

· 综述 ·

# 腰椎间盘切除术后纤维环修复的研究进展

傅裕, 吴亚伟, 张磊\*

(山东第一医科大学第一附属医院脊柱外科, 山东济南 250013)

**摘要:** 腰椎间盘切除术后髓核再突出 (postoperative relapse of lumbar disc herniation, rLDH) 压迫神经易引发腰椎术后综合征 (failed back surgery syndrome, FBSS)。由于纤维环的供血主要来自周围节段性动脉分支的小血管, 纤维环裂口瘢痕形成多需 3~6 个月。破口处形成的新瘢痕强度较低, 当椎间盘内压力极速增加时, 残余髓核多会从瘢痕处再次突出。同时由于椎管内的炎性因子通过纤维环破口进入椎间盘, 进一步加重了椎间盘的退变。纤维环修复能够促进破口瘢痕的愈合, 明显增强瘢痕的硬度, 降低髓核再突出率, 减少术后翻修的可能。随着脊柱外科微创化理念的流行, 纤维环修复的方式逐渐从开放式椎板开窗手术转变为内镜微创手术。因此, 本文就不同术式下行纤维环修复作一综述。

**关键词:** 椎间盘突出, 纤维环修复, 内窥镜, 微创手术, 综述文献

**中图分类号:** R687 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478 (2023) 20-1870-05

**Research progress in annulus fibrosus repair after lumbar discectomy // FU Yu, WU Ya-wei, ZHANG Lei. Department of Spinal Surgery, The First Affiliated Hospital, Shandong First Medical University, Jinan 250013, China**

**Abstract:** Postoperative relapse of lumbar disc herniation (rLDH) might compress nerves and cause failed back surgery syndrome (FBSS). Because the blood supply to the annulus is mainly from the small vessels of the peripheral segmental artery branches and the formation of annulus scar takes 3~6 months, the new scar formed around the rupture has low strength-resistance capacity. As the pressure in the intervertebral disc increases rapidly, the residual nucleus pulposus will protrude again from the scar. On the other hand, the inflammatory factors released from the spinal canal into intervertebral disc through the annulus fibrosus rupture, and further aggravates the degeneration of the intervertebral disc. Fibrous ring repair can promote the healing of broken annulus fibrosus, significantly enhance the hardness of scar, reduce the re-protrusion rate of nucleus pulposus, and reduce the possibility of postoperative revision. With the popularity of the concept of minimally invasive spine surgery, the way of fibrous annulus repair has gradually changed from open laminae fenestration surgery to endoscopic minimally invasive surgery. Therefore, this paper reviews the different surgical procedures for annular fibrosus repair.

**Key words:** disc herniation, annulus fibrosus repair, endoscopy, minimally invasive surgery, literature review

腰椎间盘突出 (lumbar disc herniation, LDH) 是常见的腰椎退行性疾病, 发病率为 18%~21%<sup>[1]</sup>。目前, 治疗方法多为髓核摘除术, 术后复发率为 2%~9.2%<sup>[2]</sup>。主要原因是残留髓核组织再突出压迫神经<sup>[3]</sup>。髓核摘除术后, 直接修补纤维环破口是降低腰椎术后综合征 (failed back surgery syndrome, FBSS) 与 LDH 复发的最有效方法<sup>[4]</sup>。经过国内外专家近 20 年的研究与实践, 纤维环修复已经成为一项成熟的技术。可通过不同的手术方式进行缝合。包括但不限于: 椎板开窗纤维环缝合、显微内镜下 (microendoscopic discectomy, MED) 纤维环缝合、经皮椎间孔镜下 (percutaneous endoscopic lumbar discectomy,

PELD) 纤维环缝合、单侧双通道脊柱内镜下 (unilateral biportal endoscopy, UBE) 纤维环缝合。

## 1 纤维环修复的发展历程

### 1.1 纤维环退变的原因

纤维环的完整性是防止髓核突出最主要的因素, 其退变程度起到关键的作用<sup>[5]</sup>。其中, 纤维环机械磨损的恶性循环是纤维环退变的最主要原因<sup>[6]</sup>。常规的髓核摘除术, 在摘除突出以及椎间隙内髓核的过程中, 会不可避免地破坏纤维环的结构, 术后在重力的作用下椎间盘压力增加, 残留的髓核将会再次突出并

