

中脑脚间区弥散加权成像信号与表观弥散系数的分析研究

马得廷 王君霞 孔庆奎 谢元忠

【摘要】 目的 探讨健康人群中中脑脚间区弥散信号和表观弥散系数(ADC)值的特征及其与年龄、性别的相关性。方法 回顾性分析216例健康人的横轴位DWI图像[TR/TE=3 200 ms/94 ms, 4次信号采集, 弥散敏感因子(b)值分别取0和1 000 s/mm², 矩阵192×192, 层厚5 mm, 层距1.5 mm, 视野=230 mm], 其中男111例, 女105例, 年龄10~77岁, 平均41.1岁。中脑脚间区与中脑导水管周围灰质的对比信噪比(CNR)和ADC值的比较采用配对样本 t 检验, 性别之间指标的比较采用独立样本 t 检验。采用两变量直线相关分析中脑脚间区的CNR和ADC值与年龄的相关性。结果 中脑脚间区信号明显高于中脑导水管周围灰质信号(CNR 25.48±7.25 vs. 18.79±5.60; $t=20.465$, $P=0.000$); 男女性别间CNR无统计学差异($t=-1.796$, $P=0.074$)。中脑脚间区CNR与年龄呈轻度正相关($r=0.369$, $P=0.000$)。中脑脚间区的ADC值[(696.23±40.43)×10⁻⁶ mm²/s]明显低于中脑导水管周围灰质的ADC值[(741.28±44.92)×10⁻⁶ mm²/s] ($t=-14.654$, $P=0.000$)。男女性别间ADC值无统计学差异($t=-1.199$, $P=0.232$)。中脑脚间区的ADC值与年龄没有相关性($r=0.005$, $P=0.936$)。结论 正常中脑脚间区在DWI图像中多呈高信号, 其信号强度与年龄呈正相关而与性别无关, 其ADC值与年龄、性别均没有相关性。DWI联合ADC有助于识别中脑脚间区的信号特征。

【关键词】 中脑; 信号处理, 计算机辅助; 磁共振成像, 弥散; 表观弥散系数

Evaluation of diffusion-weighted signal intensity and apparent diffusion coefficient in the interpeduncle region of midbrain Ma Deting, Wang Junxia, Kong Qingkui, Xie Yuanzhong.

Department of Radiology, Tai'an Central Hospital, Tai'an 271000, China

Corresponding author: Ma Deting, Email: medimage@163.com

【Abstract】 Objective To evaluate the apparent diffusion coefficient (ADC) and signal intensity (SI) of the interpeduncle region (IPR) on diffusion-weighted imaging (DWI) and explore their relationships with age and gender in healthy subjects. **Methods** Brain axial diffusion-weighted images (spin-echo planar imaging sequence, TR/TE, 3 200/94 ms; diffusion gradient encoding in three orthogonal directions; b=0, 1 000 s/mm²; matrix, 192×192; section thickness, 5 mm; intersection gap, 1.5 mm; and FOV, 230 mm) of 216 neurologically normal adults (111 men, 105 women; age range: 10-77 years, mean age: 41.1 years) were evaluated retrospectively. Contrast-to-noise ratios (CNR) and ADC value of the IPR and PAG were evaluated by two-paired samples t -test, respectively. Correlations between the CNR and ADC value in the IPR and age were statistically analyzed. **Results** The CNR was significantly higher in the IPR (25.48±7.25) than in the PAG (18.79±5.60; $t=20.465$, $P=0.000$). The CNRs tended to be lower in females than in males; however, this difference was not significant ($t=-1.796$, $P=0.074$). The CNR of IPR was positively correlated with patients' age ($r=0.369$, $P=0.000$) by bivariate correlation. The ADC value was significantly lower in the IPR[(696.23±40.43)×10⁻⁶ mm²/s] than in the PAG[(741.28±44.92)×10⁻⁶ mm²/s]; the difference was significant ($t=-14.654$, $P=0.000$). The ADC values tended to be higher in males than in females; however, this difference was not significant ($t=-1.199$, $P=0.232$). The ADC value of

IPR was not correlate with age ($r=0.005$, $P=0.936$) by bivariate correlation. **Conclusions** The IPR usually shows high SI on DWI in healthy subjects. The SI of IPR significantly positively correlated with age but not with gender, and the ADC value of IPR shows no correlation with gender or age. DWI combined with the ADC maps would help to evaluate signal characteristics of the IPR.

