儿科影像学。

DTI各向异性分数与椭球面积比在儿童特发性全面性癫痫中的 比较研究

张玉珍,尹秋凤,郑慧,周敏雄,徐冬溶,刘明,汪登斌

【摘要】 目的:探讨 DTI 各向异性分数(FA)和椭球面积比(EAR)在特发性全面性癫痫(IGE)中的 诊断价值。方法:根据脑电图对发作间期痫样放电(IED)的定侧结果,将33例 IGE 患儿分为3组,IGE-A 组 15 例(双侧 IED),IGE-B 组 9 例(左侧 IED),IGE-C 组 9 例(右侧 IED)。将 32 例健康志愿者纳入 对照组(NC),并根据年龄、性别分别与 A、B、C 组相匹配的方法,进一步分为 NC-A 组、NC-B 组和 NC-C组,显示阈值为 50个体素(Px)。结果:IGE-A 和 NC-A 组比较, FA 和 EAR 异常分布最大区域为左 侧半球额叶和颞叶脑白质,EAR 异常还见于右中央颞区(222 Px)、顶叶(198 Px)、脑下回(126 Px)、中 央后回(125 Px)等右侧大脑半球白质区域。与 NC-B 组比较, IGE-B 组的 FA 和 EAR 异常分布区位于 左侧大脑白质梭状回和枕叶,此外左额叶(65Px)白质内有少量 EAR 异常区域。IGE-C 与 NC-C 组比 较,FA和 EAR 异常改变均位于左侧大脑半球,EAR 异常区的体素簇范围较 FA 体素簇大(169 vs. 50 Px), EAR 图还显示了左侧颞叶(123 Px)、左侧颞中回(112 Px)和颞上回(111 Px)等部位白质及灰质的 异常改变。结论:EAR 和 FA 均可反映 IGE 脑白质异常,EAR 比 FA 更敏感,能发现更多白质异常区 域,可用于人类脑部病变的研究。

【关键词】 各向异性分数; 椭球面积比; 扩散张量成像; 癫痫; 儿童

【中图分类号】R445.2; R742.1 【文献标志码】A 【文章编号】1000-0313(2020)12-1589-06

DOI:10.13609/j.cnki.1000-0313.2020.12.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



A comparative study between fractional anisotropy and ellipsoidal area ratio of idiopathic generalized epilepsy in children using diffusion tensor imaging ZHANG Yu-zhen, YIN Qiu-feng, ZHENG Hui, et al. Department of Radiology, Xinhua Hospital Affiliated to Shanghai Jiaotong University, School of Medicine, Shanghai 200092, China

(Abstract) Objective: To compare and further evaluate the diagnosis performance of fractional anisotropy (FA) and ellipsoidal area ratio (EAR) indices in children of idiopathic generalized epilepsy (IGE).Methods: Diffusion tensor images (DTI) were obtained from three IGE groups according to the EEG results of 33 children with IGE.15 children with bilateral interictal epileptiform discharges (IED) were included in group A, 9 children with left IED and 9 children with right IED were included in group B and group C, respectively. Thirty-two healthy children (normal control group, NC) were subdivided into three groups (NC-A, NC-B and NC-C) and compared with the three corresponding IGE groups.FA and EAR were estimated through voxel-based analysis.Statistics results for group analysis were compared among the three IGE groups and age- and sex-matched NC groups. Results: Compared with NC-A group, both FA and EAR abnormalities were found in the white matter (WM) of left cerebrum of including frontal and temporal lobes in IGE-A group, and EAR abnormalities were also shown in the WM of right cerebrum, including rolandic_oper_R (222 Px), parietal lobe (198 Px), Sub-Gyral (126 Px) and postcentral gyrus (125 Px). Compared with NC-B group, reduction of FA and EAR was found in the left fusiform and occipital lobe of the WM.EAR also revealed reductions in the left frontal lobe (65 Px). In group C, the abnormalities in the left cerebrum were revealed both in FA and EAR in-

基金项目:上海市科研技术委员会科研计划项目(18411967500);国家重点研发计划子课题(2017YFC0109003)

通信作者:汪登斌, E-Mail: wangdengbin@xinhuamed.com.cn

dices. The cluster size was bigger on EAR images (169 Px) than that on FA images (50 Px). EAR also revealed differences in the left temporal lobe (123 Px), temporal_mid_L (112 Px) and superior temporal gyrus (111 Px). Conclusion: EAR and FA can reflect WM abnormalities in children with IGE, while EAR is more sensitive in detecting WM alterations than FA, which can be used for the study of human brain diseases.

