

• 论著 •

磁共振扩散张量成像定量评价消炎液微创治疗非压迫性腰椎神经根炎^{*}

杨朝炳 吕赛群 彭涛 牛翔科 植彪 肖建明

(成都大学附属医院放射科, 四川 成都 610081)

【摘要】 目的 探索利用消炎液微创治疗腰椎非压迫性神经根炎的动物实验方法,并运用磁共振扩散张量成像(DTI)对其疗效进行定量评价。**方法** 将6只巴马小型猪分为两组,通过CT导向于L2~3、L3~4及L4~5神经根旁硬膜外注入自体髓核组织造模。造模后14天,实验组神经根旁注入10 mL消炎液治疗,对照组注入10 mL生理盐水。两组治疗后3、7、14天各取1只实验猪处死,解剖相应神经根行TNF- α 蛋白含量免疫组织化学检查。造模前、治疗前、神经根取材前均行DTI检查。比较两组造模前、治疗前及治疗后各时间点神经根FA值变化及治疗后神经根TNF- α 蛋白含量的变化。**结果** 造模后两组神经根FA值均减小(均 $P<0.05$);实验组治疗后各时间点神经根FA值回升($P<0.05$),而对照组无变化($P>0.05$);实验组相应神经根FA值均高于对照组(均 $P<0.05$)。实验组治疗后7、14天神经根TNF- α 蛋白含量降低且低于对照组($P<0.05$),而对照组治疗后各时间点无变化($P>0.05$)。**结论** 消炎液微创治疗腰椎非压迫性神经根炎有效,并能用DTI进行评价。

【关键词】 腰椎间盘突出;扩散张量成像;神经根性炎;微创治疗;免疫组织化学

【中图分类号】 R445.2;R681.5⁺3 **【文献标志码】** A **DOI:**10. 3969/j. issn. 1672-3511. 2022. 04. 007

Quantitative evaluation of anti-inflammatory minimally invasive surgery of non-compressive lumbar radiculitis with diffusion tensor imaging

YANG Chaobing, LYU Saiqun, PENG Tao, NIU Xiangke, ZHI Biao, XIAO Jianming

(Department of Radiology, The Affiliated Hospital of Chengdu University, Chengdu 610081, China)

【Abstract】 Objective To explore the animal experimental method (AEM) of minimally invasive surgery (MIS) of non-compressive lumbar radiculitis with anti-inflammatory liquid, and evaluate its efficacy with diffusion tensor imaging (DTI) quantitatively. **Methods** To establish non-compressive lumbar radiculitis model, we injected suspension, coming from autologous nucleus pulposus of 6 Bama miniature pigs. The pigs were divided into two groups (experimental group and control group) randomly into epidural space paracentrally at the level of intervertebral foramen of L₂₋₃ and L₃₋₄ as well as L₄₋₅ by CT-guided puncture respectively. 14 days later, we inject anti-inflammatory liquid with same dose into the epidural space in experimental group and normal saline in control group respectively at the same level. Another 3 days and 7 days as well as 14 days later, one piggy in the two groups was sacrificed randomly respectively for TNF- α immunohistochemical study of the nervous root. DTI has been done pre-modeling and prior treatment as well as before sacrifice. Statistic analyses of FA value of the nervous roots had been implemented at the point of execution above, and of TNF- α value post-injection of suspension of anti-inflammation or saline as well. **Results** With comparison to during pre-modeling period, the FA values of nerve roots are reduced significantly ($P<0.05$) during post-modeling period in two groups. But, the FA values of nerve roots are elevated gradually in the experimental group on the other hand in the control group are kept non-variable on the 3 days and 7 days as well as 14 days after injection ($P>0.05$), and are higher ($P<0.05$) in the experimental group than in the control group at the same date. On the date of 7 and 14, TNF- α value

基金项目:成都市卫健委项目(2020177)

通信作者:吕赛群, E-mail:36017688@qq.com

引用本文:杨朝炳,吕赛群,彭涛,等.磁共振扩散张量成像定量评价消炎液微创治疗非压迫性腰椎神经根炎[J].西部医学,2022,34(4):504-508. DOI:10. 3969/j. issn. 1672-3511. 2022. 04. 007

in the experimental group was decreased ($P < 0.05$). The pigs were and lower than in the control group ($P < 0.05$) on the other hand it kept stable in the control group ($P > 0.05$). **Conclusion** MIS of non-compressive lumbar radiculitis with anti-inflammatory liquid is effective and, can be evaluated with DTI quantitatively.

