

人眼高阶像差与年龄的关系及左右眼对称性研究

肖巴伊, 张振平, 王 铮, 杨 斌, 邱 平, 郑丹莹, 陈伟蓉

中山大学中山眼科中心, 广东 广州 510060

摘 要:【目的】研究人眼高阶像差(higher-order aberration, HOA)随年龄增长的变化规律以及 HOA 在左右眼的对称性。【方法】用一基于 Hartmann-Shack 原理的 Zywave 波前像差仪测量了 35 例正常人 69 眼的 HOA, 评估时所取的瞳孔直径为 6 mm。根据测试对象年龄的不同分为 3 组: 青年组 (< 35 岁), 中年组 (35 岁~54 岁), 老年组 (> 54 岁), 计算各组高阶像差的均方根 (root mean square, RMS) 值, 并对 3 组进行单因素方差分析, 对 HOA 与年龄作相关分析, 研究高阶像差随年龄的变化规律; 同时对左右眼各 Zernike 系数作相关分析, 以研究高阶像差在左右眼的对称性。【结果】总体高阶像差 (HOA)、球差、三阶与四阶像差与年龄均有相关关系 ($P < 0.05$), 彗差与五阶像差与年龄的关联性不大 ($P > 0.05$); 左右眼的 15 项 Zernike 系数中有 8 项存在关联性 ($P < 0.05$)。【结论】高阶像差随年龄的增长而增加, 左右眼的高阶像差存在一定程度的对称性。

关键词: 高阶像差; 年龄; 对称性; 眼/生理学

中图分类号: R77

文献标识码: A

文章编号: 1672-3554(2005)01-0099-04

Changes of Ocular Higher-order Aberration with Age and Symmetry Between Right and Left Eyes

XIAO Ba-yi, ZHANG Zhen-ping, WANG Zheng, YANG Bin, QIU Ping,
ZHENG Dan-ying, CHEN Wei-rong

(Zhongshan Ophthalmic Center, SUN Yat-sen University, Guangzhou 510060, China)

Abstract: 【Objective】To explore the changes of higher-order aberration (HOA) with age, and to evaluate the symmetry of the aberrations between right and left eyes. 【Methods】Higher-order aberration of 69 normal eyes (35 persons) were examined across a 6.0 mm pupil using Zywave which based on the theory of Hartmann-Shack. All subjects were divided into three groups according their age: youth group (age < 35 years); middle-aged adults (age 35 - 45 years); old adults (age > 54 years). The root mean square (RMS) values of higher-order aberrations of the three groups were calculated and univariate analysis of variance was performed. The association between ocular HOA and age was analyzed, as well as the aberration symmetry between right and left eyes using Zernike terms. 【Results】Higher-order aberrations, spherical aberration (SA), the third-order aberrations, and the forth-order aberrations were associated with age ($P < 0.05$); but coma and the fifth-order aberrations were not associated with age ($P > 0.05$). Eight of the fifteen Zernike terms were significantly correlated between right and left eyes ($P < 0.05$). 【Conclusion】Higher-order aberration, especially spherical aberration increased with age. A moderate degree of mirror symmetry existed between right and left eyes.

Key word: higher-order aberrations; age; symmetry; eyes/physiology

[J SUN Yat-sen Univ (Med Sci), 2005,26(1):99-102, 118]

收稿日期: 2004-07-29

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (021824)

作者简介: 肖巴伊 (1978-), 男, 湖南株洲人, 硕士; 张振平, 教授, 博士生导师, 通讯作者, E-mail: Zhenpinz@hotmail.com

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

随着波前像差仪在眼科中的运用,我们对人眼屈光性能的认识不再局限于低阶像差即离焦和规则散光,更多影响人眼视功能的高阶像差也可被测量到,并通过各种途径给与适当矫正。高阶像差指三阶(球差、三叶草)和三阶以上的像差(彗差、四叶草、二级散光等等)。目前,国内关于高阶像差与年龄的关系及其在人左右眼中分布特征的研究罕有报道,我们希望通过此项研究能对国内正常人眼的高阶像差与年龄的变化关系以及高阶像差在左右眼的分布特征有所了解,为屈光性手术的设计提供一定参考。

