

文章编号: 1005-5630(2020)04-0047-09

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.04.008

三种年龄相关性人眼模型的成像质量比较研究

阳 婷^{1,2,3}, 徐晓立^{1,2,3}, 张学典^{1,2,3}, 李 峰^{1,2,3}, 江旻珊^{1,2,3}

- (1. 上海理工大学上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;
2. 上海理工大学教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093;
3. 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 利用 Zemax 软件建立了 Navarro, Atchison 和 Zapata-Díaz 三种年龄相关性人眼模型的光学系统, 评估并比较了各模型眼在不同年龄及不同调节状态下的成像质量。模拟了入瞳直径分别为 3 mm 和 5 mm 时, 各模型眼在年龄为 20~60 岁时的成像质量, 以及 Navarro 和 Zapata-Díaz 模型眼在 0.5~2 D 范围内的调节。结果表明, 三种模型眼的成像质量均随年龄的增长或者入瞳直径的增加而变差, Atchison 模型眼在不同年龄下的成像质量更好, 且较符合临床实际, Navarro 模型眼在调节过程中具有更好的成像质量。研究结果可为视光学领域中年龄相关性人眼模型的选择提供参考。

关键词: 年龄相关性人眼模型; 入瞳直径(EPD); 调制传递函数; 调节; 光线追迹
中图分类号: R 778 **文献标志码:** A

Optical image quality comparison of three age-related human eye models

YANG Ting^{1,2,3}, XU Xiaoli^{1,2,3}, ZHANG Xuedian^{1,2,3}, LI Feng^{1,2,3}, JIANG Minshan^{1,2,3}

- (1. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System (MOE), University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Engineering Research Center of Optical Instrument and System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
3. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, we built the optical systems of three age-related human eye models, including the Navarro, the Atchison and the Zapata-Díaz models using the Zemax software, and analyzed the changes of image quality at different ages and different accommodation status. Simulations included retinal image quality evaluations at both 3 mm and 5 mm entrance pupil diameters (EPDs). Accommodation amplitudes ranging from 0.5 D to 2 D were measured in the Navarro and Zapata-Díaz models. Image quality worsens with age or EPD in all the age-related eye models. Besides of the good imaging quality, the Atchison model eye is also consistent with clinical

收稿日期: 2020-02-01

作者简介: 阳婷(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为视光学。E-mail: 705690166@qq.com

通信作者: 江旻珊(1983—), 女, 副教授, 研究方向为生物光学。E-mail: jiangmsc@gmail.com

results. Navarro model performs better during accommodation. The results of this study can be valuable for the eye model selection in the field of optometry.

Keywords: age-related human eye model; entrance pupil diameter (EPD); modulation transfer function; accommodation; ray tracing

引 言

人眼是由角膜、房水、晶状体、玻璃体及视网膜等物质组成的复合光学系统,其中每个物质表面都具有复杂的几何特征和光学特征^[1]。随着年龄的增长,眼睛的光学结构发生变化引起视力下降,最终导致视觉功能的衰退^[2]。

年龄相关性变化发生在人眼所有组织中,其中许多涉及到光学参数的变化^[3]。研究表明:随着年龄的增长,角膜前表面的曲率半径减小,非球面系数一般会减小^[4-5];角膜后表面的曲率半径减小,非球面系数减小^[6]。晶状体的前后表面曲率半径均随年龄的增长而减小^[7],其尺寸、形状、体积以及折射率分布随年龄也都有相当大的变化^[8]。此外,随着年龄的增长,由于晶状体及其囊膜弹性的下降,眼睛将逐渐失去调节能力^[9-10]。

多年来,人们开发了许多人眼光学模型来帮助 we 了解视网膜上图像的形成机理和特征^[11-12]。一些模型眼的参数值来源于临床数据(其平均值必须适应年龄、性别、种族、屈光不正和调节等因素)^[13-15],而另一些模型眼的参数值取自理论计算,或取自于相关研究的文献^[16-18]。Gullstrand 模型眼^[19]是一个早期的精确模型眼,该模型眼具有不同折射率的晶核和皮层组成的晶状体。Liou-Brennan 模型眼^[20]是一个解剖学上更为精确的模型眼,并且是第一个能够预测色差和球差的模型眼。但是这些模型眼还没有考虑到年龄及晶状体调节的变化。近年来,一些人眼随年龄变化相关的研究被提出,使得眼睛模型得到进一步扩展^[13]。

Zapata-Díaz 等提出了一种基于回顾性数据的平均模型眼^[3]。该模型综合了大多数随年龄和调节而发生的光学参数的变化,可以预测目标屈光和人眼调节。该模型是一种年龄相关性旋转对称模型眼,可以通过改变年龄来预测光学参数的