[Key words] Fractional anisotropy; Ellipsoidal area ratio; Diffusion tensor imaging; Epilepsy; Children

特发性全面性癫痫(idiopathic generalized epilepsy,IGE)患者头颅常规 MRI 表现通常并无明显异常, 但在脑电图(electroencephalogram,EEG)上可以检测 到致痫区和某些部位的痫样波^[1]。1994年,Basser 等^[2]首次引入了扩散张量成像(diffusion tensor imaging,DTI)技术来分析 MRI 上水分子的扩散信息。 DTI 在全脑结构连接异常的识别中具有重要作用,近 年来被广泛应用于癫痫继发脑白质异常的研究中^[3]。 DTI 技术可测量多种参数反映组织的各向异性,最常 用的参数有表观扩散系数(apparent diffusion coefficient,ADC)、各向异性分数(fractional anisotropy, FA)、相对各向异性分数(relative anisotropy,RA)和 平均扩散率(mean diffusivity,MD)。研究证明 FA 和 MD 在描述 IGE 患者脑白质完整性及异常方面具有 较高敏感性^[1,3-6]。

尽管 FA 和 MD 已被广泛运用于临床研究,但它 们对各向异性的量化还是存在一些不足。脑白质中由 于髓鞘等组织的阻碍,在垂直方向上水分子扩散的受 限程度远大于与纤维走行一致方向上,即其具有较高 的各向异性,此时扩散张量可描述为椭球体。扩散张 量椭球面积比(ellipsoidal area ratio, EAR)是一种类 似于 FA 的参数,反映了沿各个方向扩散的趋势,加入 了扩散椭球的表面积信息作为修正,对噪声的敏感性 较低,可以克服 FA 的一些缺陷,相对反映扩散椭球的 实际形状,更容易看到差异显著性,进而定量描述其对 应的生物学扩散特征^[7-10]。

目前关于 EAR 的研究报道较少^[10-12]。本研究中 基于体素分析(voxel-based analysis, VBA)方法,对 IGE 及年龄、性别相匹配的正常对照组(normal control, NC)的儿童被试进行全脑白质 FA 及 EAR 的测 量和比较,探讨这两种各向异性指标对 IGE 脑白质病 的诊断价值,并比较图像信噪比。

材料与方法

1. 一般资料

本组 33 例 IGE 患儿, 男 16 例, 女 17 例, 经临床 诊断、经头皮 EEG 或 24 小时视频 EEG 检查明确诊 断。癫痫发作时临床主要表现为一侧或双侧肢体抽搐 为主,伴有其它癫痫发作症状,如口吐白沫、突发失神、 呼之不应、睁眼和凝视等。常规 EEG 诊断一侧或两侧 半球尖波、棘波、尖慢波和棘慢波;3 例常规 EEG 诊断 为阴性,行 24 小时视频 EEG 检查,显示颞叶有痫样 波。

在 EEG 检查后 2~14 d 行头颅 MRI 检查。选择 行 DTI 检查的条件:①出现癫痫各种临床表现,无癫 痫家族病史。除外脑血管病、肿瘤、外伤等病变所致; ②无小儿热痉挛史,无脑炎、脑膜炎史;③无各种原因 所致的智能障碍;④无脑缺氧史;⑤无长期低血糖史; ⑥无精神病史;⑦发作间期 EEG 或 24 小时视频 EEG 显示单侧或双侧癫痫波;⑧符合以上 7 条行头颅常规 MRI 扫描未见明显病灶者。另外,将 32 例年龄及性 别与患者组相匹配的健康儿童纳入对照组。IGE 患者 的主要临床表现为头痛或头晕。所有被试的运动、听 力和视力均正常,常规 MRI 表现无明显异常。