1 资料与方法

1.1 研究对象

随机选取不同年龄段的正常成年人 35 例(19 岁~74 岁),按年龄分为三组:年轻组(< 35 岁),12 人(24 眼);中年组(35 岁~54 岁),12 人(24 眼);老年组(> 54 岁),11 人(21 眼)。所有受检查眼均排除一切影响视功能的器质性疾病和活动性炎症,且最佳矫正视力均大于 1.0。

1.2 检查方法

检查仪器为 Bausch & Lomb 公司的 Zywave 波前像差仪,基于 Hartmann-Shack 原理:一笔形小直径光束经校准后射入人眼,在视网膜上聚焦为一点,从该点反射出眼的光线被一与出瞳平面共轨的微透镜矩阵聚焦为一点矩阵,被位于透镜焦点处的照相机摄取,根据实际点矩阵与理想点矩阵的偏移推算人眼的像差情况。测量在暗环境下进行,用新福林眼液扩瞳,使测量时的瞳孔直径均保证在 7 mm 以上,每眼测 3 次,取 3 次测量中对位最准确和点矩阵最完整的一次为被检查眼的结果。

1.3 统计学方法

对青、中、老年 3 组的高阶像差均方根值(Root Mean Square, RMS)作单因素方差分析,认为 3 组的差别有统计学意义后对高阶像差的 RMS 值与年龄做相关分析和回归分析,分析其关联性;对左右眼的各 Zernike 系数分别做相关分析和回归分析,分析其关联性。数据分析均采用 SPSS10.0 统计软件包,所有检验水准 $\alpha=0.05$ 。

2 结果

2.1 高阶像差与年龄的关系

不同年龄组的球差(spherical aberration, SA)、彗差(COMA)、总体高阶像差(higher order aberrations, HOA)、三阶(Z_3)、四阶(Z_4)和五阶(Z_5)像差的均方根值(root mean square, RMS)见表 1。从表中可以看出,总体高阶像差、球差和彗差随着年龄的增长有逐渐增加的趋势,由年轻组到老年组,球差增加至 2.02 倍,彗差增加至 1.21 倍,HOA 增加至 1.44 倍,在年轻组,高阶像差中占主要地位的是彗差(球差 vs 彗差:41.8% vs 63.7%),而老年组占主要地位的变为球差(球差 vs 彗差:58.7% vs 53.4%)。单因素方差分析的结果:总体高阶像差、球差、四阶像差在 3 组间比较具有非常显著差异($P < 0.001$)。其中,总体高阶像差和球差与年龄的相关性有非常显著的统计学意义($\kappa = 0.502, P < 0.001; r = 0.506, P < 0.001$) (图 1);三阶(Z_3)、四阶(Z_4)像差与年龄有相关性($\kappa = 0.277, P = 0.021; r = 0.519, P = 0.000$);而彗差和五阶(Z_5)像差与年龄的相关无统计学意义($\kappa = 0.136, P = 0.265; r = 0.130, P = 0.286$)。

表 1 3 个年龄组的高阶像差 RMS

Table 1 Root mean square of higher-order aberrations in three different age groups ($\bar{x} \pm s$, microns)

