

· 综述 ·

## 成人股骨干骨折内固定的研究进展<sup>△</sup>

宋美玲<sup>1,2</sup>, 温 俭<sup>1</sup>, 钟玉朋<sup>1</sup>, 董谢平<sup>1\*</sup>

[1. 江西省人民医院(南昌医学院第一附属医院)骨科, 江西南昌 330006; 2. 江西中医药大学研究生院, 江西南昌 330004]

**摘要:** 股骨干骨折(femoral shaft fractures, FSF)是骨科的常见病,多为高能量致伤,因其解剖的特殊性,骨折后大多出现明显位移,若治疗不当常出现畸形愈合、骨不愈合、脂肪栓塞及急性呼吸窘迫综合征等并发症,严重时可危及生命,需及时有效治疗以恢复股骨的连续性、正常力线、长度和功能,而目前最常用的髓内钉、接骨板等内固定方法各有优缺点。本文主要介绍成人股骨干骨折内固定的研究进展,以期为临床实践提供参考。

**关键词:** 股骨干骨折, 内固定, 髓内钉, 接骨板, 研究进展

**中图分类号:** R683.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8478(2023)12-1106-05

**Research progress in internal fixation of femoral shaft fractures in adults** // SONG Mei-ling<sup>1,2</sup>, WEN Jian<sup>1</sup>, ZHONG Yu-peng<sup>1</sup>, DONG Xie-ping<sup>1</sup>. 1. Department of Orthopedics, Affiliated Hospital of Nanchang Medical College, Jiangxi Provincial People's Hospital, Nanchang 330006, China; 2. Postgraduate School, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330006, China

**Abstract:** The femoral shaft fractures (FSF) are common fractures in clinical orthopedics, usually caused by high energy. As a result of its special anatomy, most fractures occur with obvious displacement, and accompanied with complications, such as fat embolism and acute respiratory distress syndrome that may threaten life in severe cases, as well as malunion and bone nonunion if treated improperly. Therefore, FSF should be treated timely and effectively to restore the continuity, normal alignment and length of the bone. However, the most commonly used internal fixation methods, such as intramedullary nail and bone plate all have their own advantages and disadvantages. This article mainly introduces the research progress in internal fixation of femoral shaft fracture in adults, in order to provide reference for clinical practice.

**Key words:** femoral shaft fracture, internal fixation, intramedullary nail, bone plate, research progress

股骨干骨折(femoral shaft fractures, FSF)是临床常见骨折类型,多发生在小转子下2~5 cm至股骨髁上4~5 cm处,常由高能量损伤所致,治疗不当易出现感染、骨折畸形愈合、骨不愈合等并发症,死亡率和致残率较高<sup>[1,2]</sup>。FSF的治疗方式主要有保守治疗和手术治疗,保守治疗多用于儿童和不耐受手术的成人患者,疗程长,易出现畸形愈合、下肢功能障碍、骨不连等并发症。手术治疗分外固定和内固定。外固定易出现针道感染、固定针松动、神经损伤等问题,常用于多发伤患者及开放性骨折的初期临时固定<sup>[3]</sup>。内固定的适应证广、稳定性强、术后可早期功能锻炼。一直以来,作为最常用的内固定物,髓内钉和接骨板尽管已在临床普遍使用,但内固定失效、再骨

折、骨不连等问题仍时有发生。微动接骨板、桥接组合式内固定系统(bridge combined fixation system, BCFS)等更加符合骨折生物学内固定原则的新型髓外内固定器械的相继出现,为临床医师提供了更多的选择,并有望降低FSF延迟愈合和不愈合的发生率。因此临床上FSF的治疗多倾向内固定治疗。本文回顾近年国内外的相关文献,就成人FSF的内固定治疗进展作一综述。

### 1 分型

FSF的临床分型最常使用的是AO-OTA分型、Winquist-Hansen分型<sup>[4]</sup>。AO-OTA分型是基于原始

DOI:10.3977/j.issn.1005-8478.2023.12.10

**△基金项目:**国家自然科学基金地区科学基金项目(编号:8216090362);国家骨科与运动康复临床医学研究中心创新基金项目(编号:2021-NCRC-CXJJ-PY-05);江西省技术创新引导类计划项目(编号:20212BDH81018);江西中医药大学大学生创新创业训练计划项目(编号:202210412153)