【Key words】 Lumbar disc herniation; Diffusion tensor imaging; Radiculitis; Minimally invasive treatment; Immunohistochemistry

近年关于腰椎神经根性疼痛研究^[1-3]表明,疼痛原因除了椎间盘突出的机械压迫外,还包括非机械压迫因素。随着腰椎神经根非机械压迫机制研究的深入,各种非压迫性腰神经根性疼痛的介入微创治疗得到了飞速发展,患者获益良多,但患者预后定量评估方法有限。磁共振扩散张量成像(Diffusion Tensor Imaging, DTI)能显示神经根走行及量化分析,并能定量评估水分子在组织中的扩散运动^[4-6]。腰椎神经根的水分子横向扩散受纤维束多层膜结构的限制,纵向扩散却不受影响,而 DTI 中的 FA 值能定量测定水分子在神经纤维束的各向异性值,由此可评价纤维束膜结构的完整性。因此,DTI 在外周神经系统的应用越来越广泛并取得了良好的效果^[7]。本研究探索磁共振扩散张量成像技术能否定量评估实验猪腰椎非压迫性神经根炎消炎液微创治疗的疗效,为进一步的研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 实验动物 选取健康普通级雌性巴马小型猪共 6 只,体质量 20 kg 左右,无跛行,实验前经 CT 及 MRI 检查,排除胸腰段脊柱相关疾病。由成都达硕实验动物有限公司提供(生产许可证号:SCXK(川)2013-24),同时实验进程中的动物饲养工作亦由该公司承担(四川省实验动物使用许可证号:SYXK(川)2014-189)。本研究经医院伦理委员会审核通过。

1.2 MRI 检查及图像处理与测量

1.2.1 检查前准备 检查前实验动物禁食 8 h,禁饮 4 h。常规消毒后,肌内注射氯胺酮约 300 mg,待进入麻醉状态后,于耳后静脉穿刺留置针,并持续静脉滴注氯胺酮混合液(氯胺酮 600 mg+地西洋 20 mg+500 mL 生理盐水)维持麻醉。实验过程中,密切关注实验动物的一般情况,评估麻醉深度:如因麻醉过浅而不自运动,可肌内加注氯胺酮 100 mg;如因麻醉过深而呼吸抑制,可减缓滴注速率。

1.2.2 检查序列及参数 使用 SIEMENS AVANTO 1.5T 超导型磁共振扫描仪进行检查,使用 8 通道相控阵脊柱线圈,采取仰卧位、头先进方式固定实验动物,动物中线置于线圈中心,身体长轴平行于主磁场长轴。扫描前进行匀场,然后进行 T2WI 序列、DTI 扫描。T2WI 序列:采用可变翻转角的自旋回波序列(spcR)矢状位扫描,TR/TE: 2000/117 ms,视野

(FOV)250×250 mm,层厚 1 mm,层间距 0,层数 88,平均次数 2 次,分辨率 256×254,相位编码方向:H-F,并行因子 2,翻转角 150°,带宽 399。DTI:采用单次激发自旋回波平面成像序列(SE-EPI)横断位扫描,TR/TE:12000/117 ms,视野(FOV)200×200 mm,层厚 3 mm,层间距 0,层数 48,平均次数 5 次,分辨率 132×132,相位编码方向:A-P,并行因子 2,带宽 996,弥散方向 12,b 值 0、800。

1.2.3 MRI 图像处理与测量 图像的后处理工作在 SIEMENS 工作站进行,运用 neuro 3D(MR)软件进行后处理,先将 T2 解剖图像进行多平面重建,然后将重建后的多平面图像与 DTI 进行融合,定义参数:b0 阈值为 60~1353,Diffusion Map 阈值 0~1000,b 值为 800。结合横断位 T2 解剖图像辅助定位进行神经根 FA 值的测量。测量每根神经根的三个节段,并取其平均值的方法,尽量减小测量误差。感兴趣区(Region of interest, ROI)的大小为 12~28 mm²(18.3±7.6 mm²)。ROI 放置位置分别为 L2~3、L3~4、L4~5 双侧神经根椎间孔外段、椎间孔内段及椎管内段的中央区域,测量范围应避免超出所测量的神经根截面,并尽可能多的包含神经根。