【Key words】 Mesencephalon; Signal processing, computer-assisted; Diffusion magnetic resonance imaging; Apparent diffusion coefficient

弥散加权成像 (diffusion-weighted imaging, DWI) 在神经系统疾病检查和诊断中具有重要的临床价值, 已在脑中风^[1-4]、多发性硬化^[5-6]、脑炎^[7-8]、胶质瘤复发与治疗^[9-10]、后部可逆性脑病综合征^[11-12]、癫痫^[13-15]等疾病进行了深入的研究。正常脑实质在 DWI 图像中因部位不同也存在着信号差异。正常的扣带回、岛叶在 DWI 中通常表现为高信号^[16], 这些相对弥散受限而表现为高信号的部位并非真正的异常征象, 因此准确地识别正常与异常的弥散高信号具有重要的临床意义。

在横轴位 MR 图像上, 中脑脚间区位于中脑下部中线处、大脑脚层面, 国内学者韩鸿宾等^[17]报道此区域在 DWI 中经常表现为高信号, 这在临床实践中也经常见到。正常中脑脚间区表现为弥散高信号需要与异常的弥散受限相鉴别, 以免混淆为异常病变, 尤其是急性期脑梗死。鉴于以上情况, 本研究旨在研究健康人群中脑脚间区弥散信号和表观弥散系数 (apparent diffusion coefficient, ADC) 值的特征及其与年龄、性别的相关性; 分析中脑脚间区 ADC 值与急性期脑梗死的区别。

资料与方法

本研究经过医院医学伦理委员会批准。因是回顾性分析研究, 没有签署知情同意书。

一、研究对象

回顾性分析泰安市中心医院 MR 室连续 15 个月 216 名健康受检者, 其中男 111 例、女 105 例, 年龄 10~77 岁, 平均 41.1 岁。入选标准包括: (1) 无神经系统及精神疾病史, 神经科体格检查无异常; (2) 无固定的义齿或其他金属牙齿填充物; (3) 无明确头颅创伤史; (4) 没有高血压、糖尿病以及其他免疫性、血液性、代谢性疾病史; (5) 头颅常规 MR 扫描 (横断面 T1WI、T2WI、FLAIR 和矢状面 T2WI) 无异常。磁共振检查的原因包括头痛 98 例, 眩晕 72 例, 感觉异常 46 例。216 例受检者按其年龄段分为六组见表 1。

表 1 216 例健康受检者的年龄与性别分布

组别	年龄(岁)	例数(男/女)
1	10~19	30(17/13)
2	20~29	32(16/16)
3	30~39	36(15/21)
4	40~49	49(28/21)
5	50~59	37(20/17)
6	60~77	32(15/17)
合计	10~77	216(111/105)

二、MR 成像程序

1. 扫描设备: 所有 MR 检查应用德国西门子 1.5 T 超导磁共振成像仪 (Siemens Medical Systems, Avanto)。头部矩阵线圈, 全脑扫描。

2. 常规扫描序列及成像参数: 常规 MRI 进行横轴位 T1WI、T2WI 和 FLAIR, 矢状位 T2WI。横轴位 T1WI 采用自旋回波 (SE) 序列: TR=2 000 ms, TE=55 ms, 矩阵 512×512, 层厚 5 mm, 层间距 1.5 mm, 视野 230 mm×230 mm。横轴位 T2WI 采用快速自旋回波 (FSE) 序列: TR=4 000 ms, TE=99 ms, 矩阵 512×512, 层厚 5 mm, 层间距 1.5 mm, 视野 230 mm×230 mm。横轴位液体衰减反转恢复 (fluid attenuation inversion recovery, FLAIR) 序列: TR=9 000 ms, TE=99 ms, 矩阵 512×512, 层厚 5 mm, 层间距 1.5 mm, 视野 230 mm×230 mm。矢状位 T2WI 采用快速自旋回波 (FSE) 序列: TR=4 500 ms, TE=88 ms, 矩阵 512×512, 层厚 5 mm, 层间距 1.5 mm, 视野 230 mm×230 mm。

