

• 中枢神经影像学 •

基于 MRI 扩散张量成像的腰骶丛神经定量研究

钱贵珍, 黄家荣, 汪梅, 李玥, 徐建, 苗重昌

【摘要】 目的:探讨影响正常人腰骶丛神经扩散张量成像(DTI)参数值相关临床基线资料,获得腰骶丛神经各向异性分数(FA)、表观扩散系数(ADC)、轴向扩散系数(AD)和径向扩散系数(RD)正常值参考范围。方法:前瞻性搜集 60 名健康志愿者,年龄平均在 20~80 岁之间,所有受试者接受 3.0T MR 扫描,包括 DTI 和 3D-T₂W-FFE 序列,由两名医师独立测量腰骶丛 L4—S1 双侧共 360 条神经根椎管内、椎间孔内及椎间孔外 3 个 ROI 的 DTI 参数值,计算平均值。采用 Pearson 相关分析检验 DTI 参数值与临床基线资料相关性,对与多个临床基线资料相关的 DTI 参数进行多元线性回归分析。结果:正常人腰骶丛神经 FA、ADC、RD、AD 值在左右两侧及 L4—S1 组间差异无统计学意义。平均 FA 值与年龄($r = -0.687, P < 0.001$)、体重($r = -0.411, P = 0.001$)、BMI($r = -0.378, P = 0.003$)存在负相关性,平均 RD 值与年龄($r = 0.293, P = 0.023$)存在正相关性。构建关于腰骶丛神经 FA 值的多元线性回归模型,将与 FA 值相关变量以逐步法代入,最终年龄和体重作为预测变量,得出 FA 值的多元线性回归模型,调整后 $R^2 = 0.620$,进一步提出校正公式以根据年龄和体重调整 FA 值。结论:腰骶丛 FA 值随着年龄和体重增加而下降,提示涉及腰骶丛 DTI 研究中考虑年龄和体重因素。

【关键词】 磁共振成像; 腰骶丛; 年龄; 定量评价

【中图分类号】 R445.2;R322.8;R—33 **【文献标志码】** A **【文章编号】** 1000-0313(2024)06-0741-05

DOI: 10.13609/j.cnki.1000-0313.2024.06.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Quantification of lumbosacral plexus by diffusion tensor imaging QIAN Gui-zhen, HUANG Jia-rong, WANG Mei, et al. The Affiliated Lianyungang Hospital of Xuzhou Medical University, Jiangsu 222002, China

【Abstract】 Objective: To explore relationship between the clinical baseline data and diffusion tensor imaging (DTI)-derived indices of lumbosacral plexus in normal population and obtain the reference range for normal values of lumbosacral plexus anisotropy fraction (FA), apparent diffusion coefficient (ADC), axial diffusion coefficient (AD) and radial diffusion coefficient (RD). **Methods:** A total of sixty healthy volunteers aged 20~80 years were prospectively enrolled. Two physicians independently measured the DTI parameters of three ROIs in the spinal canal, intervertebral foramen, and outside the intervertebral foramen of 360 nerve roots on both sides of the lumbosacral plexus (L4—S1) and calculated the average values. Pearson correlation was used to evaluate the correlation between DTI parameter values and clinical baseline data, and multiple linear regression analysis was performed on parameters related to multiple clinical baseline data. **Results:** The difference were not significant between were not significantly between the left and right sides and between L4—S1 groups for FA, ADC, RD, AD of the lumbosacral plexus in normal people. The average FA value was negatively correlated with age ($r = -0.687, P < 0.001$), body weight ($r = -0.411, P = 0.001$), BMI ($r = -0.378, P = 0.003$). To construct a multiple linear regression model for lumbosacral plexus FA values, the variables related to FA value were selected by the stepwise method. The final model used age and body weight as predictive variables, resulting in an adjusted R^2 of 0.620. A correction formula was provided to adjust FA values according to age and body weight. **Conclusion:** The FA of the lumbosacral plexus decreases with age and weight, suggesting that these factors should be considered in the study of lumbosacral plexus DTI.