Groups	Age	SA	Coma	HOA	Z_3	Z_4	Z_5
Youth	25.9 $\pm$ 4.8	0.159 $\pm$ 0.104	0.242 $\pm$ 0.102	0.380 $\pm$ 0.114	0.307 $\pm$ 0.104	0.196 $\pm$ 0.093	0.073 $\pm$ 0.025
Middle-aged	45.3 $\pm$ 6.6	0.297 $\pm$ 0.149	0.284 $\pm$ 0.135	0.497 $\pm$ 0.148	0.354 $\pm$ 0.112	0.322 $\pm$ 0.142	0.069 $\pm$ 0.030
Old	64.5 $\pm$ 5.8	0.321 $\pm$ 0.117	0.292 $\pm$ 0.143	0.547 $\pm$ 0.128	0.389 $\pm$ 0.151	0.352 $\pm$ 0.114	0.064 $\pm$ 0.032
P		0.000	0.363	0.000	0.087	0.000	0.584

SA: spherical aberration; HOA: ocular higher-order aberration; Z_3 : the third order aberration; Z_4 : the fourth order aberration; Z_5 : the fifth order aberration; P value: by analysis of variance

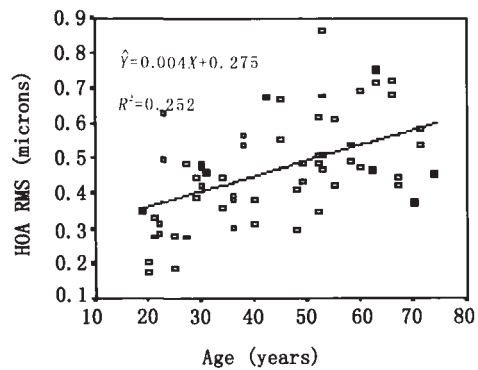


图 1 总体高阶像差 RMS 与年龄的散点图

Fig.1 Scattergram of HOA RMS versus age ($r=0.502, P=0.000$)

2.2 左右眼的对称性分析

分析 34 例 68 眼的对称性,发现总体高阶像差、球差、彗差 RMS 在左右眼中均有显著的关联性 ($t=0.801, 0.919, 0.496$, respectively; all $P<0.005$) (图 2)。如表 2 所示,15 项 Zernike 系数中有 8 项在左右眼有一定关联 ($P<0.05$),其中,最显著的是 Z_4^0 、 Z_4^2 和 Z_5^5 ($P<0.001$);接下来依次为 Z_3^{-3} ($P=0.001$)、 Z_3^{-1} ($P=0.002$)、 Z_4^4 ($P=0.008$)、 Z_3^3 ($P=0.009$)、 Z_5^{-1} ($P=0.010$)。三阶 (Z_3)、四阶 (Z_4)像差中各有 3 项,五阶 (Z_5)像差中有 2 项 Zernike 系数在

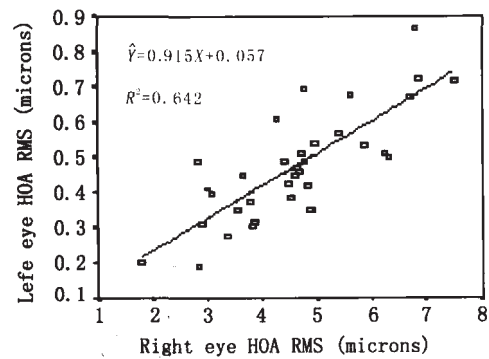


图 2 左右眼总体高阶像差 RMS 的散点图

Fig.2 Scattergram of HOA RMS

Right eye versus left eye ($r=0.801, P=0.001$)

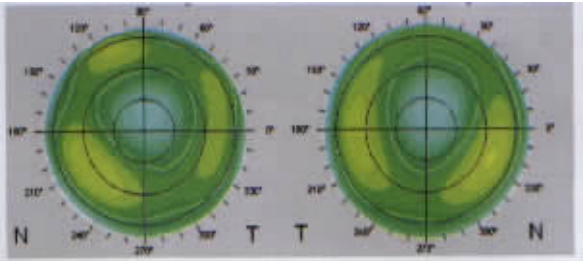


图 3 双眼高阶像差图

Fig.3 Higher-order aberration map of a typical subject

Male, 36 years old; left eye vs right eye

左右眼中存在镜面对称关系。一典型双眼高阶像差图如图 3,可显见左右眼存在中等程度的对称。

表 2 34 例双眼各 Zernike 项的相关分析

Table 2 Correlation coefficients of each Zernike term between right and left eyes