3. DWI 成像参数: 在常规 MR 成像的基础上进行横轴位扫描, 其扫描参数: 选用三次激发自旋回波平面成像 (EPI) 序列, 平行成像技术 (GRAPPA): TR/TE=3 200 ms/94 ms, 4 次信号平均, 矩阵 192×192, 弥散敏感因子 (b) 值分别取 0 和 1 000 s/mm², 层厚 5 mm, 层间隔 1.5 mm, 视野 230 mm。ADC 图由扫描设备自动生成, DWI (b=1 000 s/mm²) 和 ADC 图被用于定量分析。

三、图像评价

运用感兴趣区 (region of interest, ROI) 分析

在横轴位 DWI 和 ADC 图上进行(图 1), 采用双盲法测量, 所有测量数据均由两名具有丰富经验的副主任医师(15 年以上 MR 工作经验)独立完成。每位医师各部位的最终数值是取其三次测量值的平均值。两名医师测量值的平均值作为最终有效数值。

为了定量评价 ROI 的信号强度, 应用圆形 ROI 放置于同一层面的中脑脚间区、中脑导水管周围和背景区域以及颅外空气区域(图 1)。背景信号的测量放置于同一层面图像的左侧颞叶白质。噪声为颅外空气区域信号强度的标准差(SD)。

计算中脑脚间区和中脑导水管周围的对比信噪比(contrast-to-noise ratios, CNR), 计算公式如下: $CNR(?) = [SI(?) - SI(b)] / SD$ 。其中(?)表示中脑脚间区或中脑导水管周围, (b)表示背景(左侧颞叶白质), SI表示信号强度, SD表示颅外空气 SI 值的标准差。

圆形 ROI 的大小界定: 中脑脚间区呈高信号者 ROI 以略小于高信号的范围为准, 呈等信号者采用 20~25 像素; 中脑导水管周围为 10~15 像素, 背景信号(左侧颞叶白质)为 20~25 像素, 颅外空气为 40~50 像素。

ADC 值测量在 ADC 图上进行, 亦采用圆形 ROI 获得(图 1)。ROI 的大小形态从相应层面 DWI ($b=1\ 000\ s/mm^2$) 图像中信号测量的 ROI 复制而来。ROI 的测量值即为 ADC 值。

四、统计学分析

中脑脚间区与中脑导水管周围信号强度(CNR)和 ADC 值的比较采用配对样本 *t* 检验, 性别间 CNR 和 ADC 值的比较采用独立样本 *t* 检验。不同年龄组之间 CNR 和 ADC 值的比较采用单因素方差分析。中脑脚间区的 CNR、ADC 值与年龄的相关性采用两变量直线相关(Bivariate correlation)分析, 计算 Pearson 相关系数(*r*)。相关强度的判断标准: $r \geq 0.7$ 为高度相关, $0.4 \leq r < 0.7$ 为中度相关, $0.2 \leq r < 0.4$ 为低度相关, $r < 0.2$ 为弱相关。所有数据采用 SPSS 16.0 软件进行统计学分析, 以 $P < 0.05$ 为差异有统计学意义。

结 果

一、中脑脚间区弥散信号(CNR)特征

1. 中脑脚间区与中脑导水管周围信号比较: 中脑脚间区 CNR (25.48 ± 7.25) 明显高于中脑导水管周围 CNR (18.79 ± 5.60) (图 2), 信号差异具有

显著统计学意义($t=20.465$, $P=0.000$)。各年龄组中, 中脑脚间区的 CNR 均明显高于导水管周围 CNR (均 $P < 0.05$), 并且中脑脚间区的弥散信号(CNR)随年龄增加而逐渐增高(图 3)。经方差分析, 年龄组间 CNR 比较具有统计学差异($F=7.351$, $P=0.000$)。除第 1 与 2 组、第 2 与 3 组、第 3 与 4 组、第 4 与 5 组、第 4 与 6 组、第 5 与 6 组 CNR 无统计学差异(均 $P > 0.05$)外, 其余各组之间均具有统计学差异(P 均 < 0.05)。

