不同的形状、曲率、屈光度的角膜,用于研究部分角膜疾病的发病机制以及角膜形态异常改变对视觉质量和光学成像的影响,此外,模型眼还可以用于协助疾病诊断、角膜手术的规划,模拟手术前后的视觉效果以评估手术疗效,进而改善手术效果。通过比较患者眼球参数以及标准值,模型眼有助于协助诊断相关疾病,尤其适用于圆锥角膜等角膜形态异常的疾病。

圆锥角膜是一种角膜呈圆锥样凸起伴凸起区域角膜基质进行性变薄,最终导致视力下降并明显影响患者生活质量的疾病^[45]。虽然角膜地形图是诊断圆锥角膜的常见方法,但是对于疾病的早期诊断以及角膜形态异常引起的眼球光学性能改变并不能明确的体现,利用模型眼联合 Pentacam 评估视觉质量有助于探索疾病引起的角膜病理改变以及相应的成像异常^[46]。Miret 等^[47]探讨了圆锥角膜合并白内障患者中确定患眼的角膜和人工晶状体屈光力的方法。Velarde-Rodriguez 等^[48]利用一种新型超高分辨率设备(T-eyede)结合 Zemax 分析圆锥角膜患者的像差,该设备能表现各阶段圆锥角膜患者波前像差的微小变化,该发现可以提高筛查或随访的检出率。

3.3 模型眼在白内障的应用

白内障超声乳化吸除术和人工晶状体植入是治疗白内障的主要方法,并且目前的白内障手术不仅是恢复视觉功能,还要保证提高视觉质量以改善患者的生活质量^[49]。白内障术后获得良好视觉质量的关键是合适的人工晶状体设计、精确计算人工晶状体屈光力、术后稳定的人工晶状体位置^[50-53],有研究^[20]发现当人工晶状体倾斜大于 7°或偏心大于 0.4 mm 会增加像差,从而造成成像质量下降,所以模拟人工晶状体在眼球内的位置有助于发现视觉质量的影响因素,给临床疾病诊疗带

来启示,并促进人工晶状体的设计和相关手术方法的优化。

模型眼现在常用于评估、预测白内障术后人工晶状体位置并探讨人工晶状体稳定性对视觉的影响^[54-55]。Tokuhisa等^[56]研究了巩膜固定术后晶状体的倾斜情况,发现人工晶状体倾斜超过 10° 会引起屈光不正。模型眼也可用于协助选择人工晶状体度数并优化人工晶状体设计^[57],探讨人工晶状体稳定性有利于改善人工晶体设计,以及发现潜在的视觉质量影响因素。Al-Hamdani等^[58]评估了几种多焦点人工晶状体的术后视觉质量,根据实验结果提出了改进意见。Omidi团队^[59]的研究发现磨砂边缘的人工晶状体可降低光线对视觉的干扰。Furlan等^[60]提出的一种全新的衍射三焦点人工晶状体能够改善中等距离的视觉质量。

模型眼进行体外评估的方法仍然存在改进之处,如何在模型眼中体现晶状体的梯度折射率仍是建立模型眼过程中不断探讨的重点。

4 总结与展望

随着计算机技术的发展,模型眼在眼科学领域展现出了巨大的研究潜力,过去,临床对视觉质量的评估主要依赖于问卷、双通道视觉质量分析系统(OQAS)、iTrace像差分析仪等检查设备^[61-62]。模型眼结合光学分析软件的体外评估方法能够减少以往使用方法所限导致的各种主观检查误差,有助于更准确的评估眼科手术后的视觉质量,该方法已在白内障、角膜疾病、近视防控等疾病中体现出重要的诊疗价值。然而模型眼的应用也存在一定局限性,模型眼的简化可能导致与真实眼球光学行为存在差异,其评估结果与临床对比的一致性还需要更多临床数据进行比较验证^[63]。同时,眼球结构会随着时间、环境、个体差异等变化出现改变,如何更准确地模拟眼球的动态差异和个体差异仍是一个挑战^[64]。

随着光学技术和人工智能等新兴领域的发展,与之联合应用,模型眼及其体外评估软件的应用范围也将进一步拓展。未来要进一步探索模型眼在临床应用中的潜力,使基于模型眼的体外评估能够更加合理地应用于眼科临床实践中。