**作者简介:**宋美玲,医师,硕士在读,研究方向:创伤骨折愈合的临床研究,(电话)13879742419,(电子信箱)song202306@163.com

**\*通信作者:**董谢平,(电话)13576030901,(电子信箱)13576030901@163.com

的正侧位 X 线片所进行的骨折分类,对预后具有重要指导意义。Winquist-Hansen 分型主要是描述皮质粉碎情况,可指导是否锁钉和确定负重状态<sup>[5]</sup>。

## 2 内固定治疗方式

髓内钉和接骨板是成人 FSF 的传统内固定物,随着镍钛记忆合金环抱器(Ni-Ti shaped memory embracing plate, Ni-Ti MEP)和桥接组合式内固定系统(bridge combined fixation system, BCFS)等新型内固定物渐渐进入临床,为 FSF 的治疗提供了更多选择。

### 2.1 髓内钉内固定系统

近年来,髓内钉技术蓬勃发展,涌现众多不同类型的髓内钉供选择,其中带锁髓内钉应用较多。与接骨板相比,髓内钉具有中心性固定、应力遮挡小、稳定性强等优势,且早期于骨折端形成的局部微动可促进骨痂形成,降低骨不连率。

#### 2.1.1 带锁与非带锁髓内钉

自从带锁髓内钉广泛应用于临床后,除 Ender 钉、Rush 钉仍具有特殊适应证以外,V 型针、梅花针等其他非带锁髓内钉基本上已被弃用。带锁髓内钉具有手术损伤小、固定可靠、骨折愈合快、并发症少、可早期活动、适应证广等优点。但带锁髓内钉远端锁钉困难的情况影响了骨科医师对髓内钉的选用。为解决远端锁钉困难的问题,磁力导航<sup>[6]</sup>、激光导航<sup>[7]</sup>、计算机导航<sup>[8]</sup>、芯钻锁定系统<sup>[9]</sup>、透视定位器<sup>[10]</sup>等技术相继得到应用,这些技术的应用提高了髓内钉技术的效率,降低了术中射线的摄入量及术中创伤风险。

但带锁髓内钉存在一些固有缺点:(1)应力恰好会集中到主钉最薄弱的锁孔处,易引起主钉或锁钉断裂,致使内固定失效,产生相应的并发症;(2)锁钉与锁孔的间隙配合结构方式降低了对抗旋转和剪切应力的固定作用;(3)静力性固定时骨折断端发生的应力遮挡现象,可降低骨愈合质量,并致髓内钉疲劳断裂或取钉后再骨折。这些固有缺点在一定程度上影响了髓内钉的临床应用。

#### 2.1.2 扩髓与非扩髓髓内钉

骨髓腔的大小限制了髓内钉的直径,从而决定了髓内钉的抗弯强度和固定效果。扩髓后允许插入更大直径的髓内钉,可提高抗弯曲、扭转及抗轴向压缩的能力,术后断钉风险小<sup>[11]</sup>。扩髓时产生的骨碎屑积聚于骨折断端,具有自体植骨效应<sup>[12]</sup>。但扩髓将破坏骨内膜的血液循环,且扩髓时产生的热量可引起内

侧皮质骨坏死,反过来又会影响骨愈合<sup>[13]</sup>。另外,扩髓手术时间较长,对心脏免疫反应显著,肺脑栓塞风险更高;非扩髓技术手术时间短,心、肺、脑损害发生率低,更适用于多发伤合并肺心病患者<sup>[14-16]</sup>。

#### 2.1.3 顺行与逆行髓内钉

股骨髓内钉根据置入方向的不同,可分为顺行髓内钉与逆行髓内钉。顺行髓内钉的适应证较广泛,在牵引床的帮助下,复位相对容易;但易出现术后髋关节疼痛、进针点周围异位骨化和神经损伤等并发症。而逆行髓内钉固定需经过膝关节软骨面,滑车沟部位易出现医源性软骨损伤,导致膝关节疼痛及感染<sup>[17-19]</sup>。通常顺行髓内钉是临床的首选方案,但对于 FSF 合并同侧股骨颈骨折、股骨远端骨折、孕妇或肥胖患者,逆行髓内钉更有优势<sup>[20]</sup>。总体而言,顺行与逆行髓内钉术后并发症、愈合率、长期功能结果相似,关键是要综合分析患者的具体情况,谨慎选择<sup>[21]</sup>。

