

# 角膜透镜技术治疗圆锥角膜的研究进展

王晓璇<sup>1</sup>, 雷玉琳<sup>2</sup>

引用:王晓璇,雷玉琳.角膜透镜技术治疗圆锥角膜的研究进展.国际眼科杂志,2024,24(3):380-383.

基金项目:山东省医药卫生科技发展计划项目(No.202107020525);济南市卫生健康委员会科技计划项目(No.2022-2-191)

作者单位:<sup>1</sup>(256699)中国山东省滨州市,滨州医学院;  
<sup>2</sup>(250200)中国山东省济南市,济南明水眼科医院

作者简介:王晓璇,在读硕士研究生,研究方向:屈光。

通讯作者:雷玉琳,毕业于山东大学,博士研究生,主任医师,副院长,研究方向:近视、屈光。leiyulin642@126.com

收稿日期:2023-07-18 修回日期:2024-01-18

## 摘要

圆锥角膜是一种慢性非炎症性的角膜疾病,以角膜基质变薄、局部扩张呈锥形突出为特征,常造成不可逆的不规则散光 and 不同程度矫正视力下降。随着飞秒激光屈光手术的兴起,角膜透镜作为一种良好的生物学材料被发现。角膜透镜植入角膜可增加角膜厚度,延缓圆锥角膜病程进展以便于下一步的治疗。目前,从近视飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(small incision lenticule extraction, SMILE)中获得的凸透镜和从远视 SMILE 手术中获得的凹透镜,以及从供体中取得的平行透镜均可作为透镜材料在飞秒激光的辅助下植入角膜。本文将对上述3种透镜材料植入治疗的方式进行总结和讨论,为圆锥角膜治疗方法的选择提供参考。

关键词:圆锥角膜;角膜透镜植入;飞秒激光

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2024.3.09

## Research progress of corneal lens technique for keratoconus

Wang Xiaoxuan<sup>1</sup>, Lei Yulin<sup>2</sup>

Foundation items: Shandong Medical and Health Science and Technology Development Plan Project (No. 202107020525); Science and Technology Program of Jinan Board of Health (No. 2022-2-191)

<sup>1</sup>Binzhou Medical University, Binzhou 256699, Shandong Province, China; <sup>2</sup>Jinan Mingshui Eye Hospital, Jinan 250200, Shandong Province, China

Correspondence to: Lei Yulin. Jinan Mingshui Eye Hospital, Jinan 250200, Shandong Province, China. leiyulin642@126.com

Received: 2023-07-18 Accepted: 2024-01-18

## Abstract

• Keratoconus is a chronic non-inflammatory corneal disease characterized by thinning and localized protrusion of the corneal stroma in a conical shape. It often leads to irreversible irregular astigmatism and varying degrees of decline in corrected visual acuity. With the rise of femtosecond laser refractive surgery, corneal lenses were discovered as a good biological material. Corneal lens implantation of the cornea can increase the thickness of the cornea and delay the progression of keratoconus disease for further treatment. Currently, convex lenses obtained from myopic small incision lenticule extraction (SMILE) surgery and concave lenses obtained from farsighted SMILE surgery, as well as parallel lenses obtained from donors, can be implanted into the cornea with the aid of femtosecond lasers as lens materials. This article will summarize and discuss the above three lens material implantation methods to provide reference for the selection of keratoconus treatment.

• KEYWORDS: keratoconus; corneal lens implantation; femtosecond laser

Citation: Wang XX, Lei YL. Research progress of corneal lens technique for keratoconus. Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci), 2024, 24(3):380-383.