Zernike terms	Correlation coefficient	<i>P</i>
Z_3^{-1}	0.514	0.002
Z_3^1	-0.211	0.232
Z_3^{-3}	0.527	0.001
Z_3^3	-0.442	0.009
Z_4^0	0.941	0.000
Z_4^{-2}	-0.291	0.095
Z_4^2	0.579	0.000
Z_4^{-4}	-0.112	0.530
Z_4^4	0.444	0.008
Z_5^{-1}	0.434	0.010
Z_5^1	-0.187	0.290
Z_5^{-3}	0.127	0.474
Z_5^3	0.298	0.087
Z_5^{-5}	0.157	0.375
Z_5^5	0.573	

3 讨 论

人眼像差 (ocular wavefront aberration, OWA) 通常被描述为视网膜上点光源发出的光波相对于理想平面波的偏移,OWA 提供了人眼单色光成像能力的信息,在视网膜成像中扮演着非常重要的角色^[1]。像差分为低阶像差 (离焦和散光)和高阶像差。以往屈光不正的矫正只是着眼于矫正前者,而忽略了后者,实际上随着前者的被矫正,后者对视网膜成像的影响变得更明显,尤其是晚上瞳孔散大时。随着波前技术的引入,我们可以进一步观察人眼高阶像差细小而微妙的变化,了解其随年龄变化的规律和特点;同时,我们还可以对同一个体左右眼高阶像差的对称性进行分析。

3.1 高阶像差和年龄的关系

角膜和晶状体是人眼屈光系统最重要的光学介质,因此,人眼像差主要来自角膜和晶状体的缺陷:首先,角膜和晶状体表面不理想,存在局部偏差;其次,角膜与晶状体不同轴;再次,角膜和晶状体的内含物不均匀,折射率有局部偏差,从而使经过偏差部位的光线偏离了理想光路,以致物体上一点在视网膜的对应点不是一个理想的点,而是

一个发散的光斑。随着年龄的增加,正常人眼在没有任何眼病如白内障、青光眼和黄斑变性等疾病干扰的情况下也会有对比敏感度等视功能指标的下降,从光学角度考虑,主要与人眼的散射和像差增加有关。近来,随着波前技术的运用,愈来愈多的研究表明年龄-像差-视功能 3 者之间有密切联系^[2]。以往的探索表明在人眼高阶像差中的主要成分是三阶和四阶像差,在本研究中瞳孔直径为 6 mm 时,比较突出的高阶像差也是三、四阶像差,且均与年龄有相关性;五阶像差与年龄的相关关系无统计学意义。其中,总体高阶像差和球差随着年龄的增长而增加,结果具有非常显著的意义 ($P < 0.001$),彗差与年龄则无明显相关 ($P = 0.265$)。这说明在高阶像差中,随着年龄的增长,主要是球差的增大使眼的总体高阶像差增加,使人眼的视觉质量越来越差。单因素方差分析的结果也证明了这一点,只有球差、总体高阶像差、四阶像差在 3 组间比较有显著意义,因为四阶像差主要包括球差和四叶草,我们可以考虑这 3 者的变化均由球差的变化引起。随着年龄的增长,人眼以球差为主的高阶像差为什么会增大? Mark 等^[2]认为人眼像差测量结合角膜地形图检查结果证明正常扁平角膜终生都会产生正球差,晶状体中央介质屈光指数较高,且其平凸形结构与角膜的球形前凸相抵,使周边光线聚焦在近轴光线之后,产生负球差,刚好抵消了一部分角膜源性正球差。随着年龄的增长,晶状体悬韧带的老化和代谢产物的堆积使晶状体的表面形状和成分发生变化,球差朝正球差方向发展,逐渐不能弥补角膜等产生的正球差,角膜和晶状体之间的像差平衡被打破,全眼的球差增加,从而导致总体高阶像差增大^[3]。2002 年,Artal 等^[4]的研究表明,从 20 岁至 70 岁,人眼的整体像差增加了 3 倍以上,而球面像差的增大是其主要原因。了解了晶状体球差的特点和它与角膜等的相互作用,可通过人工晶状体的设计,减少白内障术后人眼的球差。目前已有报道,Tecnis9000 (Pharmacia) 晶状体前表面的非球面设计有助于抵消部分角膜源性球差,以减少眼的总体高阶像差^[5]。

