

·临床研究·

SMILE术暗适应下瞳孔直径的影响因素分析

林海芹, 刘 泉

(中山大学中山眼科中心眼科学国家重点实验室, 广东广州 510060)

摘要:【目的】比较手持瞳孔测量仪与Sirius眼前节分析系统对暗适应下瞳孔直径测量的一致性,探究SMILE术后暗适应下瞳孔直径的变化以及影响暗适应下瞳孔直径的因素。【方法】本研究分为两部分:①纳入接受SMILE手术的患者128人(共256只眼),采用两种方法对同一只眼术前和术后3月的暗适应下瞳孔直径进行测量,数据采用配对资料的符号秩和检验和简单线性回归分析;②回顾性研究,纳入行SMILE手术患者2237人(共4179只眼),采集其暗适应下瞳孔直径、年龄、性别、眼别、主视眼及等效球镜度等数据进行分析。【结果】用手持瞳孔测量仪测量(x)和用Sirius眼前节分析系统测量暗适应下瞳孔直径(y)的差异无统计学意义($P=0.369$),行简单线性回归分析: $\hat{y}=0.929x+0.453, r^2=0.858$ 。SMILE术前($x, 6.80\pm 0.88$)mm较术后3月的暗适应下瞳孔直径($y, 6.65\pm 0.73$)mm大,且其差异有统计学意义($P=0.018$),行简单线性回归分析: $\hat{y}=1.050x-0.223, r^2=0.771$ 。暗适应下瞳孔直径影响因素的流行病学研究:①对暗适应下瞳孔直径与年龄行相关性分析,发现两者呈负相关($r=-0.204, P=0.000$)。②男组暗适应下瞳孔直径(6.35 ± 0.75)mm较女组(6.27 ± 0.74)mm大,且其差异有统计学意义($P=0.000$)。③右眼组(6.29 ± 0.74)mm及左眼组(6.31 ± 0.75)mm差异无统计学意义。④主视眼组(6.30 ± 0.73)mm及非主视眼组(6.31 ± 0.75)mm差异无统计学意义。⑤低度(6.23 ± 0.73)mm、中度(6.31 ± 0.74)mm、高度(6.30 ± 0.75)mm和超高度近视组(6.33 ± 0.70)mm间的差异无统计学意义。【结论】①手持瞳孔测量仪及Sirius眼前节分析系统对术前暗适应下瞳孔直径的测量具有一致性,在屈光手术中可使用手持瞳孔测量仪替代SIRIUS眼前节分析系统对暗适应下瞳孔直径进行测量。②SMILE术后3月患者暗适应下瞳孔直径有变小趋势。③术前暗适应下瞳孔直径与年龄呈负相关,男性的术前暗适应下瞳孔直径较女性大,术前暗适应下瞳孔直径与眼别、主视眼和术前等效球镜度无明显关系。

关键词:暗适应下瞳孔直径;瞳孔相关因素;眼别;主视眼;术前等效球镜度

中图分类号:R779.6

文献标志码:A

文章编号:1672-3554(2021)05-0756-06

DOI:10.13471/j.cnki.j.sun.yat-sen.univ(med.sci).2021.0514

Clinical Study on Pupil Diameter Under Dark Adaptation of SMILE

LIN Hai-qin, LIU Quan

(State Key Laboratory of Ophthalmology, Zhongshan Ophthalmic Center, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510060, China)

Correspondence to: LIU Quan; E-mail: drliuquan@163.com

Abstract:【Objective】To compare the consistency between handheld pupil measuring instrument and Sirius anterior segment analysis system in measuring pupil diameter under dark adaptation, and explore the changes of pupil diameter under dark adaptation after small incision lenticule extraction (SMILE) surgery and the factors affecting pupil diameter under dark adaptation.【Methods】This study is divided into two parts. ① One hundred and twenty-eight patients (256 eyes) who underwent SMILE surgery were included in this study. Besides, the pupil diameter under dark adaptation of the same eye, before and 3 months after surgery, were measured by two methods. The data were analyzed by Wilcoxon matched-pairs signed rank sum test and simple linear regression analysis. ② A retrospective study included 2237 patients (4179 eyes in total) who underwent SMILE surgery, and data of pupil diameter under dark adaptation, age, gender, eye type, dominant eye and equivalent spherical power were collected for analysis.【Results】There was no significant difference between the

