

# 眼组织生物力学的研究

蔡友欢<sup>1</sup>, 李海祥<sup>2</sup>, 刘太祥<sup>2</sup>, 许小英<sup>1</sup>, 应 晔<sup>1</sup>

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 81660169); 遵义市联合基金(No. fu120141260)

作者单位:<sup>1</sup>(563003) 中国贵州省遵义市, 遵义医学院;<sup>2</sup>(563003) 中国贵州省遵义市, 贵州省眼科医院

作者简介: 蔡友欢, 毕业于遵义医学院, 硕士研究生, 研究方向: 白内障、屈光学。

通讯作者: 李海祥, 主任医师, 研究方向: 白内障、屈光学。

Haixiang302@sohu.com

收稿日期: 2016-12-29 修回日期: 2017-03-29

## A review: biomechanics of ocular tissue

You-Huan Cai<sup>1</sup>, Hai-Xiang Li<sup>2</sup>, Tai-Xiang Liu<sup>2</sup>, Xiao-Ying Xu<sup>1</sup>, Ye Ying<sup>1</sup>

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 81660169); United Foundation of Zunyi (No. fu120141260)

<sup>1</sup>Zunyi Medical University, Zunyi 563003, Guizhou Province, China; <sup>2</sup>Department of Ophthalmology, Guizhou Eye Hospital, Zunyi 563003, Guizhou Province, China

Correspondence to: Hai-Xiang Li. Department of Ophthalmology, Guizhou Eye Hospital, Zunyi 563003, Guizhou Province, China.

Haixiang302@sohu.com

Received: 2016-12-29 Accepted: 2017-03-29

## Abstract

• Biomechanics is the application of mechanics to biological systems. It helped to provide more understanding of normal tissue function, the effect of pathology, and the impact of treatment. The biomechanics research also is an important method to understand the prevention, onset and treatment of eye diseases. Eye ball is a closed globe which undergoes pressure from intraocular or extraocular. The pathology of eye will affect its biomechanics. Recent years, several methods about biomechanics were used to study eye diseases, such as corneal collagen crosslinking for treatment of keratoconus and corneal ectasia, posterior sclera reinforcement for treatment of pathological myopia, and so on. Here we reviewed the biomechanical research of extraocular muscle, cornea, sclera, iris and lens.

• KEYWORDS: biomechanics; extraocular muscles; cornea; sclera; choroid; retina

Citation: Cai YH, Li HX, Liu TX, et al. A review: biomechanics of ocular tissue. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2017;17(5):869-872

## 摘要

生物力学是研究组织或器官的力量与功能之间关系的学科,对研究眼科疾病的预防、发生、发展、诊疗具有重要作用。眼球是一个封闭的近似球体的器官,眼球内外的每一组织都有一定张力,而且相互联系,互为影响。眼内外及球壁某一局部组织的改变,可能会影响眼球某一区域组织的生物力学或功能的改变。随着生物力学的方法增多,大家越来越重视对眼部组织生物力学的研究,达到预防和治疗眼部疾病的目的。如使用胶原交联增强角膜的强度,防治圆锥角膜或扩张性角膜疾病;又如后巩膜加固术增强巩膜力学的方法来治疗或预防高度近视等。对眼外肌、角膜、巩膜、虹膜、晶状体的生物力学的研究是目前热点,本文就目前眼部生物力学的研究热点做一综述。

关键词: 生物力学; 眼外肌; 角膜; 巩膜; 脉络膜; 视网膜

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2017.5.16

引用: 蔡友欢, 李海祥, 刘太祥, 等. 眼组织生物力学的研究. 国际眼科杂志 2017;17(5):869-872

## 0 引言

生物力学是研究组织或器官的力量与功能之间关系的学科,对研究眼科疾病的预防、发生、发展、诊疗具有重要作用。生物力学在维持眼的正常功能和导致病理形态方面起到重要作用。眼球壁的巩膜上有6条眼外肌附着,主管眼球向各个方向运动,在其舒缩的同时,对眼球壁产生牵拉和压迫作用而影响球壁的生物力学,从而改变眼球的曲率或角膜的屈光力,造成视功能的改变。