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.20.09

作者简介: 傅裕, 硕士研究生在读, 研究方向: 纤维环修复、椎间盘修复等, (电话)13561221291, (电子信箱)sdllcfy0811@163.com

\* 通信作者: 张磊, (电话)13645311150, (电子信箱)qygzkl1818@163.com

压迫神经<sup>[7]</sup>。

## 1.2 纤维环缝合的研究进展

Carrage 等<sup>[8]</sup>通过分析不同类型椎间盘突出术后复发的影响因素,提出了纤维环的完整性与术后复发明显有关。Lebow 等<sup>[9]</sup>也发现在椎间盘髓核摘除术后,复发处常出现在原突出处或纤维环的裂口部位。由此可见,纤维环修复是避免术后复发的关键因素之一。

早在1997年,就有专家认为,髓核摘除术后的纤维环外科缝合,或许对防止椎间盘的再突出具有重要意义<sup>[10]</sup>。2000年,Ahlgren<sup>[11]</sup>开始在实验动物体内开展纤维环缝合实验,但并没有证实直接缝合对纤维环的愈合有着显著的疗效。2007年,Bajanes 率先在临床上研究了纤维环缝合的临床疗效。2001年,Chiang<sup>[4]</sup>在猪体内建立纤维环缝合模型,并经过压力实验和影像学检测,结果表明缝合的纤维环能够明显降低髓核摘除术后椎间盘退化变性的速度。

## 1.3 纤维环缝合的优点

因为髓核突出的方式不同,纤维环破口的程度也不一样。所以,纤维环缝合的效果也大不相同。相较于老年患者,年轻患者的椎间盘髓核组织长期处于胶冻状态,含水量较高,强度大,更容易组织缝合,缝合成功率较高。因此,对青年患者而言,缝合纤维环的作用更重要<sup>[3]</sup>。

目前,在医学上使用的纤维环缝合的新技术,如FAST-FIX、Xclose 等技术在临床使用中的安全性也得到了肯定,而纤维环缝合技术对预防术后椎间盘突出复发、缓解椎间盘退变、保护脊椎稳定性等方面的作用均已得到证实<sup>[12]</sup>。

## 2 椎板开窗纤维环缝合

### 2.1 椎板开窗下纤维环缝合的研究进展

1934年,Mixer 等<sup>[13]</sup>首先报道了通过开放手术治疗LDH,如今开放视野下摘除椎间盘已是治疗LDH的重要办法。1977年,由Yasargil<sup>[14]</sup>首次报道了纤维环缝合技术,在手术显微镜的帮助下,完成了椎板开窗纤维环缝合。105例患者术后1~9年内未出现复发,无神经损伤症状,术后未发现神经根病。但由于早期的技术限制,且治疗LDH的效果尚无明确定论,纤维环缝合并未成为髓核摘除后的常规操作。2013年,Bailey 等<sup>[15]</sup>通过对750例LDH患者采用开放视野下椎板开窗摘除髓核,其中500例使用Xclose缝合缝合纤维环,两组的腿部和背部VAS评分都

比术前基准值有明显改善。在术后的3、5个月和2年内,修复组患者的复发率(2.4%)明显低于未修复组(6.2%)。尽管环状修补术在统计学上没有显著意义,但它减少了随后的再突出的可能,同时保留了椎间盘切除术的好处,而不会增加复发的风险。

同年,张国刚等<sup>[16]</sup>报道了椎板开窗髓核摘除术后纤维环缝合诊治未成年人LDH的效果。通过对比86例腰椎间盘突出患者的术后6个月内腰椎活动、JOA评分的优良率以及术后疗效,修复组显著优于未修复组。另外,修复组的恢复时间和并发症发生率,明显低于未修复组。这也表明了椎板开窗髓核摘除联合纤维环缝合,能够更有效地提高LDH患者的腰椎稳定性,从而改善手术疗效。

### 2.2 椎板开窗术下纤维环缝合的优缺点

椎板开窗术虽然显露完全、视野明确、能够彻底解除突出间盘对神经根的压迫且操作空间大<sup>[17]</sup>。其弊端仍不可忽视:术中肌肉损伤面积大、手术时间长、出血多;切除了腰椎的部分后柱组织,严重降低了腰椎稳定性,可造成术后下背部的疼痛、腰椎滑脱,以及医源性椎管狭窄;术后恢复缓慢、下床时间较晚等<sup>[18]</sup>。因此,椎板开窗术下纤维环缝合并不是患者及术者首选的术式。