收稿日期:2021-07-12

基金项目:国家自然科学基金(31671000)

作者简介:林海芹,硕士生,研究方向:激光近视眼, E-mail: 772018495@qq.com; 刘泉,通信作者,教授,研究方向:激光近视眼, E-mail: drliuquan@163.com

pupil diameter under dark adaptation measured by hand-held pupil measuring instrument (\hat{y}) and that measured by Sirius anterior segment analysis system ($P=0.369$). Simple linear regression analysis was performed ($\hat{y}=0.929x+0.453$, $r^2=0.858$). The difference of pupil diameter under dark adaptation before SMILE surgery (x , 6.80 ± 0.88) mm and pupil diameter under dark adaptation 3 months after SMILE surgery (\hat{y} , 6.65 ± 0.73) mm was statistically significant ($P=0.018$). Simple linear regression analysis showed that $\hat{y}=1.050x-0.223$ and $r^2=0.771$. This is an epidemiological study on influencing factors of pupil diameter under dark adaptation. ① Correlation analysis between pupil diameter under dark adaptation and age showed that there was a negative correlation between them ($r=-0.204$, $P=0.000$). ② The pupil diameter under dark adaptation of male group (6.35 ± 0.75) mm was significantly different from that of female group (6.27 ± 0.74) mm ($P=0.000$). ③ There was no significant difference between the right eye group (6.29 ± 0.74) mm and the left eye group (6.31 ± 0.75) mm. ④ There was no significant difference between the dominant eye group (6.30 ± 0.73) mm and the non-dominant eye group (6.31 ± 0.75) mm. ⑤ There is no statistically significant difference among low myopia group (6.23 ± 0.73) mm, moderate myopia group (6.31 ± 0.74) mm, high myopia group (6.30 ± 0.75) mm and super high myopia group (6.33 ± 0.70) mm.【Conclusions】① Hand-held pupil measuring instrument and Sirius anterior segment analysis system are consistent in measuring pupil diameter under dark adaptation before surgery. Therefore, in refractive surgery, hand-held pupil measuring instrument can be used to measure pupil diameter under dark adaptation instead of Sirius anterior segment analysis system. ② The pupil diameter under dark adaptation 3 months after SMILE surgery tends to decrease, compared with that before SMILE surgery. ③ Pupil diameter under preoperative dark adaptation is negatively correlated with age. Pupil diameter under preoperative dark adaptation is larger in men than that in women. Pupil diameter under preoperative dark adaptation has nothing to do with eye type, dominant eye and preoperative equivalent spherical degree.

Key words: pupil diameter under dark adaptation; factors related with pupil; eye type; dominant eye; preoperative equivalent spherical degree

[J SUN Yat-sen Univ(Med Sci), 2021, 42(5): 756-761]

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(small incision lenticule extraction, SMILE)因无瓣、微创的特点,具有良好的安全性、有效性、预测性、准确性及稳定性^[1-2],具有术后屈光矫正效果佳^[3]、高阶像差小^[4-6]、对角膜生物力学影响小^[7]等优点。因此,SMILE成为主流的屈光手术方式。大部分学者认为像差与瞳孔大小密切相关,瞳孔越大,像差越大,术后视觉质量越差。叶娅^[8]发现不同直径的瞳孔在一定条件下可明显影响对比度视力,从而影响夜间视觉质量。因此,需对患者术前暗适应下瞳孔直径进行测量以确定屈光手术参数,但现有的瞳孔测量方法,普遍具有设备价格昂贵、操作复杂、测量条件苛刻等问题,所以亟需寻找新的测量工具。手持式瞳孔测量仪以红外测量为核心,具有小巧、快捷、方便等特点,具有较高的应用前景。本研究将通过分别使用手持瞳孔测量仪和Sirius眼前节分析系统对同一只眼术前进行暗适应下瞳孔直径进行测量,比较两种测量方式的一致性。此外,暗适应下瞳孔直径的影响因素众说纷纭,本研究将比较术前和术后3月暗适应下瞳孔直径,明确SMILE术后瞳孔变化情况,以及将收集患者的术前参数,包括术前暗适应下瞳孔直径、年龄、性别、眼别、主视眼和等效球镜度,以明确暗适应下瞳孔直径的影响因素。

