

# 采用自适应光学扫描激光检眼镜系统观察健康成年人黄斑区视锥细胞的分布

赵 玥, 杨婷婷, 姚 进

引用: 赵玥, 杨婷婷, 姚进. 采用自适应光学扫描激光检眼镜系统观察健康成年人黄斑区视锥细胞的分布. 国际眼科杂志, 2024, 24(3): 473-478.

作者单位: (210000) 中国江苏省南京市, 南京医科大学眼科医院  
作者简介: 赵玥, 毕业于南京中医药大学, 特检组副组长, 研究方向: 眼科特检、眼底病。

通讯作者: 姚进, 毕业于南京医科大学, 博士, 主任医师, 博士研究生导师, 研究方向: 眼底病. dryaojin@126.com

收稿日期: 2023-08-10 修回日期: 2024-01-26

## 摘要

目的: 采用自适应光学扫描激光检眼镜(AO-SLO)系统观察不同年龄健康成年人黄斑区视锥细胞的分布, 分析其与年龄的相关性。

方法: 选取2023-06/07于我院进行健康体检者100例200眼, 根据年龄进行分组, 其中A组年龄18-30岁, B组年龄31-40岁, C组年龄41-50岁, D组年龄51-65岁, 每组各25例50眼。纳入研究对象双眼均行AO-SLO检查, 测量视锥细胞密度。

结果: 各组研究对象双眼中心凹偏心率 $3^\circ$ 处 $2.4^\circ \times 2.4^\circ$ 范围视锥细胞密度均有差异( $P < 0.001$ ), 且各区域视锥细胞密度均呈现较为规律的分布特点, 均以颞侧视锥细胞密度最高, 由高至低依次为颞侧>鼻侧>下方>上方。各组研究对象双眼黄斑区平均视锥细胞密度分别为 $14144.38 \pm 1082.40$ 、 $13241.24 \pm 535.32$ 、 $12930.29 \pm 727.73$ 、 $10907.50 \pm 490.86$  cell/mm<sup>2</sup> ( $P < 0.001$ ), 提示随着年龄的增长, 视锥细胞密度呈下降趋势。相关性分析结果显示, 纳入研究对象黄斑区平均视锥细胞密度与年龄呈负相关( $r = -0.578$ ,  $P < 0.001$ )。

结论: AO-SLO检查是一种可无创定量检测视锥细胞的方法, 健康人群黄斑区视锥细胞密度与年龄呈负相关关系, 50岁以上健康人群视锥细胞密度明显降低。

关键词: 自适应光学; 视锥细胞密度; 黄斑; 健康人群; 年龄  
DOI: 10.3980/j.issn.1672-5123.2024.3.27

## Observation on the distribution of macular cone in healthy adult using adaptive optics scanning laser ophthalmoscope system

Zhao Yue, Yang Tingting, Yao Jin

The Eye Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China

Correspondence to: Yao Jin. The Eye Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210000, Jiangsu Province, China. dryaojin@126.com

Received: 2023-08-10 Accepted: 2024-01-26

## Abstract

• AIM: To observe the distribution of cone in the macular of healthy adult in different ages using adaptive optics scanning laser ophthalmoscope (AO-SLO) system, and analyze its relationship with age.

• METHODS: A total of 100 healthy examinees (200 eyes) in our hospital from June to July 2023 were selected, and they were divided into four groups according to their age, with 25 cases (50 eyes) in each group, including 18-30 years in group A, 31-40 years in group B, 41-50 years in group C, 51-65 years in group D. AO-SLO was performed in both eyes and cone density was measured.

• RESULTS: The density of cone in the foveal eccentricity of  $3^\circ$  and  $2.4^\circ \times 2.4^\circ$  in each group was different ( $P < 0.001$ ), and the cone density in each area showed a relatively regular distribution characteristics, with the highest density in the temporal side, and the temporal > nasal > inferior > superior sides from high to low. The mean cone density in the macular area of both eyes was  $14144.38 \pm 1082.40$ ,  $13241.24 \pm 535.32$ ,  $12930.29 \pm 727.73$ , and  $10907.50 \pm 490.86$  cell/mm<sup>2</sup>, respectively ( $P < 0.001$ ), indicating that the cone density decreased with age. The correlation analysis showed that the mean cone density in the macular area was negatively correlated with age ( $r = -0.578$ ,  $P < 0.001$ ).

• CONCLUSION: AO-SLO is a quantitative non-invasive detection of cones, and there is a negative correlation between cone density and age in healthy human. Furthermore, density of cone in healthy people over 50 years was significantly decreased.

• KEYWORDS: adaptive optics; cone density; macular; healthy people; age

Citation: Zhao Y, Yang TT, Yao J. Observation on the distribution of macular cone in healthy adult using adaptive optics scanning laser ophthalmoscope system. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2024, 24(3): 473-478.

