

• 实验研究 •

扩散峰度与扩散张量成像对比评估兔周围神经急性挤压伤

万齐,余煜栋,包盈莹,夏晓颖,王鹏,彭玉,刘洁琼,谢晓斌,李新春

【摘要】 目的:对比扩散峰度成像(DKI)与扩散张量成像(DTI)评估兔周围神经挤压伤的价值。**方法:**选取新西兰大白兔 27 只,于右后肢建立坐骨神经损伤与修复模型,左后肢为假手术侧。分别于术前、1、3 天、1、2、4、6、8 周行 DTI 及 DKI 扫描,测量各时间点定量参数,并于各时间点随机取 2 只兔子行电镜检查。**结果:**DKI 参数中平均峰度(MK)值在损伤后第 1 天明显下降并在较低水平波动,自第 2~8 周逐渐上升,损伤侧与假手术侧 MK 值于 2~8 周差异均有统计学意义($P<0.05$);损伤后 1 天各向异性分数(FADKI)值明显下降至最低点;3 天~8 周持续上升,各时间点差异均有统计学意义($P<0.005$);径向峰度(RK)值仅在 6 周时双侧差异有统计学意义($P=0.018$);而轴向峰度(AK)值于各时间点均无显著差异($P>0.05$)。DTI 参数中 FADTI 与 FADKI 变化趋势一致且各时间点差异均有统计学意义($P<0.001$);ADC 值仅在第 8 周差异有统计学意义($P=0.038$)。**结论:**DKI 可用于周围神经急性挤压伤的评估,但与 DTI 相比,DKI 在评估急性周围神经损伤时可能并不能提供额外价值。

【关键词】 兔;周围神经损伤;磁共振成像

【中图分类号】 R-332; R745; R445.2 **【文献标识码】** A

【文章编号】 1000-0313(2022)02-0158-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2022.02.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Comparing diffusion kurtosis imaging and diffusion tensor imaging in the evaluation of peripheral nerve acute crush injury in rabbits WAN Qi, YU Yu-dong, BAO Ying-ying, et al. Department of Radiology, the First Affiliated Hospital of Guangzhou Medical University, Guangzhou 510120, China

【Abstract】 Objective: To investigate the value of diffusion kurtosis imaging (DKI) and diffusion tensor imaging (DTI) in the evaluation of peripheral nerve crush injury in rabbits. **Methods:** A total of 27 healthy New Zealand white rabbits were selected and the right hind limb was selected as the injured side to establish a sciatic nerve injury model, in which sciatic nerve injury was performed after surgical exposure. The left side was the sham surgical side, as the nerve only exposed by operation. The changes of limb function were evaluated by DTI and DKI scanning at the time points of before injury and 1 day, 3 days, 1 week, 2 weeks, 4 weeks, 6 weeks and 8 weeks after injury, respectively. At each time point, 2 rabbits were randomly selected from the injured sciatic nerves for pathological examination. **Results:** The mean kurtosis (MK) value of DKI parameters decreased significantly on the 1st day after injury and fluctuated at a low level, but gradually increased from the 2nd to the 8th week. The differences of MK value between the injured side and the sham side were statistically significant in all time points ($P<0.05$). The score of anisotropy (FADKI) decreased to the lowest point one day after injury, while a sustained increase was maintained over three to eight weeks, and FA values at each time point were statistically significant (all $P<0.005$). Radial kurtosis (RK) was only significantly different at 6 weeks ($P=0.018$). There was no significant difference in axial kurtosis (AK) at all time points ($P>0.05$). In DTI parameters, the variation trend of FADTI was consistent with the FADKI in DKI, and the differences at each time point were statistically significant (all $P<0.001$), while the difference in ADC value was statistically significant only at week 8 ($P=0.038$). **Conclusion:** DKI can be used to evaluate peripheral nerve crush injury, but it may not provide additional value in the assess-

作者单位: 510120 广州, 广州医科大学附属第一医院放射科

作者简介: 万齐(1989-), 男, 湖南永州人, 博士研究生, 主治医师, 主要从事胸部疾病影像诊断、功能磁共振及影像组学研究。

通讯作者: 李新春, E-mail: xinchunli@163.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(81171800), 广东省科技计划项目(2016A020215168)

ment of acute peripheral nerve injury compared with DTI.