作者单位:222002 江苏,徐州医科大学附属连云港医院影像科

作者简介:钱贵珍(1998—),女,江苏连云港人,硕士,住院医师,主要从事神经影像研究工作。

通讯作者:苗重昌,E-mail:lygzhchmiao@163.com

【Key words】 Magnetic resonance imaging; Lumbosacral plexus; Aging; Quantitative evaluation

腰骶丛神经疾病是常见的周围神经疾病,诊断主要依靠临床症状、体格检查、影像学检查以及电生理检查,MRI因其高解剖分辨率、无电离辐射损伤和不需要鞘内注射对比剂等众多优点而得到广泛应用,然而有研究表明常规MRI检查诊断效果存在局限性,影像学结果常常与临床症状不相符^[1,2],随着影像技术、设备的创新及优化,广泛用于中枢神经系统的扩散张量成像(diffusion tensor imaging,DTI)和纤维束示踪成像(diffusion tensor tractography,DTT)技术越来越多的应用于周围神经^[3-5],因其能够直观显示神经纤维束的位置、形态及走行,定量分析神经纤维微观结构,对腰骶神经病变评估具有独特优势^[6]。目前,DTI技术尚处于研究阶段,因其参数受众多因素包括病变、非病变等影响,尚不存在量化诊断标准。

根据神经的电生理学及组织学证据证明^[7,8],随着年龄的增长周围神经会发生脱髓鞘和轴突损伤,体重和体重指数(body mass index,BMI)等因素与神经横截面积相关^[9]。因此,临床基线资料可能影响脊神经DTI参数值,既往研究表明在四肢周围神经中DTI参数值与人口统计学因素存在适当相关性^[10]。本研究旨在探求影响正常人腰骶丛神经DTI参数值相关临床基线资料,为初步建立DTI参数值正常范围提供相关参考数据。

材料与方法

1. 研究对象

本研究通过所在机构伦理委员会批准,获得所有参与者的书面知情同意。2022年6~12月在本院招募健康志愿者,纳入标准:①年龄大于20岁,无腰部不适;②无腰椎手术史、脊柱肿瘤、脊柱外伤及脊柱感染疾病;排除标准:①糖尿病、风湿病等慢性疾病;②影像图像质量差者或临床信息不全;③有MRI扫描禁忌症。共纳入健康志愿者60名(共360条神经根),其中男32名,女28名,平均20~80岁之间。每个参与者的年龄、性别、体重、身高和BMI被登记为临床基线资料。

2. MR扫描方法

使用Philips Ingenial 3.0T二代MR扫描仪,体部通道线圈进行MR扫描,受检者取头先进仰卧位,扫描序列包括周围横断面TSE序列T₂WI,DTI序列及3D-T₂W-FFE序列。在正中矢状面设置T₂WI横断面,中心线平行于椎间隙或椎间夹角平分线,头侧至足侧连续扫描3~5层。横断面TSE序列T₂WI,扫描参数:TR 3000 ms, TE 120 ms, 回波链长度 25, 带宽

185.1 Hz,视野160 mm×179 mm,层厚4 mm,层距0.4 mm,矩阵268×216,激励次数1.6。DTI序列扫描参数:TR 4000 ms, TE 73 ms, FOV 224 mm×176 mm,层厚2.5 mm,层间距0 mm,激励次数2,b值为0、600 s/mm²,扩散敏感梯度为15个不同方向。3D-T₂W-FFE序列扫描参数:TR 7.9 ms, TE 3.9 ms, FOV 270 mm×214 mm,层厚1.8 mm,层间距-0.9 mm,激励次数2。