### 2.2 接骨板内固定系统

接骨板属于髓外的偏心性固定,存在应力遮挡大、手术切口长、骨膜剥离较广泛等不足;但有更好的抗扭转性,且骨折对位通常更好,固定牢靠,手术简单,适应证广。随着微创内固定系统接骨板(less invasive stabilization system, LISS 接骨板)、微动接骨板等接骨板的相继出现,上述不足已获得显著改善。

#### 2.2.1 普通接骨板

因强度和刚度常达不到成人 FSF 内固定的要求,即使术后加用髓人字石膏或牵引,骨不连、畸形愈合和接骨板螺钉断裂的发生率仍很高,目前已很少使用。

#### 2.2.2 动力加压接骨板(dynamic compression plate, DCP)

DCP 通过半球形钉头与椭圆形钉孔的滑动配合,可在挤压钢板以增大钢板与骨面摩擦力的同时,对骨折断端形成轴向加压。Thapa 等<sup>[22]</sup>分别用 DCP 与髓内钉治疗 FSF 患者,结果显示在愈合、感染和内固定失败等方面无明显差异。但 DCP 术后易出现应力遮挡效应,长期固定易使接骨板下发生骨萎缩,并发接骨板或螺钉的疲劳断裂,或在内固定物取出后发生二次骨折。

#### 2.2.3 有限接触动力加压接骨板(limited contact-dynamic compression plate, LC-DCP)

LC-DCP 是在 DCP 基础上发展而来的接骨板,它与骨皮质的接触面呈波浪形,不仅能减小对骨皮质毛细血管的损伤,改善骨折端局部的血液供应,还可

降低应力遮挡引起的骨折疏松, 促进骨折愈合。相关的动物实验研究结果表明, LC-DCP 比 DCP 更适合修复 FSF<sup>[23]</sup>。

#### 2.2.4 锁定加压接骨板 (locking compression plate, LCP)

LCP 通过接骨板与螺钉头之间的螺纹锁定, 实现不接触骨面固定和角稳定, 以避免传统接骨板易引起的骨质疏松问题。相较非锁定固定, LCP 的优点主要有: (1) 对骨外膜血运损伤小, 更符合微创原则<sup>[24]</sup>; (2) 具有良好的把持力, 固定牢靠, 适用于骨质疏松患者; (3) 无需进行精准的塑形预弯。但 LCP 固定也有应力遮挡导致的骨不连、接骨板断裂、再骨折等并发症。研究表明, 其内固定术后失效的原因主要是医源性失误, 如接骨板选用不当、手术操作失误、术后过早负重锻炼等<sup>[25]</sup>。

#### 2.2.5 LISS

LISS 是基于微创经皮接骨术的一种新型内固定系统, 术中采用闭合复位, 小切口, 接骨板与骨无压力接触固定方式可保护骨膜血运。与普通接骨板相比, LISS 在骨愈合时间以及膝关节功能恢复方面更有优势<sup>[26]</sup>。LISS 出现骨折延迟愈合、骨不连及内固定失效的主要原因也是早期负重、肥胖、骨质疏松和操作不当等<sup>[27]</sup>。

#### 2.2.6 对侧皮质锁定螺钉 (far cortical locking, FCL)

随着对接骨板研究的深入, 逐渐发现传统锁定接骨板存在与接骨板相邻的近皮层应力集中、刚度较高等问题。FCL 的出现解决了骨折愈合与锁定接骨板结构刚性过高之间的矛盾, 其结构在保留锁定螺钉固定强度的同时, 降低了 84% 的固定刚度, 提供了骨折断端的微动条件, 为对称性骨痂生成提供了有利条件, 可降低骨不连发生率<sup>[28, 29]</sup>。但 FCL 在骨质疏松患者中的失败风险更高<sup>[30]</sup>。

#### 2.2.7 微动接骨板

近期多项动物研究显示, 骨折端轴向微动 0.2~1 mm 可促进骨折的愈合, 具有轴向微动功能的新型内固定物可在降低锁定接骨板整体结构刚度的同时保持结构强度, 有助于接骨板的近皮层与远皮层均匀地形成骨痂<sup>[31]</sup>。Madedy 团队研发出一种动力锁定接骨板, 系将接骨板的所有螺钉孔均设为镶嵌有带螺钉孔的滑块, 使螺钉能相对于接骨板滑动, 以此获得轴向微动, 临床实验证实该固定装置可产生早期骨痂桥接<sup>[32]</sup>。