参考文献

- [1] Atchison DA, Thibos LN. Optical models of the human eye. *Clin Exp Optom*, 2016,99(2):99-106.
- [2] Jaimes-Nájera A. Modified Poisson-Gauss Single-Function to Describe the GRIN of the Human Lens. *J Phys: Conf Ser*, 2023, 2448(1):012012.
- [3] Debowy F, Pierscionek B. A comparative analysis of the influence of refractive error on image acuity using three eye models. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2024,44(1):182-190.
- [4] Snead MP, Hardman Lea S, Rubinstein MP, et al. Determination of the nodal point position in the pseudophakic eye. *Ophthalmic Physiol Opt*, 1991,11(2):105-108.
- [5] Tsherning M. *Physiologic Optics*. Philadelphia: The Keystone Publishing Company, 1920.
- [6] Navarro R, Santamaría J, Bescós J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics. *J Opt Soc Am A*, 1985,2(8):1273-1281.
- [7] Navarro R, González L, Hernández-Matamoros JL. On the prediction of optical aberrations by personalized eye models. *Optom Vis Sci*, 2006,83(6):371-381.
- [8] Lotmar W. Theoretical Eye Model with Aspherics. *J Opt Soc Am*,

1971,61:1522-1529.

- [9] Blaker JW. Toward an adaptive model of the human eye. *J Opt Soc Am*, 1980,70(2):220-223.
- [10] Kooijman AC. Light distribution on the retina of a wide-angle theoretical eye. *J Opt Soc Am*, 1983,73(11):1544-1550.
- [11] Escudero-Sanz I, Navarro R. Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 1999,16(8):1881-1891.
- [12] Liou HL, Brennan NA. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 1997,14(8):1684-1695.
- [13] de Almeida MS, Carvalho LA. Different schematic eyes and their accuracy to the *in vivo* eye: a quantitative comparison study. *Braz J Phys*, 2007,37(2a):378-387.
- [14] Siedlecki D, Kasprzak H, Pierscionek BK. Schematic eye with a gradient-index lens and aspheric surfaces. *Opt Lett*, 2004,29(11):1197-1199.
- [15] Atchison DA. Optical models for human myopic eyes. *Vision Res*, 2006,46(14):2236-2250.
- [16] Li Q, Fang F. Physiology-like crystalline lens modelling for children. *Opt Express*, 2020,28(18):27155-27180.
- [17] Taberero J, Kallamata E, Velonias G, et al. Individualized modeling for the peripheral optics of the human myopic eye. *Biomed Opt Express*, 2023,14(6):2726-2735.
- [18] Zvorničanin E, Vatavek Z, Popović M, et al. Gender- and Age-Related Differences of Ocular Biometric Parameters in Patients Undergoing Cataract Surgery in Bosnia and Herzegovina. *J Ophthalmology*, 2023,2023:1-8.
- [19] Benito A, Pérez GM, Mirabet S, et al. Objective optical assessment of tear-film quality dynamics in normal and mildly symptomatic dry eyes. *J Cataract Refract Surg*, 2011,37(8):1481-1487.
- [20] Chen X, Song Q, Yan W, et al. Evaluation of Multimodal Biometric Parameters for Diagnosing Acute Angle Closure Secondary to Lens Subluxation. *Ophthalmol Ther*, 2023,12(2):839-851.
- [21] Gu X, Chen X, Yang G, et al. Determinants of intraocular lens tilt and decentration after cataract surgery. *Ann Transl Med*, 2020,8(15):921.
- [22] Calzetti G, Bellucci C, Tedesco SA, et al. Tilt and decentration of posterior and anterior iris-claw intraocular lenses: a pilot study using anterior segment optical coherence tomography. *BMC Ophthalmol*, 2022,22(1):233.
- [23] 张晓山, 王萍, 李帅飞, 等. Pentacam 三维眼前节分析仪与 iTrace 视觉分析仪测量近视眼 Kappa 角的一致性分析. *眼科学报*, 2023,38(6):449-453.
- [24] 潘玉苗, 吴尚操, 杨万举, 等. Pentacam HR 和 RTVue OCT 测量圆锥角膜的角膜厚度及最薄点位置的比较. *国际眼科杂志*, 2023,23(6):1012-1016.
- [25] Liang SS, Li XY, Kang JJ, et al. Design and simulation of an ultra-wide field optical coherence tomography retinal imaging system. *Photonics*, 2021,8(11):476.
- [26] Ding XQ, Tan JZ, Meng J, et al. Time-serial evaluation of the development and treatment of myopia in mice eyes using OCT and ZEMAX. *Diagnostics*, 2023,13(3):379.
- [27] Wu QY, Tang YH, Chen XY, et al. Method for evaluating ophthalmic lens based on Eye-Lens-Object optical system. *Opt Express*, 2019,27(26):37274-37285.