[Key words] Rabbits; Peripheral nerve injuries; Magnetic resonance imaging

扩散峰度成像(diffusion kurtosis imaging,DKI)是传统扩散张量成像(diffusion tensor imaging,DTI)技术上的延伸,可用于反映组织内非高斯分布水分子扩散情况^[1]。目前 DKI 已逐步应用于中枢神经系统且在部分中枢神经系统疾病中被证明能较 DTI 提供额外信息^[2-4];但目前使用 DKI 评估周围神经创伤的相关报道很少。与 DTI 相比,DKI 能否在评估周围神经急性创伤时亦提供额外信息目前尚不明确。本研究使用 DKI 及 DTI 对兔坐骨神经挤压伤模型进行监测,以期明确 DKI 在周围神经损伤评估的可行性及对比两者在评估周围神经病变的价值。

材料与方法

1. 模型建立

选用清洁级新西兰大白兔 27 只(广东省动物实验中心提供),雌雄不限,体重 1.8~2.3 kg。速眠新肌注诱导麻醉后,经耳缘静脉注射 3%戊巴比妥钠麻醉,常规消毒备皮。实验兔取左侧卧位,于右侧大腿上段沿股骨背侧长轴纵向切口约 2 cm,钝性分离股二头肌与股直肌及内收长肌间隙,暴露坐骨神经,速眠新肌间隙内滴注局部麻醉,合上血管钳轻轻提起坐骨神经远端并用自制扁嘴钳夹持坐骨神经 30 s,见神经纤细变薄但未离断,然后以丝线分层缝合切口。左后肢行假手术,以相同方式暴露坐骨神经并滴注速眠新后直接缝合创口。

2. MRI 扫描及测量

采用超导型 3.0T MR 机(Achieva, Philips)及兔专用线圈,分别于术前、1 天、3 天、1、2、4、6、8 周行 MRI 扫描。扫描序列: T₂WI/SPAIR; TR 3000 ms, TE 66 ms, NSA 2, 层厚 2 mm, 采集矩阵 172×137, 重建矩阵 528×528, FOV 120×120。DKI 序列: TR 1129 ms, TE 111 ms。层厚/层间距: 2 mm/0 mm, b 值 (0, 750, 1500) s/mm², 扩散编码方向 medium (15 方向), FOV 120 mm×120 mm, 采集矩阵 80×79, 体素 1.4×1.4 mm。DTI 序列: TR 1092 ms, TE 106 ms。层厚/层间距: 2 mm/0 mm, b 值 (0, 1000) s/mm², 采集矩阵 80×79, 体素 1.4 mm×1.4 mm, 扩散编码方向 medium, FOV 120 mm×120 mm。

DKI 及 DTI 图像后处理采用 IMAge/enGINE Beta V2.0.3 (Vusion Tech, Hefei, China.) 由 2 名有经验的影像科医师协商一致后在损伤侧神经手动勾画感兴趣区(ROI)行数据测量(图 1),然后将 ROI 复制到假手术侧神经进行测量。MRI 数据分析采用在各时间点均有完整数据的 11 只兔进行分析。

3. 病理检查

于各时间点随机选取 2 只兔子,使用过量麻醉将兔处死并解剖兔的下肢。兔取侧卧位双大腿屈曲,取股骨下横向切口为入口,沿肌间隙钝性分离,暴露、游离坐骨神经,取损伤段神经一段立即置于 4%戊二醛磷酸缓冲液中预固定,1%四氧化锇后固定,系列乙醇脱水, Epon812 环氧树脂包埋, LKB-III 型超薄切片机切半薄切片定位,再切超薄切片,片厚 50 nm,经醋酸