变化,通过改变屈光度来预测调节的变化。

Navarro 通过调整晶状体内部梯度折射率结构和光学表面曲率,提出了一种随年龄和调节变化的正视眼模型^[16]。模型中的大多数参数都是取自实验研究或以往的模型^[21-22]。

Atchison 等测量了年龄相关性正视眼的生物和光学参数,提出了一种基于解剖数据的年龄相关性人眼模型^[13]。研究结果表明,随着年龄的增长,前房深度、晶状体前表面曲率半径、晶状体等效折射率和等效屈光度都减小。相反,晶状体中心厚度、角膜前表面至晶状体长度、眼轴长以每年 0.01 mm 左右的速度增加,这反映了随年龄变化的屈光矫正模式。该模型是一种年龄相关性非调节模型。

为了给临床研究中年龄相关性人眼模型的正确选择提供参考,本文利用 Zemax 软件建立三种模型眼 Navarro、Atchison 和 Zapata-Díaz 的光学系统,用像质评价的方法评估并比较各模型眼在不同年龄及不同调节幅度下的成像质量。

1 人眼模型建模仿真

1.1 非调节模拟

三种模型均为年龄相关性模型眼,且模拟的是人眼 20~60 岁时的成像状态。Navarro 和 Zapata-Díaz 模型眼可以调节,当调节幅度为 0 D ($1\text{ D}=1\text{ m}^{-1}$)时,这两种模型眼与 Atchison 模型眼一样处于非调节状态。入瞳直径(EPD)设置为 3 mm 和 5 mm,选取与光轴平行的光为入射光,在 Zemax 软件中设置各物质表面曲率半径、前房深度、各表面之间距离和非球面系数等参数,所用波长为 587.6 nm。为便于比较,本文优化了三种人眼模型的玻璃体厚度以便在视网膜上获得清晰的图像。选用玻璃体厚度这个参数,是因为它是唯一可优化的参数。

球差是评价光学系统成像质量的一个重要参数。根据三阶理论^[10], 球差是由表面曲率半径和其非球面系数决定的。利用赛德尔系数(s_1)计算球差波前像差系数($w_{4,0}$)可得: $w_{4,0} = s_1/8$, 由于 $w_{4,0} = 6\sqrt{5}z_{4,0}$, 故 $z_{4,0} = s_1/(48\sqrt{5})$ ^[23]。以下球差均用 $z_{4,0}$ 表示。

1.2 调节模拟

三种模型眼中只有 Navarro 和 Zapata-Díaz 模型眼可调节, 在模拟调节时, 设置调节幅度为 0.5~2 D(相关物距变化为 2~0.5 m)。由于模型眼的成像质量在 20 岁时最好, 且随着年龄增长而变差, 所以本文模拟了这两种模型眼在

20 岁时的调节状态, 模拟过程中改变了物距、前房深度、晶状体厚度及晶状体曲率半径。Zhong 等利用超长扫描深度光学相干层析成像设备(OCT)完成调节时的全眼轴向生物测量^[24], 认为调节期间玻璃体厚度发生变化。Zoulinakis 等模拟了三种非年龄相关性人眼模型的调节, 为了比较各模型眼在调节后的成像质量, 他们优化了玻璃体厚度^[25]。基于这些方法, 本文在模拟人眼模型调节过程中也优化了玻璃体厚度。

调节期间各模型眼的前房深度减小, 晶状体的厚度增加且前后表面曲率半径减小, 原参数变化如表 1 所示。

表 1 调节过程中各模型眼的参数变化
Tab. 1 The parameters changes in all models during accommodation

模型	前房深度/mm		晶状体厚度/mm		晶状体前表面曲率半径/mm		晶状体后表面曲率半径/mm	
	调节前	调节后	调节前	调节后	调节前	调节后	调节前	调节后
Navarro模型	3.650	3.590	3.426	3.498	11.049	9.799	-5.572	-5.379
Zapata-Díaz模型	3.076	3.016	3.426	3.498	11.314	10.159	-5.895	-5.708

2 模拟结果

2.1 非调节模拟

表 2 为各模型眼优化后玻璃体厚度的变化量, 由表中数据可知, 各模型眼优化后其玻璃体厚度增加, 且增加的量随着年龄的增长而增加。Atchison 模型眼在不同年龄下的增加量最小, 表明优化对该模型的影响最小。

表 2 各模型眼优化后玻璃体厚度的变化量
Tab. 2 The change of vitreous thickness of each model after optimization

年龄/岁	玻璃体厚度变化量/mm		
	Navarro模型	Atchison模型	Zapata-Díaz模型
20	0.05	0.04	0.06
40	0.09	0.07	0.11
60	0.14	0.10	0.14