## 0 引言

自适应光学扫描激光检眼镜(adaptive optics scanning laser ophthalmoscope, AO-SLO)系统<sup>[1-4]</sup>作为一种新型的

眼科影像检查设备,是一种利用自适应光学(adaptive optics, AO)技术充分校正人眼像差,结合扫描激光检眼镜(scanning laser ophthalmoscope, SLO)获得视网膜高分辨率视细胞图像的自动控制系统。目前主要用于对眼底结构的活体显微成像,提供视网膜细胞及血管的图像,通过对视网膜图像进行后处理,获取如感光细胞密度、血管管径、血流速度等参数<sup>[5-7]</sup>。该系统通过校正像差将横向分辨率提高到细胞级别,光学分辨率可达 $2\ \mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>,不仅在形态上能够在细胞水平对视网膜进行可视化,而且可以动态观察细胞及血管的变化,将一些视网膜疾病的发病机制及病理研究提前到细胞未死亡、仅有形态变化的阶段,提高了疾病的超早期诊断率,为临床进一步了解视细胞和视网膜血流的变化提供了无创快捷的影像学资料,为深入了解视网膜和脉络膜疾病的发病机制开辟了新的途径。本研究通过AO-SLO系统观察不同年龄健康人黄斑区视锥细胞,了解其分布特点及其与年龄的相关性,现报告如下。

## 1 对象和方法

### 1.1 对象

选取2023-06/07于我院进行健康体检者100例200眼,年龄18-65(平均 $31.73\pm 11.98$ )岁,其中男45例,女55例。纳入标准:(1)行裂隙灯及眼底镜检查均未发现明显器质性病变;(2)医学验光矫正视力均 $\geq 0.8$ (小数视力);(3)年龄18-75岁。排除标准:(1)眼压(intraocular pressure, IOP) $> 21\ \text{mmHg}$ 或其他原因不能进行散瞳者;(2)球镜度超过 $\pm 2\ \text{D}$ 或柱镜度超过 $\pm 1\ \text{D}$ ,等效球镜度超过 $\pm 2.50\ \text{D}$ ;(3)眼轴长度 $\geq 26\ \text{mm}$ 或 $\leq 23\ \text{mm}$ ;(4)上睑下垂等无法充分暴露瞳孔区者;(5)无晶状体眼或人工晶状体眼;(6)患有流行性角结膜炎或处于其他传染性眼病活动期,屈光介质混浊而无法获得满意图像者;(7)固视不良,或其他原因无法配合检查者;(8)患有高血压、糖尿病、心脏病等全身疾病或既往有眼部疾病史者;(9)色觉检查异常者。本研究遵循《赫尔辛基宣言》,已通过南京医科大学眼科医院伦理委员会审批[No.伦理新技术字第(2023001)号],所有研究对象均了解本研究相关内容并签署知情同意书。

## 1.2 方法

### 1.2.1 一般检查

纳入研究对象均行最佳矫正视力(best corrected visual acuity, BCVA)、IOP、色觉、眼轴、医学验光等检查,并采用共焦激光同步血管造影系统(Heidelberg Spectralis, HRA+OCT)进行光学相干断层扫描成像(optical coherence tomography, OCT)检查,对黄斑区视网膜进行区域多线扫描,测量中心凹下视网膜厚度(central macular

thickness, CMT)。所有检查均由同一名医师完成。

### 1.2.2 AO-SLO检查

采用Mona II a自适应光学扫描激光检眼镜系统(南京博视医疗科技有限公司,设备软件版本号V1.00.00.221115)进行检查。检查前使用5%复方托吡卡胺散瞳,瞳孔直径大于6 mm且直接、间接对光反射消失后进行检查,分别采集双眼中心凹上方(superior)、下方(inferior)、鼻侧(nasal)及颞侧(tempo)偏心率 $3^\circ$ 处的 $2.4^\circ\times 2.4^\circ$ 视锥细胞层图像,同一位置重复采集2次并记录测量结果,取平均值。操作方法:在信息管理界面输入受检者基本信息,输入屈光度及眼轴数据以在扫描中自动校正眼底放大倍率。扫描过程中调整瞳孔相机的位置及景深,确保瞳孔居于中央且虹膜影像清晰后点击“AO”键启动自适应矫正,通过左右轻微拖动深度调节键,确定采集深度,采集图像前嘱受检者瞬目或多次瞬目后保持睁眼并注视绿色固视灯,确认波前点阵图清晰规则接近类圆,此时细胞结构镶嵌最为清晰,然后迅速点击采集按钮,等待3 s采集结束即可查看采集图像的清晰度。在扫描成像过程中,根据机器对焦时调节深度显示在原位 $0\ \mu\text{m}$ 可知获得的图像为椭圆体带层面,结合已有文献<sup>[9]</sup>中电镜下视锥细胞切片图及其他自适应光学相关研究,可以判断扫描的图像为视锥细胞形态。视锥细胞密度指区域内的视锥细胞数量除以面积的值;细胞间距指每个视锥细胞与其相邻视锥细胞之间的平均距离。采集时所有图像的收敛实时信号强度均为90%以上,以保证最终图像的质量及可信度。所有检查均由同一名医师完成。