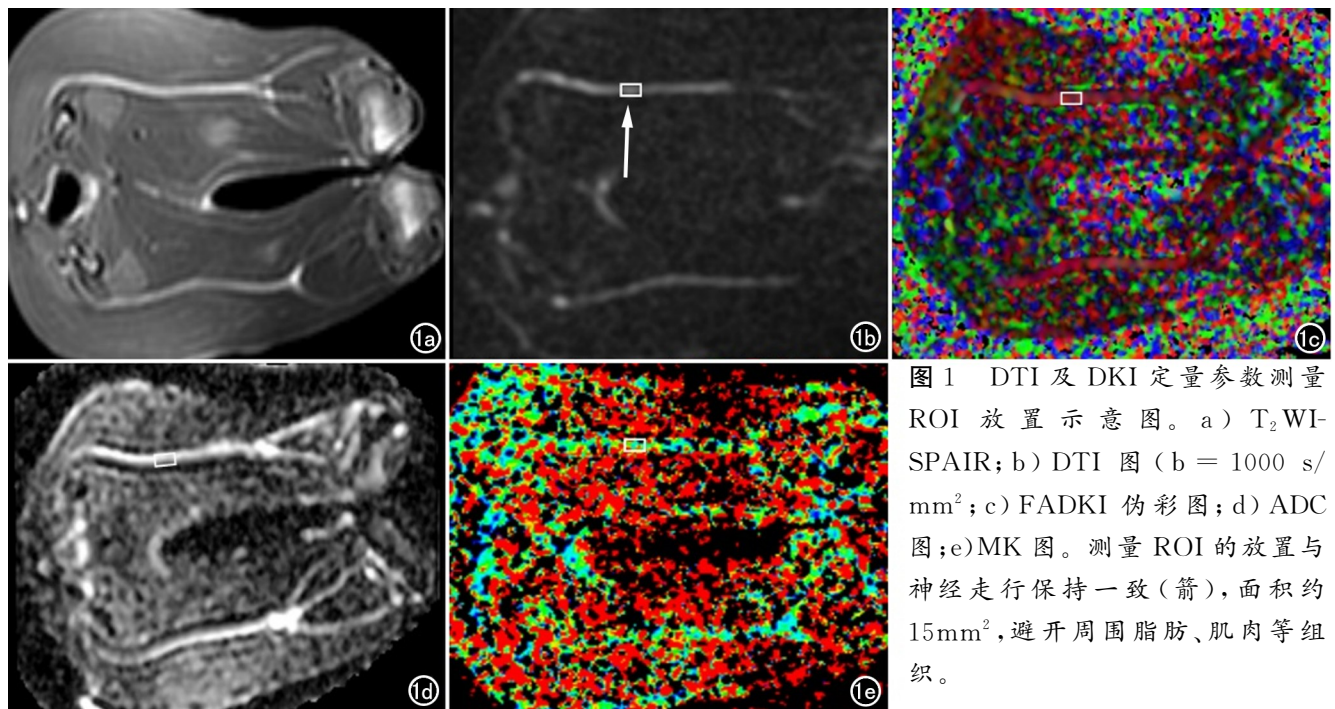


图 1 DTI 及 DKI 定量参数测量 ROI 放置示意图。a) T₂WI-SPAIR; b) DTI 图 (b = 1000 s/mm²); c) FADKI 伪彩图; d) ADC 图; e) MK 图。测量 ROI 的放置与神经走行保持一致(箭),面积约 15 mm²,避开周围脂肪、肌肉等组织。

铀和柠檬酸铅双重染色后用 Hitachi H-600 电子显微镜观察。

4. 统计学分析

计量资料以用均数 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm s$)表示,使用 SPSS 19.0 统计学软件进行统计分析。采用重复测量资料的单因素方差分析方法,分析损伤侧与对照侧神经各时间点 DTI 及 DKI 参数。 $P<0.05$ 为差别有统计学意义。

结 果

1. 坐骨神经损伤后常规 MRI 表现

兔坐骨神经挤压伤后 1 天, T_2 WI/SPAIR 序列显示兔子坐骨神经信号增高,神经所在肌间隙增宽,神经及周围软组织水肿;3 天~1 周损伤段神经肿胀加重,信号进一步增高,边界模糊,神经及周围软组织水肿持续存在;至损伤后 2 周,神经肿胀增粗及信号增高较前稍改善。损伤后 4~8 周,损伤段神经形态、信号逐渐恢复,水肿基本消退。假手术侧神经在损伤后 1 天, T_2 WI 信号稍增高,神经所在间隙稍增宽,周围软组织少许水肿,损伤后 3 天~2 周神经信号逐步恢复,周围软组织少许水肿基本消退,其后各时间点对照侧神经形态信号未见明确异常(图 2)。

2. 坐骨神经损伤后 DTI 及 DKI 各参数值变化

DTI 参数:损伤后第 1 天,损伤侧 FADTI 下降至最低点;3 天~8 周各时间点 FA 值逐步回升,至 8 周

上升至最高点,各时间点 FADTI 值与假手术侧差异有统计学意义($P<0.001$)。双侧 ADC 值于损伤后第 1 天明显升高,差异无统计学意义。损伤侧第 3 天~第 6 周 ADC 值逐渐降低,第 8 周时稍升高;假手术侧第 3 天~第 8 周 ADC 值逐渐降低。第 8 周两侧 ADC 值差异有统计学意义($P=0.038$),余时间点差异均无统计学意义。

DKI 参数:术后第 1 天损伤侧及假手术侧神经 MK 值明显下降,此后开始缓慢、曲折上升趋势,损伤侧与假手术侧 MK 值在术后第 2 周($P=0.022$)、第 4 周($P=0.018$)、第 6 周($P=0.016$)及第 8 周($P=0.016$)差异有统计学意义。双侧 FADKI 值于损伤后第 1 天均明显下降,损伤侧 FADKI 值下降幅度明显大于假手术侧,差异有统计学意义($P=0.001$);3 天~8 周双侧 FADKI 值呈逐渐上升趋势,以假手术侧上升较损伤侧快,各时间点差异均有统计学差异($P=0.001, 0.004, 0.000, 0.000, 0.001, 0.000$)。双侧 RK 值在第 1 天明显下降,其后各时间点 RK 值波动较大,第 6 周双侧神经 RK 值差异有统计学意义($P=0.018$)。双侧 AK 值损伤后各时间点差异均无统计学意义(图 3、表 1~3)。