## 3 PELD下纤维环修复

### 3.1 PELD下纤维环缝合的研究进展

近年来脊柱外科的微创技术得到了很大发展,PELD是目前常用的微创手术方式<sup>[19]</sup>,主要是通过对腹侧突出结构的减压达到神经根松解的目的,该技术主要有YESS(Yeung endoscopic spine system)技术<sup>[20]</sup>、TESS(transforaminal endoscopic spine system)技术<sup>[15]</sup>。1997年,Yeung 等<sup>[20]</sup>研究出第3代脊柱内窥镜YESS系统,标志着这一微创技术逐步走向成熟。但由于其有限髓核摘除,对破裂的纤维环无法进行修复,术后局部炎性介质的渗出、残留髓核的再突出、局部瘢痕形成等原因,导致此术式的复发率较高,术后临床满意率有所降低。

2017年,蒋国强等<sup>[21]</sup>尝试在椎间孔镜下行纤维环修复术,80例LDH患者,40例在摘除髓核后进行纤维环缝合。评估不同时期VAS、ODI评分,术后1年改良的Macnab标准评分。两组未有明显差异,但术后1年内复发率,修复组明显低于未修复组。值得注意的是,在40例纤维环缝合的患者中,7例出现缝合失败的情况(失败率17.5%),表明纤维环缝

合仍有进一步研究与改进的空间。2018年,肖增亮等也对 Vista 通道系统下的髓核移除、联合纤维环缝合技术(Vist-a)和 PELD 对治疗 LDH 的长期安全和短期内临床效果做出了评价。42例患者中,14例进行了纤维环修复,在术后不同时间 VAS、ODI 评分,修复组均优于未修复组。然而,PELD 组仍有 1 例复发,并再次实施手术治疗,复发率高达 3.6%。

### 3.2 PELD 下纤维环修复的优缺点

PELD 能够明显缓解突出的髓核对脊髓和神经根的压力,之后进行纤维环缝合,也能够有效地减轻术后复发率<sup>[22]</sup>。对比椎板开窗,PELD 下行纤维环修复可以使用局麻,适合不能耐受全麻的患者。且术中基本上不牵拉神经根,避免了神经的损伤<sup>[23]</sup>。降低了对脊椎构造的破坏,减小了对腰椎稳定性的影响<sup>[24]</sup>。因为 PELD 的通道相对狭小,纤维环缝合的困难也很大,因此要求术者具有丰富的脊椎外科及微创治疗知识<sup>[25]</sup>。该手术创伤小、手术时间短、术中出血量低,降低了年老患者的手术风险,是患者较易接受的一种手术方式。

## 4 MED 下纤维环修复

### 4.1 MED 下纤维环缝合的进展

MED 技术对是近年来逐步发展的微创手术技术,具有疗效好、损伤范围小、康复速度快、不损伤脊柱的固定结构等优势<sup>[26]</sup>。1977年,Caspar 首次在显微镜帮助下开展了椎间盘切除术,1997年 Smith 等<sup>[27]</sup>率先将显微内窥镜方法应用于腰椎间盘切除。开创了内镜可视下经皮去除病变节段髓核,并将其应用到 LDH 患者治疗中。

2017年,朱召银等<sup>[28]</sup>首次在 MED 下进行髓核摘除纤维环修复。在 280 例 LDH 患者中,118 例患者成功实施了 MED 联合纤维环缝合术。两组的术中时间、出血量、术后患者及随访问时的疼痛视觉模拟数据表评分、Oswestry 功能障碍指标均无显著差别,但在使用腰椎 X 线测量术前和随访时术后节段椎空间的高度时发现,未修复组患者椎间隙高度较手术前下降 19.4%,而修复组患者椎间隙高度则降低了 14.5%。在 24 个月的随访中,修复组的恢复为 (8.1%) 而未修复组为 (2.5%)。这主要因为术后早期,纤维环缝合可以高效地关闭破口,促进瘢痕的形成,同时阻挡了椎管内如前列腺素、白介素在内的炎症因子进入椎间盘内部,从而改善了椎间盘的内在气压和纤维环力学整体性,减缓了椎间盘的炎性退变,