1 材料与方法

1.1 入选与排除标准

①符合《我国飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术规范专家共识(2016年)》手术适应症和排除禁忌症,②所有患者均有自愿摘除眼镜的愿望,③年龄 ≤ 50 岁。本研究所有入组患者签署知情同意书,接受SMILE手术治疗并配合完成研究计划。本研究获得中山大学中山眼科中心伦理委员会审批通过,所有研究步骤均遵守赫尔辛基宣言的条例。

1.2 对象与数据收集

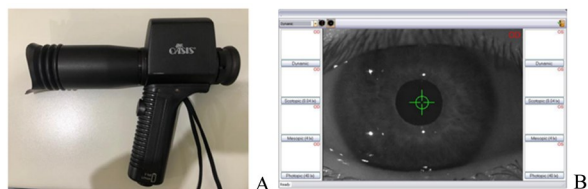
第一部分:纳入2017年3月至4月在中山大学中山眼科中心激光近视眼治疗中心接受SMILE手术的患者128人(共256只眼),采用手持瞳孔测量仪和Sirius眼前节分析系统对同一只眼术前和术后3月的暗适应下瞳孔直径分别进行测量。第二部分:纳入2017年3月1日至2018年2月28日至我中心行SMILE手术患者2 237人(共4 179只眼),采集其基本资料和术前检查结果,包括患者术前的暗适应下瞳孔直径(使用手持瞳孔测量仪测量)、年龄、性别、眼别、主视眼和等效球镜度。

1.3 检查

1.3.1 术前常规检查 基本资料(包括年龄和性

别),裸眼远视力;眼压(非接触式眼压仪, TX-20, Canon, 日本);裂隙灯眼前节检查及前置镜眼底检查(裂隙灯显微镜, SL-2G, TOPCON, 日本);眼位;角膜地形图(Pentacam 眼前节角膜分析系统, WaveLight® Oculyzer II, Alcon, Fort Worth, 德国);角膜像差和眼前节分析(Schwind Sirius 眼前节分析系统, Schwind Eye-Tech-Solutions, software version 2.6, Kleinostheim, 德国);角膜中央厚度(A超角膜测厚度仪, SP-100; TOMEY, 日本);电脑验光(电脑验光仪, RM-8000B, TOPCON, 日本);主觉验光(综合验光仪, IS-600, TOPCON, 日本);暗适应下瞳孔直径(手持瞳孔测量仪 Colvard Pupillometer, OASIS, 美国)。

1.3.2 本研究第一部分的特殊检查 分别使用手持瞳孔测量仪(图1A)和Sirius眼前节分析系统(如图1B)测量患者暗适应下瞳孔直径共256只眼。检查时间分别为患者行SMILE术前以及术后3月。检查时,关闭检查室的所有灯,检查环境亮度要求在10 lux以下,至少等待30 s^[9],直到瞳孔完全扩张。将手持瞳孔测量仪置于眼睛上方,检查时,指示患者用对侧眼聚焦在房间尽头的物体上,检查者透过目镜看到检测眼的虹膜和瞳孔后稍微向前或向后移动仪器,使图像获得更清晰的焦点,将该装置中的一个网状物将1 mm的直尺叠加在虹膜和瞳孔的图像上,测量瞳孔直径并读取结果,结果保留1位小数点,重复测量3次,取均值。然后,在同一环境下,以Sirius眼前节分析系统瞳孔计作为唯一的光源,暗视野,其中唯一的可见光源是LED光源(0.4 lux),用Sirius眼前节分析系统进行测量,检查时嘱咐患者将头部正对检查仪器,额头前靠,下颏紧靠托腮板,通过计算机红外测量得出患者暗适应下瞳孔直径大小,结果保留2位小数点,重复测量3次,取均值。



A: Hand-held pupil measuring instrument; B: Schwind Sirius Eye-Tech-Solutions interface under the dark adaptation

图1 检查方法

Fig. 1 Inspection method

1.4 SMILE手术操作

术前3 d患者常规使用可乐必要滴眼液(Santen Pharmaceutical, 日本), 4次/d, 一共12次。所有

患者完成常规角膜屈光手术前准备如术眼消毒、铺巾等操作后,由同一主刀医生采用飞秒激光机(VisuMax, Carl Zeiss Meditec AG, 德国)在表面麻醉下(5 g/L盐酸丙美卡因滴眼液)进行手术操作。