根据发作间期 EEG 或 24 小时视频 EEG 对痛样 放电(interictal epileptiform discharges, IED)的定侧 结果,将 33 例 IGE 患儿分为 3 个亚组: 痛样波位于双 侧大脑半球 15 例(IGE-A 组),位于左侧大脑半球 9 例 (IGE-B 组)、位于右侧大脑半球 9 例(IGE-C 组)。 IGE-A、IGE-B和 IGE-C 三组中分别有 4 例、2 例和 4 例患儿出现癫痫发作时意识丧失。根据各亚组患儿的 平均年龄和性别分布,将对照组的 32 例儿童分为与其 相匹配的 3 个亚组: NC-A 组(18 例)、NC-B 组(n=18 例)和 NC-C 组(18 例)。其中病例-A 组和 NC-A 组的 临床数据已在我们发表的文章中使用^[13]。

本研究经我院伦理委员会批准,所有被试的监护 人签署了书面知情同意书。

2. 影像检查方法

使用 GE Signa Horizon LX 3.0T 磁共振仪和八 通道相控阵头部线圈。在 IGE 组及对照组中各有 16 例小于 3 岁无法自然入睡的患儿,给予口服 10%水合 氯醛溶液(0.5 mL/kg),待其镇静入睡后进行 MRI 检 查。本研究中主要包括 4 个成像序列,分别是 DWI、 全脑快速扰相梯度回波序列(fast spoiled gradient echo,FSPGR)T₁WI、液体反转恢复(fluid-attenuated inversion - recovery, FLAIR)T₂ WI 和 矢 状 面 FSE T₂WI。DWI 扫描参数:b 值为 0 和 1000 s/mm²,扩 散编码向量沿 25 个非平行方向,TR 14000 ms,TE 76.9 ms,层厚 2.5 mm,间距 0 mm,视野 24.0 cm× 16.8 cm,矩阵 96×96,激励次数 1;横轴面 FSPGR 序 列:TR 713 ms,TE 2.2 ms,TI 450 ms,层厚 1.0 mm, 间距 0.5 mm,矩阵 320×256 ,翻转角 15°;横轴面 FLAIR 序列 T₂WI:TR 8002 ms,TE 153.9 ms,层厚 5.0 mm,间距 1.5 mm,矩阵 320×192 ;矢状面 FSE T₂WI:TR 2560 ms,TE 116.6 ms,层厚 5.0 mm,间距 2.0 mm,矩阵 384×224 ;后 3 个序列视野均为 $24.0 \text{ cm} \times 24.0 \text{ cm},激励次数 1。$

3. 数据后处理及分析

使用 FSL 软件对 DWI 图像进行预处理^[14]。使用 FSL 中的"涡流校正"工具对 DWI 图像的涡流畸变进 行校正,"BET"工具去除非脑区域,最后利用自行开发 的软件计算 FA 和 EAR 参数^[9]。

4. 图像配准

本研究创建了一个特定于儿童的正常头颅模板, 通过最小化正常儿童数据到模板的变形量来提高组间 配准的质量^[15]。所有的图像配准过程基于 SPM8 软 件。主要步骤:首先,根据美国国立卫生研究院对正常 大脑发育的研究创建使用基于 SPM 的工具箱模板 TOM^[16-17]。然后使用统一分割方法(SPM8 中的工具 箱)将 NC 组儿童脑的 S0 图像配准到组织概率模板 中^[18]。对已配准的 S0 图像进行平均及 8 mm 半高全 宽(full width at half maximum,FWHM)高斯核平滑 处理,得到特定的 S0 模板。所有对象的 S0 图像使用 标准化工具 SPM8 与特定组内对象 S0 模板进行非线 性配准,并将由此产生的变形场应用于其相应的 FA、 EAR 图像。最后对配准参数图进行平滑处理。

5.统计方法

对所有已配准和平滑的 FA 和 EAR 图像进行 VBA 分析。采用两样本 t 检验比较各 IGE 亚组与相 应的对照亚组之间各定量参数的差异。以 P < 0.001 和超过 50 个体素簇(pixel, Px)被认为是有显著差异 性的区域。