统计学分析:采用SPSS 26.0软件进行统计学分析。计量资料以均数 $\pm$ 标准差( $\bar{x}\pm s$ )表示,多组间差异比较采用单因素方差分析,进一步两两比较采用LSD-*t*检验。计数资料采用频数表示,多组间比较采用 $\chi^2$ 检验。相关性分析采用Pearson相关性分析法。 $P<0.05$ 认为差异具有统计学意义。

## 2 结果

### 2.1 纳入研究对象临床基本资料比较

根据年龄将纳入研究对象分为4组,其中A组年龄18-30岁,B组年龄31-40岁,C组年龄41-50岁,D组年龄51-65岁,每组各25例50眼。纳入研究对象色觉检查均正常。各组研究对象年龄、BCVA、等效球镜度差异均有统计学意义( $P<0.001$ ),性别构成、IOP、眼轴及CMT差异均无统计学意义( $P>0.05$ ),见表1。

### 2.2 纳入研究对象视锥细胞间距比较

各组研究对象双眼中心凹偏心率 $3^\circ$ 处 $2.4^\circ\times 2.4^\circ$ 范围平均视锥细胞间距差异均有统计学意义( $P<0.001$ ),见表2。

表1 各组研究对象临床基本资料比较

| 组别         | 例数 | 男/女<br>(例) | 年龄<br>( $\bar{x}\pm s$ ,岁) | BCVA<br>( $\bar{x}\pm s$ ,LogMAR) | IOP<br>( $\bar{x}\pm s$ ,mmHg) | 眼轴<br>( $\bar{x}\pm s$ ,mm) | CMT<br>( $\bar{x}\pm s$ , $\mu\text{m}$ ) | 等效球镜度<br>( $\bar{x}\pm s$ ,D) |
|------------|----|------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---|-------------------------------|
| A组         | 25 | 15/10      | 24.84 $\pm$ 3.95           | 0.06 $\pm$ 0.04                   | 17.06 $\pm$ 3.12               | 24.7 $\pm$ 7.32             | 307.11 $\pm$ 68.32                        | -1.37 $\pm$ 0.72              |
| B组         | 25 | 13/12      | 34.92 $\pm$ 2.75           | 0.08 $\pm$ 0.41                   | 16.24 $\pm$ 2.71               | 24.4 $\pm$ 6.98             | 290.42 $\pm$ 72.49                        | -0.89 $\pm$ 0.66              |
| C组         | 25 | 12/13      | 44.56 $\pm$ 2.63           | 0.08 $\pm$ 0.21                   | 17.12 $\pm$ 2.12               | 24.6 $\pm$ 8.11             | 297.36 $\pm$ 52.87                        | +0.50 $\pm$ 0.45              |
| D组         | 25 | 14/11      | 55.12 $\pm$ 2.93           | 0.10 $\pm$ 0.21                   | 18.14 $\pm$ 3.13               | 24.5 $\pm$ 7.17             | 287.96 $\pm$ 80.56                        | +1.00 $\pm$ 0.51              |
| $F/\chi^2$ |    | 2.013      | 416.088                    | 753.022                           | 1.373                          | 0.872                       | 1.387                                     | 87.317                        |
| $P$        |    | 0.343      | <0.001                     | <0.001                            | 0.421                          | 0.379                       | 0.431                                     | <0.001                        |

注:A组:年龄18-30岁;B组:年龄31-40岁;C组:年龄41-50岁;D组:年龄51-65岁。

**2.3 纳入研究对象视锥细胞密度比较** 各组研究对象双眼中心凹偏心率  $3^\circ$  处  $2.4^\circ \times 2.4^\circ$  范围视锥细胞密度差异均有统计学意义 ( $P < 0.001$ ), 且各组研究对象各区域视锥细胞密度均呈现较为规律的分布特点, 均以颞侧视锥细胞密度最高, 由高至低依次为颞侧 > 鼻侧 > 下方 > 上方, 见图 1、2, 表 3。各组研究对象双眼黄斑区平均视锥细胞密度分别为  $14144.38 \pm 1082.40$ 、 $13241.24 \pm 535.32$ 、 $12930.29 \pm 727.73$ 、 $10907.50 \pm 490.86$  cell/mm<sup>2</sup>, 差异有统计学意义 ( $F = 83.76$ ,  $P < 0.001$ ), 提示随着年龄的增长, 视锥细胞密度呈下降趋势。