我们用点列图和 MTF 曲线图来评估视网膜的成像质量。图 1 为 EPD 分别为 3 mm 和 5 mm 时, 各模型眼在不同年龄下的点列图, 图 2 为三

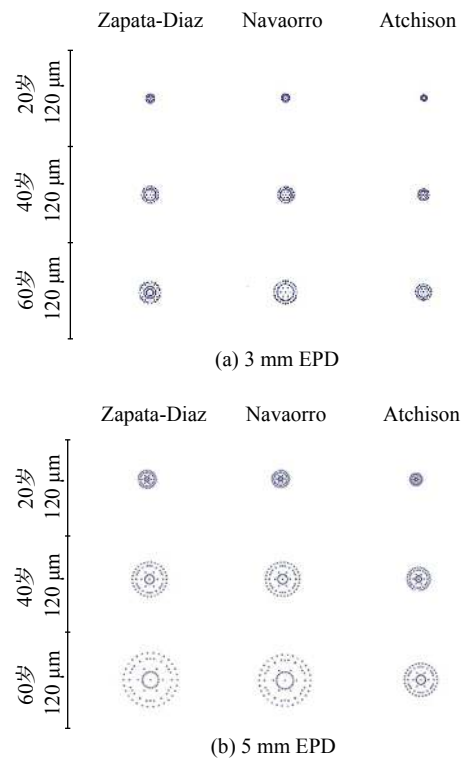


图 1 三种模型眼在不同年龄、不同入瞳直径下的点列图

Fig. 1 Spot diagrams for the three eye models at different ages and different EPDs

种模型眼在不同年龄、不同入瞳直径下的 MTF 图。由图 1 可见，所有模型眼的 RMS 半径均随年龄增长而增大，且 EPD 为 5 mm 时的 RMS 半径更大，Atchison 模型眼的 RMS 半径最小。类似的现象在图 2 中也很明显，所有模型眼的 MTF

曲线均随年龄增长而降低，EPD 为 5 mm 时的 MTF 曲线更低，Atchison 模型眼的 MTF 曲线最高。综合表明，成像质量随着年龄的增长或者 EPD 的增加而变差，三种模型眼中 Atchison 模型眼的成像质量最好。