SMILE手术方法:采用Visu-Max飞秒激光系统(德国蔡司公司)完成所有患者的SMILE手术。

所有患者术后用药相同:术后第1天起即可用可乐必要滴眼液(4次/d,用14 d);海露滴眼液(4次/天,用完为止);典必殊滴眼液(4次/d,用3 d),停用后改露达舒滴眼液(4次/d,用14 d),停用后再改普罗纳克滴眼液(2次/d,用完为止)。

1.5 统计分析

用SPSS 25.0软件进行数据统计分析。第一部分:采用Shapiro-Wilks检验评估各组所有指标分布的正态性,各组数据均不完全符合正态分布,使用配对资料的符号秩和检验。当分析结果中 $P < 0.05$,可以认为组间的差异有统计学意义。所有分析的数据均为定量资料,结果用均值±标准差($\bar{x} \pm s$)来描述。第二部分:用Shapiro-Wilks检验评估各组暗适应下瞳孔直径分布的正态性,各组数据不完全符合正态分布或方差不齐,使用非参数检验,若分析的数据仅有两组,则使用Wilcoxon秩和检验,若分析的数据分为多组,则使用Kruskal Wallis H 检验。当分析结果中 $P < 0.05$,可以认为组间的差异有统计学意义。所有分析的数据均为定量资料,结果用均值±标准差($\bar{x} \pm s$)描述。

2 结果

根据暗适应下瞳孔直径的测量方法、SMILE术前和术后3月、年龄、性别、眼别、主视眼和等效球镜度等进行分组统计,具体分组情况、各组的样本量和均值±标准差见表1。

2.1 本研究中第一部分256只眼的分析结果

患者的平均年龄为18~34(26.17 ± 5.25)岁,术前等效球镜为-1.75~-10.75(-6.09 ± 1.84)D,其中球镜为-0.75~-10.00(-5.68 ± 1.83)D,柱镜为0~-2.00(-0.83 ± 0.67)D,术前最佳矫正视力(logMAR)为-0.18~-0.05(-0.09 ± 0.06),平均暗适应下瞳孔直径为4.4~8.4(6.75 ± 0.94)mm。

2.1.1 两种暗适应下瞳孔直径测量方法的简单线性回归分析 将手持瞳孔测量仪测量组和Sirius眼前节分析系统测量组进行配对资料的符号秩和检验,两者的差异无统计学意义($Z = -0.899$, $P = 0.369$)。进而行简单线性回归分析,得出回归方程: $\hat{y} = 0.929x + 0.453$, $r^2 = 0.858$,其分布如图2。

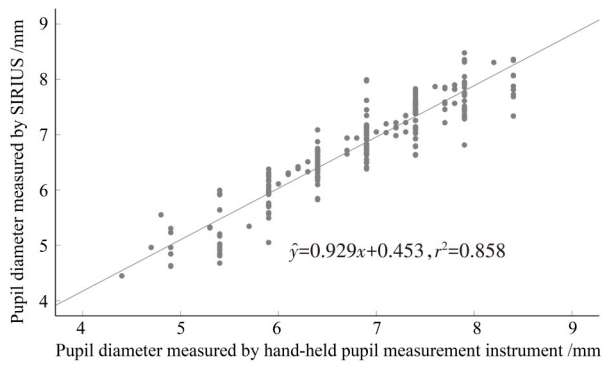


图2 两种暗适应下瞳孔直径测量方法的简单线性回归分析
Fig. 2 Simple linear regression analysis of pupil diameter measurement methods under two dark adaptations

2.1.2 术前与术后3月的暗适应下瞳孔直径的变化 将SMILE术前组(x)和术后3月组(y)进行配对资料的符号秩和检验,两者的差异有统计学意义($Z=-2.376, P=0.018$),进而行简单线性回归分析,得出回归方程: $\hat{y}=1.050x-0.223, r^2=0.771$,其分布如图3。

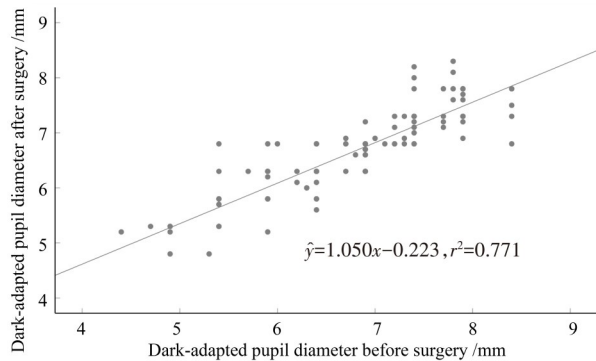


图3 术前术后的暗适应下瞳孔直径的关系
Fig. 3 The relationship of pupil diameter under dark adaptation before and after surgery