## 0 引言

圆锥角膜是一种常见的先天性的、进展性的、非炎症性的角膜变性疾病,通常在青少年发病。圆锥角膜的主要特征为:角膜中央或旁中央部非炎症性进行性变薄并向前呈圆锥状突起,其中圆锥顶端变薄最明显,同时会造成高度不规则近视散光和不同程度视力损害,严重者可能会导致视力丧失<sup>[1]</sup>。这种改变可能是双眼明显不对称的,而且角膜变薄通常发生在角膜扩张之前。如果任由病情发展大多数患者最终会形成角膜瘢痕,进一步影响视力。通常早期应用框架眼镜和硬性角膜接触镜(RGP)圆锥角膜进行屈光矫正,进展期应用角膜交联术控制圆锥角膜的进展,晚期圆锥角膜患者使用隐形眼镜、框架眼镜都不能获得足够的矫正视力,对于这类患者,可以选择进行角膜移植,其中穿透性角膜移植(penetrating keratoplasty, PKP),是用透明角膜组织替代原有整个角膜,这是隐形眼镜不耐受的晚期圆锥角膜患者的最常用手术方式<sup>[2]</sup>,其次深板层角膜移植术(deep anterior lamellar keratoplasty, DALK)去除角膜浅层(后弹力层和内皮层保持完整),代之以健康供体组织<sup>[3]</sup>。随着科技发展飞秒激光兴起,飞秒激光作为一种红外线激光,它具有作用时间短、瞬间功率高以及热效应区域小等优点,因此可完成高精确度的切开<sup>[4]</sup>。因此,

由飞秒激光辅助的角膜透镜移植术也逐渐用来治疗圆锥角膜。本文便是对角膜透镜技术治疗圆锥角膜的研究进展进行综述。

## 1 角膜透镜技术治疗圆锥角膜的发展史

Barraquer 早在 20 世纪 50-60 年代便提出了角膜镜片手术并于 1961 年发明了微型冷冻车床切削技术,1963 年首次完成了人眼异体冷冻切削角膜镜片移植也称层间角膜镜片术,该手术是将供体角膜冷冻切削,制成具有一定屈光力的凸型角膜镜片,移植给受体眼<sup>[5]</sup>。Kaufman 于 1979 年提出了表面角膜镜片术,它是在角膜磨镶术的基础上对角膜镜片术的改进,首先去除受体角膜中央区上皮,然后将切削成不同屈光度的异体角膜组织镜片移植于受体角膜表面<sup>[6]</sup>。该手术可适用于无晶状体眼、圆锥角膜、不宜行准分子激光或可植入式接触镜(implantable collamer lens, ICL)的单眼高度屈光不正者和角膜变薄类疾病。与此同时该手术方式还存在许多不足,例如:术后视力恢复缓慢、解冻后镜片变形、角膜镜片切削不够准确、矫正效果难以预测、设备昂贵、操作困难、供体有限、感染风险高等。

随着飞秒激光的出现与发展,可以将手术中获取的角膜基质透镜通过 2-4 mm 的小切口植入由飞秒激光产生的受体囊袋中。相较于之前手术方式该方法极大地提高了透镜切削的准确性、可以更加精确地预测矫正结果;同时术后炎症反应和愈合反应比较轻、感染风险几乎为零;而且术后无需缝合,从而避免了缝合瘢痕;供体数量大。

## 2 飞秒激光辅助的角膜透镜技术

飞秒激光小切口角膜基质透镜取出术(small incision lenticule extraction, SMILE)是一种具有无瓣、微创、安全、有效、屈光可预测性等优点的新型角膜屈光手术。通过 SMILE 手术产生的角膜基质透镜是一种良好的生物学材料,进行移植时感染风险低<sup>[7]</sup>。可以用来矫正远视、治疗角膜溃疡和穿孔、也可以用来治疗圆锥角膜<sup>[8]</sup>。当前,用来治疗圆锥角膜的透镜有:近视 SMILE 手术来源的凸透镜、远视 SMILE 手术来源的凹透镜,以及由飞秒激光从受体中取得的平行透镜。

### 2.1 近视 SMILE 来源的角膜基质透镜(凸透镜)用于治疗薄角膜圆锥角膜

**2.1.1 研究现状** 角膜胶原交联术是利用化学原理增加角膜胶原纤维之间的链接。从而使角膜的生物力学得到加强,以此起到有效控制圆锥角膜的进一步发展的作用<sup>[9-10]</sup>。但是手术过程中核黄素和紫外线可能会对角膜内皮造成损伤,所以为防止角膜内皮的损伤,手术标准要求去上皮后角膜厚度大于 400  $\mu\text{m}$  的圆锥角膜可行标准的角膜胶原交联术<sup>[11]</sup>。这对薄角膜圆锥角膜的治疗构成了一个重大的挑战,随着角膜厚度的降低,内皮损伤不可避免。目前已经提出了几种解决方案来解决这一问题,包括给予低渗核黄素、定制的测厚仪引导的上皮清创、角膜透镜植入辅助交联和加速高能量角膜胶原交联术(corneal collagen cross-linking, CXL)<sup>[12]</sup>。最近的一种方法是将 SMILE 手术中获取的角膜基质透镜放入圆锥角膜患者的囊袋里,从而增加角膜厚度以达到角膜胶原交联所需要的厚度要求。