因而防止了髓核继续向该破口处冲破,从而有效地降低了髓核摘除术的复发率。

2018年,宋通渠等<sup>[29]</sup>比较了 MED 下纤维环缝合和 PELD 单纯髓核摘除术在诊断青少年 LDH 之间的差异。36 例青少年患者,其中 20 例行 MED 联合纤维环缝合手术,16 例行 PELD 术,两组间手术时间、术中出血量、术后切口以及术后住院时间均无明显差异,术后两组的 VAS 和 ODI 评分均随时间推移而明显下降,两组的 JOA 评分均随时间推移明显上升,在 10~14 个月的随访期间中,两组均无腰椎间盘突出复发。这表明, MED 下行髓核摘除纤维环修复术与 PELD 单纯髓核摘除术,均可取得相似且良好的预后,并明显降低了手术的复发率。

### 4.2 MED 下纤维环修复术的优缺点

MED 作为脊柱微创手术,其减压范围大,对腰椎病变节段致压髓核切除比较彻底,可以给予受压神经根提供足够的活动空间<sup>[30]</sup>。然而, MED 下腰椎纤维环缝合术需全麻下操作,对于不能耐受全麻的患者或伴有严重基础疾病的患者不适用此种手术方式<sup>[31]</sup>。同时, MED 下腰椎纤维环缝合术切口与出血量均明显高于其他微创手术<sup>[32]</sup>。再次,现有的纤维环缝合器比较粗笨,对于纤维环残缺口紧贴骨性结构、破口过大等情况均无法进行有效缝合,有一定缝合失败率,临床使用受限<sup>[33]</sup>。

## 5 UBE 下纤维环修复

### 5.1 UBE 技术的发展

1983年,Forst<sup>[34]</sup>首次使用关节镜,在直视下进行髓核摘除术。2016年 Hwa<sup>[35]</sup>首次报道了经皮双通道内窥镜下减压术。2017年,Heo 等<sup>[36]</sup>将其命名为 UBE 技术。UBE 作为新兴的脊柱微创手术,是对单通道脊柱内窥镜技术的改进,增加了单独的观察通道,具有术中视野清晰、可使用常规手术器械、操作范围广、对侧隐窝狭窄减压良好等优点<sup>[37]</sup>。

### 5.2 UBE 下纤维环缝合的研究进展

2022年,韩康等<sup>[38]</sup>首次报道了 UBE 下腰椎间盘切除纤维环修复。31 例 LDH 患者术后 VAS 及 ODI 评分均明显改善。MRI 显示突出物明显减少,同时腰椎 X 线片示椎间隙出现略微降低,这或许与术中椎间盘摘除过多有关。

### 5.3 UBE 下纤维环修复术的优缺点

对比椎间开窗,UBE 下纤维环修复对患者造成更小的创伤。同时,对比 MED、PLED 等微创术式,

UBE 术具备更清晰的术野以及开阔的操作视野。UBE 术采用水介质,术中操作通道水压大于肌肉静脉丛与硬膜囊表面血管血压时,患者术中出血会明显减少。因此,UBE 下纤维环修复,是未来 UBE 治疗椎间盘突出后较为科学的术式。

## 6 总结与展望

目前,纤维环修复可以明显降低髓核摘除术后复发率已成为国内外专家的共识。选择何种术式,更利于患者的预后,是临床医师首要考虑的问题。随着外科手术微创化的发展,在小切口、小创伤的理念下,微创手术似乎成为纤维环修复首选的手术方式。然而,现有研究存在研究病例少,随访时间短的缺点。还需进一步开展大型队列前瞻性研究和长期随访,以评估不同微创术式纤维环修复的相对利弊。相信各种微创术式下纤维环修复会是治疗 LDH 的新方向。