1.3 非压迫性神经根炎造模及微创介入治疗

1.3.1 非压迫性神经根炎造模 磁共振检查完成后,继续保持实验动物麻醉状态,将实验动物移至 CT 检查床俯卧位固定,对术区进行常规备皮、消毒、铺巾,在 CT 引导下用 17 cm 19G 巴德针穿刺 L2~3、L3~4、L4~5 椎间盘髓核,连接电动经皮椎间盘旋切器(Stryker instruments, USA)进行椎间盘髓核的旋切,旋切器推进速率为 0.5~1 mm/s,每个椎间盘旋切出约 1.0 g 椎间盘髓核组织,将椎间盘髓核组织置于无菌器皿加入生理盐水,制备成混悬液约 12 mL 备用。通过 CT 引导穿刺,分别注入 2 mL 上述混悬液于 L2~3、L3~4、L4~5 双侧椎间孔硬膜外腔神经根周围,并避免刺伤神经根,从而建立神经根非压迫性损伤模型。造模完成后,在造模术后当天及第 2、4 天肌注青霉素 G 33000 U/kg,预防术后感染。将实验动物继续常规饲养,密切观察其一般情况及活动时肢体情况。

1.3.2 微创介入治疗 造模成功 14 天后,将实验猪随机分为实验组(消炎液治疗)与对照组(生理盐水治

疗)。同样用上述方法麻醉、磁共振检查及 CT 导向下穿刺实验动物 L2~3、L3~4、L4~5 双侧椎间孔。在实验组动物每根神经根周围注射消炎液 10 mL(曲安奈德 120 mg、利多卡因 30 mL、维生素 B12 6 mg 制成溶液共约 72 mL),在对照组动物每根神经根周围注射生理盐水 10 mL。同样用造模术后的方案肌注青霉素 G 预防术后感染及密切观察动物情况。

1.4 神经根组织免疫组化检查

1.4.1 标本取材 两组随机各取 1 只试验猪于相应取材时间点(治疗后 3、7、14 d)再次按前述方法麻醉及磁共振检查后,麻醉状态下处死并解剖出 L2~3、L3~4、L4~5 双侧神经根近段,然后置于 4%多聚甲醛固定液并标记。取材方法:持续麻醉状态下,采用仰卧位,将实验动物固定于手术台上,沿左侧胸骨旁线剪开胸壁,充分暴露心脏并钝行分离心包,于心尖向左心室内快速注射 100 mL 生理盐水,然后剪开右心耳,再次于心尖快速注射生理盐水 100 mL 及 10%中性甲醛固定液 200 mL。使甲醛固定液通过血液循环快速到达神经根周围。待动物呼吸心跳停止后,将动物取俯卧位,逐层剥离腰背部皮肤、肌肉并取去 T11~L5 节段脊柱,再用骨钳咬断 L1~5 双侧椎板,从后方打开椎管并充分暴露脊髓及双侧神经根,分别剪取 7~10 mm L2~3、3~4、4~5 双侧神经根近段,并固定、标记送免疫组化检查。

1.4.2 免疫组化(S-P 法) ①一抗:TNF- α ,兔多克隆抗体,批号:ab6671,英国 abcam--艾博抗(上海)贸易有限公司。②二抗:生物素化山羊抗兔 IgG(H+L),批号:13152A11,北京中杉金桥生物有限公司。③三抗:辣根酶标记链霉素卵蛋白素(HRP/A-V),批号:13152A11,北京中杉金桥生物有限公司。④封闭用正常山羊血清,批号:13152A11,北京中杉金桥生物有限公司。⑤显色剂:浓缩型 DAB 试剂盒,批号:K135925C,北京中杉金桥生物有限公司。