采用飞秒激光辅助角膜基质透镜植入联合角膜胶原交联的治疗方法已经取得了良好的研究成果, Sachdev

等<sup>[13]</sup>将从 SMILE 治疗近视中获取的角膜基质透镜分别植入了 3 只角膜厚度均小于 400  $\mu\text{m}$  的薄角膜圆锥角膜患眼中,然后再对患眼进行角膜胶原交联治疗,术后矫正视力明显提高、随访 1 a 中角膜曲率稳定。王坤宁等<sup>[14]</sup>对 1 例最薄点厚度仅有 396  $\mu\text{m}$  的薄角膜圆锥角膜患者进行治疗,采用了角膜基质透镜植入联合角膜胶原交联术的治疗方法,术后随访发现,有效控制了圆锥角膜的进展。Zhao 等<sup>[15]</sup>对 1 例 18 岁薄角膜患者进行了飞秒激光辅助角膜基质透镜联合角膜胶原交联治疗,术后视力提高,角膜透明,曲率保持稳定,表明该手术方式有效控制了圆锥角膜的进展。王伟玮<sup>[16]</sup>将冷冻过的角膜基质透镜植入薄角膜的圆锥角膜患者的囊袋里,4 mo 后,等患者的屈光度及厚度稳定后再行角膜胶原交联手术,术后角膜最薄点厚度显著增加,角膜曲率趋于稳定,有效延缓了圆锥角膜的进展。孙西宇等<sup>[17]</sup>采用角膜基质透镜植入结合角膜胶原交联术治疗 1 例不接受角膜移植方案的患者,术后复查各项指标表明该手术方式具有良好的疗效。以上共同表明了角膜基质透镜的植入联合角膜胶原交联术治疗圆锥角膜的安全性和有效性。

除了飞秒激光辅助角膜基质透镜联合角膜胶原交联治疗之外,有研究发现角膜基质透镜的植入本身就有抑制圆锥角膜进一步发展的作用。Semiz 团队<sup>[18]</sup>对 40 例诊断为 2 期或 3 期晚期圆锥角膜患者进行角膜移植手术,包含 60 只患眼,所有患眼均为薄角膜,其中最小和最大角膜厚度分别为 300 和 419  $\mu\text{m}$ 。术后经过随访发现术后患者视力均较术前有所提高、角膜地形图检查 K1、K2 都有所降低、OCT 检查角膜厚度都增厚。此外有研究表明圆锥角膜中  $\beta$ -肌动蛋白表达的降低和基质角化细胞的减少可能会造成细胞骨架的不稳定和基质的变薄和减弱<sup>[19-20]</sup>,所以 Semiz 团队<sup>[18]</sup>取植入的一小部分透镜与圆锥角膜患者获得的角膜透镜进行了比较,可见植入的透镜角化细胞和端粒细胞样细胞,外观健康,细胞器发育良好,纤维厚度明显大于圆锥角膜组。这项研究表明近视 SMILE 来源的新鲜角膜基质透镜植入术是一种安全、经济、可靠的技术,可增加角膜厚度,提高视力,促进参与基质再生的健康角化细胞和 telcell 样细胞的再生。雷玉琳等<sup>[21]</sup>对 1 例最薄点厚度仅有 302  $\mu\text{m}$  的薄角膜晚期圆锥角膜患者进行了异体角膜基质透镜移植的治疗,术后角膜厚度增加、角膜表面光滑、基质透镜透明性良好,末次随访角膜曲率、前后表面高度均低于术前,表明角膜基质透镜植入有助于视力恢复和预防圆锥角膜进展。