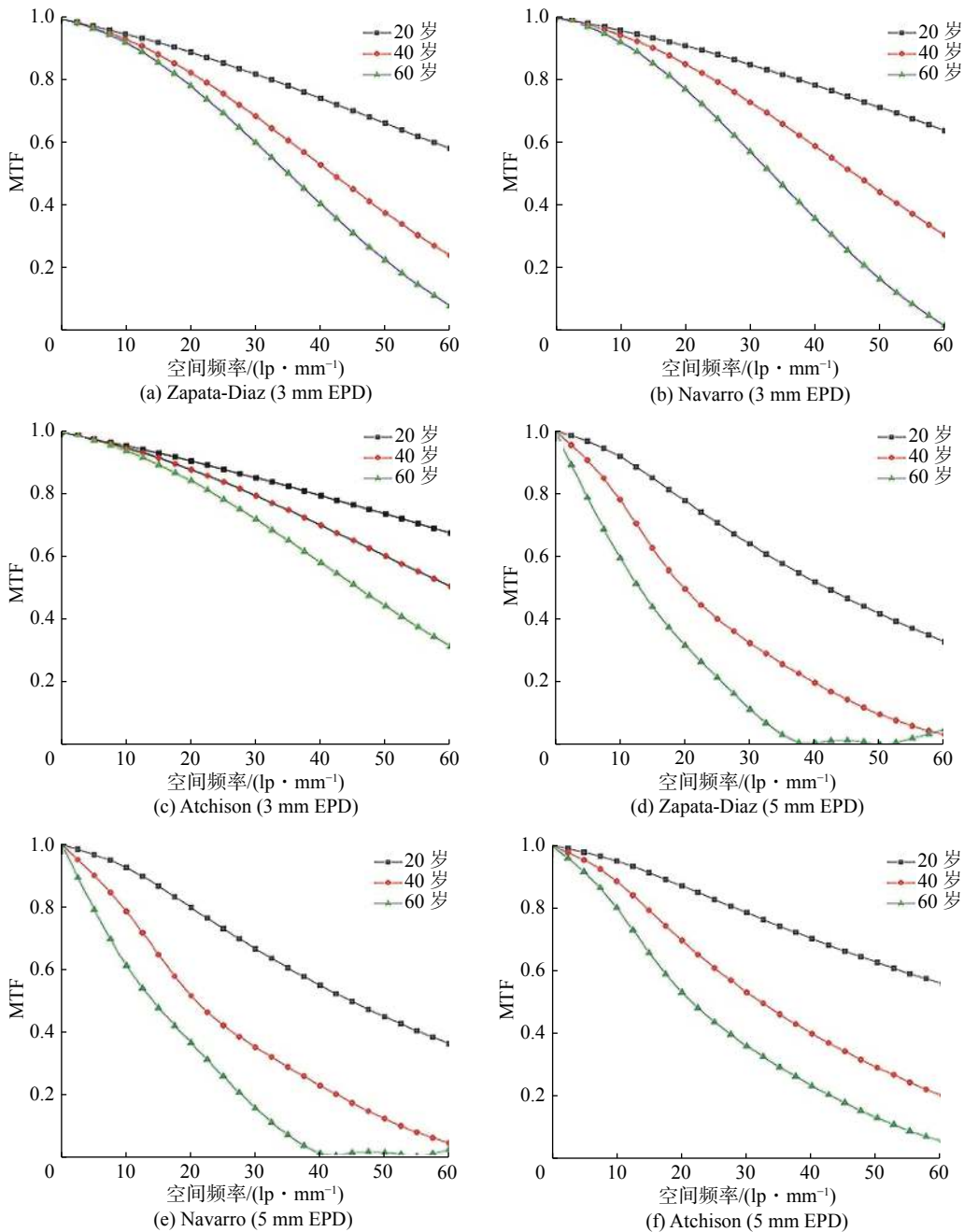


图 2 三种模型眼在不同年龄、不同入瞳直径下的 MTF 图

Fig. 2 MTF diagrams for the three eye models at different ages and different EPDs

球差是评价光学系统成像质量的一个重要参数，屈光度(1/焦距)表示系统的屈光能力。图 3

表示各模型眼在不同 EPD 下的球差(SA)和屈光度随年龄的变化，由图可见：三种模型眼的

球差($z_{4,0}$)均随年龄增长而增大, 且 EPD 为 5 mm 时的球差值更大, Atchison 模型眼的球差值最小; Atchison 和 Zapata-Diaz 模型眼的屈光度

随年龄增长而减小, Navarro 模型眼的屈光度随年龄增长而增加; EPD 的增加对屈光度的影响不大。

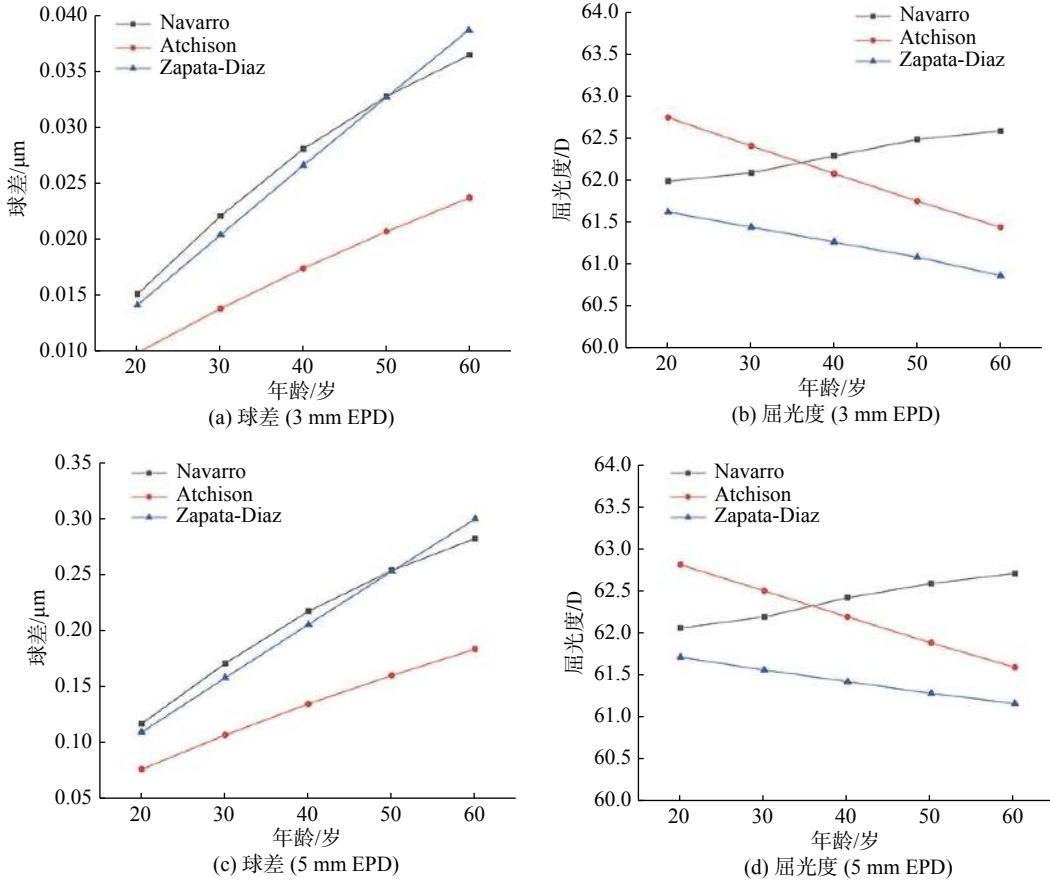


图 3 三种模型眼不同入瞳直径下的球差(SA)和屈光度随年龄的变化

Fig. 3 Changes of SA and power vs age for the three eye models at different EPDs

2.2 调节模拟

表 3 表示各模型眼优化后玻璃体厚度的变化量, 由表中数据可知, 优化后各模型眼玻璃体厚度增加, 且不同调节幅度下的增加量接近。

表 3 调节期间各模型眼优化后玻璃体厚度的变化量
 Tab. 3 The change of vitreous thickness after optimization of each model during accommodation