**2.4 视锥细胞密度与年龄的相关性** Pearson 相关性分析显示, 纳入研究对象 100 例 200 眼黄斑区平均视锥细胞密度与年龄呈负相关 ( $r = -0.578$ ,  $P < 0.001$ ), 见图 3。

### 3 讨论

自 2000 年 AO 技术首次应用于临床<sup>[2,10-16]</sup>, 即突破了单个细胞的可视化只能使用组织学技术来实现的不足, 逐步开展了在视锥细胞、视网膜血管和其他视网膜结构(如玻璃膜疣、微动脉瘤、出血等)方面的多项研究<sup>[9,17-19]</sup>。由于 AO-SLO 可以对活体视网膜中单个细胞直接成像, 作为更细微的影像形式对其他眼底成像如 OCT、光学相干断层扫描血管成像(optical coherence tomography angiography, OCTA)、眼底自发荧光(fundus autofluorescence, FAF)、眼底荧光血管造影(fundus fluorescein angiography, FFA)、吲哚菁绿血管造影(indocyanine green angiography, ICGA)等进行补充, 从微观角度观察视锥细胞改变及丢失的区域和范围<sup>[20]</sup>, 量化测量研究可以帮助临床得以在区域内进行细胞密度等定量测定, 使对细胞的定量观察成为可能。

表 2 各组研究对象中心凹偏心率  $3^\circ$  处  $2.4^\circ \times 2.4^\circ$  范围平均视锥细胞间距比较

( $\bar{x} \pm s$ ,  $\mu\text{m}$ )

| 组别       | 眼数 | 右眼                         |                            |                            |                            |
|----------|----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|          |    | 上方                         | 下方                         | 鼻侧                         | 颞侧                         |
| A 组      | 25 | 7.02±0.14                  | 6.97±0.11                  | 6.94±0.10                  | 6.88±0.10                  |
| B 组      | 25 | 6.96±0.09 <sup>a</sup>     | 6.93±0.09 <sup>a</sup>     | 6.89±0.08 <sup>a</sup>     | 6.84±0.08                  |
| C 组      | 25 | 7.23±0.06 <sup>a,c</sup>   | 7.20±0.05 <sup>a,c</sup>   | 7.14±0.06 <sup>a,c</sup>   | 7.09±0.06 <sup>a,c</sup>   |
| D 组      | 25 | 7.29±0.16 <sup>a,c,e</sup> | 7.25±0.18 <sup>a,c,e</sup> | 7.23±0.18 <sup>a,c,e</sup> | 7.12±0.25 <sup>a,c,e</sup> |
| <i>F</i> |    | 46.56                      | 44.70                      | 47.22                      | 25.93                      |
| <i>P</i> |    | <0.001                     | <0.001                     | <0.001                     | <0.001                     |

| 组别       | 眼数 | 左眼                         |                            |                            |                            |
|----------|----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|          |    | 上方                         | 下方                         | 鼻侧                         | 颞侧                         |
| A 组      | 25 | 7.00±0.11                  | 6.98±0.16                  | 6.96±0.09                  | 6.90±0.10                  |
| B 组      | 25 | 6.97±0.10 <sup>a</sup>     | 6.94±0.08 <sup>a</sup>     | 6.90±0.08 <sup>a</sup>     | 6.86±0.08 <sup>a</sup>     |
| C 组      | 25 | 7.23±0.06 <sup>a,c</sup>   | 7.19±0.06 <sup>a,c</sup>   | 7.13±0.07 <sup>a,c</sup>   | 7.08±0.08 <sup>a,c</sup>   |
| D 组      | 25 | 7.29±0.20 <sup>a,c,e</sup> | 7.23±0.22 <sup>a,c,e</sup> | 7.19±0.24 <sup>a,c,e</sup> | 7.15±0.20 <sup>a,c,e</sup> |
| <i>F</i> |    | 41.20                      | 29.93                      | 19.51                      | 33.34                      |
| <i>P</i> |    | <0.001                     | <0.001                     | <0.001                     | <0.001                     |

注: A 组: 年龄 18-30 岁; B 组: 年龄 31-40 岁; C 组: 年龄 41-50 岁; D 组: 年龄 51-65 岁。<sup>a</sup> $P < 0.05$  vs A 组; <sup>c</sup> $P < 0.05$  vs B 组; <sup>e</sup> $P < 0.05$  vs C 组。

表 3 各组研究对象中心凹偏心率  $3^\circ$  处  $2.4^\circ \times 2.4^\circ$  范围视锥细胞密度比较

( $\bar{x} \pm s$ , cell/mm<sup>2</sup>)

| 组别       | 眼数 | 右眼                               |                                  |                                  |                                  |
|----------|----|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|          |    | 上方                               | 下方                               | 鼻侧                               | 颞侧                               |
| A 组      | 25 | 13189.18±1419.96                 | 13286.99±1370.19                 | 15231.79±1343.43                 | 15559.48±1345.77                 |
| B 组      | 25 | 12145.64±783.88 <sup>a</sup>     | 12172.88±895.71 <sup>a</sup>     | 14254.39±860.80 <sup>a</sup>     | 14638.86±472.74                  |
| C 组      | 25 | 12042.09±843.50 <sup>a</sup>     | 12093.61±1094.15 <sup>a</sup>    | 13861.96±1077.10 <sup>a</sup>    | 13885.93±889.16 <sup>a,c</sup>   |
| D 组      | 25 | 10244.04±701.76 <sup>a,c,e</sup> | 10346.28±535.55 <sup>a,d,e</sup> | 11606.53±685.03 <sup>a,c,e</sup> | 11840.51±786.29 <sup>a,c,e</sup> |
| <i>F</i> |    | 38.69                            | 35.44                            | 64.03                            | 64.24                            |
| <i>P</i> |    | <0.001                           | <0.001                           | <0.001                           | <0.001                           |