## 参考文献

- [1] 刘培太,张军,吴硕柱.成年人不同年龄阶段腰椎间盘突出症的特点[J].实用骨科杂志,2021,27(1):66-70,87.
- [2] Ambrossi GL, McGirt MJ, Sciubba DM, et al. Recurrent lumbar disc herniation after single-level lumbar discectomy: incidence and healthcare cost analysis [J]. Neurosurgery, 2009, 65 (3) : 574-578, 578.
- [3] 李益明,拾坤,马超,等.椎板开窗髓核摘除术中纤维环缝合困难的相关因素分析[J].骨科临床与研究杂志,2019,4(6):355-358.
- [4] Chiang CJ, Cheng CK, Sun JS, et al. The effect of a new anular repair after discectomy in intervertebral disc degeneration: an experimental study using a porcine spine model [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36 (10) : 761-769.
- [5] 刘鑫,孙天泽,张警,等.椎间盘纤维环修复的研究与进展[J].中国组织工程研究,2023,27(31):5078-5084.
- [6] 谭利贤,杜小康,汤润民,等.脊柱小关节骨关节炎的病因/病理与发病机制研究进展[J].中国脊柱脊髓杂志,2022,32(10):954-960.
- [7] Weinstein JN, Lurie JD, Tosteson TD, et al. Surgical versus nonoperative treatment for lumbar disc herniation: four-year results for the Spine Patient Outcomes Research Trial (SPORT) [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2008, 33 (25) : 2789-2800.
- [8] Carragee EJ, Han MY, Suen PW, et al. Clinical outcomes after lumbar discectomy for sciatica: the effects of fragment type and anular competence [J]. J Bone Joint Surg Am, 2003, 85 (1) : 102-108.
- [9] Lebow RL, Adogwa O, Parker SL, et al. Asymptomatic same-site recurrent disc herniation after lumbar discectomy: results of a prospective longitudinal study with 2-year serial imaging [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2011, 36 (25) : 2147-2151.
- [10] Reul J. Treatment of lumbar disc herniations by interventional fluoroscopy-guided endoscopy [J]. Interv Neuroradiol, 2014, 20 (5) : 538-546.
- [11] Ahlgren BD, Lui W, Herkowitz HN, et al. Effect of anular repair on the healing strength of the intervertebral disc: a sheep model [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2000, 25 (17) : 2165-2170.
- [12] 张壮壮,汪文龙,刘正.腰椎纤维环缝合技术的研究进展[J].中国骨与关节杂志,2020,9(2):153-156.
- [13] Mixer WJ, Barr JS. Rupture of the intervertebral disc with involvement of the spinal canal [J]. New Engl J Med, 1934, 211 (5) : 210-215.
- [14] Yasargil MG. Microsurgical operation of herniated lumbar disc [M] // Wüllenweber R, Brock M, Hamer J, et al. Lumbar disc adult hydrocephalus. Advances in neurosurgery, vol 4. Berlin Heidelberg: Springer, 1977.
- [15] Bailey A, Araghi A, Blumenthal S, et al. Prospective, multi-center, randomized, controlled study of anular repair in lumbar discectomy: two-year follow-up [J]. Spine (Phila Pa 1976), 2013, 38 (14) : 1161-1169.
- [16] 张国刚,程海,余峰,等.单纯椎板开窗髓核摘除术与椎板开窗髓核摘除纤维环缝合术治疗未成年人腰椎间盘突出症疗效比较[J].新乡医学院学报,2017,34(5):423-425.
- [17] 程俊杰,安宁,汤世斌,等.侧路椎间孔镜髓核摘除术与后路椎板间开窗髓核摘除术治疗腰椎间盘突出症的效果对比[J].中国实用医药,2022,17(9):73-75.
- [18] 孙海涛,韩大鹏,张洪涛,等.可视化环锯椎板间开窗内镜治疗 L<sub>5</sub>/S<sub>1</sub> 椎间盘突出症[J].中国矫形外科杂志,2021,29(13):1170-1174.
- [19] 陈树东,李永津,苏国义,等.基于腰椎间盘突出不同类型及节段探讨经皮椎间孔镜的术前规划[J].中国中医骨伤科杂志,2023,31(1):84-88.
- [20] Yeung AT. Minimally invasive disc surgery with the Yeung endoscopic spine system (YESS) [J]. Surg Technol Int, 1999, 8: 267-277.
- [21] 蒋国强. MED 下椎间盘摘除纤维环缝合术治疗单纯腰椎间盘突出症的近期疗效[C].杭州:2016年浙江省骨科学学术年会,2016.
- [22] 丁远飞,柳申鹏,宋凯,等.椎间孔镜下髓核摘除联合纤维环缝合治疗腰椎间盘突出症的疗效分析[J].实用骨科杂志,2022,28(5):436-441.
- [23] 吴继彬,葛保健,吴东迎,等.椎板开窗与椎间孔镜治疗腰椎间盘突出症比较[J].中国矫形外科杂志,2016,24(21):1972-1976.
- [24] 李昞鹏,刘璐璐,谭菁华,等.椎间孔镜腰椎间盘切除术早期复发的相关因素[J].中国矫形外科杂志,2022,30(19):1732-1737.
- [25] Smorgick Y, Floman Y, Millgram MA, et al. Mid- to long-term outcome of disc excision in adolescent disc herniation [J]. Spine J, 2006, 6 (4) : 380-384.
- [26] 唐司亚,徐进. MED 术联合镜下纤维环修复治疗腰椎间盘突出症的效果分析[J].颈腰痛杂志,2022,43(5):722-724.