**2.1.2 该手术方式的优点** 角膜胶原交联可以有效控制圆锥角膜的进展,但是对于薄角膜来说还有很大的限制,而 SMILE 手术的盛行,为圆锥角膜的治疗提供了新方案,它产生角膜基质透镜是一种很好的供材,具有生物相容性好以及经济易获得等优点,以上研究表明近视 SMILE 来源的角膜基质透镜治疗薄角膜圆锥角膜取得了良好疗效,不仅增加了角膜的厚度、扩大了手术的适应证、推迟甚至避免了角膜移植的可能、有效提高了患者视力,而且随着飞秒激光广泛开展,角膜基质透镜来源丰富、易获取、成本低、生物相容性好。圆锥角膜多为青少年发病,此方法的实行将会为圆锥角膜晚期的青年患者提供更多的选择。

**2.1.3 不足** 角膜基质透镜植入治疗圆锥角膜有很大优势的同时也存在一定的局限性,例如:手术操作难度大、术后早期反应略重,而且有研究发现在光镜和电镜下观察到角膜基质晶状体表面出现毛刺、纤维断裂和组织桥,并且在微观尺度上并非完全光滑<sup>[22-23]</sup>。近视 SMILE 来源的透镜为凸透镜,而圆锥角膜患者的角膜曲率本身就高,如此便导致原本就高曲率的角膜变得曲率更高,使屈光度变得更大,从而不利于术后屈光不正的矫正,影响患者的生活质量。但是如果将 SMILE 产生的角膜基质重塑和定制之后再行植入将有效解决该问题,可以利用准分子激光对取出的角膜基质透镜进行局部切削,使其中央变平以完成角膜基质透镜的重塑。但是屈光结果的准确性和可预测性需要进一步研究。

## 2.2 远视 SMILE 来源的角膜基质透镜(凹透镜)用于治疗薄角膜圆锥角膜

**2.2.1 研究现状** 自 2011 年首次发表以来,SMILE 手术已在全球范围内进行了超过 600 万次治疗,已成为一种现代、微创、可靠的治疗近视和近视散光的手术。SMILE 治疗远视也已开发并发表了初步研究。Pradhan 等<sup>[24]</sup>对接受治疗的 93 眼进行了远视 SMILE 手术,显现出与远视 LASIK 相似的中心精度,经术后回访检查发现 3-12 mo 间屈光和地形稳定性良好。Reinstein 等<sup>[25]</sup>对 199 例患者进行了 SMILE 远视治疗,术后结果表明该手术是一种矫正复合远视散光的有效治疗方法,表现出高水平的疗效、可预测性、安全性和稳定性。而且 Reinstein 等<sup>[26]</sup>通过比较远视 SMILE 手术与远视 LASIK 手术,发现远视 SMILE 的光学区直径比远视 LASIK 的等效光学区直径大,所以与 LASIK 相同区域相比,SMILE 在球差诱导方面有所改善。上述数据证明了 SMILE 治疗远视是一种可行且有效的方式。随着远视 SMILE 的开展,其产生的角膜基质透镜也可以用来作为透镜植入术的材料。

在之前的 Mastropasqua 等<sup>[27]</sup>的一项人体角膜离体研究中,我们发现植入远视 SMILE 来源的角膜基质透镜是一种可行且可重复的手术,可以在增加基质厚度的同时诱导角膜中央扁平化。随后 Mastropasqua 等<sup>[28]</sup>对 10 例 III 期和 IV 期稳定型薄角膜圆锥角膜患者进行一种新型的飞秒激光辅助角膜基质透镜治疗,使用飞秒激光对从人眼库中取得的角膜进行远视 SMILE 手术,从而取得角膜基质透镜,将其放入受体眼由飞秒激光产生的囊袋中,术后无感染、上皮缺损、间质浸润或免疫排斥的病例,患者视力均有提高,OCT 检查发现角膜厚度均增加,角膜地形图检查结果均表明锥体扁平化,活体共聚焦显微术检查发现,所有病例在随访期间均未观察到角膜炎。6 mo 时,角化细胞形态接近正常,角膜基质透镜中的大部分细胞可见明亮的角化细胞,形状更规则,反射率规则,而细胞外组织呈现正常透明度。该研究表明远视 SMILE 来源的角膜基质透镜用于治疗薄角膜圆锥角膜是一种可行且有效的角膜间质重塑技术,可改善晚期中央圆锥角膜的视力和角膜的规律性。