3.2 左右眼像差的对称性

为了分析左右眼像差的对称情况,我们将全部右眼总体高阶像差、球差和彗差 RMS 和左眼的相应值做散点图,并计算其相关系数(离焦和散光

除外),结果 3 者均有相关关系 ($P < 0.005$),提示了双眼的像差存在着一定程度的相关关系。同时,我们发现所有的左右眼高阶像差图均存在不同程度的对称(图 3)。为了进一步分析左右眼高阶像差的对称性,我们将所有右眼 Zernike 系数与左眼的相应值做相关分析,结果发现左眼像差项的 53.3%(8/15)与右眼的相应像差项有着相关关系 ($P < 0.05$),主要集中在三阶和四阶中,但 Z_3^1 、 Z_4^{-2} 和 Z_4^{-4} 除外,以四阶中的球差 Z_4^0 关系最为密切 ($r = 0.941$, $P = 0.000$)。Zernike 多项式是建立在以圆形瞳孔为几何基础上的正交函数序列,在各项 Zernike 系数中,Wyatt^[6]曾发现人眼瞳孔形状存在左右对称性,这可能与人脸面的左右对称有关,由此及彼,左右眼的角膜和晶状体等屈光介质均有可能存在对称性,故双眼的像差大部分也会倾向于对称分布。正的相关系数说明两眼像差朝同一方向变化,而负的相关系数代表两眼像差朝相反方向变化,因为角坐标 (φ)180° 的旋转会使 Zernike 多项式中依赖 $\cos(n+1)\varphi$ 和 $\sin(n\varphi)$ 的 Zernike 系数符号有所改变,使得它们所对应的相关为一负相关关系,这些系数是: Z_3^1 、 Z_3^3 、 Z_4^{-4} 、 Z_4^{-2} 、 Z_5^1 、 Z_5^3 和 Z_5^5 ^[7]。从表 2 中,我们知道,当瞳孔直径为 6 mm 时,除 Z_5^3 和 Z_5^5 外,7 项系数中的其余系数确实如预期的一样呈负相关,而 Z_5^3 的相关系数非常小,即便将置信水平降至小于 0.05,相关系数仍无统计学意义。仅 Z_5^5 项的结果有所不同,其原因尚需加大样本量继续深入探讨。余 Zernike 系数均如预期的一样,呈正相关关系。高阶像差是屈光介质好坏的一个很敏感的指标,在一眼的屈光介质存在某种改变时,双眼高阶像差的对称性也将受影响,故左右眼高阶像差的差异有时可作为眼病理改变的一个早期参考指标,如圆锥角膜、早期白内障等。此外,在手术设计时,双眼高阶像差的对称性亦有一定的参考价值。

本研究通过对正常眼高阶像差与年龄的相关性及左右眼高阶像差的对称性进行分析,得出结论:正常人眼的高阶像差随着年龄的增长而增加,以球差的增加为主;高阶像差的成分也会发生改变,由以彗差为主变为以球差为主。这可以说明,随着年龄的增长,人眼的视觉质量下降主要与球差的增加有关,故在进行白内障手术时,可考虑采用能减少正球差的人工晶体。而左右眼高阶像差的对

(下转第 118 页 to page 118)