- [28] Alshakhli ZS, Hekmat WA. Simultaneous correction of primary aberrations through wearing silicone hydrogel contact lens. *Opt Quantum Electron*, 2023,55(7):654.
- [29] Łabuz G, Varadi D, Khoramnia R, et al. Progressive-toric IOL design reduces residual astigmatism with increasing pupil size: a ray-tracing simulation based on corneal topography data. *Biomed Opt Express*, 2021,12(3):1568-1576.
- [30] Yuan B, Li J, Song H. Effect of misalignment at different orientations associated with angle κ on optical performance of aspheric intraocular lenses with different surface designs. *Appl Opt*, 2021,60(20):5917-5924.
- [31] Jin H, Rabsilber T, Ehmer A, et al. Comparison of ray-tracing method and thin-lens formula in intraocular lens power calculations. *J Cataract Refract Surg*, 2009,35(4):650-662.
- [32] Zangoules J, Campbell MCW. Optimal pupil size in older adults for retinal imaging. *2020 Photonics North*, 2020;1-1.
- [33] Chen YC, Jiang CJ, Yang TH, et al. Development of a human eye model incorporated with intraocular scattering for visual performance assessment. *J Biomed Opt*, 2012,17(7):075009.
- [34] Kawamorita T, Handa T, Shoji N. Relationship between intraocular lens refractive index and illuminance distribution on retina in off-axis incident light: simulation study of illumination optics. *Opt Rev*, 2022,29:487-491.
- [35] Lacort M, Pérez-Gracia J, Ares J, et al. Optical quality variation of different intraocular lens designs in a model eye: lens placed correctly and in an upside-down position. *Ophthalmic Res*, 2023,66(1):757-766.
- [36] Pérez-Gracia J, Varea A, Ares J, et al. Evaluation of the optical performance for aspheric intraocular lenses in relation with tilt and decenter errors. *PLoS One*, 2020,15(5):e0232546.
- [37] Schmucker C, Schaeffel F. A paraxial schematic eye model for the growing C57BL/6 mouse. *Vision Res*, 2004,44(16):1857-1867.
- [38] Tapasztó B, Fliteroft DI, Aclimandos WA, et al. Myopia management algorithm. Annex to the article titled Update and guidance on management of myopia. European Society of Ophthalmology in cooperation with International Myopia Institute. *Eur J Ophthalmol*, 2024,34(4):952-966.
- [39] Jonas JB, Ang M, Cho P, et al. IMI prevention of myopia and its progression. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2021,62(5):6.
- [40] Liu X, Wang P, Xie Z, et al. One-year myopia control efficacy of cylindrical annular refractive element spectacle lenses. *Acta Ophthalmol*, 2023,101(6):651-657.
- [41] Morgan PB, Sulley AL. Challenges to the new soft contact lens wearer and strategies for clinical management. *Contact Lens Anterior Eye*, 2023,46(3):101827.
- [42] Du H, Zhang B, Wang Z, et al. Quality of vision after myopic refractive surgeries: SMILE, FS-LASIK, and ICL. *BMC Ophthalmol*, 2023,23(1):291.
- [43] Shaker LM, Al-Amieri AA, Kadhum AAH, et al. Manufacture of contact lens of nanoparticle-doped polymer complemented with ZEMAX. *Nanomaterials*, 2020,10(10):2028.
- [44] Ji QZ, Yoo YS, Alam H, et al. Through-focus optical characteristics of monofocal and bifocal soft contact lenses across the peripheral visual field. *Ophthalmic Physiol Opt*, 2018,38(3):326-336.
- [45] Unni P, Lee HJ. Systemic associations with keratoconus. *Life (Basel)*, 2023,13(6):1363.
- [46] Tan B, Baker K, Chen YL, et al. How keratoconus influences optical performance of the eye. *J Vis*, 2008,8(2):13.