3. 电镜改变

正常神经髓鞘结构完整,髓鞘呈层板状,轴索排列整齐,走行平直、分布均匀。损伤后第 1 天、第 3 天有髓神经呈脱髓鞘状的洋葱皮样改变,轴索轻度萎缩,见

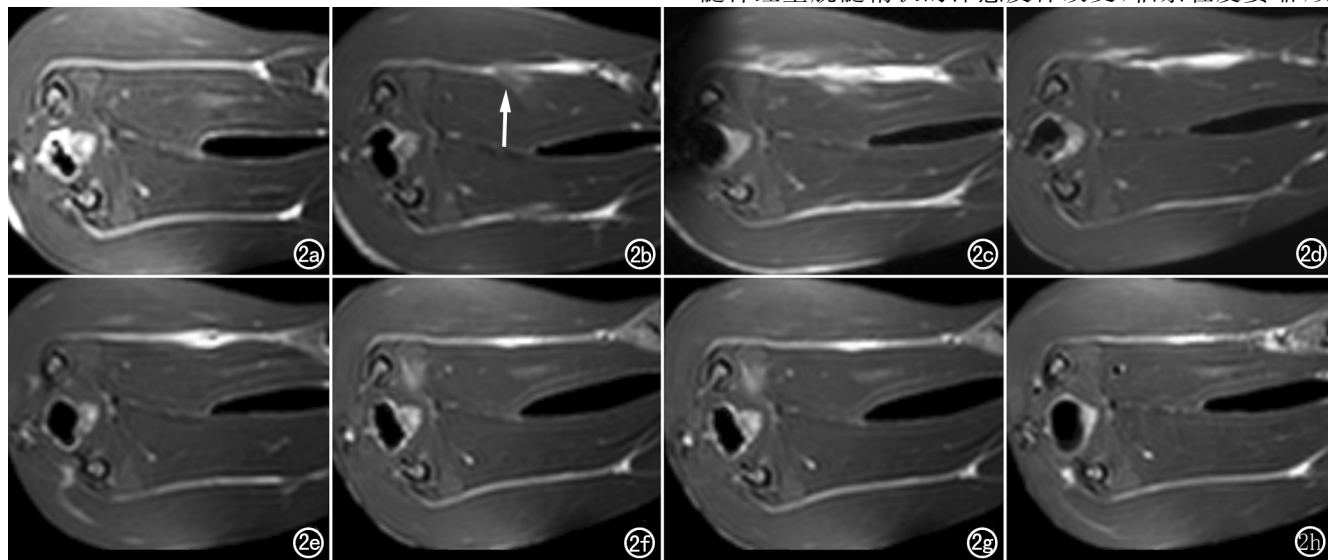


图 2 兔坐骨神经挤压伤前后 T_2 WI/SPAIR 信号改变系列图像。a) 损伤前坐骨神经在 T_2 WI/SPAIR 上表现为均匀线状高信号影; b) 损伤后 1 天, 损伤段(箭)坐骨神经信号稍模糊, 远端神经肿胀, 周围软组织水肿; 假手术侧神经亦稍模糊, 周围见少许高信号影; c) 3 天, 损伤侧神经走行稍扭曲呈条状高信号影, 粗细不均, 周围软组织高信号增多; 假手术侧神经信号升高, 边界较清; d) 1~2 周, 损伤侧神经高信号影走行变直, 神经中段见明显膨隆, 软组织高信号影逐渐吸收; 假手术侧坐骨神经信号较前减低, 形态均匀, 趋于正常; e) 2 周, 损伤侧神经局部仍肿胀, 对照侧神经信号基本恢复正常; f) 4~8 周, 损伤侧神经水肿逐步减轻, 信号逐渐减低; g) 6 周, 损伤侧神经水肿进一步减轻; h) 8 周, 神经信号进一步降低。