2.2 暗适应下瞳孔直径与年龄、性别、眼别、主视眼和等效球镜度等因素的关系

对本研究中收集的4 179只眼的数据进行分析:患者的平均年龄为17~50(26.64 ± 5.96)岁,术前等效球镜为-1.75~-10.75(-5.79 ± 2.14)D,术前暗适应下瞳孔直径为3.50~8.50(6.30 ± 0.74)mm。

经Kruskal Wallis H 检验可得出7个年龄组的暗适应下瞳孔直径总体分布不完全相同($H=163.404, P=0.000$),其分布如图4;再进一步行7组间的两两比较,可以发现20岁以下跟31~35岁($P=0.000$)、36~40岁($P=0.000$)、41~45岁($P=0.000$)、46~50岁($P=0.000$)组间的差异有统计学意义;21~25岁跟31~35岁($P=0.000$)、36~40岁($P=0.000$)、

41~45岁($P=0.000$)、46~50岁($P=0.000$)组间的差异有统计学意义;26~30岁跟31~35岁($P=0.000$)、36~40岁($P=0.000$)、41~45岁($P=0.000$)、46~50岁($P=0.000$)组间的差异有统计学意义;31~35岁跟46~50岁($P=0.005$)组间的差异有统计学意义,且年龄越大组的暗适应下瞳孔直径越小。最后对暗适应下瞳孔直径与年龄行相关性分析显示两者呈负相关($r=-0.204, P=0.000$)。综上所述,随年龄增大,暗适应下瞳孔直径有减小趋势。

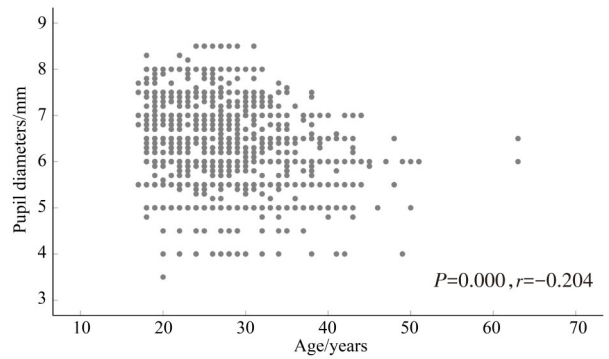


图4 暗适应下瞳孔直径与年龄的相关性

Fig. 4 The relationship of pupil diameter under dark adaptation with age

男组的暗适应下瞳孔直径较女组大,其差异有统计学意义($Z=-5.568, P=0.000$)。右眼组与左眼组、主视眼组与非主视眼组以及不同等效球镜度四组的暗适应下瞳孔直径间的差异无统计学意义($P>0.05$),详见表1。

3 讨论

SMILE手术中光学切削区是根据术前暗适应下瞳孔直径来进行个性化设置的,高阶像差均方根和初级球差与光学区直径与瞳孔直径比有显著的相关性^[10]。叶娅^[8]发现不同直径的瞳孔在一定条件下可明显影响对比度视力,从而影响夜间视觉质量。因此,术前暗适应下瞳孔直径是决定SMILE术中手术参数的重要指标之一,在术前对其进行准确测量是至关重要的。

近年来,关于瞳孔测量的技术也种类繁多^[11]。传统瞳孔检测是通过观察并标定,或采用卡尺进行手工测量。此方法测量结果粗略,给临床工作带来极大的不便。为此国内外学者研究了多种测量方法:模板匹配方法^[12]、投影法^[13]、“特征眼”法^[14]、基于小波变换方法^[15]、对称性方法^[16]和基于神经网络^[17]等方法。从静态图像中提取瞳孔信息的算

表1 各组暗适应下瞳孔直径的统计分析
Table 1 Statistical analysis of pupil diameter under dark adaptation in each group