| 组别       | 眼数 | 左眼                               |                                  |                                  |                                  |
|----------|----|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|          |    | 上方                               | 下方                               | 鼻侧                               | 颞侧                               |
| A 组      | 25 | 12601.67±1150.10                 | 12897.61±1185.20                 | 15187.23±1252.68                 | 15201.11±1238.13                 |
| B 组      | 25 | 11962.38±869.98                  | 12283.80±777.73                  | 14195.11±776.52 <sup>a</sup>     | 14236.88±700.16 <sup>a</sup>     |
| C 组      | 25 | 11821.58±1003.67 <sup>a</sup>    | 12043.58±940.74 <sup>a</sup>     | 13786.10±959.11 <sup>a</sup>     | 13907.43±93.37 <sup>a</sup>      |
| D 组      | 25 | 10043.51±567.11 <sup>a,c,e</sup> | 10279.37±730.83 <sup>a,c,e</sup> | 11384.61±780.86 <sup>a,c,e</sup> | 11515.15±817.80 <sup>a,c,e</sup> |
| <i>F</i> |    | 25.27                            | 36.82                            | 63.10                            | 78.32                            |
| <i>P</i> |    | <0.001                           | <0.001                           | <0.001                           | <0.001                           |

注: A 组: 年龄 18-30 岁; B 组: 年龄 31-40 岁; C 组: 年龄 41-50 岁; D 组: 年龄 51-65 岁。<sup>a</sup> $P < 0.05$  vs A 组; <sup>c</sup> $P < 0.05$  vs B 组; <sup>e</sup> $P < 0.05$  vs C 组。