3. 图像分析

将所得到的MRI及DTI图像传至飞利浦后处理工作站,由两名经验丰富的医师分别对所有患者L4~S1神经根测量及腰骶丛神经纤维束示踪成像(图1),时隔4周后再次进行DTI参数测量,DTI参数包括各向异性分数(fraction anisotropy,FA)、表观扩散系数(apparent diffusion coefficient,ADC)、轴向扩散系数(axial diffusion coefficient,AD)和径向扩散系数(radial diffusion coefficient,RD)。范围从L4~S1神经根,共3对6根。每条神经根分别于椎管内、椎间孔内及椎间孔外选取3个感兴趣区域(region of interest,ROI),ROI勾画采取轮廓法,每个ROI面积控制在20~50 mm²,每对神经根双侧ROI均取自同一层面。将3D-T₂W-FFE序列与DTI序列融合,以3D-T₂W-FFE为定位像,对L4~S1进行纤维束追踪。

4. 统计学分析

所有数据均采用SPSS 26.0软件进行统计学分析,所有统计学过程取P<0.05为差异有统计学意义。计量资料以均数±标准差表示;采用组内相关系数(intraclass correlation coefficient,ICC)评价测量者间及测量者内部的一致性,正常人左右两侧DTI参数值比较采用配对样本t检验,L4~S1神经根DTI参数值组间比较采用单因素方差分析(One-Way ANOVA),先检验方差齐性,如果方差齐采用Fisher法,如果方差不齐则用近似F检验Welch法。采用Pearson相关性分析检验DTI参数值与临床基线资料的相关性,将存在相关性的DTI参数纳入多元线性回归模型。