1.4.3 免疫组化步骤 先将载玻片防脱片处理、切片常规脱蜡至水、热修复抗原,然后滴加山羊血清封闭液,室温 20 min;再滴加稀释的一抗(1:200),4℃过夜;再滴加二抗,37℃ 30 min;再滴加三抗,37℃ 30 min。经 DAB 室温显色 2 min,蒸馏水洗涤后苏木素轻度复染,脱水,透明,中性树胶封片。

1.4.4 免疫组化图像采集及评价 采用 BA200Digital 数码三目摄像显微摄像系统对切片进行 400 倍图像采集。神经根 TNF- α 蛋白的平均光密度测定使用 Image-Pro Plus 6.0 图像分析系统。

1.5 统计学分析 运用 IBM SPSS Statistics Ver. 21 统计软件,采用一维组间方差分析(one way ANO-

VA)统计方法进行数据处理和分析。先分别比较两组实验动物组间及组内造模前、治疗前、治疗后各时间点神经根平均 FA 值的差异及变化;再分别比较两组治疗后不同时间点组内神经根 TNF- α 蛋白含量变化及相同时间点组间神经根 TNF- α 蛋白含量差异。 $P<0.05$ 表示差异有统计学意义。

2 结果

2.1 神经根平均 FA 值

2.1.1 造模前后两组神经根平均 FA 值 造模前实验组神经根平均 FA 值为(0.476 ± 0.150),对照组神经根平均 FA 值为(0.394 ± 0.115)。两组间造模前神经根平均 FA 值比较差异无统计学意义($P>0.05$),见表 1。造模后实验组神经根平均 FA 值为(0.214 ± 0.084),对照组神经根平均 FA 值为(0.180 ± 0.061);两组间造模后神经根平均 FA 值比较差异无统计学意义($P>0.05$),见表 2。与造模前相比,两组实验对象造模后神经根平均 FA 值均出现减小($P<0.05$)。

表 1 造模前两组实验猪神经根平均 FA 值表($\bar{x} \pm s$)

Table 1 Average FA values of nerve roots in the two groups before modeling

神经根	实验组	对照组
L2~L3	0.291 ± 0.037	0.302 ± 0.059
L3~L4	0.501 ± 0.024	0.350 ± 0.055
L4~L5	0.639 ± 0.022	0.532 ± 0.044

表 2 造模后两组实验猪神经根平均 FA 值表($\bar{x} \pm s$)

Table 2 Average FA values of nerve roots in the two groups after modeling

神经根	实验组	对照组
L2~L3	0.149 ± 0.041	0.134 ± 0.021
L3~L4	0.202 ± 0.058	0.193 ± 0.051
L4~L5	0.293 ± 0.069	0.214 ± 0.064

2.1.2 治疗后各时间点两组神经根平均 FA 值 与治疗前(造模后)相比,实验组治疗后 3、7、14 d 神经根平均 FA 值均升高($P<0.05$),且与造模前比较差异无统计学意义($P>0.05$);而对照组治疗前后神经根平均 FA 值比较差异无统计学意义($P>0.05$);治疗后各时间点实验组神经根平均 FA 值均较对照组高($P<0.05$),见表 3。

表 3 治疗后两组实验猪神经根平均 FA 值表($\bar{x} \pm s$)

Table 3 Average FA value of nerve root in the two groups after treatment

治疗时间(d)	实验组	对照组
3	0.373 ± 0.115	0.189 ± 0.035
7	0.366 ± 0.075	0.182 ± 0.057
14	0.479 ± 0.120	0.248 ± 0.052

2.2 治疗后两组各时间点神经根 TNF- α 蛋白含量 与治疗前 3 天相比,实验组治疗后 7、14 d 神经根

TNF- α 蛋白含量降低($P < 0.05$);而对照组治疗后 3、7、14 d 神经根 TNF- α 蛋白含量比较差异无统计学意义($P > 0.05$);治疗后 7、14 d 实验组神经根 TNF- α 蛋白含量均较对照组明显降低($P < 0.05$),见表 4、图 1。

表 4 治疗后两组实验猪神经根 TNF- α 平均光密度表($\bar{x} \pm s$)

Table 4 The mean optical density of TNF- α in nerve roots of the two groups after treatment