**2.2.2 该手术方式的优点** 对于薄角膜患者,其厚度低于角膜胶原交联术的推荐值,远视 SMILE 手术产生的凹透镜是一种良好的供材,可以用来增加薄角膜圆锥角膜患者的角膜厚度,该手术方式不仅可以增加角膜厚度,而且可

以使患者角膜中央扁平化,可以有效控制圆锥角膜进一步发展,而且使得术后角膜中央曲率降低,从而有利于术后视力的矫正。

**2.2.3 不足** 与近视 SMILE 手术相比,远视 SMILE 手术导致更多的角膜基质胶原纤维紊乱且屈光回退的发生率更大。而且远视 SMILE 手术的难度更大,角膜曲率的改变和上皮重构的存在可导致意想不到的屈光结果,最终的屈光是不可预测的。其次进行手术的患者都患有晚期圆锥角膜并且对隐形眼镜不耐受,所以手术引起的角膜曲率改善是否有利于隐形眼镜耐受性,是否对视力产生更大的影响需要进一步研究。目前研究的主要局限性是样本量小,并且选择的都是中央圆锥角膜患者,以方便进行透镜体植入和集中手术,对于常见的偏心性圆锥角膜患者是否适用需要进一步的研究。

## 2.3 飞秒激光辅助微创板层角膜移植术治疗进展性圆锥角膜

**2.3.1 研究现状** Pradhan 等<sup>[29]</sup>对 1 例 20 岁的隐形眼镜不耐受的薄角膜圆锥角膜患者进行了飞秒激光辅助微创板层角膜移植术(FL-MILK),将从供体角膜中取出的平行角膜基质透镜用准分子激光进行消融,以降低屈光度,然后将获得的透镜放入受体眼由飞秒激光创建的囊袋中,术后 1 a 右眼视力稳定、无明显水肿残余,Pentacam 检查发现最大高度略有增加,但最大和最小高度之间的差距大大缩小了,散光也减少了,OCT 检查显示角膜厚度增加了,但是比计划厚度厚了 117  $\mu\text{m}$ 。Gao 等<sup>[30]</sup>为了进一步评价飞秒激光辅助微创板层角膜移植术治疗晚期圆锥角膜的初步安全性和有效性,对 22 例晚期圆锥角膜患者进行治疗,用飞秒激光在受体角膜上创建一个 150  $\mu\text{m}$  深度的囊袋,供体角膜采用 FS200 激光系统的板层法制备,用钝性剥离法分离供体角膜上皮,将获得的角膜基质透镜放入创建好的囊袋中,任何治疗的眼睛在术后随访的 2 a 均未观察到上皮植入、感染或同种异体排斥的迹象,且角膜透明性良好,平均裸眼视力较术前有所提高,角膜形态学方面,手术后角膜前中央抬高有统计学意义的降低,然而,平均角膜测量值与术后没有差异,角膜中央厚度在术后增加,采用 Scheimpflug 非接触式测压仪(Corvis ST)研究了变形幅度(DA)和刚度参数 A1(SP-A1),SP-A1 显著升高和 DA 显著降低表明角膜僵硬程度升高。以上研究共同证明了飞秒激光辅助微创板层角膜移植术治疗进展性圆锥角膜的安全性和有效性,表明这种微创移植可能是晚期圆锥角膜的可行选择。但该手术方式还在起步阶段,后续是否能维持良好的控制效果还需要进一步的研究。

**2.3.2 该手术方式的优点** 这种手术方式增加了角膜厚度,增加了角膜的生物力学。与深板层角膜移植术相比,不影响受体的内皮细胞。同时避免了缝合带来的风险,例如:诱导不规则散光、脓肿和感染、组织糜烂和炎症等。因为供体内皮细胞层的质量不那么重要,因此组织的成本可能更低,而且更容易获得。排异反应的风险更低,视力恢复更快。潜在优势可能包括保存了角膜前神经丛,从而潜在地减少了移植后神经营养并发症的发生率。根据 Huang 等<sup>[31]</sup>先前的报导供体的移植物直径越大,对圆锥角膜受体床的压力就越大,较大的平面透镜可能更理想地调节角膜曲率与偏心扩张。该手术方式可以将较大的平