角膜与巩膜是眼球壁的最外层,同属纤维层,主要由几种类型的胶原纤维构成,在维持眼球形状、保护眼内容物方面起着至关重要的作用,它与葡萄膜、视网膜共同构成眼球壁。房水、晶状体和玻璃体构成眼内容物,形成眼内压对眼球壁施以一定的压力,视网膜视神经节细胞发出的神经节纤维在眼球后极聚集,形成视盘,穿过巩膜筛板形成视神经。

## 1 眼外肌的生物力学

眼球外有6条眼外肌,根据附着巩膜部位和行走方向的不同,将其分为4条直肌和2条斜肌,又根据其功能的不同将其分为拮抗肌、协同肌和配偶肌。正常时,由于拮抗肌或协同肌之间力量保持动态平衡才能使眼球保持在正常位置,若某一条肌肉力量减弱或加强,就可能導致眼位不正,发生斜视。眼外肌的运动单位很小,肌肉收缩力的大小与同时收缩的肌纤维的多少有关,其运动机制非常复杂。过去斜视的诊断和治疗大多建立在经验和推理的基础上,收缩力和张力无法定量分析,主要靠临床经验选择手术方案和评估手术效果,但随着学者对力学研究的深入,可以较为精确测量某条眼外肌的力学,手术基本可以做到精准,使效果更好。Robinson等<sup>[1]</sup>在做斜视

手术过程中测量外直肌的长度与张力的关系,结果发现随测量所处的不同位置而变化。Scott 测量了人体眼外肌及眼球限制组织的力学,发现眼外肌的个体差异不大,而眼球限制组织的刚度为 0.5g/deg。眼球运动内直肌的力量呈线性增加,达到最大值 617.25mN,上直肌与下直肌力量较稳定,在初始位置时,它们最小的力值分别是 123.9mN 和 147.54mN,当眼球发生转动时,力量变化较小<sup>[2]</sup>。在眼外肌的生物力学精确估计后可通过收集眼组织的解剖学数据组装成三维实体模型,用来估计长期共同性斜视的治疗效果<sup>[3]</sup>。通过模型,测得初始张力的外直肌的力量,得到应力-延伸的关系,从而削弱神经支配的影响,可更准确治疗斜视<sup>[4]</sup>。当眼外肌有损伤时,肌肉力量是会受影响的,有学者研究测试尸体上的眼肌,发现在眼外肌未受伤的情况下,平均最大力值为 271±51N,当肌肉有损伤的情况下,平均峰值力 268±26N,所以我们平时也可以看到外伤后长时间出现斜视的患者<sup>[5]</sup>。现随着影像学的发展,使用核磁共振成像技术发现眼外肌 Pulley 是功能性起点,并制作了 Pulley 模型,用其模拟斜视手术的操作,获得与临床经验相近的水平斜视矫正量<sup>[6]</sup>。

## 2 眼球壁的生物力学

解剖学上眼球壁从外向内分为纤维膜、葡萄膜、视网膜 3 层。纤维膜由大量胶原纤维组成,最薄处为 300μm,最厚为 1 000μm,在维持眼球形状,保护眼内容和维持眼球生物力学方面起着至关重要的作用。纤维膜的生物力学特性可使用离体和在体测量两种方法,离体测试主要是单轴拉伸实验及整体膨胀实验。而在体的测量很受限,角膜力学性质的在体测试方法主要有非接触式眼内压反应仪(ocular response analyzer,ORA)和超声剪切成像(supersonic shear imaging,SSI),可视化角膜生物力学分析仪(corneal visualization Scheimpflug technology,Corvis ST),眼部 A 超及高分辨率照相介入技术<sup>[7]</sup>,而巩膜的在体生物力学测量存在困难。葡萄膜为眼球壁中间组织,其厚度为 150~220μm,由于有大量色素和丰富血管,除了具有遮光作用和为眼球壁各层提供营养外,在维持眼球壁的力学方面也起着重要作用。视网膜厚度为 250μm,它的生物力学的在体测量主要通过眼内压(IOP)与眼前节相干断层扫描(optical coherence tomography,OCT)测量后建立三维模型结合数值模量得出<sup>[8]</sup>。