结 果

IGE 组和对照组的基本临床资料的比较见表 1。 患者组与对照组的 3 对配对亚组之间年龄及性别的差 异均无统计学意义(P>0.05)。

与对照组中配对亚组比较,IGE 组中 3 个亚组的 FA 和 EAR 显示有异常改变的脑区(≥50 Px)分布见 表 2~4。IGE-A 组:15 例中痫样波在两侧大脑半球 各脑叶均有分布 8 例,位于双侧额叶、颞叶和额枕叶各 2 例,双侧枕叶 1 例。FA 伪彩图显示,左侧大脑半球 的白质及灰质内均存在 FA 值减低区域(536 Px),集 中分布于 3 个区域,尤其是额叶和颞叶内,具体分布部 位及体素簇大小见表 2。这些差异已经在我们之前发 表的论文中列出^[13]。EAR 伪彩图显示,EAR 值异常 区域的数量要多于 FA 图(图 1)。EAR 值异常区域同 时存在于两侧大脑半球,集中分布于 5 个区域,左侧大 脑半球异常区域体素簇之和为 316 Px,右侧大脑半球 异常区域体素簇之和为 322 Px,具体部位及体素簇大 小分布见表 2。

表 2 IGE-A 组与 NC-A 组 FA、EAR 异常区域的比较

编号	FA异常区域	EAR 异常区域
1		左侧 半球:直回(AAL, 119Px),额上眶回(AAL, 111Px), 新 胝 下 回 (97Px),额下回,尾叶 (AAL,58Px),前扣带回 (56Px),边缘叶(56Px)
2	左额下眶回(AAL, 255Px),左额中回 (237Px),左额下回 (133 Px),左额下回 (aal,67Px)	左额下眶回(AAL, 220Px), 左额中回 (209Px), 左额下回 (106Px), 左额下回 (AAL,56Px)
3	左颞中回 (AAL, 197Px), 左颞中回 (193Px)	左颞中回(AAL,169Px), 左颞中回(57Px),左脑下 回(33Px)
4	_	左侧颞叶中央(AAL, 222Px),右顶叶(198Px), 右脑下回(126Px),中央 后回(125Px),右额叶 (69Px),右脑下叶(55Px)
5	_	左脑下叶(134Px),左中 央颞区(AAL,120Px),左 额叶(97Px),左岛叶 (94Px),左顶叶(69Px), 左中央后回(65Px),左中 央前回(55Px)

注:AAL 为解剖自动标记(anatomical automatic labeling),AAL 分 区是由 Montreal Neurological Institute (MNI)机构提供。

IGE-B组:9例中异常痫样波散在分布于左侧半球2例,左颞叶6例,左额叶和颞中回1例。FA和 EAR异常区的分布及体素簇大小见表3。结果显示,

表1 IGE 组与对照组的3个配对亚组之间临床特征的比较

指标	IGE-A 组	NC-A 组	统计量#	P 值	IGE-B	NC-B 组	统计量#	P 值	IGE-C 组	NC-C 组	统计量	P 值
性别(男/女)	7/8	8/10	0.0499#	0.8232	4/5	9/9	0.0185#	0.8917	5/4	10/8	0.0000#	1.000
年龄(岁)	6.9 ± 3.1 (3.0~11.9)	6.4±1.4 (4.1∼9.3)	0.54*	0.5983	8.3±2.1 (5.3~12.1)	8.3 ± 2.0 (4.8~12.6)	-0.07*	0.9432	6.5 ± 3.4 (3.3~12.6)	6.9 ± 2.5 (3.8~12.6)	-0.32*	0.7571

注: # 为卡方值, * 为 t 值。

FA及EAR异常区域的体素簇均较小,主要位于左侧 半球白质,前者为70Px,后者为89Px;FA减低区域 主要为梭状回和枕叶;EAR异常区域还包括脑回下区 和左额叶。部分FA异常区的体素范围小于对应的 EAR异常区(图2)。

IGE-C组:9例患儿中痫样波广泛分布于右侧大脑半球2例,位于右颞叶4例、中央回和右颞叶3例。 FA和EAR异常区的分布及体素簇大小见表3。

表 3 IGE-B 组与 NC-B 组的 FA、EAR 异常区域的比较

编号	FA异常区域	EAR 异常区域
1	左侧梭状回(AAL, 56Px),左枕叶(56Px)	左脑下回(64Px),左侧梭 状回(AAL,63Px),左枕 叶(59Px)
2	_	左额叶(65Px),左侧颞叶 白质(56Px)