2. 中脑脚间区信号与年龄的相关性: 经 Bivariate correlation 分析, 中脑脚间区 CNR 与年龄呈低度正相关($r=0.369$, $P=0.000$) (图 4)。

3. 中脑脚间区 CNR 男女比较: 女性 CNR (26.38 ± 7.38) 略高于男性 CNR (24.62 ± 7.05), 但统计学处理没有显著性差异($t=-1.796$, $P=0.074$)。

二、中脑脚间区 ADC 值

1. 中脑脚间区 ADC 值与中脑导水管周围 ADC 值比较: 中脑脚间区的平均 ADC 值为 (696.23 ± 40.43) $\times 10^{-6}\ mm^2/s$, 范围 ($597 \sim 795$) $\times 10^{-6}\ mm^2/s$, 95% 可信区间为 ($690.81 \sim 701.65$) $\times 10^{-6}\ mm^2/s$ 。中脑导水管周围组织平均 ADC 值为 (741.28 ± 44.92) $\times 10^{-6}\ mm^2/s$ 。经统计学处理, 中脑脚间区 ADC 值明显低于中脑导水管周围的 ADC 值($t=-14.654$, $P=0.000$) (图 2)。各年龄组中, 中脑脚间区的 ADC 值均明显低于中脑导水管周围的 ADC 值(均 $P < 0.05$) (图 5), 然而中脑脚间区的 ADC 值随年龄增加而变化不大。经方差分析, 各年龄组之间 ADC 值无统计学差异($F=0.592$, $P=0.706$)。

2. 中脑脚间区 ADC 值与年龄的相关性: 经 Bivariate correlation 分析, 中脑脚间区的 ADC 值与年龄之间没有相关性($r=0.005$, $P=0.936$) (图 6)。

3. 中脑脚间区 ADC 值男女比较: 男性 ADC 值 [$(693.03 \pm 41.56) \times 10^{-6}\ mm^2/s$] 虽然略低于女性 ADC 值 [$(699.62 \pm 39.11) \times 10^{-6}\ mm^2/s$], 但无统计学差异($t=-1.199$, $P=0.232$)。

讨 论

DWI 是目前在活体上进行水分子弥散运动测量与成像的唯一方法^[18]。本研究应用 DWI 对 216 例健康受检者中脑脚间区的弥散信号及其 ADC 值特征进行了量化分析。研究结果表明, 中脑脚间区的弥散信号明显高于中脑导水管周围组织的弥散信

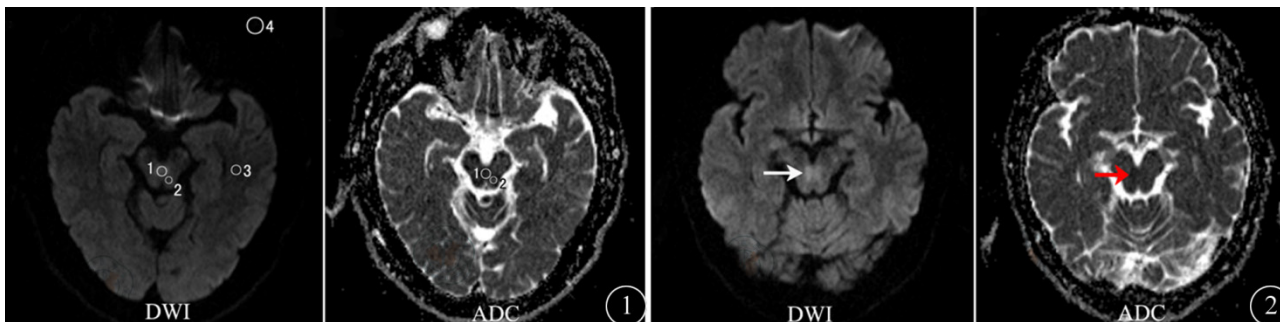


图1 横轴位DWI ($b=1000\text{ s/mm}^2$) 图像和ADC图显示感兴趣区 (ROI) 的放置位置。1: 中脑脚间区; 2: 中脑导水管周围; 3: 左侧颞叶白质; 4: 颅外空气 图2 健康女性, 62岁, 横轴位DWI ($b=1000\text{ s/mm}^2$) 和ADC图: 相对于中脑导水管周围灰质, 中脑脚间区DWI呈高信号 (白箭头), ADC呈低信号 (红箭头)