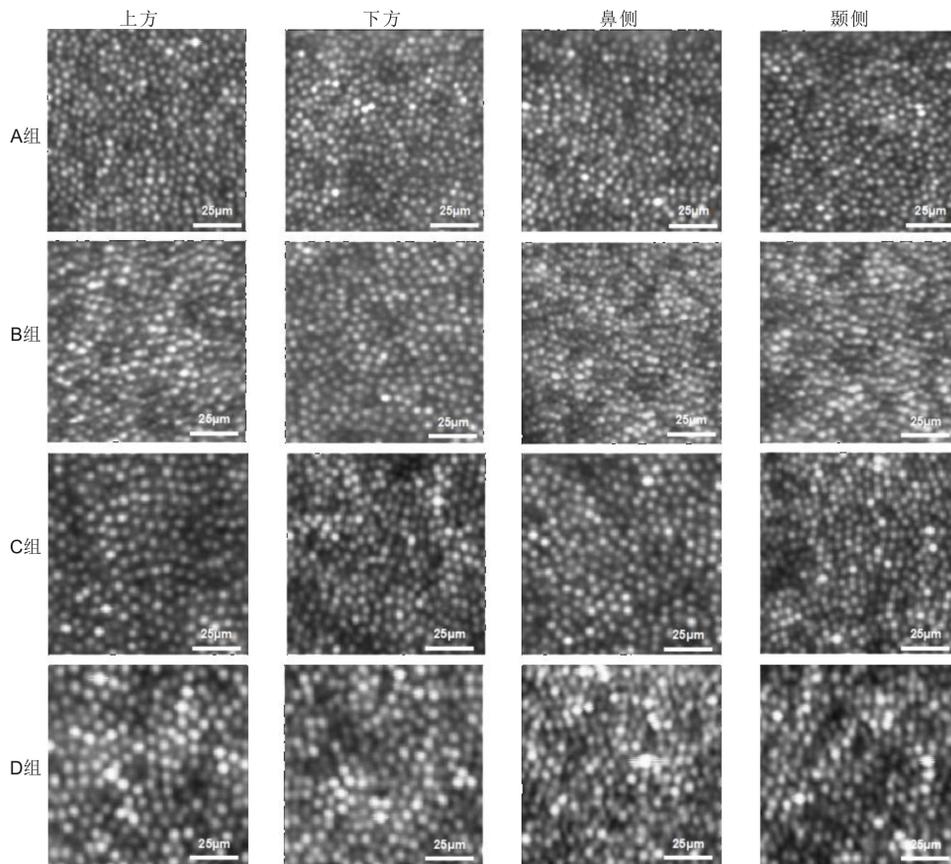


图1 各组研究对象中心凹偏心率3°处的视锥细胞示意图(图像大小100 µm×100 µm)。

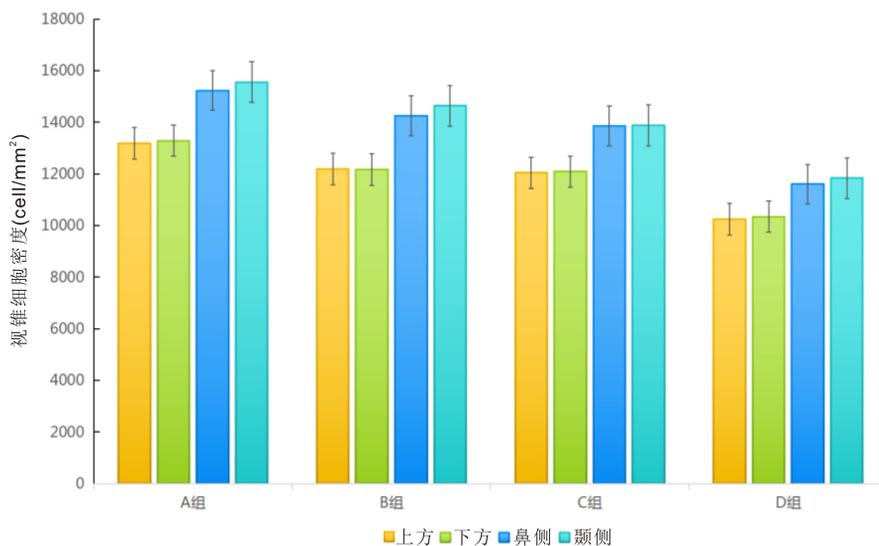


图2 各组研究对象双眼中心凹偏心率3°处2.4°×2.4°范围各区域平均视锥细胞密度比较。

视锥细胞通常以六边形点阵排列<sup>[11,21]</sup>,既往其识别是通过半自动方法,先自动检测视锥细胞的中心,再由有经验的人员进行手动校正,较为费力和耗时。目前研发应用于临床的AO-SLO系统有效提高了视锥细胞的自动检测分析能力。在对细胞进行识别后,系统自动测量获得的指标如视锥细胞密度和细胞间距均是有临床意义的生物标志物。在最初使用时,认为首先进行对于健康眼的检测分析是非常重要的,因为其结果有助于建立基础数据库,获得健康人生理改变的基础信息,在临床中用于评估患眼的异常变化,分析其与健康眼的偏差,对于眼底疾病的早期诊断和监测具有重要的参考价值。

目前已有多项研究发现,视皮质神经细胞、双极细胞、

神经节细胞、色素上皮层细胞及细胞内的黑色素均会随年龄增长而逐渐减少,视神经纤维束间结缔组织常随年龄增长而逐渐增生,视神经传导功能减弱<sup>[22-25]</sup>。本研究发现,中心凹周围视锥细胞密度同样会随着年龄递增而降低,这与既往研究<sup>[26-27]</sup>测量的不同年龄健康受试者在不同偏心率上视锥细胞密度的变化结果一致。本研究还发现,尽管不同年龄人群中心凹旁视锥细胞密度会存在一定的波动与偏差,但整体分布仍较为规律,均以颞侧密度最高,由高到低依次为颞侧>鼻侧>下方>上方,分析认为这样的规律可能与中心凹颞侧视网膜血管分布较少有关。此外,本研究发现,50岁以上健康人群中心凹旁各方位视锥细胞密度均下降明显,在同一放大倍率下观察不同年龄研究对象

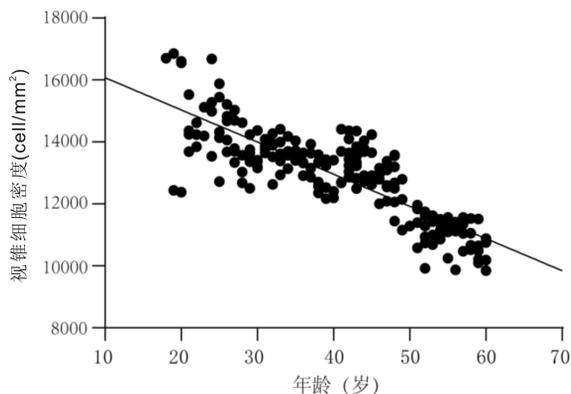


图3 纳入研究对象视锥细胞密度与年龄的相关性。

的视锥细胞形态,发现功能正常的视锥细胞呈蜂窝状均匀分布,境界清晰,随着年龄递增,尤其是进入50岁以后,区域内的高反射细胞增多,视锥细胞密度减少,细胞胞体及间距增大,但形态仍然规则,推测这可能进一步提示了以上均是与年龄相关的视锥细胞功能下降的特征。