- 51.
- [3] Schneider SW. A comparison of canal preparations in straight and curved root canals [J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 1971, 32(2): 271-5.
- [4] 徐 琼,樊明文,范 兵.平衡力法预备弯曲根管的临床评价[J].牙体牙髓牙周病学杂志,2002,12(10):550-3.
- [5] Abou-Rass M, Jastrab RJ. The use of rotary instruments as auxiliary aids to root canal preparation of molars [J]. *J Endod*, 1982, 8(2): 78-82.
- [6] Imfeled TN. Prevalence and quality of endodontic treatment in elderly urban population of Switzerland [J]. *J Endod*, 1991, 17(10): 604-7.
- [7] Buchanan LS. Paradigm shifts in cleaning and shaping [J]. *Cal Dent Asso J*, 1991, 19(1): 23-6.
- [8] 韦 曦,凌均荣,张顺彬.镍钛机动预备器械根尖成形能力的研究[J].中山医科大学学报,2002, 23 (5): 126-8.
- [9] Ruddle CJ. The ProTaper endodontic system: geometries, features, and guidelines for use [J]. *Dent Today*, 2001, 20(10): 60-7.
- [10] Yun HH, Kim SK. A comparison of the shaping abilities of 4 nickel- titanium rotary instruments in simulated root canals [J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2003, 95(3): 228-33.
- [11] Sattapan B, Nervo GJ, Palamara J, *et al.* Defects in rotary nickel-titanium files after clinical use [J]. *J Endod*, 2000, 26(3):161-5.
- [12] Barbakow F, Lutz F. The Lightspeed preparation technique evaluated by Swiss clinicians after attending continuing education courses [J]. *Int Endod J*, 1997, 30(1): 46-50.
- [13] Yare GM, Bou Dagher FE, Machtou P. Failure of Profile instruments used with high and low torque motors [J]. *Int Endod J*, 2001, 34(6): 471-5.
- [14] Pruett JP, Clement DJ, Carnes DL. Cyclic fatigue testing of nickel-titanium endodontic instruments [J]. *J Endod*, 1997, 23(2): 77-85.
- [15] Peters OA, Peters CI, Schonenberger K, *et al.* ProTaper rotary root canal preparation: assessment of torque and force in relation to canal anatomy [J]. *Int Endod J*, 2003, 36(2): 93-9.

(编辑 刘清海)

(上接第 102 页 from page 102)

称性也为我们将高阶像差作为眼病诊断和手术设计的参考指标时提供一定参考。由于本研究的样本例数有限,故在各项分析上可能存在一定的偏倚,随着样本量的加大,各项相关研究的进一步深入,可望得到更准确的结果,为临床提供更多的参考。

参考文献:

- [1] Navarro R, Moreno E, Dorronsoro C. Monochromatic aberrations and point-spread functions of the human eye across the visual field [J]. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 1998, 15(9):2522-9.
- [2] Parker M, Fine IH, Hoffman RS. Functional vision, wavefront sensing, and cataract surgery [J]. *International Ophthalmol Clin*, 2003, 43(2):79-91.
- [3] Glasser A, Campbell MC. Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age [J]. *Vision Res*, 1998, 38(2):209-29.
- [4] Artal P, Berrio E, Guirao A. Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age[J]. *J Opt Soc Am A Opt image Sci Vis*, 2002, 19(1):137-43.
- [5] Kershner RM. Retinal image contrast and functional visual performance with aspheric, silicone, and acrylic intraocular lens. Prospective evaluation[J]. *J Cataract Refract Surg*, 2003, 29(3):1684-94.
- [6] Wyatt HJ. The form of the human pupil[J]. *Vision Res*, 1995, 35(14):2021-36.
- [7] Liang J, Williams DR. Aberrations and retinal image quality of the normal human eye[J]. *J Opt Soc Am A*, 1997, 14(11):2873-83.

(编辑 刘清海)