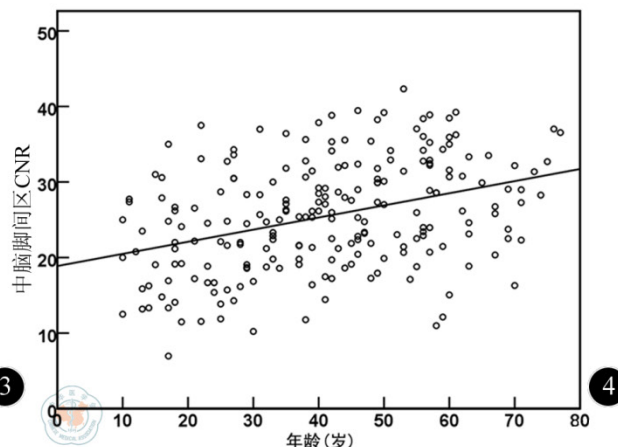
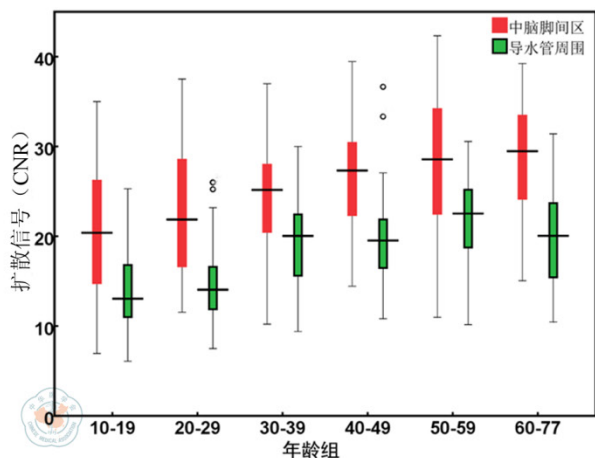


图3 各年龄组中, 中脑脚间区的CNR均明显高于导水管周围CNR; 中脑脚间区的弥散信号 (CNR) 随年龄增加而逐渐增高 图4 中脑脚间区弥散信号强度 (CNR) 与年龄之间的相关性: 中脑脚间区的CNR与年龄呈低度正相关 ($r=0.369$, $P=0.000$)

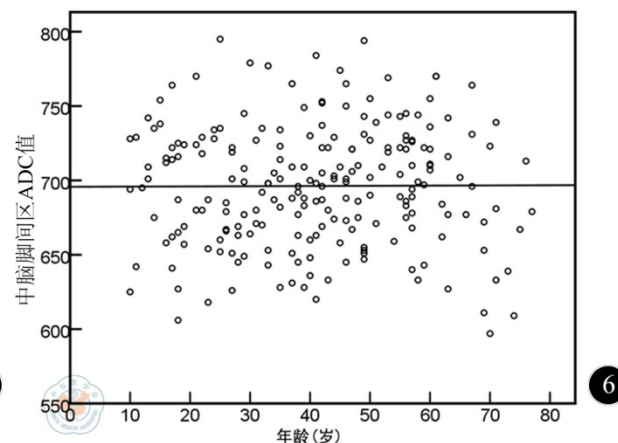
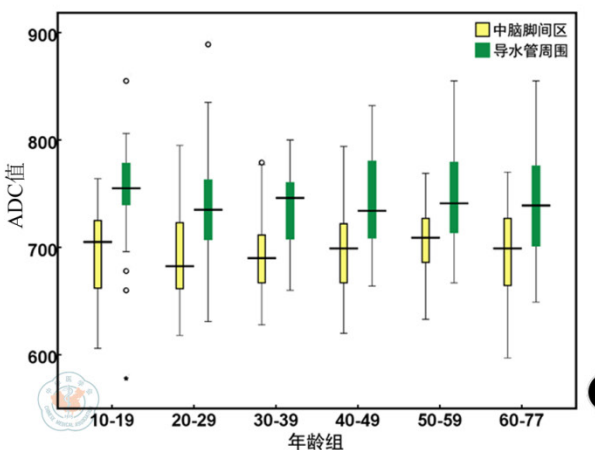