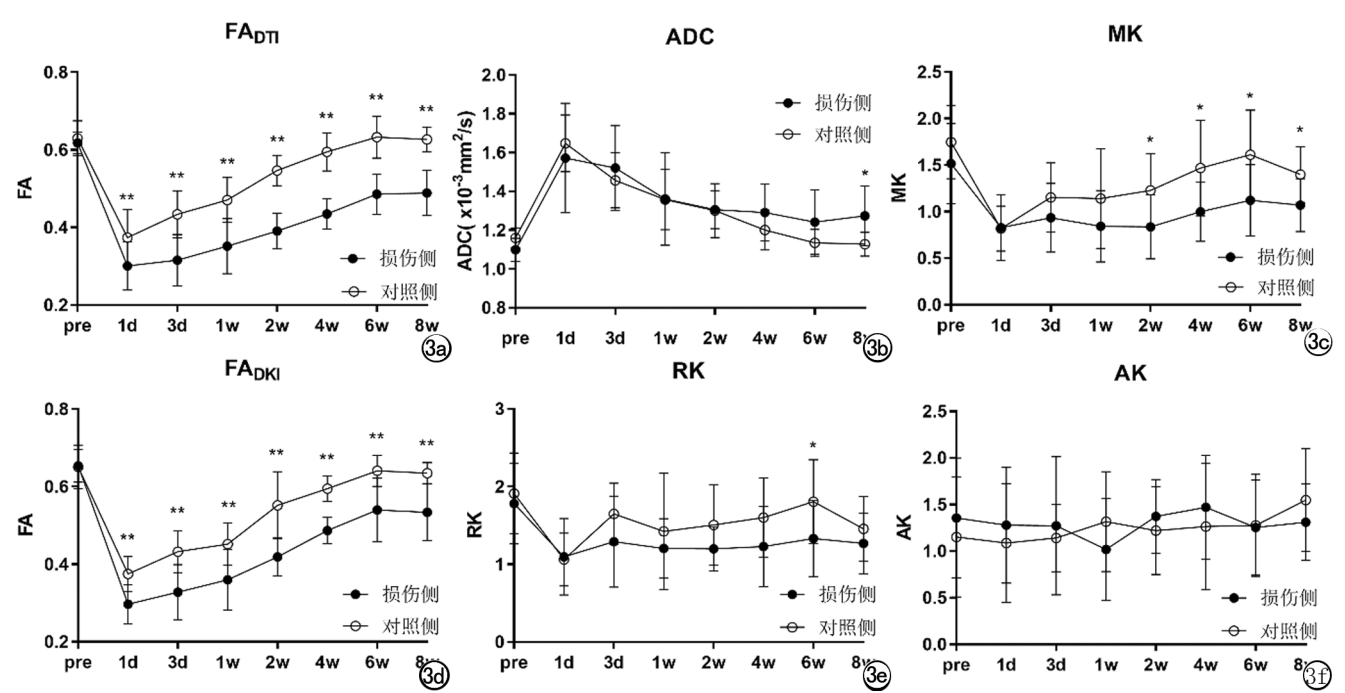


图 3 坐骨神经损伤侧及对照侧 DTI 及 DKI 各时间点参数值变化;a)FADTI 值;b)ADC 值;c)MK 值;d)FADKI 值;e)RK 值;f)AK 值。* $P<0.05$, ** $P<0.005$ 。

表 1 DKI 参数(FADKI 与 MK)在损伤侧与假手术侧不同时间点的比较

时间点	FADKI			MK		
	损伤侧 (n=11)	假手术侧 (n=11)	P	损伤侧 (n=11)	假手术侧 (n=11)	P
0d	0.642±0.042	0.651±0.056	>0.05	1.516±0.429	1.747±0.394	>0.05
1d	0.297±0.050	0.375±0.045	0.001	0.829±0.352	0.818±0.242	>0.05
3d	0.328±0.071	0.432±0.054	0.001	0.935±0.369	1.153±0.370	>0.05
1w	0.360±0.078	0.452±0.054	0.004	0.842±0.383	1.141±0.536	>0.05
2w	0.419±0.049	0.552±0.087	<0.001	0.836±0.345	1.229±0.395	0.022
4w	0.487±0.034	0.595±0.033	<0.001	0.998±0.317	1.467±0.514	0.018
6w	0.540±0.082	0.641±0.040	0.001	1.122±0.384	1.611±0.480	0.016
8w	0.534±0.073	0.635±0.027	<0.001	1.070±0.283	1.399±0.301	0.016

表 2 DKI 参数(RK 与 AK)在损伤侧与假手术侧不同时间点的比较

时间点	RK			AK		
	损伤侧 (n=11)	假手术侧 (n=11)	P	损伤侧 (n=11)	假手术侧 (n=11)	P
0d	1.781±0.519	1.912±0.520	>0.05	1.355±0.644	1.150±0.644	>0.05
1d	1.095±0.495	1.060±0.341	>0.05	1.278±0.621	1.087±0.637	>0.05
3d	1.292±0.586	1.648±0.395	>0.05	1.272±0.741	1.141±0.362	>0.05
1w	1.204±0.383	1.424±0.748	>0.05	1.017±0.547	1.316±0.535	>0.05
2w	1.198±0.287	1.505±0.516	>0.05	1.372±0.397	1.220±0.472	>0.05
4w	1.228±0.516	1.600±0.514	>0.05	1.469±0.559	1.263±0.677	>0.05
6w	1.330±0.491	1.806±0.539	0.018	1.254±0.510	1.276±0.548	>0.05
8w	1.269±0.389	1.456±0.415	>0.05	1.310±0.411	1.546±0.551	>0.05