清晰的细胞成像主要取决于受检者的屈光状态与屈光介质的清晰程度,因此本研究纳入的研究对象等效球镜度均不超过 $\pm 2.50$  D以保证检测结果的可靠性。通常球镜 $\pm 5.00$  D以内,柱镜 $\pm 1.5$  D以内,眼轴 $< 26$  mm的眼成像质量较好。虽然从原理上讲眼轴对于成像质量无影响,但实际操作来看,长眼轴( $> 26$  mm)确实会导致细胞成像不理想,主要表现为细胞变小导致成像不清晰,此时可尝试戴镜测量,但需受检者手扶镜框,保证光学中心与瞳孔对齐。如果成像质量还不理想,则放弃。柱镜补偿理论上可达到 $\pm 2.00$  D,但实际操作中发现 $> \pm 1.5$  D时会出现图像中央清晰,周边不清晰的现象,推测可能是由于柱镜轴向的原因导致清晰位置不同。

由于目前光学成像技术限制,中心凹处的视锥细胞尚无法成像,因此本研究选取中心凹偏心率 $3^\circ$ 处的位置,考虑到人眼视网膜结构的特点,距离中心凹越远的位置,视锥细胞密度越小、面积越大,而中心凹偏心率 $3^\circ$ 处的视锥细胞密度高、体积小,同时可以避开中心凹凹陷结构造成的反射不均匀情况,又最为贴近中心凹,因此对此处最具有代表性的位置进行图像采集和评估。选取 $2.4^\circ$ 范围的视锥细胞主要是考虑到希望有足够的图像清晰度和精确度以保证研究结果的准确性,同时一些可能会影响测量结果的因素如屈光介质混浊、泪膜不稳定等,在本研究过程中也均进行了严格筛选,基本摒弃了可能存在影响结果的因素。然而,本研究也存在一些不足,如欠缺对于可能与视锥细胞相关的影响因素更为细致的研究,如眼轴、屈光度、中心视力、色觉、眼压实际值等;未对中心凹偏心率 $3^\circ$ 以外更大范围的视锥细胞密度是否会随着年龄增加而递减、不同范围内的差异性以及与其他细胞相关检测项目进行对照研究等进行探讨,这些均有待于临床进一步观察。

#### 参考文献

- [1] Babcock HW. The possibility of compensating astronomical seeing. *Publ Astron Soc Pac*, 1953,65:229.
- [2] Roorda A. Applications of adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. *Optom Vis Sci*, 2010,87(4):260-268.
- [3] Burns SA, Tumber R, Elsner AE, et al. Large-field-of-view, modular, stabilized, adaptive-optics-based scanning laser

ophthalmoscopy. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis*, 2007,24(5):1313-1326.

[4] Giannini JP, Lu RW, Bower AJ, et al. Visualizing retinal cells with adaptive optics imaging modalities using a translational imaging framework. *Biomed Opt Express*, 2022,13(5):3042-3055.

[5] Mujat M, Ferguson RD, Iftimia N, et al. Compact adaptive optics line scanning ophthalmoscopy. *Opt Express*, 2009,17(12):10242-10258.

[6] Boretzky A, Khan F, Burnett G, et al. *In vivo* imaging of photoreceptor disruption associated with age-related macular degeneration; a pilot study. *Lasers Surg Med*, 2012,44(8):603-610.

[7] Li WY, Liu GX, He Y, et al. Quality improvement of adaptive optics retinal images using conditional adversarial networks. *Biomed Opt Express*, 2020,11(2):831-849.

[8] Zhang B, Li N, Kang J, et al. Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy in fundus imaging, a review and update. *Int J Ophthalmol*, 2017,10(11):1751-1758.

[9] Jonas JB, Schneider U, Naumann GO. Count and density of human retinal photoreceptors. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 1992,30(6):505-510.

[10] Liang JZ, Williams DR, Miller DT. Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. *J Opt Soc Am A, JOSAA*, 1997,14(11):2884-2892.

[11] Duncan JL, Carroll J. Adaptive optics imaging of inherited retinal disease. *Cold Spring Harb Perspect Med*, 2023,13(7):a041285.

[12] Wynne N, Heitkotter H, Woertz EN, et al. Comparison of cone mosaic metrics from images acquired with the SPECTRALIS high magnification module and adaptive optics scanning light ophthalmoscopy. *Transl Vis Sci Technol*, 2022,11(5):19.

[13] Pandiyan VP, Jiang XY, Kuchenbecker JA, et al. Reflective mirror-based line-scan adaptive optics OCT for imaging retinal structure and function. *Biomed Opt Express*, 2021,12(9):5865-5880.

[14] Chen M, Cooper RF, Gee JC, et al. Automatic longitudinal montaging of adaptive optics retinal images using constellation matching. *Biomed Opt Express*, 2019,10(12):6476-6496.

[15] Liu JF, Shen C, Liu T, et al. Deriving visual cues from deep learning to achieve subpixel cell segmentation in adaptive optics retinal images. *Ophthalmic Med Image Anal* (2019), 2019,11855:86-94.

[16] Luo T, Gast TJ, Vermeer TJ, et al. Retinal vascular branching in healthy and diabetic subjects. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2017,58(5):2685-2694.

[17] Birnback CD, Järveläinen M, Possin DE, et al. Histopathology and immunocytochemistry of the neurosensory retina in fundus flavimaculatus. *Ophthalmology*, 1994,101(7):1211-1219.