Variables	Groups	n	Diameter/mm	Statistics	P
Measurement	hand-held	256	6.79±0.87	Z=-0.899	0.369
	Sirius	256	6.80±0.88		
Surgery	Before	256	6.80±0.88	Z=-2.376	0.018
	3 months after	256	6.65±0.73		
Age/years	≤20	676	6.42±0.71	H=163.404	0.000
	21~25	1236	6.41±0.73		
	26~30	1294	6.32±0.77		
	31~35	672	6.13±0.68		
	36~40	202	5.96±0.66		
	41~45	72	5.53±0.73		
	46~50	24	5.40±0.70		
Gender	Male	736	6.35±0.75	Z=-5.568	0.000
	Female	1 353	6.27±0.74		
Eye type	OD	2 091	6.29±0.74	Z=-0.643	0.520
	OS	2 088	6.31±0.75		
Dominant eye	Dominant eye	2 082	6.30±0.73	Z=-0.349	0.727
	Non-dominant eye	2 080	6.31±0.75		
	>-3.00 D	326	6.23±0.73	H=2.892	0.409
Preoperative equivalent spherical degree	-6.00~-3.00 D	2 108	6.31±0.74		
	-10.00~-6.00 D	1 446	6.30±0.75		
	<-10.00 D	299	6.33±0.70		

法^[18]已广泛应用于暗适应下瞳孔直径的测量。手持式瞳孔测量仪以红外测量为核心对瞳孔进行测量定位,弥补了 Sirius 眼前节分析系统的缺陷。本研究第一部分纳入 256 只眼分别使用手持瞳孔测量仪和 Sirius 眼前节分析系统对同一只眼术前和术后 3 月的暗适应下瞳孔直径进行测量,结果发现①两种测量方法的差异在统计学上无显著意义,这说明两种测量方法都能保证术前暗适应下瞳孔直径测量的准确性。手持瞳孔测量仪在实用性和推广度方面明显优于 Sirius 眼前节分析系统。②SMILE 术前暗适应下瞳孔直径较术后 3 月的大,且其差异有统计学意义,再进行简单线性回归分析,得出回归方程: $\hat{y}=1.050x-0.223$, $r^2=0.771$,说明 SMILE 手术后 3 月患者的暗适应下瞳孔直径有变小趋势,且可根据术前的暗适应下瞳孔直径对术后 3 月的进行推测,用以辅助 SMILE 术前光学切削区的设定。但目前 SMILE 术后 3 月暗适应下瞳孔直径变小的机制不明,尚需进一步的动物实验进行证实。综上,

本研究第一部分证实了手持瞳孔测量仪的有效性与 Sirius 眼前节分析系统一致,且术后 3 月患者的暗适应下瞳孔直径有变小趋势,前者有利于瞳孔测量在临床中的普及,后者有利于推测术后 3 月瞳孔变化,两者均有利于辅助 SMILE 术中光学切削区的设定,优化手术参数,有利于进一步提高患者术后的视觉质量。

瞳孔的大小与年龄、性别、眼别、主视眼、屈光度等因素的相关性并未有研究明确表明其关系。本研究发现,瞳孔直径与年龄呈负相关;男组的术前暗适应下瞳孔直径大于女组;眼别、主视眼以及等效球镜度对术前暗适应下瞳孔直径无明显影响。既往研究发现,随着年龄的增长,瞳孔直径减小^[19],与本研究结论一致,但目前机制不明,可能与患者生理因素相关,随着年龄增长,自主神经功能下降,瞳孔直径逐渐变小,反应速度逐渐变大^[20]。本研究发现男组的瞳孔直径明显大于女组,目前研究机制同样不明,研究推测可能与交感神经兴奋性以及激

素相关^[20]。其余指标如眼别、主视眼以及屈光度目前并无发现与瞳孔直径明显相关。因此,在临床工作中,在对患者进行SMILE光学切削区设置时,应注意年轻患者和男性患者的术前暗适应下瞳孔直径更大,主刀医生应酌情增大其光学切削区。

综上,采用手持瞳孔测量仪进行暗适应下瞳孔

直径的测量是有效、便利的方法,有利于推广使用。SMILE术后3月暗适应下瞳孔直径有变小趋势,术前暗适应下瞳孔直径与行SMILE手术患者的年龄和性别有关,与眼别、主视眼、术前等效球镜度无明显相关,在进行SMILE术中光学切削区设置时应注意患者的性别与年龄,合理增大光学切削区。