- [47] Miret JJ, Camps VJ, García C, et al. New method to improve the quality of vision in cataractous keratoconus eyes. *Sci Rep*, 2020,10(1):20049.
- [48] Velarde-Rodríguez G, Belda-Para C, Velasco-Ocaña M, et al. Ultra-High Resolution Optical Aberrometry in Patients with Keratoconus: A Cross-Sectional Study. *Ophthalmol Ther*, 2023,12(3):1569-1582.
- [49] Imburgia A, Gaudenzi F, Mularoni K, et al. Comparison of clinical performance and subjective outcomes between two diffractive trifocal intraocular lenses (IOLs) and one monofocal IOL in bilateral cataract surgery. *Front Biosci*, 2022,27(2):41.
- [50] Langenbucher A, Szentmáry N, Cayless A, et al. Prediction of IOL decentration, tilt and axial position using anterior segment OCT data. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2024,262(3):835-846.
- [51] Borkenstein AF, Borkenstein EM, Luedtke H, et al. Impact of decentration and tilt on spherical, aberration correcting, and specific aspherical intraocular lenses: an optical bench analysis. *Ophthalmic Res*, 2022,65(4):425-436.
- [52] Pérez-Merino P, Aramberri J, Quintero AV, et al. Ray tracing optimization: a new method for intraocular lens power calculation in regular and irregular corneas. *Sci Rep*, 2023,13(1):4555.
- [53] Lawu T, Mukai K, Matsushima H, et al. Effects of decentration and tilt on the optical performance of 6 aspheric intraocular lens designs in a model eye. *J Cataract Refract Surg*, 2019,45(5):662-668.
- [54] Can E, Senel EC, Holmström STS, et al. Comparison of the optical behaviour of five different multifocal diffractive intraocular lenses in a model eye. *Sci Rep*, 2023,13:19646.
- [55] Park CH, Moon K, Kim JH, et al. Contribution factors of effective lens position, tilt, and decentration during flanged scleral fixation of intraocular lens: a model eye study. *Retina*, 2024,44(2):324-332.
- [56] Tokuhisa T, Watanabe T, Watanabe A, et al. Refractive error induced by intraocular lens tilt after intrascleral intraocular lens fixation. *Int Ophthalmol*, 2022,42(4):1213-1220.
- [57] Das KK, Werner L, Collins S, et al. In vitro and schematic model eye assessment of glare or positive Dysphotopsia-type photic phenomena: comparison of a new material IOL to other monofocal IOLs. *J Cataract Refract Surg*, 2019,45(2):219-227.
- [58] Al-Hamdani AH, Rashid HG, Hashim HT, et al. Optimum design of the hybrid (diffractive/refractive) multifocal intraocular lenses implanted within human eye. *Kuwait Journal of Science*, 2020,48(1).
- [59] Omid P, Cayless A, Langenbucher A. EDOF intraocular lens design: shift in image plane vs object vergence. *BMC Ophthalmol*, 2023,23(1):397.
- [60] Furlan WD, Martínez-Espert A, Montagud-Martínez D, et al. Optical performance of a new design of a trifocal intraocular lens based on the Devil's diffractive lens. *Biomed Opt Express*, 2023,14(5):2365-2374.
- [61] 张帆, 陈彦辰, 巫雷, 等. 双眼单焦点与多焦点人工晶状体混搭植入术后视觉质量评估. *国际眼科杂志*, 2022,22(8):1262-1266.
- [62] 唐玉玲, 钱玖林, 廖萱, 等. 非球面人工晶状体植入术后偏心 and 倾斜与视觉质量的相关性研究. *国际眼科杂志*, 2022,22(10):1621-1624.
- [63] Oltrup T, Bende T, Al-Mohamedi H, et al. Comparison of spherical and aspherical intraocular lenses with decentration and tilt error using a physical model of human contrast vision and an image quality metric. *Z Med Phys*, 2021,31(3):316-326.
- [64] 潘若琳, 廖萱, 兰长骏. 体外光学质量测试系统对 IOL 光学质量评估应用的研究进展. *中华实验眼科杂志*, 2024,42(3):290-296.