结 果

60名健康志愿者均完成MR扫描,图像质量满足后处理要求。男女之间年龄、BMI差异无统计学意义,然而体重、身高差异具有统计学意义(表1)。

为了检验测量结果的可靠性,我们对DTI参数值进行一致性检验,结果显示测量间及测量者内部ICC值均大于0.7(P<0.001,表2),提示本资料具有较好

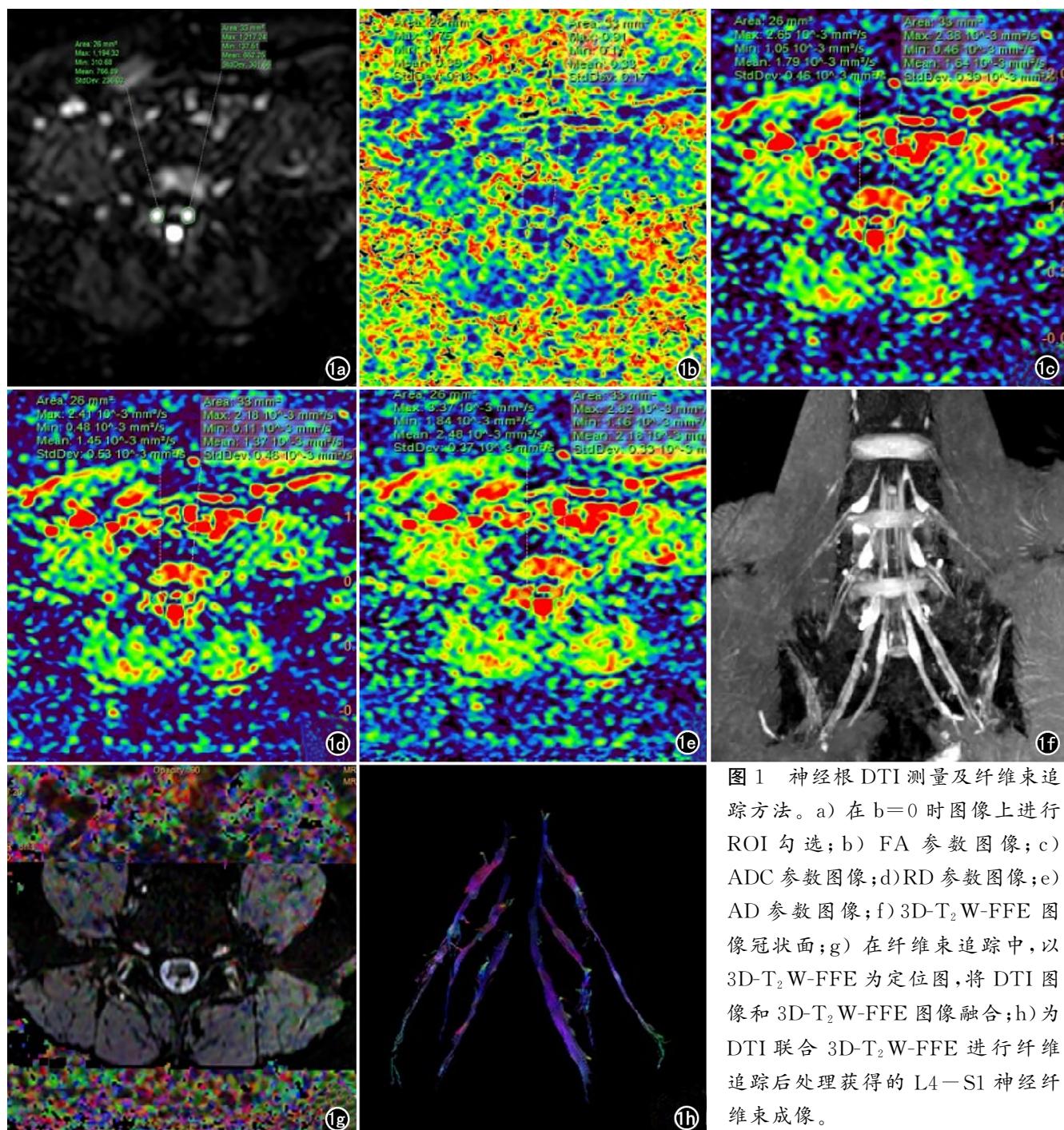


图 1 神经根 DTI 测量及纤维束追踪方法。a) 在 b=0 时图像上进行 ROI 勾选; b) FA 参数图像; c) ADC 参数图像; d) RD 参数图像; e) AD 参数图像; f) 3D-T₂W-FFE 图像冠状面; g) 在纤维束追踪中, 将 DTI 图像和 3D-T₂W-FFE 图像融合; h) 为 DTI 联合 3D-T₂W-FFE 进行纤维追踪后处理获得的 L4—S1 神经纤维束成像。

表 1 健康志愿者的临床基线资料

临床基线资料	男	女	t	P
年龄(years)	47.69±18.83	49.25±16.83	-0.337	0.737
体重(kg)	74.84±9.08	62.68±9.53	5.058	<0.001
身高(cm)	172.72±6.05	160.18±4.39	9.073	<0.001
BMI(kg/m ²)	25.13±3.07	24.46±3.88	0.742	0.461

表 2 DTI 参数值的一致性检验

测量者间	FA	ADC	RD	AD
K1	0.704	0.808	0.844	0.719
K2	0.732	0.828	0.853	0.723

注: K1 测量者间; K2 测量者内部

可靠性及可重复性。

L4—S1 神经 DTI 参数值如表 3 所示, 对 L5—S1 神经根整体左右两侧 DTI 参数值进行配对样本 t 检验, 正常人腰骶神经丛 DTI 参数(FA、ADC、RD、AD)值左右两侧差异无统计学意义。此外, 将神经根 DTI 参数值左右两侧取平均值后进行单因素方差分析, 结果显示在 L4、L5、S1 3 组之间的各个 DTI 参数值差异也无统计学意义。为了保持样本间独立性, 在接下来比较中我们采用平均 DTI 参数值, 平均 FA、ADC、RD 及 AD 值定义为即正常人 L4—S1 左右两侧 6 条神经根平均值。