模型	玻璃体厚度变化量/mm			
	0.5 D	1.0 D	1.5 D	2.0 D
Navarro模型	0.05	0.04	0.04	0.03
Zapata-Diaz模型	0.05	0.05	0.05	0.03

图 4 显示了 EPD 为 3 mm 时, 两种模型眼的点列图随调节的变化, 由图可见, 两种模型眼的光斑半径均随调节幅度的增加而减小, 且

Navarro 模型眼的光斑半径更小。图 5 为各模型眼在不同调节下的 MTF 曲线, 从图上也可看出类似的趋势, 与 Zapata-Diaz 模型眼相比, Navarro 模型眼的 MTF 曲线更高。图 6 为各模型眼在不同调节下的球差和屈光度的变化, 由图看出, 随着调节幅度的增加, 两种模型眼的球差减小, 屈光度增大。

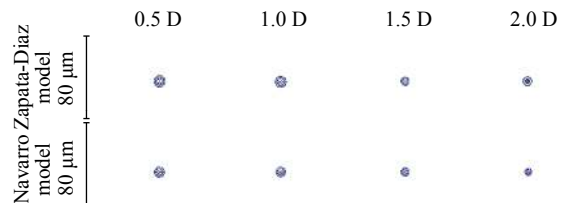


图 4 各模型眼调节下的点列图

Fig. 4 Spot diagrams for the two eye models with accommodation

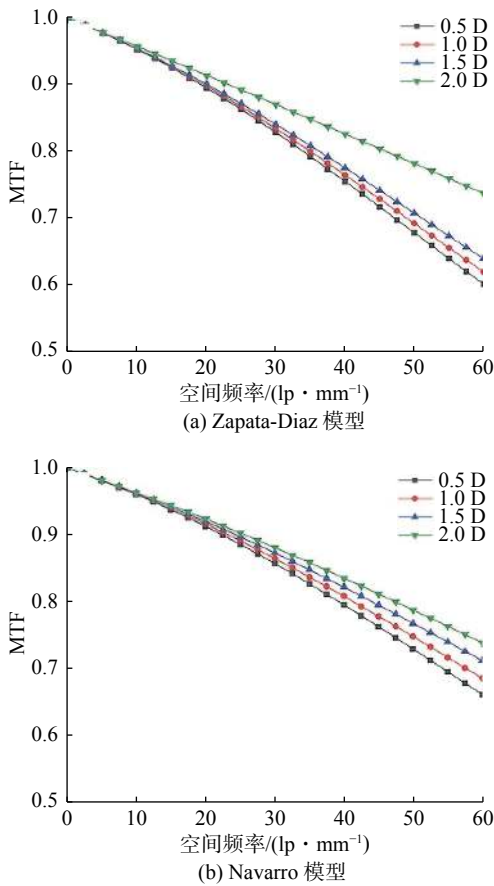


图 5 各模型眼调节下的 MTF 图

Fig. 5 MTF diagrams for the two eye models with accommodation

3 分析和讨论

Gambra 等用三维 OCT 定量评价了晶状体的调节, 发现在 0~6 D 调节范围内, 晶状体前后表面曲率半径的变化率分别为-0.73 mm/D 和 -0.20 mm/D, 前房深度和晶状体厚度的变化率分别为-0.057 mm/D 和 0.081 mm/D^[26]。对于晶状体前后表面曲率半径变化率, 在 0~8 D 调节范围内, Rosales 等报道的分别是-0.57 mm/D 和 -0.29 mm/D^[27], Garner 等报道的分别是-0.62 mm/D 和-0.17 mm/D^[28]。对于前房深度和晶状体厚度变化率, 在文献中报道的主要有: 0~4 D 调节范围内变化率分别为-0.019 mm/D 和 0.058 mm/D^[29]; 0~5 D 调节范围内变化率分别为-0.062 mm/D 和 0.066 mm/D^[30]; 0~8 D 调节范围内分别为-0.037 mm/D 和 0.045 mm/D^[31]。综合以上数据