面透镜植入患眼。而且该透镜可以被定制,以反映每个病例上要处理的特定锥体。

**2.3.3 不足** 圆锥角膜造成的角膜扭曲以及严重的角膜瘢痕可能会影响飞秒激光的切削。而且在之前的研究中最终角膜厚度比预计的厚,可能与板层扩张以及供体消肿程度的不确定性有关。

### 3 总结

凹透镜体(远视 SMILE 衍生透镜体)、凸透镜体(近视 SMILE 衍生透镜体)或平行透镜体的植入,均可扩大薄角膜的间质体积并使锥体变平,显著改善裸眼视力、矫正视力以及屈光度。研究发现角膜基质透镜植入是增加角膜厚度、矫正晚期圆锥角膜患者屈光畸变、扩大角膜体积、调节角膜曲率的一种可行技术,角膜胶原交联术也可能减少或防止圆锥角膜的发展。然而,为了进一步提高角膜植入术的疗效,需要对该技术进行标准化(如是否交联,是否使用凸、平面或凹透镜),并建立一个数学模型,考虑长期上皮厚度变化和间质重塑,以确定透镜的形状或轮廓。而且由于角膜表面不规则,对患有圆锥角膜的眼睛进行精确的屈光评估是困难的。此外,角膜曲率的改变和上皮重构的存在可导致意想不到的屈光结果,所以最终的屈光是不可预测的。

该手术方式仍处于起步阶段,需要更多的后续研究,来证明其安全性与稳定性,还需要更长时间的随访,来评估阻止圆锥角膜进展方面的效果。目前的研究显示了不错的结果,圆锥角膜多为青少年发病,此方法的实行将会为圆锥角膜晚期的青年患者提供更多的选择。

### 参考文献

- [1] Ferrari G, Rama P. The keratoconus enigma: a review with emphasis on pathogenesis. *Ocul Surf*, 2020,18(3):363-373.
- [2] Boucenna W, Bourges JL. Penetrating keratoplasty. *J Fr Ophtalmol*, 2022,45(5):543-558.
- [3] Yu AC, Spena R, Pellegrini M, et al. Deep anterior lamellar keratoplasty: current status and future directions. *Cornea*, 2022,41(5):539-544.
- [4] Akimoto K, Tsuichihara S, Takamatsu T, et al. Evaluation of laser-induced plasma ablation focusing on the difference in pulse duration. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*, 2019,2019:6987-6990.
- [5] 丁萱,于志强.角膜镜片术发展史及角膜基质透镜移植研究新进展. *中华眼科杂志*, 2018,54(10):792-796.
- [6] Alio JL, Shah S, Barraquer C, et al. New techniques in lamellar keratoplasty. *Curr Opin Ophthalmol*, 2002,13(4):224-229.
- [7] Shang YF, Li Y, Wang ZQ, et al. Risk evaluation of human corneal stromal lenticules from SMILE for reuse. *J Refract Surg*, 2021,37(1):32-40.
- [8] Zhang H, Deng YP, Li ZS, et al. Update of research progress on small incision lenticule extraction (SMILE) lenticule reuse. *Clin Ophthalmol*, 2023,17:1423-1431.
- [9] Wollensak G, Spoerl E, Seiler T. Riboflavin/ultraviolet-a-induced collagen crosslinking for the treatment of keratoconus. *Am J Ophthalmol*, 2003,135(5):620-627.
- [10] 陈甜,吴昌凡,殷义平.角膜胶原交联治疗进展期圆锥角膜.实用防盲技术,2016,11(2):89-82.
- [11] Wollensak G, Spörl E, Reber F, et al. Corneal endothelial cytotoxicity of riboflavin/UVA treatment *in vitro*. *Ophthalmic Res*, 2003,35(6):324-328.
- [12] Hafezi F, Torres-Netto EA, Hillen M. Expanding indications for

corneal cross-linking. *Curr Opin Ophthalmol*, 2023,34(4):339-347.