### 2.1 角膜的生物力学

角膜位于眼球前端,占纤维膜的前 1/6 面积,厚度大约为 500~1 000μm,它除了具备纤维膜的相关功能外,还是眼重要的屈光间质。组织学上角膜由前向后分为上皮层、前弹力层、基质层、后弹力层和内皮层 5 层,基质层占其厚度的 90%。角膜表现复杂的生物力学性质,基质层中的胶原纤维决定了该组织的弹性性能<sup>[9-10]</sup>,基质层含有 80%的水份,决定了角膜的黏滞性。角膜板层胶原排列从浅到深,从中央到周边逐渐致密,周边纤维最为致密<sup>[11-12]</sup>。因角膜具有黏弹性,应力能通过应力-拉伸循环使能量消散,产生滞后现象(corneal hysteresis,CH),呈现非线性应力应变关系,弹性模量也是应力中的一项重要指标,是指应力后角膜复原的能力,为评估材料产生弹性变形难易程度的指标。角膜的生物力学特性对屈光手术的设计和预后,维持角膜形状和透明度有重要作用,还与多数角膜的病理状态相关,尤其是角膜扩张类疾病:医源性角膜扩张、圆锥角膜等。有学者

将圆锥角膜与正常角膜相比,角膜滞后量(CH)、角膜阻力因数(CRF)、第一次压平长度、曲率半径均下降,第二次压平速率绝对值、角膜最大变形幅度升高<sup>[13-14]</sup>。因准分子激光术过度切削后导致的继发圆锥角膜和角膜扩张的病例时有报道<sup>[15-16]</sup>。随着屈光手术的发展,飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术能更精确地切削角膜,该术式使角膜较其他手术方式让角膜更早地达到稳定状态<sup>[17]</sup>。随着对圆锥角膜与角膜扩张疾病增多,很多学者发现角膜胶原交联的方法使角膜的胶原纤维增粗,生物力学增强,弹性模量增加<sup>[18]</sup>;Wollensak 等<sup>[19]</sup>将人角膜胶原交联后,进行拉伸试验,人角膜的刚度增加 330%,现临床上使用跨上皮胶原交联<sup>[20]</sup>和飞秒联合胶原交联<sup>[21]</sup>,使 CH 和 CRF 增强,跨上皮胶原交联后的弹性模量是未交联的 2 倍,使变薄的部分角膜的抗张力增强,治疗圆锥角膜。

### 2.2 巩膜的生物力学

巩膜占纤维膜的后 5/6 面积,与角膜相连,在组织学上从外向内分为巩膜表层、巩膜基质层、棕黑色板层。巩膜是由 I 型和 III 型胶原纤维和弹力纤维构成<sup>[22]</sup>,其生长发育与生物力学密切相关,应力超出正常生理范围时,巩膜的组织学发生改变,胶原纤维增粗增多。巩膜生物力学具有区域差异性,这种差异主要是由于不同部位巩膜胶原纤维的排列方式不同所导致的<sup>[23]</sup>,巩膜后部外层纤维像气球一样分布,内层似扇状散开,前部巩膜则不同,由紧密的环形纤维构成<sup>[24]</sup>。有学者发现 3mo 左右形觉剥夺的树鼩的巩膜胶原纤维直径显著减小,巩膜拉伸变薄,后极部更明显<sup>[25]</sup>,后极部及赤道部的蠕变率均升高,近视眼眼轴的增长与巩膜蠕变率的升高密切相关<sup>[26]</sup>。Avetisov 等<sup>[27]</sup>对人尸眼(死后 12h 内)巩膜进行抗拉试验,其中包括正常的巩膜和近视的巩膜,发现近视患者巩膜的抗张强度低于正常人,弹性性能降低。研究表明巩膜的生物力学减弱是与近视息息相关的。目前有人通过建立动物模型,用不同胶原交联方法可使巩膜刚度增强,有效防止眼轴增长,预防及缓解近视发生、发展<sup>[28-29]</sup>。也有研究通过巩膜后加压固定术,增强巩膜的抗张强度,有效治疗病理近视<sup>[30]</sup>。