- [27] Smith JS, Ogden AT, Shafizadeh S, et al. Clinical outcomes after microendoscopic discectomy for recurrent lumbar disc herniation [J]. *J Spinal Disord Tech*, 2010, 23 (1): 30-34.
- [28] 朱召银, 黎庆初, 杨洋, 等. 显微内窥镜下髓核摘除纤维环缝合治疗腰椎间盘突出症的疗效分析 [J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2017, 27 (3): 213-219.
- [29] 宋通渠, 李杰, 李益明, 等. 显微内窥镜纤维环缝合术与椎间孔镜术治疗青少年腰椎间盘突出症 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26 (23): 2135-2140.
- [30] 赵晓明, 刘亮, 袁启令, 等. 椎间孔镜与椎间盘镜治疗腰椎间盘突出症后复发率及翻修率比较的 Meta 分析 [J]. *中国内镜杂志*, 2019, 25 (12): 1-8.
- [31] Garg B, Nagraja UB, Jayaswal A. Microendoscopic versus open discectomy for lumbar disc herniation: a prospective randomised study [J]. *J Orthop Surg (Hong Kong)*, 2011, 19 (1): 30-34.
- [32] Perez-Cruet MJ, Foley KT, Isaacs RE, et al. Microendoscopic lumbar discectomy: technical note [J]. *Neurosurgery*, 2002, 51 (5 Suppl): S129-S136.
- [33] 朱灏, 刘波, 张华溢, 等. 经皮椎间孔镜与椎间盘髓核摘除术治疗腰椎间盘突出症的疗效及复发影响因素分析 [J]. *河北医学*, 2021, 27 (3): 429-436.
- [34] Forst R, Hausmann B. Nucleoscopy—a new examination technique [J]. *Arch Orthop Trauma Surg* (1978), 1983, 101 (3): 219-221.
- [35] Hwa EJ, Hwa HD, Son SK, et al. Percutaneous biportal endoscopic decompression for lumbar spinal stenosis: a technical note and preliminary clinical results [J]. *J Neurosurg Spine*, 2016, 24 (4): 602-607.
- [36] Heo DH, Son SK, Eum JH, et al. Fully endoscopic lumbar interbody fusion using a percutaneous unilateral biportal endoscopic technique: technical note and preliminary clinical results [J]. *Neurosurg Focus*, 2017, 43 (2): E8.
- [37] 王佳鑫, 许卫兵, 杨东方, 等. 单侧双通道脊柱内窥镜技术研究进展 [J]. *脊柱外科杂志*, 2020, 18 (6): 425-429.
- [38] 韩康, 谭树森, 张政, 等. 单侧双通道内窥镜腰椎间盘切除纤维环修复 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2022, 30 (23): 2193-2196.
- (收稿: 2022-12-06 修回: 2023-04-07)  
(同行评议专家: 武京国, 王丹)  
(本文编辑: 宁桦)

(上接 1869 页)

- [39] Liu W, Chen D, Jiang G, et al. A lithium-containing nanoporous coating on entangled titanium scaffold can enhance osseointegration through Wnt/ $\beta$ -catenin pathway [J]. *Nanomedicine*, 2018, 14 (1): 153-164.
- [40] 耿磊, 张国强, 倪明, 等. 载药缓释敷料对兔开放创面愈合的影响 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (24): 2257-2260.
- [41] Covarrubias C, Durán JP, Maureira M. Facile synthesis of lithium carbonate nanoparticles with potential properties for bone repair applications [J]. *Mater Lett*, 2018, 219: 205-208.
- [42] Li N, Bai J, Wang W, et al. Facile and versatile surface functional polyetheretherketone with enhanced bacteriostasis and osseointegrative capability for implant application [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13 (50): 59731-59746.
- (收稿: 2022-09-15 修回: 2023-02-20)  
(同行评议专家: 张开亮, 张海军, 赵志鹏)  
(本文编辑: 宁桦)