[18] Nakatake S, Murakami Y, Funatsu J, et al. Early detection of cone photoreceptor cell loss in retinitis pigmentosa using adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2019,257(6):1169-1181.

[19] Chen YM, Ratnam K, Sundquist SM, et al. Cone photoreceptor abnormalities correlate with vision loss in patients with stargardt disease. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2011,52(6):3281-3292.

[20] Murro V, Mucciolo DP, Giorgio D, et al. Adaptive optics imaging in patients affected by pseudoxanthoma elasticum. *Am J Ophthalmol*, 2021,224:84-95.

[21] Chen YW, He Y, Wang J, et al. Automated superpixels-based

identification and mosaicking of cone photoreceptor cells for adaptive optics scanning laser ophthalmoscope. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18 (10):52-56.

[22] Rockhill RL, Euler T, Masland RH. Spatial order within but not between types of retinal neurons. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97(5): 2303-2307.

[23] Matlach J, Mulholland P, Cilkova M, et al. Ageing changes in retinal outer nuclear layer thickness and cone photoreceptor density using adaptive optics - free imaging. *Eur J Ophthalmol*, 2023, 33 (3): 1434-1442.

[24] 庞东渤, 洪晶. 视网膜色素上皮细胞凋亡途径的研究. *眼科新进展*, 2007, 27(6):405-407.

[25] Valterova E, Unterlauff JD, Francke M, et al. Comprehensive automatic processing and analysis of adaptive optics flood illumination retinal images on healthy subjects. *Biomed Opt Express*, 2023, 14(2): 945-970.

[26] Wells-Gray EM, Choi SS, Bries A, et al. Variation in rod and cone density from the fovea to the mid-periphery in healthy human retinas using adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. *Eye*, 2016, 30(8):1135-1143.

[27] Liu JF, Shen C, Aguilera N, et al. Active cell appearance model induced generative adversarial networks for annotation-efficient cell segmentation and identification on adaptive optics retinal images. *IEEE Trans Med Imaging*, 2021, 40(10):2820-2831.

## 《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告》 2023版中国眼科期刊入选名单及排名

《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告》2023版经严格评议,精选全球优秀科技期刊1555种为《世界引文数据库》来源期刊,中国期刊1772种,其中中文期刊1350种。期刊名录及指标、收录证书等可通过网络免费查阅,网址为:[HTTP://WJCI.CNKI.NET](http://WJCI.CNKI.NET)。入选《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告》2023版的中国眼科期刊共9种,其WJCI学科排名及分区等各项评价指标如下表。

**2023版《科技期刊世界影响力指数(WJCI)报告》中国眼科期刊入选名单及排名**

| 序号 | 刊名  | ISSN/EISSN              | 出版商/主办单位          | 总被引<br>频次 | 影响因子  | WAJCI | WI    | WJCI  | WJCI<br>学科排名 | 分区 |
|----|---|-------------------------|-------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|--------------|----|
| 1  | EYE AND VISION                            | 2326-0246/<br>2326-0254 | 浙江省新闻<br>出版广电局    | 1294      | 5.349 | 1.816 | 0.139 | 1.955 | 20/95        | Q1 |
| 2  | INTERNATIONAL JOURNAL<br>OF OPHTHALMOLOGY | 2222-3959/<br>2227-4898 | 中华医学会<br>西安分会     | 4233      | 1.564 | 0.915 | 0.208 | 1.123 | 50/95        | Q3 |
| 3  | 中华眼科杂志                                    | 0412-4081/              | 中华医学会             | 1864      | 1.647 | 0.710 | 0.227 | 0.937 | 56/95        | Q3 |
| 4  | 国际眼科杂志                                    | 1672-5123/              | 中华医学会<br>西安分会     | 1203      | 0.412 | 0.217 | 0.264 | 0.481 | 76/95        | Q4 |
| 5  | 中华实验眼科杂志                                  | 2095-0160/              | 中华医学会             | 818       | 0.595 | 0.244 | 0.048 | 0.292 | 82/95        | Q4 |
| 6  | 眼科新进展                                     | 1003-5141/              | 新乡医学院             | 682       | 0.456 | 0.182 | 0.076 | 0.258 | 86/95        | Q4 |
| 7  | 中华眼视光学与<br>视觉科学杂志                         | 1674-845X/              | 中华医学会             | 550       | 0.479 | 0.177 | 0.030 | 0.207 | 88/95        | Q4 |
| 8  | 中华眼底病杂志                                   | 1005-1015/              | 中华医学会             | 429       | 0.367 | 0.126 | 0.043 | 0.169 | 89/95        | Q4 |
| 9  | 中国眼耳鼻喉科杂志                                 | 1671-2420/              | 复旦大学附属<br>眼耳鼻喉科医院 | 240       | 0.215 | 0.054 | 0.048 | 0.102 | 91/95        | Q4 |

摘自中国知网:<https://wjci.cnki.net/Home/JournalList?code=004>