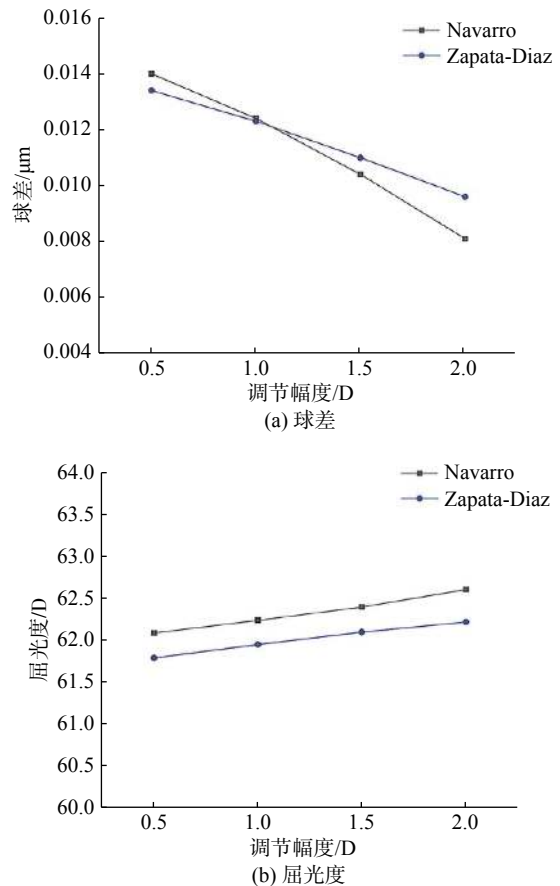


图 6 各模型眼调节下的球差和屈光度变化

Fig. 6 Changes of SA and power vs age for the two eye models with accommodation

分析可知, 调节期间晶状体前后表面曲率半径和前房深度均减小, 晶状体厚度增加, 本文模型眼在调节过程中的参数变化趋势和上述报道的一致。

本文同时研究了年龄增加导致的临床人眼在不同年龄段的斯特列尔比(SR)变化率^[32], 并将其与三种模型眼的 SR 变化率进行了对比, 如表 4 所示。SR 变化率反映了眼睛的成像质量随年龄的变化程度。由表 4 可知: 各模型眼的 SR 值均随年龄的增加而减小, 表明其成像质量随年龄增加而变差; Atchison 模型眼在不同年龄段的 SR 变化率最为接近临床数据, 表明 Atchison 模型眼的成像情况更为符合临床实际。

由于角膜非球面系数的年龄相关性变化, 角膜的球差随着年龄的增长呈小幅度增加的趋势^[5]。Zapata-Díaz 模型眼中角膜前后表面的非球面系数随年龄增长均有轻微变化, Navarro 模型

表4 年龄增加导致的各模型眼和临床人眼在不同年龄段的SR变化率

Tab. 4 The SR change rate of each model and clinical eye at different ages caused by the increase of age

年龄/岁	SR变化率/%			
	Navarro 模型	Atchison 模型	Zapata-Diaz 模型	真实人眼
20~40	-26.1	-23.3	-48.8	-19.2
40~60	-29.4	-24.2	-52.4	-23.8

眼中只有角膜前表面的非球面系数随年龄变化, Atchison 模型眼中只有角膜后表面的非球面系数随年龄变化。对于所有模型眼, 角膜非球面系数上的年龄相关性变化是相似的, 在任何情况下都不足以充分证明眼睛的球差总变化。

人眼晶状体在减小眼睛像差上起着非常重要的作用^[33], 其球差随着年龄的增长而增加。晶状体的球差有两个主要的年龄相关性趋势: 一个是 Salmon 等提出的晶状体球差和年龄的多项式关系^[34], 即 $y=0.000\ 045\ x^2-0.002\ 038\ x+0.064\ 08$, 其中 x 为年龄, y 为球差; 另一个是 Sheil 等提出的, 他们认为晶状体表面非球面系数随年龄的增加, 会导致晶状体球差的增加, 且晶状体前表面非球面系数增加率为+0.03/年, 后表面非球面系数增加率为+0.02/年^[35]。图7为不同模型眼球差随年龄的变化曲线, 由图可见, 本文模拟的模型眼结果和他们的非常接近。随着年龄的增长, 眼睛的体积越来越大, 作用在弹性囊袋上的拉伸力也越来越大, 从而导致非球面系数随年龄的增长而增加。虽然这种变化没有达到统计学上的显著性, 但随着年龄增长, 球差仍呈上升趋势。