治疗时间(d)	实验组	对照组
3	0.1885 $\pm$ 0.0048	0.1962 $\pm$ 0.0101
7	0.1765 $\pm$ 0.0073	0.1966 $\pm$ 0.0102
14	0.1734 $\pm$ 0.0105	0.1987 $\pm$ 0.0074

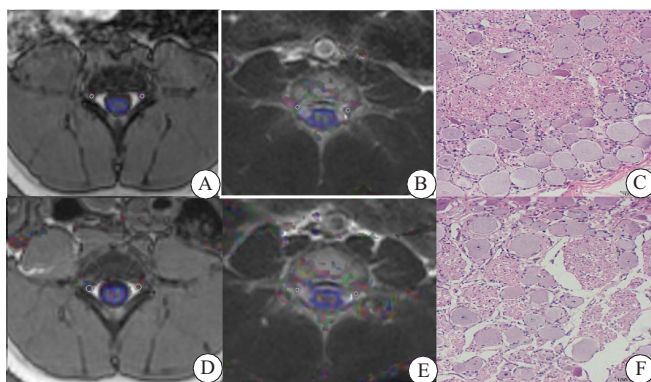


图 1 神经根 DTI 测值及免疫组化图

Figure 1 DTI and immunohistochemistry of nerve roots

注:A.对照组治疗前 FA 值;B.实验组治疗前 FA 值;C.对照组治疗 7 天 L4~5 右侧神经根 HE 染色图;D.对照组治疗 7 天 FA 值;E.实验组治疗 7 天 FA 值;F.实验组治疗 7 天 L4~5 右侧神经根 HE 染色图

3 讨论

传统研究认为腰椎神经根性疼痛的原因是由腰椎间盘突出导致的机械压迫引起的,然而近年来的研究认为,神经根性疼痛除了机械压迫,还包括非压迫性因素^[1-3]。Marshall^[8]首次提出化学性神经根炎是由于纤维环破裂和椎间盘液沿神经根鞘扩散而引起的神经根炎症。Sun 等^[9]进一步研究认为椎间盘髓核属于无血液供应组织,独立于人体免疫系统之外,在体内具有免疫原性,椎间盘突出患者中,由于纤维环断裂髓核组织突出于椎管内,从而暴露于免疫系统中可导致自身免疫反应,从而导致化学性炎症。Peng 等^[10]通过非压迫性神经根痛的临床病例证实,化学性神经根炎所致临床病理疼痛现象存在。因此影像检查中突出的椎间盘未压迫神经根,而临床出现神经病理性疼痛,神经根组织免疫组化检查中也出现炎症反应及炎症因子即能诊断该疾病。同时,有研究表明,髓核组织本身就含有多种致炎因子,包括 TNF- α 、IL-

1a 等,其中 TNF- α 在炎症的发生过程中扮演重要作用,神经病理性疼痛与其浓度高低呈正相关^[11-12]。神经根受压的无疼痛患者神经根 FA 值反而无变化^[13],表明神经根 FA 值可能是阐明神经根病病理机制的潜在工具。本研究以神经根中 TNF- α 蛋白含量为参考标准,以反映神经根炎治疗过程中的转归及与神经根平均 FA 值的相对应关系,从而评价非压迫性腰椎间盘突出所致神经根自身免疫性炎症、化学性炎症以及治疗后

Balbi 等^[14]研究表明腰椎间盘突出患者受压患侧神经根较健侧及健康志愿者相对应节段神经根 FA 值减低。本研究同样发现造模后 FA 值较减低,推测其原因可能是由于神经根暴露于髓核组织中发生自身免疫性炎症、化学性炎症,神经发生沃勒变性,神经髓鞘及外周多层膜结构的完整性被破坏、通透性增加,水分子在神经横轴方向扩散运动增加,神经根的各向同性增加,各向异性减小,因此 FA 值降低^[15];治疗后神经的远端轴索再生、新生的轴索密度增加,水分子在神经纵行方向扩散运动增加,FA 值也随之升高^[16]。