### 2.3 镍钛形状记忆合金

目前, 由镍钛形状记忆合金材料制造的置入物已

广泛应用于骨科领域, 其具有低磁性和良好的耐磨、耐腐蚀、耐疲劳及生物相容性<sup>[33]</sup>。镍钛形状记忆合金对抗扭转、剪切、弯曲应力性能良好, 抗扭转力高于髓内钉, 应力遮挡又低于接骨板<sup>[34]</sup>。镍钛形状记忆合金捆绑内固定手术时可不剥离或少剥离骨膜, 不钻孔楔入, 不上螺钉, 固定时点面结合, 可减少对髓内血循环及骨折断端血运的破坏<sup>[35]</sup>。尤其适用于对髓腔内有金属占位的髌关节周围假体骨折的固定。但镍钛形状记忆合金捆绑内固定对粉碎性骨折的固定强度尚不够, 是典型的骨折二期愈合方式; 环抱器易为大量骨痂所发包裹, 将增加取出手术的难度, 故临床应用存在一定的局限性<sup>[36]</sup>。

### 3 BCFS

BCFS 是实现个性化组合的内固定技术, 通过螺钉、模块、连接棒组合配搭来实现内固定功能, 整个系统无力学薄弱区, 发生断裂概率小, 可实现立体性、灵活性及桥接性固定, 具有较好的生物力学稳定性<sup>[37, 38]</sup>。Kang 等<sup>[39]</sup>采用 BCFS 治疗了 14 例同侧股骨颈合并骨干骨折的患者, 结果显示其操作简单、创伤小、并发症少、应用范围广, 能有效保护骨折端血供, 骨折愈合率高, 尤其适用于多节段骨折。方继锋等<sup>[40]</sup>通过比较 BCFS 与 LCP 治疗 FSF 的围手术期情况, 发现 BCFS 治疗 FSF 的效果优于 LCP。但 BCFS 也存在一些局限, 易出现连接棒滑动、连接块脱落等并发症<sup>[41]</sup>, 可能与螺钉没有拧紧及把持力不足有关。

### 4 小结与展望

综上所述, 不同的内固定物适应证不同, 各有利弊。无论选择何种内固定物治疗 FSF, 均需综合考虑患者的年龄、健康状况、骨质疏松情况及骨折类型等个体化因素。可以预见, 未来内固定器械还将不断创新, 而如何选择并优化治疗方案, 进一步提高内固定手术的临床疗效, 尤其是如何避免并发症, 仍是外科医生和研究人员面临的挑战。

#### 参考文献

- [1] Bogdan Y, Tornetta P, Einhorn TA, et al. Healing time and complications in operatively treated atypical femur fractures associated with bisphosphonate use: a multicenter retrospective cohort [J]. J Orthop Trauma, 2016, 30 (4): 177-181.