男受试者平均 FA 值(0.332±0.024)稍低于女受

试者 (0.342 ± 0.023), 但是这种差异无统计学意义 ($P=0.239$), ADC、RD、AD 平均值在男、女之间差异无统计学差异。分别将平均 DTI 参数值与临床基线资料进行 Pearson 相关分析, 结果显示平均 FA 值与年龄 ($r=-0.687, P<0.001$) 呈较强负相关, 与体重 ($r=-0.411, P=0.001$) 及 BMI ($r=-0.378, P=0.003$) 呈中等强度负相关, 平均 RD 值与年龄 ($r=0.293, P=0.023$) 呈较弱正相关, 平均 ADC 值与平均 AD 值与临床基线资料无明显相关性(表 4)。

鉴于平均 FA 值与年龄、体重以及 BMI 都存在相关性, 我们建立以 FA 值为因变量的多元线性回归模型。选择逐步法输入变量后, 年龄和体重为模型中预测变量, R^2 为 0.633, 调整后 $R^2=0.620$, $FA=0.442-0.001\times\text{年龄}(\text{Years})-0.001\times\text{体重}(\text{kg})$; 年龄的标准化系数 -0.681, 体重的标准化系数为 -0.400。运用这个回归模型可将任意测到的 FA 测量根据需要调整的年龄和体重参数而得到的的 FA 校正。FA 校正 = FA 测量 - (年龄校正 - 年龄测量) $\times 0.001$ - (体重校正 - 体重测量) $\times 0.001$ 。

讨 论

DTI 技术通过描述水分子的扩散运动, 在扩散加权成像的基础上发展起来的神经成像技术, DTT 则是基于 DTI 在体内非侵入性活体可视化追踪神经纤维束的方法, 用来观察神经的生理功能状态及微观结构变化。既往 DTI 用于周围神经研究集中在四肢神经^[11], 以坐骨神经更为常见, 近几年的研究证实了 DTI 及 DTT 技术在测量腰骶神经完整性的可行性^[12,13], 但是腰骶丛 DTI 参数是否受临床基线资料影响研究较少。

1. 正常腰骶神经扩散张量的定量研究

本研究采用 3.0T MRI 进行对 60 名健康志愿者

腰骶神经 DTI 的研究, 结果表明正常人 L4-S1 神经根 DTI 参数在左右两侧差异无统计学意义。这与粟小芸等^[14,15]研究结果一致。然而时寅等^[16]对 L3-S1 神经内椎间孔内外共 16 个 ROI 分段进行比较, 单独的各段神经根 FA 值差异具有统计学意义, 这与我们的研究存在方法上的差异; Sakai 等^[17]对 L4、5 神经根从椎管内至椎间孔外 18 个点连续测量, 发现虽然 FA 值存在波动, 但是总体上呈上升趋势, 因此我们推测如果分段比较, 椎间孔外的 FA 值将大于椎间孔内侧的 FA 值, 我们的研究中我们将每条神经根上在椎管内、椎间孔内及椎间孔外侧取 3 个 ROI 测得参数值之后取平均值进行比较, 结果显示 DTI 参数值在 L4-S1 各段神经根差异均无统计学意义。这一结果可作为 DTI 研究病变的腰骶丛神经的基础, 为今后提出量化的诊断标准提供参考数据。

2. DTI 参数与临床基线资料相关性

FA 及 ADC 是两个主要的 DTI 参数, FA 值反应扩散的各向异性成分占整个扩散张量总值的比值, 数值高表示各向异性扩散较多, 数值低表示各向同性扩散较多, ADC 值反应水分子扩散速度和范围, ADC 值随着水分子扩散运动增强而升高。当神经发生脱髓鞘和轴突损伤时, 水分子趋于各向同性扩散, FA 值降低。Matsumot 等^[18]对 100 名健康人进行电生理研究发现相比于大脑和脊髓, 周围神经受衰老的影响很大。之前的研究^[10,19,20]都表明周围神经 FA 与年龄存在负相关, 但是 ADC、RD、AD 值与年龄的关系未得到一致结果, Kronlage 等^[10]研究表明外周神经 RD 值与年龄正相关, AD 值与年龄呈负相关, ADC 值则与年龄无显著相关性; 陈昱帆等^[19]则认为臂丛神经 ADC 值与年龄存在正相关性, 但是未具体评估 RD 值和 AD 值。在我们的研究中发现在腰骶丛 DTI 的 4 个参数中 FA 值与年龄、体重及 BMI 呈负相关, RD 值与年龄呈正相