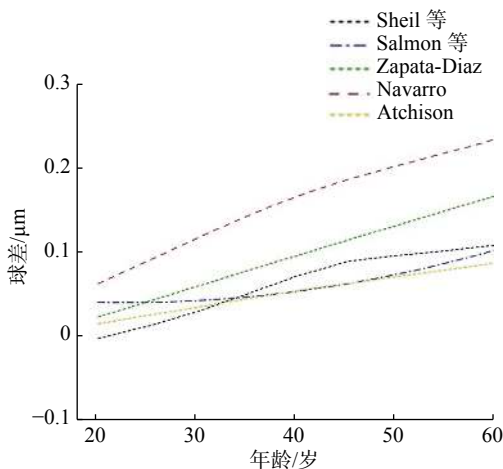


图7 5 mm 瞳孔直径下球差(SA)随年龄的变化

Fig. 7 SA vs age with 5 mm pupil diameter

在人眼调节期间, 球差是泽尼克多项式中变化最大的项^[36-38]。Cheng 等记录了三个调节水平下的 Shack-Hartmann 波前传感图像, 并计算了 EPD 超过 5 mm 时的波像差, 发现球差随着调节幅度的增加而减小^[38]。本文 Navarro 和 Zapata-Diaz 模型眼的球差也都随调节幅度的增加而减小, 这一变化趋势与调节期间球差的下降趋势吻合。

本文模型眼中用到的参数取自于临床数据, 或取自于有临床数据的模型眼。考虑到样本的区域和数量限制, 现提出的模型眼中的参数并不完全一致。对于真实的眼睛, 角度(光轴和视觉轴之间的角度)和瞳孔去中心化也会影响图像质量的计算。角度降低了中心系统的调制灵敏度, 特别是在低空间频率下, 但瞳孔向同一方向的分散抵消了部分影响。要模拟真实人眼, 就必须考虑到它的复杂性, 需要输入更多的数据。

4 结 论

通过分析三种人眼模型的成像质量, 可以得出以下结论: Atchison 模型眼在不同年龄下的成像质量最好, 且随年龄增长而变差, 其 SR 变化率在两个年龄段分别降低 23.3% 和 24.2%, 结果符合临床实际, 更适合模拟人眼的年龄相关性变化; Navarro 模型眼在不同调节幅度下的成像质量更好, 更适合模拟人眼调节。本文对模拟眼的研究结果可为眼科临床医学和眼镜更优设计提供参考。

参考文献:

- [1] ATCHISON D A, THIBOS L N. Optical models of the human eye[J]. *Clinical and Experimental Optometry*, 2016, 99(2): 99 – 106.
- [2] WHITAKER D, ELLIOTT D B. Simulating age-related

- optical changes in the human eye[J]. *Documenta Ophthalmologica*, 1992, 82(4): 307 – 316.
- [3] ZAPATA-DÍAZ J F, RADHAKRISHNAN H, CHARMAN W N, et al. Accommodation and age-dependent eye model based on in vivo measurements[J]. *Journal of Optometry*, 2019, 12(1): 3 – 13.
- [4] HAYASHI K, HAYASHI H, HAYASHI F. Topographic analysis of the changes in corneal shape due to aging[J]. *Cornea*, 1995, 14(5): 527 – 532.
- [5] DUBBELMAN M, SICAM V A D P, VAN DER HEIJDE G L. The shape of the anterior and posterior surface of the aging human cornea[J]. *Vision Research*, 2006, 46(6/7): 993 – 1001.
- [6] LAM A K C, DOUTHWAITE W A. Measurement of posterior corneal asphericity on Hong Kong Chinese: a pilot study[J]. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 1997, 17(4): 348 – 356.
- [7] DUBBELMAN M, VAN DER HEIJDE G L. The shape of the aging human lens: curvature, equivalent refractive index and the lens paradox[J]. *Vision Research*, 2001, 41(14): 1867 – 1877.
- [8] BAHRAMI M, HEIDARI A, PIERSCIONEK B K. Alteration in refractive index profile during accommodation based on mechanical modelling[J]. *Biomedical Optics Express*, 2016, 7(1): 99 – 110.
- [9] GIOVANZANA S, EVANS T, PIERSCIONEK B. Lens internal curvature effects on age-related eye model and lens paradox[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(11): 4827 – 4837.
- [10] SHEIL C J, BAHRAMI M, GONCHAROV A V. An analytical method for predicting the geometrical and optical properties of the human lens under accommodation[J]. *Biomedical Optics Express*, 2014, 5(5): 1649 – 1663.
- [11] POLANS J, JAEKEN B, MCNABB R P, et al. Wide-field optical model of the human eye with asymmetrically tilted and decentered lens that reproduces measured ocular aberrations[J]. *Optica*, 2015, 2(2): 124 – 134.
- [12] OOMMEN V, KANTHAKUMAR P. A simple model of the accommodating lens of the human eye[J]. *Advances in Physiology Education*, 2014, 38(2): 183 – 184.
- [13] ATCHISON D A, MARKWELL E L, KASTHURIRANGAN S, et al. Age-related changes in optical and biometric characteristics of emmetropic eyes[J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(4): 29.1 – 20.
- [14] GONCHAROV A V, DAINTY C. Wide-field schematic eye models with gradient-index lens[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(8): 2157 – 2174.
- [15] RICHDALE K, BULLIMORE M, SINNOTT L, et al. The effect of age, accommodation, and refractive error on the adult human eye[J]. *Optometry and Vision Science*, 2016, 93(1): 3 – 11.
- [16] NAVARRO R. Adaptive model of the aging emmetropic eye and its changes with accommodation[J]. *Journal of Vision*, 2014, 14(13): 21.
- [17] GOLDBERG D B. Computer-animated model of accommodation and presbyopia[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2015, 41(2): 437 – 445.
- [18] QIU C, HEILMAN B M, KAIPIO J, et al. Fully automated laser ray tracing system to measure changes in the crystalline lens GRIN profile[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(11): 4947 – 4964.
- [19] GULLSTRAND A. Appendix II and IV. von helmholtz' handbuch der physiologischen optik[M]. London: Voss, 1909: 382 – 415.
- [20] LIOU H L, BRENNAN N A. Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(8): 1684 – 1695.
- [21] NAVARRO R, SANTAMARÍA J, BESCÓS J. Accommodation-dependent model of the human eye with aspherics[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1985, 2(8): 1273 – 1280.
- [22] NAVARRO R. The optical design of the human eye: a critical review[J]. *Journal of Optometry*, 2009, 2(1): 3 – 18.
- [23] BAHRAMI M, GONCHAROV A V. Geometry-invariant gradient refractive index lens: analytical ray tracing[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2012, 17(5): 055001.
- [24] ZHONG J G, TAO A Z, XU Z, et al. Whole eye axial biometry during accommodation using ultra-long scan depth optical coherence tomography[J]. *American Journal of Ophthalmology*, 2014, 157(5): 1064 – 1069.
- [25] ZOULINAKIS G, ESTEVE-TABOADA J J, FERRER-BLASCO T, et al. Accommodation in human eye models: a comparison between the optical designs of Navarro, Arizona and Liou-Brennan[J]. *International Journal of Ophthalmology*, 2017, 10(1): 43 – 50.
- [26] GAMBRA E, ORTIZ S, PEREZ-MERINO P, et al. Static and dynamic crystalline lens accommodation