### 2.3 葡萄膜的生物力学

葡萄膜是眼球壁的中间层膜,由前往后分为:虹膜、睫状体和脉络膜。虹膜介于前房和后房之间,为一圆盘形膜,虹膜作为一种生物软组织材料,具有黏弹特性,它的生物力学特性与瞳孔阻滞的发生密切相关<sup>[31]</sup>。虹膜生物力学特性离体测量方法有轴向拉伸试验、压痕实验、膨胀实验等。虹膜在体力学特性的测量主要通过超声生物显微镜(UBM)获取图像,结合数值模拟方法确定虹膜的在体力学特性。

闭角型青光眼的发病因素影响最大的是瞳孔阻滞<sup>[32]</sup>,研究生物力学也可了解青光眼的发生机制,指导治疗。Marpstone<sup>[33]</sup>于 1968 年提出瞳孔阻滞力产生的重要影响因素是虹膜形变、晶状体相对位置的改变,形成了后来进行瞳孔阻滞力研究的理论基础<sup>[34]</sup>。1991 年 Tiedeman<sup>[35]</sup>研究得出:晶状体越向前靠,虹膜膨隆则越高,虹膜根部膨隆角最大在瞳孔中度散大,此时阻滞最大。虹膜弹性产生的力决定了后房的压力,前后存在的压力差使虹膜离开晶状体表面,从而房水由后房流到前房。

Heys 等<sup>[36]</sup>对离体牛虹膜做环状或放射状拉伸实验,发现虹膜具有各向异性、弹性和不可压缩性。瞳孔开大

肌平均环形方向杨氏模量为 890kPa,其放射性方向为 9.6kPa,瞳孔括约肌平均环形方向杨氏模量为 340kPa。乔春艳等<sup>[37]</sup>将虹膜沿瞳孔缘做水密荷包缝合进行力学检测,发现虹膜弹性模量并不是一个常数,而是随力的增加而增加的变量。虹膜的应变-压强曲线提示:压强在较低时虹膜变化明显,随着压强的增加虹膜变化愈来愈不明显,滞后环明显,反映了虹膜软组织的滞后特性。刘志成等<sup>[38]</sup>研究发现虹膜前后房压强差的最大值不会超过 300Pa;当压强超过 300Pa 时,虹膜达到了最大变形量,不再发生变形,当小于 200Pa 时,虹膜比较柔软,极易产生大的非线性变形。

睫状体前接虹膜根部,后端移行于脉络膜。睫状体的肌肉由外向内分为 3 部分:最外层为前后走向的纵行纤维,中间位斜行的放射性纤维,呈扇形走向,最内层为环形纤维部分。睫状肌的协调收缩可产生调节功能,当环形纤维收缩时,可产生使晶状体悬韧带向前、向内的力,使晶状体变凸。当纵行纤维收缩时,会产生使脉络膜向前的牵引力,使脉络膜前移,同时将巩膜突拉向后,调节眼内压。但具体数值因测量困难,目前还没相关报道。脉络膜为葡萄膜的最后面部分,位于视网膜与巩膜之间,是一层富含血管的棕色膜。弹性模量为 4.62MPa<sup>[39]</sup>,会随着眼部内环境变化而改变。

**2.4 视网膜的生物力学** 视网膜是一层透明的膜,位于脉络膜与玻璃体之间,一些研究者认为其力学性能是非线性的<sup>[40]</sup>,其弹性模量的值的范围为 0.3~125kPa<sup>[41]</sup>,波动范围较大,可能与不同的物种、测量方法和分析方法相关,有研究提示视网膜弹性模量还会随着温度的变化而变化<sup>[42]</sup>。当高度近视及眼内压持续增高长时间后,使用 OCT 可观察到视网膜会变薄,生物力学下降。因视网膜生物力学性能低,不能承受过大的负荷,故视网膜脱离等在眼底疾病中较为常见,且对视力影响比较大。