图5 各年龄组中, 中脑脚间区的ADC值均明显低于中脑导水管周围的ADC值; 中脑脚间区的ADC值随年龄增加而变化不大 图6 中脑脚间区ADC值与年龄的相关性: 中脑脚间区的ADC值与年龄之间无相关性 ($r=0.005$, $P=0.936$)

号, 而中脑脚间区的 ADC 值明显低于中脑导水管周围组织。

脑组织的 DWI 信号要可受到包括 b 值、TE、T2、自旋衰减和 ADC 值^[19-20]等许多因素的影响。b

值是弥散加权成像的关键性参数, 适宜的较大 b 值可以提高 DWI 对病变显示的敏感性, 然而 b 值的选择因不同的组织结构而不同, 主要取决于组织结构扫描的回波时间 (即 TE)。本研究中由于 b 值

选择的是 $1\ 000\ \text{s}/\text{mm}^2$, $\text{TE}=94\ \text{ms}$, 它们是固定的、连续的扫描参数, 因此 b 值和 TE 可以排除对弥散信号的影响。 T2 值也与组织的弥散加权信号强度密切相关^[20], 即 DWI 的信号强度与 T2 值具有正相关性, 亦称之为 T2 穿透效应。本研究在中 T2WI 上中脑脚间区与导水管周围组织无信号差异, 这表明中脑脚间区的弥散信号与 T2 值无关。

自旋衰减主要与组织的结构特点有关。从解剖结构上, 中脑脚间区主要由小脑上脚交叉^[17]构成, 窦郁等^[21]利用 MR 弥散张量纤维束成像 (DTT) 三维重建技术显示脑干小脑上脚交叉纤维束表现为三种解剖类型: 即交叉、对吻和分叉, 其中交叉类型占 65%。这表明小脑上脚交叉存在变异或多样性, 因此中脑脚间区的弥散信号特征除与特定的解剖位置有关, 也可能与小脑上脚交叉存在变异或多样性有关。

ADC 是影响 DWI 信号强度的重要因素, 能够反映组织内的弥散特性, 但取决于许多生理参数例如体积分数、细胞外曲折性、细胞内受限、细胞膜通透性、主动跨膜过程以及各向异性形态等^[22]。低 ADC 值意味着弥散受限, 说明组织高度多孔。高 ADC 值更可能出现在组织液相对自由弥散、低细胞构成或囊性的组织结构中。另外中脑脚间区主要由小脑上脚交叉及其部分小脑上脚构成, 主要属于白质纤维结构, 而中脑导水管周围组织主要由灰质构成, 因此两者之间在组织结构上存在着较大差异, 本研究对中脑脚间区的 ADC 值进行了定量分析, 结果表明中脑脚间区的 ADC 值明显低于中脑导水管周围组织的 ADC 值, 也证实了组织结构的差异。关于正常脑白质和脑灰质 ADC 值已有报道, Helenius 等^[23]研究结果显示脑白质的 ADC 值为 $(0.70 \pm 0.03) \times 10^{-3}\ \text{mm}^2/\text{s}$, 范围为 $(0.62 \sim 0.79) \times 10^{-3}\ \text{mm}^2/\text{s}$; 脑灰质的 ADC 值为 $(0.89 \pm 0.04) \times 10^{-3}\ \text{mm}^2/\text{s}$, 范围为 $(0.78 \sim 1.09) \times 10^{-3}\ \text{mm}^2/\text{s}$; 而本组资料显示中脑脚间区的平均 ADC 值为 $(0.696 \pm 0.040) \times 10^{-3}\ \text{mm}^2/\text{s}$, 范围为 $(0.597 \sim 0.795) \times 10^{-3}\ \text{mm}^2/\text{s}$, 因此本研究结果与 Helenius 等对脑白质 ADC 值的研究结果基本吻合。通过上述研究结果及分析也表明 ADC 值对中脑脚间区的 DWI 信号具有一定的影响。