- evaluated using quantitative 3-D OCT[J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4(9): 1595 – 1609.
- [27] ROSALES P, DUBBELMAN M, MARCOS S, et al. Crystalline lens radii of curvature from Purkinje and Scheimpflug imaging[J]. *Journal of Vision*, 2006, 6(10): 1057 – 1067.
- [28] GARNER L F, YAP M K. Changes in ocular dimensions and refraction with accommodation[J]. *Ophthalmic Physiological Optics*, 1997, 17(1): 12 – 17.
- [29] RUGGERI M, UHLHORN S R, DE FREITAS C, et al. Imaging and full-length biometry of the eye during accommodation using spectral domain OCT with an optical switch[J]. *Biomedical Optics Express*, 2012, 3(7): 1506 – 1520.
- [30] KASTHURIRANGAN S, MARKWELL E L, ATCHISON D A, et al. MRI study of the changes in crystalline lens shape with accommodation and aging in humans[J]. *Journal of Vision*, 2011, 11(3): 204 – 210.
- [31] DUBBELMAN M, VAN DER HEIJDE G L, WEEBER H A. Change in shape of the aging human crystalline lens with accommodation[J]. *Vision Research*, 2005, 45(1): 117 – 132.
- [32] 俞阿勇, 施恩, 王勤美, 等. 不同年龄段成年人眼的综合光学质量客观评估 [J]. *中华眼科杂志*, 2016, 52(1): 47 – 50.
- [33] ARTAL P, GUIRAO A. Contributions of the cornea and the lens to the aberrations of the human eye[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(21): 1713 – 1715.
- [34] SALMON T O, VAN DE POL C V. Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors[J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2006, 32(12): 2064 – 2074.
- [35] SHEIL C J, GONCHAROV A V. Crystalline lens paradoxes revisited: significance of age-related restructuring of the GRIN[J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(9): 4172 – 4180.
- [36] GEORGE S, PHILLIP B, ROSS A, et al. Exploring ocular aberrations with a schematic human eye model[J]. *Optometry and Vision Science*, 2008, 85(5): 330 – 340.
- [37] NINOMIYA S, FUJIKADO T, KURODA T, et al. Changes of ocular aberration with accommodation[J]. *American Journal of Ophthalmology*, 2002, 134(6): 924 – 926.
- [38] CHENG H, BARNETT J K, VILUPURU A S, et al. A population study on changes in wave aberrations with accommodation[J]. *Journal of Vision*, 2004, 4(4): 272 – 280.

(编辑: 刘铁英)