FA图显示左侧大脑半球异常区域较小(50和

60Px)。EAR 异常区域(169Px)位于左侧大脑半球, 以颞叶为主,灰质和白质内均存在。EAR 异常区域的 体素均比 FA 大(图 3)。

本研究中 IGE-A 组和 IGE-B 组的结果(表 2、3) 显示 FA 及 EAR 异常区域与脑电图所显示的区域基 本符合,但更具体;而 IGE-C 组的结果(表 4)显示 FA 和 EAR 异常区域均位于左侧大脑半球,与脑电图的 结果不符。3 组的 EAR 图与 FA 图的对比信噪比相 似,而 EAR 图像比 FA 更平滑(图 1~3)。

表4 IGE-C组与 NC-C组的 FA、EAR 异常区域的比较

编号	FA异常区域	EAR 异常区域
1	左侧半球白质(50Px)	左颞叶白质(114Px),左 侧颞中回(AAL,112Px), 左颞上回(111Px),左缘 上回(58Px)
2	左侧中央后区(AAL, 60Px)	_



图1 IGE-A 组(双侧大脑半球癫痫组)同一层面扩散参数图。a)FA 图未显示明显异常;b)EAR 图,黄色区 域表示 EAR 值与 NC-A 组比较有显著差异,图像的信噪比与 FA 图相似,但细节比 FA 图像更平滑。 图2 IGE-B组(左侧大脑半球癫痫组)同一层面扩散参数图。a)FA 图上黄色区域表示与 NC-B 组之间 FA 值有显著差异的区域;b)EAR 图上黄色区域表示与 NC-B 组之间 EAR 值有显著差异的区域。 图3 IGE-C 组(右侧大脑半球癫痫组)同一层面扩散参数图。a)FA 图上黄色区域表示与 NC-B 组之间 FA 值有显著差 异的区域;b)EAR 图上黄色区域表示与 NC-B 组之间 EAR 值有显著差异的区域。

讨论

在过去二十年中,DTI已经成为一种广泛使用的 MR 成像技术,可通过测量水分子扩散来观察白质结 构的完整性,扩散指标如 FA、RA、MD 等用来测量不 同脑组织区域扩散各向异性的程度,还可提供不同组 织中细胞结构特征和细胞内外成分的量化信息^[19]。 研究已发现 IGE 患者的痫样放电区域的扩散各向异 性指标有异常改变,如 FA 减低及 MD 增高^[1,4,5,20]。 白质纤维髓鞘化的脱失、轴索膜的通透性升高,轴索排 列松散等因素可能导致 FA 的减低; MD 增高可能与 细胞密度降低或细胞外水肿有关^[21-22]。

尽管 FA 在研究水分子扩散、评估微观结构方面 取得了很大成功,但也存在一定的局限性:FA 没有充 分描述张量椭球面的形态曲率,由张量方向和 FA 提 供的信息不充分^[7];此外,FA 对噪声很敏感^[9-12],会给 扩散各向异性的量化带来偏差^[23-24]。EAR 是一种与 FA 相似的扩散各向异性指标,蒙特卡罗模拟和实验 表明,与 FA 图相比,EAR 图具有更高的对比噪声比, EAR 与扩散椭球体曲率和各向异性结构的关系比 FA 更直接。在外伤性脑损伤的研究中,无论是在显示深 部白质还是皮层白质结构的异常方面,EAR 都比 FA