表 3 健康志愿者 L4-S1 神经根 DTI 参数值

DTI 参数值	L4	L5	S1	t, P	F, P
FA(右/左)	0.336 ± 0.029 ; 0.339 ± 0.028	0.338 ± 0.029 ; 0.339 ± 0.036	0.337 ± 0.038 ; 0.337 ± 0.036	-0.754, 0.452	0.151, 0.860
ADC(右/左 $\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$)	1.488 ± 0.174 ; 1.476 ± 0.159	1.488 ± 0.156 ; 1.488 ± 0.163	1.502 ± 0.162 ; 1.517 ± 0.217	-0.113, 0.910	0.996, 0.371
RD(右/左 $\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$)	1.192 ± 0.140 ; 1.187 ± 0.136	1.210 ± 0.143 ; 1.221 ± 0.139	1.246 ± 0.178 ; 1.260 ± 0.202	-0.839, 0.403	2.835, 0.061
AD(右/左 $\times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{s}$)	2.003 ± 0.165 ; 2.025 ± 0.246	2.017 ± 0.194 ; 2.086 ± 0.183	2.081 ± 0.233 ; 2.075 ± 0.238	-1.921, 0.056	1.742, 0.178

表 4 腰骶神经的 DTI 参数值与临床基线资料相关性

临床基线资料	FA(r, P)	ADC(r, P)	RD(r, P)	AD(r, P)
年龄	-0.687, 0.000	0.081, 0.536	0.293, 0.023	0.005, 0.969
体重	-0.411, 0.001	-0.161, 0.220	-0.096, 0.468	-0.190, 0.147
身高	-0.155, 0.236	0.014, 0.917	0.068, 0.605	0.061, 0.645
BMI	-0.378, 0.003	-0.214, 0.101	-0.167, 0.201	-0.195, 0.135

关,而 ADC 值与 AD 值并没有呈现出与临床基线资料的相关性。随年龄增长髓鞘发生丢失、退化、持续形成等微观结构变化,腰骶神经根 FA 值降低和 RD 值升高,对关于腰骶丛 DTI 研究具有一定意义。

3. 腰骶神经 FA 值的多元线性回归模型

FA 值同时与年龄、体重、BMI 存在一定的相关性,因此我们构建一个多元线性回归模型,在这个模型里年龄、体重是重要的预测变量,可以解释 FA 值变化的 62%。进一步提出的校正公式中可以根据研究对象的年龄和体重调整 FA 值,该公式可能会在进一步的研究中应用和验证,以校正研究组之间临床基线资料差异。

本研究存在局限性:①DTI 参数与所有功能成像参数一样,可能会受到技术设置和序列规范的影响;②在选择和勾画 ROI 时一定程度受主观偏差影像;③本研究样本量相对较小,未来将加大样本量进一步研究。

综上所述,腰骶丛神经 FA、RD 值表现出不同程度随年龄变化的趋势,尤其是 FA 值变化显著,此外,FA 值与体重、BMI 因素呈负相关性,我们提出了一个校正公式,根据年龄和体重调整 FA 值,可用于未来腰骶神经 DTI 的研究。

参考文献:

- [1] Aaen J, Austevoll IM, Hellum C, et al. Clinical and MRI findings in lumbar spinal stenosis: baseline data from the NORDSTEN study [J]. Eur Spine J, 2022, 31(6): 1391-1398.
- [2] Banitalebi H, Espeland A, Anvar M, et al. Reliability of preoperative MRI findings in patients with lumbar spinal stenosis [J]. BMC Musculoskeletal Disorders, 2022, 23(1): 51.
- [3] Foesleitner O, Sulaj A, Sturm V, et al. Diffusion MRI in peripheral nerves: optimized b values and the role of non-gaussian diffusion [J]. Radiology, 2022, 302(1): 153-161.
- [4] Wu F, Wang W, Yang Y, et al. MR neurography of lumbosacral nerve roots for differentiating chronic inflammatory demyelinating polyneuropathy from acquired axonal polyneuropathies: a cross-sectional study [J]. Quantitative Imaging in Medicine and Surgery, 2022, 12(10): 4875-4884.
- [5] 李冲,朱恂,赵彦胤,等.腰骶丛 DTI 对慢性炎性脱髓鞘性多发性神经根神经病的诊断价值 [J]. 放射学实践, 2018, 33(11): 1124-1127.
- [6] 穆庆华,孙英彩,彭志刚,等.腰骶神经病变扩散张量成像的可行性评估 [J]. 中华放射学杂志, 2017, 51(12): 954-959.
- [7] Safaiyan S, Kannaiyan N, Snaidero N, et al. Age-related myelin degradation burdens the clearance function of microglia during aging [J]. Nature Neuroscience, 2016, 19(8): 995-998.
- [8] Peters A. The effects of normal aging on myelinated nerve fibers in monkey central nervous system [J]. Frontiers in Neuroanatomy, 2009, 3: 11.
- [9] Cartwright MS, Mayans DR, Gillson NA, et al. Nerve cross-sectional area in extremes of age [J]. Muscle & Nerve, 2013, 47(6): 890-893.
- [10] Kronlage M, Schwehr V, Schwarz D, et al. Peripheral nerve diffusion tensor imaging (DTI): normal values and demographic determinants in a cohort of 60 healthy individuals [J]. Eur Radiology, 2018, 28(5): 1801-1808.
- [11] 季丹,程捷飞,骆磊,等.3.0T 磁共振在正常志愿者腓总神经测量中的应用研究 [J]. 放射学实践, 2019, 34(1): 11-15.
- [12] Chiou SY, Hellyer PJ, Sharp DJ, et al. Relationships between the integrity and function of lumbar nerve roots as assessed by diffusion tensor imaging and neurophysiology [J]. Neuroradiology, 2017, 59(9): 893-903.
- [13] Awais K, Snoj Ž, Cvetko E, et al. Diffusion tensor imaging of a median nerve by magnetic resonance: a pilot study [J]. Life, 2022, 12(5): 748.
- [14] 粟小芸. 多序列定量磁共振神经成像在多发性周围神经病中的应用研究 [D]. 华中科技大学, 2020.
- [15] Simon NG, Lagopoulos J, Gallagher T, et al. Peripheral nerve diffusion tensor imaging is reliable and reproducible [J]. J Magn Reson Imaging, 2016, 43(4): 962-969.
- [16] 时寅,王传兵,刘伟,等.采用扩散张量成像定量研究及纤维束示踪成像观察正常腰骶丛神经 [J]. 中华放射学杂志, 2014, 48(2): 135-138.
- [17] Sakai T, Aoki Y, Watanabe A, et al. Functional assessment of lumbar nerve roots using coronal-plane single-shot turbo spin-echo diffusion tensor imaging [J]. Magnetic Resonance in Medical Sciences, 2020, 19(2): 159-165.
- [18] Matsumoto H, Konoma Y, Shimizu T, et al. Aging influences central motor conduction less than peripheral motor conduction: A transcranial magnetic stimulation study [J]. Muscle & Nerve, 2012, 46(6): 926-931.
- [19] 陈昱帆,王姗姗,孙聪,等.正常成年人臂丛神经 MRI 对比噪声比及扩散张量成像参数与年龄的相关性研究 [J]. 中华放射学杂志, 2020, 54(11): 1095-1100.
- [20] 常天静,李梦参,吕喆,等.3.0T MR 扩散张量成像对正常成人胫神经与腓总神经的定量分析 [J]. 临床放射学杂志, 2022, 41(12): 2310-2313.

(收稿日期:2023-03-21 修回日期:2023-06-06)