参考文献

- [1] Xia F, Shen Y, Han T, et al. Small incision lenticule extraction (SMILE) for moderate and high myopia: seven-year outcomes of refraction, corneal tomography, and wavefront aberrations [J]. *J Ophthalmol*, 2020, 2020: 3825864.
- [2] Abdelwahab S, Hamed A, Elshahat A, et al. Outcomes of small incision lenticule extraction with dual-incisions in myopic patients [J]. *Clin Ophthalmol*, 2020, 14:3067-3074.
- [3] Chiam NPY, Mehta JS. Comparing patient-reported outcomes of laser in situ keratomileusis and small-incision lenticule extraction: A review [J]. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)*, 2019, 8(5):377-384.
- [4] Ganesh S, Brar S, Patel U. Comparison of ReLEx SMILE and PRK in terms of visual and refractive outcomes for the correction of low myopia [J]. *Int Ophthalmol*, 2018, 38(3): 1147-1154.
- [5] Yao P, Zhao J, Li M, et al. Microdistortions in Bowman's layer following femtosecond laser small incision lenticule extraction observed by Fourier-Domain OCT [J]. *J Refract Surg*, 2013, 29(10): 668-674.
- [6] Chansue E, Tanehsakdi M, Swasdibutra S, et al. Efficacy, predictability and safety of small incision lenticule extraction (SMILE) [J]. *Eye Vis (Lond)*, 2015, 2: 14.
- [7] Wu W, Wang Y. The correlation analysis between corneal biomechanical properties and the surgically induced corneal high-order aberrations after small incision lenticule extraction and femtosecond laser in situ keratomileusis [J]. *J Ophthalmol*, 2015, 2015: 758196.
- [8] 叶娅,沈政伟,尹禾,等.暗环境下瞳孔大小对对比度视力的影响 [J]. *国际眼科杂志*, 2011, 11(12): 2113-2115.
Ye Y, Shen ZW, Yin H, et al. The effect of pupil size on contrast visual acuity in dark environment [J]. *Int J Ophthalmol*, 2011, 11(12): 2113-2115.
- [9] Halkiadakis I, Chatziralli I, Drakos E, et al. Causes and management of small pupil in patients with cataract [J]. *Oman J Ophthalmol*, 2017, 10(3): 220-224.
- [10] Qin B, Zhao J, Li MY, et al. The comparison of visual outcomes, aberrations, and Bowman's layer micro-distortions after femtosecond laser small-incision lenticule extraction (SMILE) for the correction of high and moderate myopia and myopic astigmatism [J]. *BMC Ophthalmol*, 2019, 19(1): 138.
- [11] Hayashi K, Yoshida M, Ishiyama M, et al. Pupillary light response after cataract surgery in healthy patients [J]. *Jpn J Ophthalmol*, 2021, Online ahead of print.
- [12] Zhang LZ, Hu JP, Wan DM, et al. Innovative measurement of parallelism for parallel transparent plate based on optical scanning holography by using a random-phase pupil [J]. *Appl Opt*, 2015, 54(9): 2483-2488.
- [13] Diwan DT. Real time eye template generation system in an image sequence [J]. *Digital Image Processing*, 2012, 11(4): 25-29.
- [14] Pabiasz S, Starczewski JT. A new approach to determine three-dimensional facial landmarks [M]. *Artificial Intelligence and Soft Computing*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, 286-296.
- [15] Gollamoazzam M, Muntarina K, Sultana N, et al. An efficient method for eye detection in color images using morphological operations [J]. *Int J Comput Appl*, 2014, 2(95): 23-27.
- [16] Aiello LP, Odia I, Glassman AR, et al. Comparison of early treatment diabetic retinopathy study standard 7-field imaging with ultrawide-field imaging for determining severity of diabetic retinopathy [J]. *JAMA Ophthalmol*, 2019, 137(1): 65-73.
- [17] Roberts M, Claridge E. Cooperative coevolution of image feature construction and object detection [M]. *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII*. Springer Berlin Heidelberg, 2004, 902-911.
- [18] Wallace HB, Misra SL, McKelvie J. Validation of Mahajan's formula for scaling ocular higher-order aberrations by pupil size [J]. *Indian J Ophthalmol*, 2020, 68(6): 1067-1072.
- [19] Guillon M, Dumbleton K, Theodoratos P, et al. The effects of age, refractive status, and luminance on pupil size [J]. *Optom Vis Sci*, 2016, 93(9): 1093-1100.
- [20] Poynter WD. Pupil-size asymmetry is a physiologic trait related to gender, attentional function, and personality [J]. *Laterality*, 2017, 22(6): 654-670.