表 3 DTI 参数(FADTI 与 ADC)在损伤侧与假手术侧不同时间点比较

时间点	FADTI			ADC		
	损伤侧 (n=11)	假手术侧 (n=11)	P	损伤侧 (n=11)	假手术侧 (n=11)	P
0d	0.618±0.028	0.630±0.045	>0.05	1098.512±59.101	1159.576±52.411	>0.05
1d	0.301±0.062	0.374±0.072	<0.001	1571.694±282.575	1647.193±146.758	>0.05
3d	0.316±0.066	0.434±0.060	<0.001	1520.746±217.938	1456.042±142.231	>0.05
1w	0.352±0.071	0.471±0.058	<0.001	1360.707±237.742	1357.202±155.454	>0.05
2w	0.391±0.046	0.547±0.039	<0.001	1305.315±98.265	1300.032±139.279	>0.05
4w	0.435±0.039	0.595±0.049	<0.001	1290.013±146.548	1200.005±103.508	>0.05
6w	0.486±0.052	0.633±0.054	<0.001	1241.266±166.100	1134.361±68.642	>0.05
8w	0.489±0.058	0.627±0.032	<0.001	1273.195±155.040	1127.688±61.390	0.038

大量神经微丝,线粒体肿胀、空化。施万细胞胞质见溶酶体,同时见大量自噬体形成,核染色质凝集、边集。损伤后第 1 周、第 2 周,有髓神经结构较前改善,髓鞘轻度皱缩,轴索见大量神经微丝,部分轴索轻度萎缩,见少量蜂窝状结构形成,周围见少量新生薄髓神经。损伤后第 4 周,轴索开始增生,雪旺细胞开始增生,并见神经外膜与神经束膜之间炎症细胞浸润减少。损伤后第 6 周,髓鞘逐渐增厚,髓鞘菲薄且不均匀,再生轴索较前明显并成熟,雪旺细胞广泛增生,板层结构稍紊乱,周围大量新生薄髓纤维。损伤后第 8 周,轴索密度、直径较前增加,髓鞘明显较前增厚,板层结构逐渐恢复接近正常,厚薄欠均匀(图 4)。

讨 论

扩散峰度成像是一种可量化组织内水分子非高斯运动的一种新的扩散成像技术,是对传统 DTI 技术的扩展与补充,其对组织某些特性如异质性更加敏感^[1,5]。研究表明 DKI 在评估轻度脑外伤疾病^[6]、急性脑梗塞^[7]、阿尔兹海默病^[3]等中枢系统疾病时能比 DTI 显示更多的组织信息及微观改变;然而目前两者在周围神经系统对比研究较少。

本研究中损伤侧和假手术侧神经的 ADC 值在各时间点几乎均无统计学意义,说明手术与假手术侧造成的水肿与消退的变化在各时间点几乎一致。本研究结果显示无论 DTI 还是 DKI,其所得 FA 值具有类似

的时间变化曲线。FA 值均在术后第 1 天明显降低至最低值,这可能是由于神经内部结构的破坏,神经局部炎症反应及水肿造成周围神经水分子扩散各向异性降低^[8]。损伤后第 3 天—第 8 周,损伤段 FA 值持续升高,这一方面可能与损伤后的大量微丝、微管及施万细胞的增殖以及炎症细胞对崩解残余物质的清除、水肿消退有关;另一方面,2 周后神经内逐渐出现轴突的增生、新生薄髓神经增多并成熟,原受损的有髓神经的修复,这使得各向异性增加,FA 值升高所致^[9]。这与其他 DTI 评估周围神经损伤的文献中在神经退变时 FA 值减低而神经再生时 FA 值升高一致^[10-12]。

MK 值为平均扩散峰度,其大小与感兴趣区域内组织结构的复杂程度有关。组织结构越复杂,平均峰度的数值越大,反之亦然。本研究术后第一天,损伤侧及假手术侧 MK 值明显下降,这与两侧神经都出现了明显水肿有关;另外神经损伤后发生脱髓鞘改变也会降低 MK 值^[13]。此后 MK 值开始缓慢、曲折上升的趋势,仅在 2 周后各时间点与假手术侧差异具有统计学意义,这可能与微丝、微管及施万细胞的增殖及有髓神经的修复导致受损神经结构的复杂性增加有关。我们发现与 FA 值相比 MK 在评估周围神经方面未能优于 FA;这与之前的一项周围神经的研究^[14]相似,但与中枢神经系统的研究^[15]不同。这可能是由于 MK 对于复杂纤维排列区域(如大脑)的异常更为敏感,而周围神经(如坐骨神经)的结构相对简单直接,故 MK 在