细胞因子是一类由多种细胞产生并分泌到胞外的糖蛋白分子,具有多种生物学功能,其中 TNF- α 在根性神经痛方面发挥重要作用。神经根发生自身免疫性炎症及化学性炎症后,各种炎症细胞因子及其他炎症介质的参与,导致神经根 TNF- α 蛋白含量增高^[17]。本实验中用自体髓核造模诱发神经根炎后,将消炎液注入神经根周围治疗,主要治疗药物是曲安奈德,为肾上腺皮质激素类药,该类药品用于治疗腰椎间盘突出性疼痛得到广泛认可,其机制可能为减少前列腺素的合成,维持细胞膜的稳定,从而抑制痛觉 C 纤维的传导冲动^[18];同时也有助于神经根损伤的修复,通过调节合成 bFGF,从而促进神经根功能的恢复,还能降低毛细血管的通透性,减轻水肿,抑制炎症浸润,从而使 TNF- α 的合成和释放减少^[19]。有研究证实神经根鞘内外局部使用糖皮质激素治疗后血液中 TNF- α 明显降低^[20];而且曲安奈德也能有效治疗神经损伤后的根性疼痛^[21]。

有研究表明神经根 FA 值与 TNF- α 平均光密度存在负相关关系^[22]。Eguchi 等^[23]通过研究腰椎间盘突出症患者发现受压迫神经 FA 均值明显低于未损伤神经,术后患处神经根 FA 值显著升高,且 FA 值和神经症状的严重程度之间存在很强的相关性。本实验研究结果也印证了消炎液治疗后神经根 TNF- α 蛋白含量均较对照组明显降低,神经根的 FA 值也较治疗前及对照组升高,且与造模前比较差异无统计学意义($P < 0.05$)。这提示扩散张量成像可用于非压迫性腰椎间盘突出所致神经根自身免疫性炎症、化学性炎症以及治疗后

炎症转归的评估^[24],并能提供定量信息以评估神经根完整性及病理生理改变^[25],同时腰椎非压迫性神经根炎能在此种配伍的消炎液微创治疗中获益。

本研究的不足之处:①仅对每只实验动物相邻节段的多组神经根同时进行实验,可能会造成相互干扰,对实验数据造成影响。②实验动物样本量较少,且部分神经根为同一实验对象,统计结果可能会有偏差。③FA 值 ROI 的放置可能会受人体的测量误差影响。④只使用一种消炎液的配伍,未对其他配伍的药物进行比较。⑤本研究为动物实验研究,未对实验对象痛觉、行动能力等主观治疗转归进行评估。