本研究结果显示在 3 个 IGE 组中 EAR 和 FA 的 异常分布范围基本相同,但 EAR 显示的异常区域比 FA 更多、对变化更为敏感,在检测白质异常方面略优 于 FA(表 2~4),尤其是在 IGE-A 组和 IGE-C 组中。 在 A 组的结果中,FA 显示的异常均位于左侧半球,而 EAR 异常区域两侧大脑半球均存在,可能与大脑神经 元之间异常突触联系形成的病理性神经环路,痫样放 电从致痫区扩散至远端皮层及对侧半球引起继发性白 质异常等癫痫复杂的发病机制有关。在 C 组中,脑电 图结果显示癫痫样波位于右侧半球不同区域,而 FA 及 EAR 均显示异常区域位于左侧半球,且 FA 异常区 域的体素簇非常小(表 4),可能也与上述原因有关,也 可能与癫痫病程长短、本组病例数量较少等多种因素 相关,有待今后增加病例数及长期随访来进一步深入 研究。

在同一区域,A 组中 FA 异常体素簇的范围大于 EAR,B 组和 C 组的结果则相反,FA 异常体素簇范围 小于 EAR。在 A、B 组中,EAR 图上显示的异常脑区 则比 FA 图更多。在部分已发表的研究结果中,在整 个大脑中 EAR 异常区域的体素平均值高于 FA^[9,11], 可能与各研究样本的异质性差异有关。EAR 采用了 一种不同于 FA 的非线性分析方法,在检测白质各向 异性和纤维束交叉方面较 FA 更敏感^[9-12]。 本研究结果对 IGE 的诊断有一定的证实和帮助, EAR 可作为 FA 等的补充研究方法,两者的比较有待 在各种脑部病变中进一步研究,以确定和解释其原因。 文献中关于 IGE 的研究结果显示扩散异常区域包括 胼胝体、穹窿、钩状束、内囊前肢、上下纵束和放射冠等 区域,表现为 FA 减低、MD 增加^[4,5,26],与我们的研究 结果相似。通过逐层对比图像,我们发现 EAR 图像 噪声敏感度低于 FA,虽然 EAR 信噪比相对较大,但 其组织对比噪声比与 FA 相似(图 1~3),且显示的脑 组织比 FA 图更平滑。

本研究也有一些不足之处:首先,IGE 患儿的数量 相对较少,尤其是 B 组和及 C 组样本量均为 9 例,需 增加样本量及进行前瞻性设计和开展长期随访研究, 以确认结果的准确性。其次,由于 VBA 中方法的异 构性,很难实现所有对象之间每个体素匹配,也不能完 全排除不同的预处理方法、高斯平滑核大小和统计阈 值方法对结果的影响。与 FA 相比,ERA 已经有一些 改进,但与其它 DTI 参数一样,由于椭球面无法与多 纤维走向吻合,因而无法解决多神经纤维交叉问题。 随着扩散峰度成像(diffusion kurtosis imaging,DKI) 基于 DTI 技术上的延伸,这个问题将会逐渐改善。

本研究通过 VBA 方法发现了 IGE 患儿脑白质中 FA 和 EAR 显著降低,而 EAR 结果显示更多的异常 区域,对反映脑实质异常改变的敏感性高于 FA,EAR 可用于扩散各向异性的定量测量,是检测人脑组织结 构的另一种可选择的各向异性指标。

参考文献:

- [1] McGill ML, Devinsky O, Wang X, et al. Functional neuroimaging abnormalities in idiopathic generalized epilepsy [J/OL]. Neuroimage Clin, 2014, 6:e455-e462.DOI:10.1016/j.nicl.2014.10.008.
- [2] Basser PJ, Mattiello J, LeBihan D. Estimation of the effective selfdiffusion tensor from the NMR spin echo[J]. J Magn Reson B, 1994,103(3):247-254.
- [3] 权巍,张志强.常规 MRI 阴性癫痫的影像学研究[J].放射学实践, 2018,33(6):642-645.
- [4] Focke NK, Diederich C, Helms G, et al. Idiopathic-generalized epilepsy shows profound white matter diffusion-tensor imaging alterations[J]. Hum Brain Mapp, 2014, 35(7); 3332-3342.
- [5] Lobato M, Garcia L, Amaro E Jr, et al. Analysis of fractional anisotropy and mean diffusivity in refractory and non-refractory idiopathic generalized epilepsies [J/OL]. Seizure, 2018, 62: e33-e37. DOI:10.1016/j.seizure.2018.09.015.
- [6] Jiang S, Li X, Li Z, et al. Cerebello-cerebral connectivity in idiopathic generalized epilepsy [J]. Eur Radiol, 2020, 30 (7): 3924-3933.
- [7] Chung HW, Chou MC, Chen CY. Principles and limitations of computational algorithms in clinical diffusion tensor MR tractography[J].AJNR,2011,32(1):3-13.
- [8] Beltrachini L, von Ellenrieder N, Muravchik CH. Error bounds in

diffusion tensor estimation using multiple-coil acquisition systems [J].Magn Reson Imaging,2013,31(8):1372-1383.