### 3 晶状体的生物力学

晶状体位于虹膜与玻璃体中间,由晶状体囊、晶状体弹性纤维和晶状体核组成,通过悬韧带与睫状体相连。目前离体测量晶状体力学的方法有:机械拉伸器测量法、光学相干弹性成像技术(optical coherence elastography, OCE)、布里渊光学显微镜技术(brillouin microscopy)、光学相干断层扫描技术(optical coherence tomography, OCT),晶状体内部生物力学具有空间梯度特点,其生物力学特性具有较大差异,主要由于位置靠近内部的纤维较靠近外部的纤维更易老化,蛋白含量增多,水分减少<sup>[43]</sup>。Czygan 等<sup>[44]</sup>发现晶状体核具有黏弹,可观察到滞后、蠕变、松弛等典型现象,随着年龄增长,晶状体纤维由于老化变性,其化学成分也同时发生改变,使弹性及透明性下降,也致使其生物力学特性发生变化,即发生老视及白内障。晶状体的变化引起老视形成的原因可能有:(1)晶状体弹性减小,变形阻力增加;(2)晶状体几何形状改变,使悬韧带张力降低。随着年龄递增,晶状体皮质随年龄递增变硬,囊厚度增加,Krag 等<sup>[45]</sup>测量了晶状体前后囊的应力、应变之间的关系,他们的推断是随着年龄增长,力传输到晶状体,晶状体囊的应力增强,但弹性模量没有改变。在进行白内障手术时,术中进行连续环形撕囊的囊膜口的生物力学更加稳定,所以环形撕囊在常规的白内障手术中,是一种较好的方法<sup>[46]</sup>。现在开始使用飞秒激光辅助切割晶状体前囊膜、碎核等,比手工撕囊更为

完整,该方法生物力学仍在研究中,但使人工晶状体位置更正,手术时间缩短,飞秒激光辅助行白内障手术将成为手术趋势。

### 4 房水与眼内压

睫状体上皮细胞产生房水,协助维持眼压,正常时房水的产生和排除,处于一个动态平衡,当房水产生量超过排出量或房水排除受阻时,将会使眼内压升高,导致眼球壁生物力学的改变。经典循环途径即小梁网途径的外流阻力约占总房水外流阻力的 75%~80%。已有很多实验对房水流出的阻力进行实验,发现主要还是存在于邻管组织、Schlemm 管(Schlemm canal, Sc)内壁以及基底膜这部分组织间,电镜下观察到 Sc 内壁的内皮细胞形成 2 个特殊的结构“大液泡”和“小孔”<sup>[47]</sup>。“大液泡”是基底膜的不连续性使得压力直接作用于内皮细胞,内皮细胞膨胀变形,产生充满液的隆起。“小孔”是由压力作用于 Sc 内皮细胞,引起细胞变形所致。有研究表明:房水流进 Sc 内壁上的小孔时形成上宽下窄漏斗状流注,从而降低了房水的有效面积,增大了外流阻力,越靠近内壁处,阻力越大,称为“漏斗效应”<sup>[48]</sup>,原发性开角型青光眼(primary open angle glaucoma, POAG)时,“小孔”调节,使流出阻力增加,最终眼压增高。

### 5 小结

眼球作为一个具有黏弹性组织器官,它的各部分组织对维持眼球的生物力学均具有一定作用,其中眼球壁纤维膜在维持生物力学方面起着主要作用。对眼球生物力学的研究可使我们深入地去了解眼的疾病发生机制,从而为临床上疾病的诊断和治疗提供新的思路和方法。目前对眼球相关的生物力学研究仍处于初级阶段,虽然测定有着多种方法,但是尚无一种精准的定量方法,测量眼部的生物力学大多数是在离体情况下进行,离体情况下测量的差异比较大,体内测量的仪器将会越发先进,我们的眼部各个组织的生物力学测量得更加准确,使眼部的疾病得到有效、高效的诊治,同时增强手术预测性,使患者得到更好的治疗。