关于中脑脚间区的弥散信号与年龄之间的相关性, 本研究结果显示两者之间存在着正相关性, 即中脑脚间区的弥散信号随着年龄的增长而增高。

因此分析与中脑脚间区相关疾病的弥散特征变化时, 要考虑到年龄因素对其弥散信号的影响。关于正常脑白质和脑灰质 ADC 值与年龄的相关性已有报道, 研究结果不一, Watanabe 等^[24]报道 ADC 峰值随年龄变化表现为四个不同阶段, Engelter 等^[25]报道, 脑白质 ADC 值与年龄呈正相关性, 尤其是 60 岁以后的老年人更为明显, Helenius 等^[23]研究结果表明脑实质的 ADC 值与年龄之间没有相关性。本研究显示中脑脚间区的 ADC 值虽然随年龄的增加略有增高的趋势, 但经双变量相关分析证实不存在相关性, 这与文献^[23]的报道基本一致。综上分析本研究结果显示正常中脑脚间区的弥散信号与年龄呈正相关性, 而其 ADC 值与年龄不存在相关性, 这可能与中脑脚间区的解剖、组织构成有关, 文献表明中脑脚间区主要由小脑上脚交叉构成^[17], 关于小脑上脚交叉微细结构的变化是否与年龄存在着某种联系, 或者这种联系使年龄因素对中脑脚间区的弥散信号产生影响, 目前尚未知, 因此还需进一步的分析研究。

DWI 主要依靠疾病与正常组织间增大的信号来检出病灶, 在临床上有许多疾病可以发生于脑干并累及到中脑脚间区, 尤其是脑中风或急性期脑梗死, 在 DWI 中表现为弥散高信号、 ADC 低信号。而本研究中的正常中脑脚间区常表现为 DWI 高信号, ADC 低信号, 因此可与急性脑梗死混淆。定量 ADC 值的测量可以量化脑内的微观病变, 在反映信号强度方面较常规 MRI 更加细化与准确^[18], 因为微小的信号变化肉眼可能很难识别^[23]。已研究证明在脑缺血发生 6 h 以内的超急性脑梗死的 ADC 值为 $<630 \times 10^{-6}\ \text{mm}^2/\text{s}$ ^[26]或 $<620 \times 10^{-6}\ \text{mm}^2/\text{s}$ ^[27]。目前国内外对脑梗死弥散受限的 ADC 阈值定在 $600 \times 10^{-6}\ \text{mm}^2/\text{s}$ 。本研究数据表明中脑脚间区的平均 ADC 值为 $(696.23 \pm 40.43) \times 10^{-6}\ \text{mm}^2/\text{s}$, 范围 $(597 \sim 795) \times 10^{-6}\ \text{mm}^2/\text{s}$, 95% 可信区间为 $(690.81 \sim 701.65) \times 10^{-6}\ \text{mm}^2/\text{s}$, 虽然 ADC 值范围与急性脑梗死的 ADC 阈值存在着部分重叠, 但其 95% 可信区间远大于 $600 \times 10^{-6}\ \text{mm}^2/\text{s}$ 或 $630 \times 10^{-6}\ \text{mm}^2/\text{s}$ 。因此客观地量化 ADC 值有助于对中脑脚间区弥散信号异常的判断。

本研究存在以下几处缺陷。首先, ROI 的测量采用了相对固定大小的圆形, 虽然进行了三次测量取其平均值, 但是人工测量仍会产生一定的偏差。第二, 对中脑脚间区弥散呈等信号的 ROI 的放置受