- [13] Sachdev GS, Sachdev R, Sachdev MS. Intra corneal ring segment implantation with lenticule assisted stromal augmentation for crosslinking in thin corneas. *Am J Ophthalmol Case Rep*, 2020,19:100726.
- [14] 王坤宁,付梦军,赵静静,等.角膜表面镜(基质透镜)植入联合角膜胶原交联治疗圆锥角膜 1 例. *临床眼科杂志*, 2022,30(6):552-553.
- [15] Zhao J, Shang JM, Zhao Y, et al. Epikeratophakia using small-incision lenticule extraction lenticule addition combined with corneal crosslinking for keratoconus. *J Cataract Refract Surg*, 2019,45(8):1191-1194.
- [16] 王玮玮.基质透镜植入治疗圆锥角膜及角膜基质替代物的可行性研究. *医药卫生科技*, 2020,3:111-131.
- [17] 孙西宇,申笛,才俊,等.全飞秒激光辅助角膜异体基质透镜植入联合角膜胶原交联术治疗圆锥角膜 1 例. *中华眼视光学与视觉科学杂志*, 2022,24(6):472-474.
- [18] Semiz F, Lokaj AS, Tanriverdi G, et al. Fresh human myopic lenticule intrastromal implantation for keratoconus using SMILE surgery in a long-term follow-up study: ultrastructural analysis by transmission electron microscopy. *J Refract Surg*, 2022,38(8):520-528.
- [19] Mathew JH, Goosey JD, Bergmanson JPC. Quantified histopathology of the keratoconic cornea. *Optom Vis Sci*, 2011,88(8):988-997.
- [20] Lagali N. Corneal stromal regeneration: current status and future therapeutic potential. *Curr Eye Res*, 2020,45(3):278-290.
- [21] 雷玉琳,侯杰,许立红,等.异体角膜基质透镜移植治疗晚期圆锥角膜 1 例. *临川眼科杂志*, 2022,30(6):546-548.
- [22] Yin YW, Hu T, Xiang AQ, et al. A microscopic study of the corneal stromal lenticules extracted during femtosecond laser-assisted small incision lenticule extraction. *Exp Ther Med*, 2021,22(1):681.
- [23] Zhao J, Miao HM, Han T, et al. A pilot study of SMILE for hyperopia: corneal morphology and surface characteristics of concave lenticules in human donor eyes. *J Refract Surg*, 2016,32(10):713-716.
- [24] Pradhan KR, Reinstein DZ, Carp GI, et al. Small incision lenticule extraction (SMILE) for hyperopia: 12-month refractive and visual outcomes. *J Refract Surg*, 2019,35(7):442-450.
- [25] Reinstein DZ, Sekundo W, Archer TJ, et al. SMILE for hyperopia with and without astigmatism: results of a prospective multicenter 12-month study. *J Refract Surg*, 2022,38(12):760-769.
- [26] Reinstein DZ, Pradhan KR, Carp GI, et al. Small incision lenticule extraction (SMILE) for hyperopia: optical zone diameter and spherical aberration induction. *J Refract Surg*, 2017,33(6):370-376.
- [27] Mastropasqua L, Nubile M. Corneal thickening and central flattening induced by femtosecond laser hyperopic-shaped intrastromal lenticule implantation. *Int Ophthalmol*, 2017,37(4):893-904.
- [28] Mastropasqua L, Nubile M, Salgari N, et al. Femtosecond laser-assisted stromal lenticule addition keratoplasty for the treatment of advanced keratoconus: a preliminary study. *J Refract Surg*, 2018,34(1):36-44.
- [29] Pradhan KR, Reinstein DZ, Vida RS, et al. Femtosecond laser-assisted small incision sutureless intrastromal lamellar keratoplasty (SILK) for corneal transplantation in keratoconus. *J Refract Surg*, 2019,35(10):663-671.
- [30] Gao H, Liu MN, Li N, et al. Femtosecond laser-assisted minimally invasive lamellar keratoplasty for the treatment of advanced keratoconus. *Clin Exp Ophthalmol*, 2022,50(3):294-302.
- [31] Huang T, Hu Y, Gui M, et al. Large-diameter deep anterior lamellar keratoplasty for keratoconus: visual and refractive outcomes. *Br J Ophthalmol*, 2015,99(9):1196-1200.