- [2] Agarwal-Harding KJ, Meara JG, Greenberg SLM, et al. Estimating the global incidence of femoral fracture from road traffic collisions: a literature review [J]. *JBJS*, 2015, 97 (6) : e31.
- [3] Ye Z, Zhao S, Zeng C, et al. Study on the relationship between the timing of conversion from external fixation to internal fixation and infection in the treatment of open fractures of extremities [J]. *J Orthop Surg Res*, 2021, 16 (1) : 1-9.
- [4] Meinberg EG, Agel J, Roberts CS, et al. Fracture and dislocation classification compendium—2018 [J]. *J Orthop Trauma*, 2018, 32 (1) : S1-S10.
- [5] Winquist RA, Hansen Jr ST. Comminuted fractures of the femoral shaft treated by intramedullary nailing [J]. *Orthop Clin North Am*, 1980, 11 (3) : 633-648.
- [6] Gao Y, Wang H, Tu P, et al. A novel dynamic electromagnetic tracking navigation system for distal locking of intramedullary nails [J]. *Comp Meth Prog Biomed*, 2021, 209: 106326.
- [7] Maleki M, Tehrani AF, Aray A, et al. Intramedullary nail holes laser indicator, a non-invasive technique for interlocking of intramedullary nails [J]. *Sci Rep*, 2021, 11 (1) : 1-11.
- [8] Kubicek J, Tomanec F, Cerny M, et al. Recent trends, technical concepts and components of computer-assisted orthopedic surgery systems: a comprehensive review [J]. *Sensors*, 2019, 19 (23) : 5199.
- [9] 陶勇, 江淳, 田克超. 芯钻远端锁定系统在髓内钉治疗股骨干骨折中的作用 [J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23 (36) : 5800-5805.
- [10] 陈立军, 庞清江, 余霄, 等. 股骨交锁髓内钉远端锁钉体外透视定位器的研制及临床应用 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2018, 26 (8) : 757-761.
- [11] Rosa N, Marta M, Vaz M, et al. Intramedullary nailing biomechanics: evolution and challenges [J]. *J Engin Med*, 2019, 233 (3) : 295-308.
- [12] Huang X, Chen Y, Chen B, et al. Reamed versus unreamed intramedullary nailing for the treatment of femoral shaft fractures among adults: A meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *J Orthop Sc*, 2022, 27 (4) : 850-858.
- [13] 刘泽民, 吕欣. 髓内钉在四肢长管状骨骨折治疗中的应用: 扩髓与不扩髓 [J]. *中国组织工程研究*, 2022, 26 (3) : 461-467.
- [14] Baur M, Weber B, Lackner I, et al. Structural alterations and inflammation in the heart after multiple trauma followed by reamed versus non-reamed femoral nailing [J]. *PLoS ONE*, 2020, 15 (6) : e0235220.
- [15] Lackner I, Weber B, Miclau T, et al. Reaming of femoral fractures with different reaming irrigator aspirator systems shows distinct effects on cardiac function after experimental polytrauma [J]. *J Orthop Res*, 2020, 38 (12) : 2608-2618.
- [16] Ozdemir B, Akesen B, Demirag B, et al. Long-term outcome of unreamed intramedullary nails in femur diaphyseal fractures [J]. *Ulus Travma Acil Cerrahi Derg*, 2012, 18 (2) : 147-152.
- [17] 陈洪强, 刘炯, 陈德斌, 等. 顺行髓内钉与钢板固定股骨远端关节外骨折比较 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2021, 29 (4) : 303-306.
- [18] Zhang F, Zhu L, Li Y, et al. Retrograde versus antegrade intramedullary nailing for femoral fractures: a meta-analysis of randomized controlled trials [J]. *Curr Med Res Opin*, 2015, 31 (10) : 1897-1902.
- [19] DePhillipo NN, Lebus GF, Cinque ME, et al. Iatrogenic trochlear chondral defects after anterolateral placement of retrograde femoral nails [J]. *Arthroscopy*, 2017, 33 (9) : 1727-1730.
- [20] El Mounmi M, Schraven P, ten Duis HJ, et al. Persistent knee complaints after retrograde unreamed nailing of femoral shaft fractures [J]. *Acta Orthop Belgica*, 2010, 76 (2) : 219-225.
- [21] Brewster J, Grenier G, Taylor BC, et al. Long-term comparison of retrograde and antegrade femoral nailing [J]. *Orthopedics*, 2020, 43 (4) : e278-e282.
- [22] Thapa S, Thapa SK, Dhakal S, et al. A comparative study of fracture shaft of femur in adults treated with broad dynamic compression plate versus intramedullary interlocking nail [J]. *J College Med Sci Nepal*, 2016, 12 (2) : 66-69.
- [23] Ijaz F, Buk SG, Khan MA, et al. Comparative efficacy of limited contact - dynamic compression plate and dynamic compression plate for repair of diaphyseal femoral fracture in dogs [J]. *Adv Anim Vet Sci*, 2014, 2 (5) : 296-301.
- [24] Miller DL, Goswami T. A review of locking compression plate biomechanics and their advantages as internal fixators in fracture healing [J]. *Clin Biomech*, 2007, 22 (10) : 1049-1062.
- [25] 宁鹏, 赵铭, 张月东. 下肢骨折锁定加压钢板内固定失败的 Logistic 回归分析 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2014, 22 (24) : 2238-2243.
- [26] 李华德, 胡宏伟. 微创内固定系统在复杂型股骨中下端骨折中的应用研究 [J]. *中国矫形外科杂志*, 2013, 21 (4) : 400-402.
- [27] Tian ZJ, Liu YJ, Chen BJ, et al. Failure of Less-Invasive Stabilization System (LISS) plating for periprosthetic distal femur fractures: Three case reports [J]. *Medicine*, 2020, 99 (8) : e19195.
- [28] Bottlang M, Doornink J, Fitzpatrick DC, et al. Far cortical locking can reduce stiffness of locked plating constructs while retaining construct strength [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2009, 91 (8) : 1985-1994.
- [29] Adams Jr JD, Tanner SL, Jeray KJ. Far cortical locking screws in distal femur fractures [J]. *Orthopedics*, 2015, 38 (3) : e153-e156.
- [30] Deng Y, Ouyang H, Xie P, et al. Biomechanical assessment of screw safety between far cortical locking and locked plating constructs [J]. *Comp Meth Biomech Biomed Eng*, 2021, 24 (6) : 663-672.
- [31] Han Z, Wu J, Deng G, et al. Axial Micromotion locking plate construct can promote faster and stronger bone healing in an ovine osteotomy model [J]. *Front Bioengin Biotechnol*, 2021, 8 (1) : 593448.
- [32] Madey SM, Tsai S, Fitzpatrick DC, et al. Dynamic fixation of humeral shaft fractures using active locking plates: a prospective observational study [J]. *Iowa Orthop J*, 2017, 37: 1-10.
- [33] 白继岳, 徐永清, 何晓清, 等. 镍钛形状记忆合金生物相容性及其表面改性研究进展 [J]. *中国修复重建外科杂志*, 2018, 32