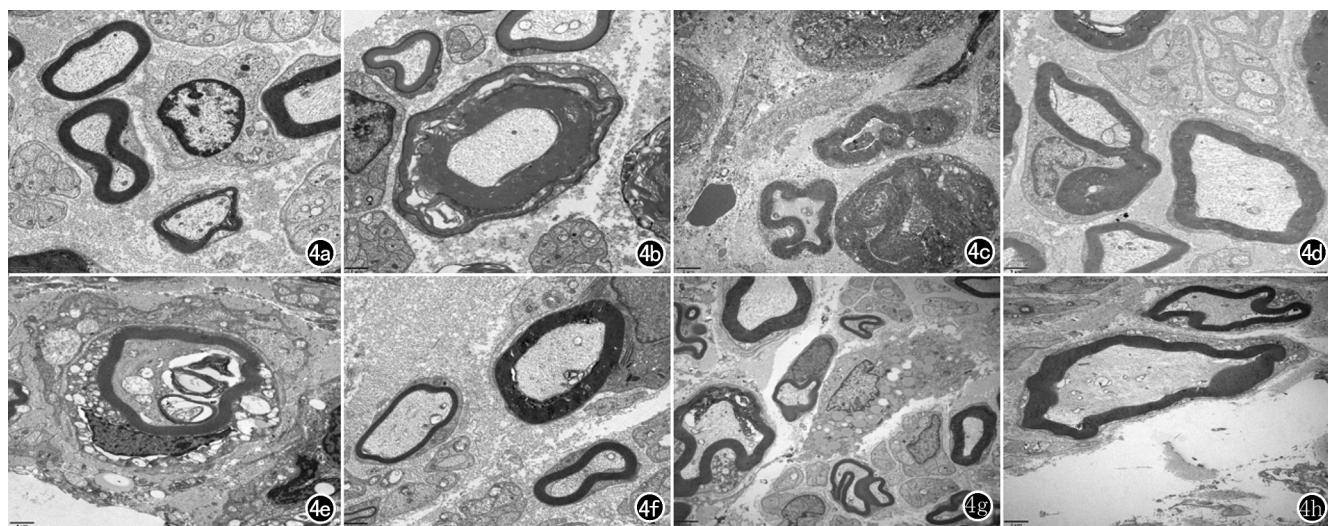


图 4 兔坐骨神经挤压伤后各时间点电镜检查($\times 10000$)。a)正常兔坐骨神经髓鞘结构完整,髓鞘呈层板状,轴索排列整齐,走行平直、分布均匀;b)损伤后第 1 天,有髓神经呈脱髓鞘状的洋葱皮样改变,轴索轻度萎缩,见大量神经微丝,线粒体肿胀、空化;c)损伤后第 3 天,神经髓鞘明显破坏,见大量炎症细胞聚集;d)损伤后第 1 周,神经髓鞘轻度皱缩,轴索见大量神经微丝,部分轴索轻度萎缩;e)损伤后第 2 周,见少量蜂窝状结构形成,周围见少量新生薄髓神经;f)损伤后第 4 周,见部分新生轴索,雪旺细胞增生,神经外膜与神经束膜之间炎症细胞浸润减少;g)损伤后第 6 周,髓鞘较前增厚,不均匀,再生轴索较前明显并成熟,大量新生薄髓纤维;h)损伤后第 8 周,轴索较前增加,髓鞘明显较前增厚,板层结构逐渐恢复接近正常。

周围神经的应用可能并无优势。

RK、AK 值分别反应纵向和轴向方向上的平均扩散峰度,两者分别量化了平行和垂直方向上的非高斯扩散受限程度。在损伤后第 1 天,损伤侧与假手术侧 RK 值较损伤前显著下降,这说明在垂直方向上的水分子非高斯扩散受限程度明显降低;但同一时间点两组间 RK 值并无明显差异,这可能是由于损伤侧与假手术侧神经及其周围间隙都出现了明显水肿所致。此后,损伤侧与假手术侧 RK 值逐渐恢复,其中假手术侧恢复明显更快,但两组 RK 值差异仍无统计学差异,这可能是由于 RK 值具有较大的标准差所致,这也反映出 RK 值具有较大的变异度。这一方面可能是由于高 b 值弥散图像的噪音对参数计算产生影响^[16];另一方面可能由于兔坐骨神经较为细小,测量容易受到部分容积效应的影响。