- [9] Xu D, Cui J, Bansal R, et al. The ellipsoidal area ratio; an alternative anisotropy index for diffusion tensor imaging[J]. Magn Reson Imaging, 2009, 27(3): 311-323.
- [10] Afzali M, Soltanian-Zadeh H, Elisevich KV. Tract based spatial statistical analysis and voxel based morphometry of diffusion indices in temporal lobe epilepsy[J]. Comput Biol Med, 2011, 41 (12):1082-1091.
- [11] Kang X, Herron TJ, Woods DL. Validation of the anisotropy index ellipsoidal area ratio in diffusion tensor imaging[J]. Magn Reson Imaging, 2010, 28(4):546-556.
- [12] Li X, Weissman M, Talati A, et al. A diffusion tensor imaging study of brain microstructural changes related to religion and spirituality in families at high risk for depression[J/OL]. Brain Behav, 2019,9(2):e01209.DOI:10.1002/brb3.1209.
- [13] Zhang Y, Yan X, Gao Y, et al. A preliminary study of epilepsy in children using diffusional kurtosis imaging[J]. Clin Neuroradiol, 2013, 23(4):293-300.
- [14] Duarte-Carvajalino JM, Sapiro G, Harel N, et al. A framework for linear and non-linear registration of diffusion-weighted MRIs using angular interpolation[J/OL]. Front Neurosci, 2013, 7: e41. DOI:10.3389/fnins.2013.00041.
- [15] Wilke M, Schmithorst VJ, Holland SK. Assessment of spatial normalization of whole-brain magnetic resonance images in children[J]. Hum Brain Mapp, 2002, 17(1):48-60.
- [16] Wilke M, Holland SK, Altaye M, et al. Template-O-Matic: a toolbox for creating customized pediatric templates[J]. Neuroimage,

2008,41(3):903-913.

- [17] Evans AC, Brain development cooperative group. The NIH MRI study of normal brain development [J]. Neuroimage, 2006, 30 (1):184-202.
- [18] Ashburner J, Friston KL. Unified segmentation [J]. Neuroimage, 2005, 26(3):849-851.
- [19] Meoded A, Huisman TAGM. Diffusion tensor imaging of brain malformations: exploring the internal architecture [J]. Neuroimaging Clin N Am, 2019, 29(3):423-434.
- [20] Rodríguez-Cruces R. Concha L. White matter in temporal lobe epilepsy:clinico-pathological correlates of water diffusion abnormalities[J].Quant Imaging Med Surg.2015.5(2):264-278.
- [21] Deleo F, Thom M, Concha L, et al. Histological and MRI markers of white matter damage in focal epilepsy[J/OL]. Epilepsy Res, 2018,140:e29-e38.DOI:10.1016/j.eplepsyres.2017.11.010.
- [22] Gross DW.Diffusion tensor imaging in temporal lobe epilepsy[J].Epilepsia,2011,52(Suppl 4):S32-S34.
- [23] Pierpaoli C, Basser PJ. Toward a quantitative assessment of diffusion anisotropy[J].Magn Reson Med, 1996, 36(6): 893-906.
- [24] Kingsley PB, Monahan WG. Contrast-to-noise ratios of diffusion anisotropy indices[J].Magn Reson Med, 2005, 53(4), 911-918.
- [25] 张首誉,包尚联,亢孝俭,等.描述人体内水分子扩散各向异性特征的新方法[J].物理学报,2013,62(20):540-545.
- [26] Kim JH.Grey and white matter alterations in juvenile myoclonic epilepsy:a comprehensive review[J].J Epilepsy Res, 2017,7(2): 77-88.

(收稿日期:2020-01-23 修回日期:2020-06-22)