4 结论

本实验结果表明,CT 导向下消炎液微创治疗腰椎非压迫性神经根炎有效,磁共振扩散张量成像能在不同时间点定量监测神经根炎的转归及评价手术治疗疗效。

【参考文献】

- [1] OLMARKER K. Combination of two cytokine inhibitors reduces nucleus pulposus-induced nerve injury more than using each inhibitor separately[J]. The open orthopaedics journal, 2011, 5(1):151-153.
- [2] SOMMER C, LEINDERS M, ÜÇEYLER N. Inflammation in the pathophysiology of neuropathic pain[J]. Pain, 2018, 159(3): 595-602.
- [3] KARPPINEN J, MALMIVAARA A, TERVONEN O, *et al.* Severity of symptoms and signs in relation to magnetic resonance imaging findings among sciatic patients[J]. Spine, 2001, 26(7): 149-154.
- [4] YAMASAKI T, FUJIWARA H, ODA R, *et al.* In vivo evaluation of rabbit sciatic nerve regeneration with diffusion tensor imaging (DTI): correlations with histology and behavior[J]. Magnetic resonance imaging, 2015, 33(1): 95-101.
- [5] EGUCHI Y, OHTORI S, ORITA S, *et al.* Quantitative evaluation and visualization of lumbar foraminal nerve root entrapment by using diffusion tensor imaging: preliminary results[J]. American journal of neuroradiology, 2011, 32(10): 1824-1829.
- [6] 曾洪武, 王培军. 磁共振扩散加权与弥散张量成像原理分析及比较[J]. 中国医学影像技术, 2005, (12): 1945-1947.
- [7] 罗树彬, 肖文丰, 黄莹. DTI 对保守治疗腰椎间盘突出受压神经根损伤的诊断价值[J]. 放射学实践, 2019, 34(6): 659-663.
- [8] MARSHALL L L, TRETHEWIE E R, CURTAIN C C. Chemical radiculitis. A clinical, physiological and immunological study [J]. Clinical orthopaedics and related research, 1977, 129(129): 61-67.
- [9] SUN Z, ZHANG M, ZHAO X H, *et al.* Immune cascades in human intervertebral disc: the pros and cons [J]. International journal of clinical and experimental pathology, 2013, 6(6): 1009-1014.
- [10] PENG B, WU W, LI Z, *et al.* Chemical radiculitis[J]. Pain, 2007, 127(1-2): 11-16.
- [11] SHAMASH S, REICHERT F, ROTSHENKER S. The cytokine network of Wallerian degeneration: tumor necrosis factor- α , interleukin-1 α , and interleukin-1 β [J]. Journal of Neuroscience, 2002, 22(8): 3052-3060.
- [12] RAMESH G, MACLEAN A G, PHILIPP M T. Cytokines and chemokines at the crossroads of neuroinflammation, neurodegeneration, and neuropathic pain[J]. Mediators of inflammation, 2013, 2013: 480739.
- [13] SAKAI T, MIYAGI R, YAMABE E, *et al.* Diffusion-weighted imaging and diffusion tensor imaging of asymptomatic lumbar disc herniation[J]. The Journal of Medical Investigation, 2014, 40(1, 2): 197-203.
- [14] BALBI V, BUDZIK J F, DUHAMEL A, *et al.* Tractography of lumbar nerve roots: initial results[J]. European radiology, 2011, 21(6): 1153-1159.
- [15] SOTAK C H. The role of diffusion tensor imaging in the evaluation of ischemic brain injury-a review[J]. NMR in Biomedicine, 2002, 15(7-8): 561-569.
- [16] TAKAGI T, NAKAMURA M, YAMADA M, *et al.* Visualization of peripheral nerve degeneration and regeneration: monitoring with diffusion tensor tractography[J]. Neuroimage, 2009, 44(3): 884-892.
- [17] 杨洋, 王拥军, 施杞. 根性神经痛与 TNF- α [J]. 中国中医骨伤科杂志, 2002, (1): 63-65.
- [18] MANCHIKANTI L, BUENAVENTURA R M, MANCHIKANTI K N, *et al.* Effectiveness of therapeutic lumbar transforaminal epidural steroid injections in managing lumbar spinal pain[J]. Pain physician, 2012, 15(3): 199-245.
- [19] BUENAVENTURA R M, DATTA S, ABDI S, *et al.* Systematic review of therapeutic lumbar transforaminal epidural steroid injections[J]. Pain Physician, 2009, 12(1): 233-251.
- [20] 代月娥, 邓俊才, 胡虹, 等. 得宝松局部使用对腰椎开放性手术患者术后早期疼痛及炎症因子的影响[J]. 西部医学, 2018, 30(8): 1162-1165.
- [21] 余开锋, 冉然, 潘雪莲, 等. 曲安奈德复合镇痛液对硬膜外麻醉神经损伤后根性疼痛的治疗作用[J]. 西部医学, 2011, 23(1): 110-111.
- [22] 牛翔科, 肖建明, 杨朝炳, 等. DTI 评价非压迫性腰椎神经根炎微创治疗价值的实验研究[J]. 中国中西医结合影像学杂志, 2017, 15(5): 547-550, 555.
- [23] EGUCHI Y, OIKAWA Y, SUZUKI M, *et al.* Diffusion tensor imaging of radiculopathy in patients with lumbar disc herniation: preliminary results[J]. The bone & joint journal, 2016, 98(3): 387-394.
- [24] KARAMPINOS D C, MELKUS G, SHEPHERD T M, *et al.* Diffusion tensor imaging and T2 relaxometry of bilateral lumbar nerve roots: feasibility of in-plane imaging[J]. NMR in Biomedicine, 2013, 26(6): 630-637.
- [25] CHHABRA A, MADHURANTHAKAM A J, ANDREISEK G. Magnetic resonance neurography: current perspectives and literature review[J]. European radiology, 2018, 28(2): 698-707.

(收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2022-03-18; 编辑: 黎仕娟)