本研究显示 AK 值在各时间点出现轻度波动并与病理改变无明显相关性,这与中枢神经损伤的相关研究^[3]中 AK 值出现下降的情况并不一致。这可能与周围神经中枢神经的解剖结构有一定差异有关。由于周围神经存在包括神经内膜、神经束膜和神经外膜在内的多层结构包裹,限制了垂直于轴突长轴方向的水分子的运动,从而使得轴向扩散性增高,这种特点可能会导致轴向方向上非高斯扩散受限程度较低,以至于周围神经损伤后改变不足以引起明显的 AK 值变化。

本研究存在一些局限性。首先,本研究所使用的后处理软件不支持提供 DTI 的本征向量值参数;其次,兔坐骨神经较为细小,故定量参数的测量可能受到容积效应的影响;最后,本研究未进行观察者一致性的评价,需在今后进一步研究中完善。

总之,DKI 可用于周围神经挤压伤的评估;FA、MK 值可作为评价周围神经挤压伤后神经损伤和修复的指标;但扩散张量参数 FA 优于包括 MK 在内的其他扩散峰度参数。虽然 DKI 也能提供 DTI 参数,但与 DTI 相比,DKI 具有更长的成像时间且未能提供额外的价值,故在评估周围神经急性损伤方面,DTI 可能是临床应用的更好选择。

参考文献:

- [1] Jensen JH, Helpern JA. MRI quantification of non-Gaussian water diffusion by kurtosis analysis[J]. NMR Biomed, 2010, 23(7): 698-710.
- [2] Spampinato MV, Chan C, Jensen JH, et al. Diffusional kurtosis im-

- aging and motor outcome in acute ischemic stroke[J]. Am J Neuroradiol, 2017, 38(7): 1328-1334.
- [3] Yuan L, Sun M, Chen Y, et al. Non-Gaussian diffusion alterations on diffusion kurtosis imaging in patients with early Alzheimer's disease[J]. Neurosci Lett, 2016, 616: 11-18.
- [4] 索学玲. DWI 技术在中枢神经系统中的应用及研究进展[J]. 放射学实践, 2018, 33(2): 210-214.
- [5] 胡达, 王波, 吴昆华, 等. DKI 对震颤型帕金森患者脑深部核团微结构变化的诊断价值[J]. 放射学实践, 2020, 35(8): 999-1004.
- [6] 樊秋菊, 杨春华, 哈若水, 等. DKI 与 DTI 技术对轻度脑外伤定量评估的研究[J]. 临床放射学杂志, 2014, 33(7): 976-981.
- [7] 陈慧铀, 冯源, 陈谦, 等. DKI 与 DTI 评估不同部位急性脑梗死的脑结构变化的作用[J]. 中国医学计算机成像杂志, 2018, 24(4): 281-286.
- [8] 万齐, 周嘉璇, 李新春, 等. MR 扩散张量成像活体评估兔坐骨神经放射性损伤[J]. 中国医学影像技术, 2015, 31(8): 1150-1154.
- [9] 陈镜聪, 李新春, 万齐, 等. 坐骨神经牵拉伤模型 MR 扩散张量成像与病理的对照[J]. 中国组织工程研究, 2013, 17(41): 7278-7283.
- [10] Wan Q, Wang S, Zhou J, et al. Evaluation of radiation-induced peripheral nerve injury in rabbits with MR neurography using diffusion tensor imaging and T₂ measurements: correlation with histological and functional changes[J]. J Magn Reson Imaging, 2016, 43(6): 1492-1499.
- [11] Sun C, Hou Z, Hong G, et al. In vivo evaluation of sciatic nerve crush injury using diffusion tensor imaging: correlation with nerve function and histology[J]. J Comput Assist Tomogr, 2014, 38(5): 790-796.
- [12] Li X, Chen J, Hong G, et al. In vivo DTI longitudinal measurements of acute sciatic nerve traction injury and the association with pathological and functional changes[J]. Eur J Radiol, 2013, 82(11): e707-714.
- [13] Takemura MY, Hori M, Yokoyama K, et al. Alterations of the optic pathway between unilateral and bilateral optic nerve damage in multiple sclerosis as revealed by the combined use of advanced diffusion kurtosis imaging and visual evoked potentials[J]. Magn Reson Imaging, 2017, 39: 24-30.
- [14] Manzanera Esteve IV, Farinas AF, Pollins AC, et al. Probabilistic assessment of nerve regeneration with diffusion MRI in rat models of peripheral nerve trauma[J]. Sci Rep, 2019, 9(1): 19686.
- [15] Kelm ND, West KL, Carson RP, et al. Evaluation of diffusion kurtosis imaging in ex vivo hypomyelinated mouse brains[J]. Neuroimage, 2016, 124(Pt A): 612-626.
- [16] Glenn GR, Tabesh A, Jensen JH. A simple noise correction scheme for diffusional kurtosis imaging[J]. Magn Reson Imaging, 2015, 33(1): 124-133.

(收稿日期: 2021-04-13 修回日期: 2021-07-29)