- (8): 1091-1095.
- [34] 戴尅戎, 倪诚, 吴小涛, 等. 形状记忆锯齿臂环抱内固定器的实验研究与临床应用 [J]. 中华外科杂志, 1994, 32 (10): 629-632.
- [35] Korovessis P, Deligianni D, Petsinis G, et al. Comparative strength measurements of five different fixation systems applied on an in vitro model of femoral midshaft osteotomy [J]. Eur J Orthop Surg Traumatol, 2002, 12 (2): 61-68.
- [36] 李开南, 马运宏. 捆绑内固定在骨折固定中的研究进展 [J]. 中国矫形外科杂志, 2009, 17 (2): 115-117.
- [37] Zhu Q, Shi B, Xu B, et al. Obtuse triangle screw configuration for optimal internal fixation of femoral neck fracture: an anatomical analysis [J]. Hip Int, 2019, 29 (1): 72-76.
- [38] Talbot C, Davis N, Majid I, et al. Fractures of the femoral shaft in children: national epidemiology and treatment trends in England following activation of major trauma networks [J]. Bone Joint J, 2018, 100 (1): 109-118.
- [39] Kang L, Liu H, Ding Z, et al. Ipsilateral proximal and shaft femoral fractures treated with bridge-link type combined fixation system [J]. J Orthop Surg Res, 2020, 15 (1): 1-10.
- [40] 方继锋, 都芳涛, 侯耀鹏, 等. 桥接组合系统与锁定钢板固定股骨干骨折比较 [J]. 中国矫形外科杂志, 2021, 29 (24): 2209-2213.
- [41] 李栋, 周维波, 朱春晖, 等. 桥接组合式内固定系统和锁定钢板系统治疗股骨干骨折的疗效比较 [J]. 中国微创外科杂志, 2020, 20 (9): 807-811.
- (收稿: 2022-07-13 修回: 2023-02-20)  
(同行评议专家: 宋一平 刘曦明)  
(本文编辑: 宁 桦)

(上接 1105 页)

- [35] Xu WN, Zheng HL, Yang RZ, et al. Mitochondrial NDUFA4L2 attenuates the apoptosis of nucleus pulposus cells induced by oxidative stress via the inhibition of mitophagy [J]. Exper Mol Med, 2019, 51 (11): 1-16.
- [36] Mahrouf-Yorgov M, Augeul L, Da Silva CC, et al. Mesenchymal stem cells sense mitochondria released from damaged cells as danger signals to activate their rescue properties [J]. Cell Death Different, 2017, 24 (7): 1224-1238.
- [37] Chen S, Zhao L, Deng X, et al. Mesenchymal stem cells protect nucleus pulposus cells from compression-induced apoptosis by inhibiting the mitochondrial pathway [J]. Stem Cells Int, 2017, 2017: 9843120.
- [38] Tait SWG, Green DR. Mitochondria and cell death: outer membrane permeabilization and beyond [J]. Nat Rev Mol Cell Biol, 2010, 11 (9): 621-632.
- [39] Kale J, Osterlund EJ, Andrews DW. BCL-2 family proteins: changing partners in the dance towards death [J]. Cell Death Different, 2018, 25 (1): 65-80.
- [40] Zhou B, Kreuzer J, Kumsta C, et al. Mitochondrial permeability uncouples elevated autophagy and lifespan extension [J]. Cell, 2019, 177 (2): 299-314.
- (收稿: 2022-07-12 修回: 2023-02-20)  
(同行评议专家: 毛 路 陈 锋)  
(本文编辑: 宁 桦)