### 参考文献

- 1 Robinson DA, O'Meara DM, Scott AB, et al. Mechanical components of human eye movements. *J Appl Physiol* 1969;26(5):548-553
- 2 Guo H, Gao Z, Chen W. Contractile force of human extraocular muscle: a theoretical analysis. *Appl Bionics Biomech* 2016;2016(5):1-8
- 3 Bushuyeva N, Romanenko D. Long term results of concomitant strabismus treatment based on operation preliminary modeling using three-dimensional biomechanical eye model. *Acta Ophthalmol* 2016;94:1-2
- 4 Gao Z, Guo H, Chen W. Initial tension of the human extraocular muscles in the primary eye position. *J Theor Biol* 2014;353(2):78-83
- 5 Kennedy E, Duma S. The effects of the extraocular muscles on eye impact force-deflection and globe rupture response. *J Biomech* 2008;41(41):3297-3302
- 6 Demer J, Oh SV. Evidence for active control of rectus extraocular muscle pulleys. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2000;41(6):1280-1290
- 7 曹雪倩, 张章, 王林农. 角膜生物力学测量及其临床应用新进展. *医学研究生学报* 2016;29(3):319-322
- 8 Qian X, Zhang K, Liu Z. A method to determine the mechanical properties of the retina based on an experiment *in vivo*. *Biomed Mater Eng* 2015;26:287-297
- 9 Delmonte DW, Kim T. Anatomy and physiology of the cornea. *J*

- Cataract Refract Surg* 2011;37(3):588-598
- 10 Winkler M, Shoa G, Xie Y, *et al.* Three-dimensional distribution of transverse collagen fibers in the anterior human corneal stroma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013;54(12):7293-7301
- 11 Ruberti JW, Roy AS, Roberts CJ. Corneal biomechanics and biomaterials. *Annu Rev Biomed Eng* 2011;13(1):269-295
- 12 Randleman JB, Dawson DG, Grossniklaus HE, *et al.* Depth-dependent cohesive tensile strength in human donor corneas: implications for refractive surgery. *J Refract Surg* 2008;24(1):85-89
- 13 李勇, 魏升升, 李晶, 等. 圆锥角膜生物力学在 Corvis ST 与 ORA 下的变化特点. *中国实用眼科杂志* 2015;33(8):881-884
- 14 Boptom HRV, Mrcophth DVP. Biomechanical properties of the keratoconic cornea: a review. *Clin Exp Optometry* 2015;98(1):31-38
- 15 Han Z, Tao C, Zhou D, *et al.* Air puff induced corneal vibrations: theoretical simulations and clinical observations. *J Refract Surg* 2014;30(3):208-213
- 16 Randleman JB, Woodward M, Lynn MJ, *et al.* Risk assessment for ectasia after corneal refractive surgery. *Ophthalmology* 2008;115(1):37-50
- 17 竦瑞, 王雁, 吴文静, 等. 飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术后角膜生物力学的影响因素分析. *中华实验眼科杂志* 2016;34(5):448-455
- 18 Pashtae NP, Pozdeeva NA, Sinitsyn MV, *et al.* Comparative evaluation of different corneal cross-linking techniques with respect to biomechanical stability of the cornea. *Vestn Oftalmol* 2015;132(2):38-46
- 19 Wollensak G, Spoerl E, Seiler T. Stress-strain measurements of human and porcine corneas after riboflavin-ultraviolet-A-induced cross-linking. *J Cataract Refract Surg* 2003;29(9):1780-1785
- 20 Chen S, Chan TC, Zhang J, *et al.* Epithelium-on corneal collagen crosslinking for management of advanced keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 2016;42(5):738-749
- 21 Letnikova KB, Khandjan AT, Oganessian OG, *et al.* Femtosecond corneal collagen crosslinking in treatment of patients with progressive keratoconus stages I-II. *Sovremennye Tehnologii* 2016;8(1):128-133
- 22 Coudrillier B, Pijanka J, Jefferys J, *et al.* Collagen structure and mechanical properties of the human sclera: analysis for the effects of age. *J Biomech Eng* 2014;137(4):197-208
- 23 Wollensak G, Spoerl E. Collagen crosslinking of human and porcine sclera. *J Cataract Refract Surg* 2004;30(3):689-695
- 24 Rada J, Nickla DD. Decreased proteoglycan synthesis associated with form deprivation myopia in mature primate eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2000;41(8):2050-2058
- 25 McBrien NA, Cornell LM, Gentle A. Structural and ultrastructural changes to the sclera in a mammalian model of high myopia. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2001;42(10):2179-2187
- 26 Phillips JR, Khalaj M, McBrien NA. Induced myopia associated with increased scleral creep in chick and tree shrew eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2000;41(8):2028-2034
- 27 Avetisov ES, Savitskaya NF, Vinetskaya MI, *et al.* A study of biochemical and biomechanical qualities of normal and myopic eye sclera in humans of different age groups. *Metab Pediatr Syst Ophthalmol* 1983;7(4):183-188
- 28 Karl A, Makarov FN, Koch C, *et al.* The ultrastructure of rabbit sclera after scleral crosslinking with riboflavin and blue light of different intensities. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2016;254(8):1-11
- 29 Dotan A, Kremer I, Galor O, *et al.* Scleral Cross-linking Using Riboflavin and Ultraviolet-A Radiation for Prevention of Axial Myopia in a Rabbit Model. *J Vis Exp* 2016;110:e53201
- 30 Chen W, Wang X, Wang C, *et al.* An experimental study on collagen content and biomechanical properties of sclera after posterior sclera reinforcement. *Clin Biomech* 2008;23:17-20
- 31 Quigley HA. The iris is a sponge; a cause of angle closure. *Ophthalmology* 2010;117(1):1-2
- 32 Huang EC, Barocas VH. Active iris mechanics and pupillary block: steady-state analysis and comparison with anatomical risk factors. *Ann Biomed Eng* 2004;32(9):1276-1285
- 33 Mapstone R. Mechanics of pupil block. *Br J Ophthalmol* 1968;52(1):19-25
- 34 Zheng C, Cheung CY, Aung T, *et al.* *In vivo* analysis of vectors involved in pupil constriction in Chinese subjects with angle closure. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2012;53(11):6756-6762
- 35 Tiedeman JS. A physical analysis of the factors that determine the contour of the iris. *Am J Ophthalmol* 1991;111(3):338-343
- 36 Heys J, Barocas VH. Mechanical characterization of the bovine iris. *J Biomech* 1999;32(9):999-1003
- 37 乔春艳, 林丁, 刘志成, 等. 虹膜组织力学特性实验方法的探索. *中国眼耳鼻喉科杂志* 2002;2(5):277-280
- 38 刘志成, 林丁, 宋红芳, 等. 虹膜组织力学特性的实验研究. *全国生物力学学术会议* 2003;54
- 39 Chen K, Rowley AP, Weiland JD. Elastic properties of porcine ocular posterior soft tissues. *J Biomed Mater Res A* 2010;93(2):634-645
- 40 Chen K, Weiland JD. Mechanical characteristics of the porcine retina in low temperatures. *Retina* 2012;32(4):844-847
- 41 Shahbazi S, Mokhtari - Dizaji M, Mansori MR. Noninvasive estimation of the ocular elastic modulus for age-related macular degeneration in the human eye using sequential ultrasound imaging. *Ultrasonics* 2012;52(2):208-214
- 42 Chen K, Weiland JD. Mechanical characteristics of the porcine retina in low temperatures. *Retina* 2012;32(4):844-847
- 43 Heys KR, Cram SL, Truscott RJ. Massive increase in the stiffness of the human lens nucleus with age: the basis for presbyopia? *Mol Vis* 2004;10(10):956-963
- 44 Czygan G, Hartung C. On the correlation of mechanical and optical properties of cataractous eye lens nuclei. *Biomed Tech* 1997;42(1-2):2-6
- 45 Krag S, Andearessen TT. Mechanical properties of the human posterior lens capsule. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2003;44(2):691-696
- 46 Morgan JE, Ellingham RB, Young RD, *et al.* The mechanical properties of the human lens capsule following capsulorhexis or radiofrequency diathermy capsulotomy. *Arch Ophthalmol* 1996;114(9):1110-1115
- 47 Fautsch MP, Johnson DH. Aqueous humor outflow; what do we know? Where will it lead us? *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2006;47(10):4181-4187
- 48 张金玲, 张宇燕. Schlemm 管内皮细胞的生物力学对眼压的调节作用. *国际眼科纵览* 2016;40(2):81-85