主观因素的影响较大,虽然测量者是由经验的MRI副主任医师执行,但主观因素导致的测量偏差仍不可避免。

综上所述,本研究以大量的数据分析了中脑脚间区的弥散信号和ADC值特征及其与年龄、性别之间的相关性,提示我们在诊断和评价中脑下部脚间区域的弥散信号时,特别是在中老年人,要考虑到正常中脑脚间区的信号特点,DWI结合ADC图将有助于评估中脑脚间区正常弥散高信号与脑梗死的鉴别。

参 考 文 献

- [1] Braemswig TB, Usnich T, Albach FN, et al. Early new diffusion-weighted imaging lesions appear more often in stroke patients with a multiple territory lesion pattern[J]. *Stroke*, 2013, 44(8): 2200-2204.
- [2] Brunser AM, Hoppe A, Illanes S, et al. Accuracy of diffusion-weighted imaging in the diagnosis of stroke in patients with suspected cerebral infarct[J]. *Stroke*, 2013, 44(8): 1169-1171.
- [3] Liu Z, Xiao X. The use of multi b values diffusion-weighted imaging in patients with acute stroke[J]. *Neuroradiology*, 2013, 55(3): 371-376.
- [4] Oostema JA, Brown MD, DeLano M, et al. Does diffusion-weighted imaging predict short-term risk of stroke in emergency department patients with transient ischemic attack?[J]. *Ann Emerg Med*, 2013, 61(1): 62-71.
- [5] Straus Farber R, Devilliers L, Miller A, et al. Differentiating multiple sclerosis from other causes of demyelination using diffusion weighted imaging of the corpus callosum[J]. *J Magn Reson Imaging*, 2009, 30(4): 732-736.
- [6] Tavazzi E, Dwyer MG, Weinstock-Guttman B, et al. Quantitative diffusion weighted imaging measures in patients with multiple sclerosis[J]. *Neuroimage*, 2007, 36(3): 746-754.
- [7] Lian ZY, Huang B, He SR, et al. Diffusion-weighted imaging in the diagnosis of enterovirus 71 encephalitis[J]. *Acta Radiol*, 2012, 53(2): 208-213.
- [8] Sawlani V. Diffusion-weighted imaging and apparent diffusion coefficient evaluation of herpes simplex encephalitis and Japanese encephalitis[J]. *J Neurol Sci*, 2009, 287(1-2): 221-226.
- [9] Yamasaki F, Kurisu K, Aoki T, et al. Advantages of high b-value diffusion-weighted imaging to diagnose pseudo-responses in patients with recurrent glioma after bevacizumab treatment[J]. *Eur J Radiol*, 2012, 81(10): 2805-2810.
- [10] Zeng QS, Li CF, Liu H, et al. Distinction between recurrent glioma and radiation injury using magnetic resonance spectroscopy in combination with diffusion-weighted imaging[J]. *Int J Radiat Oncol Biol Phys*, 2007, 68(1): 151-158.
- [11] Ishikura K, Hamasaki Y, Sakai T, et al. Children with posterior reversible encephalopathy syndrome associated with atypical diffusion-weighted imaging and apparent diffusion coefficient[J]. *Clin Exp Nephrol*, 2011, 15(2): 275-280.
- [12] Dicuozzo F, Salvati A, Palma M, et al. Posterior reversible encephalopathy syndrome associated with methotrexate neurotoxicity: conventional magnetic resonance and diffusion-weighted imaging findings[J]. *J Child Neurol*, 2009, 24(8): 1013-1018.
- [13] Kanner AM. Diffusion-weighted imaging: can it play a role in the evaluation of patients with epilepsy?[J]. *Epilepsy Curr*, 2006, 6(4): 121-123.
- [14] Wang R, Li SY, Chen M, et al. Diagnostic value of interictal diffusion-weighted imaging in evaluation of intractable temporal lobe epilepsy[J]. *Chin Med Sci J*, 2008, 23(2): 68-72.
- [15] Wehner T, Lapresto E, Tkach J, et al. The value of interictal diffusion-weighted imaging in lateralizing temporal lobe epilepsy[J]. *Neurology*, 2007, 68(2): 122-127.
- [16] Asao C, Hirai T, Yoshimatsu S, et al. Human cerebral cortices: signal variation on diffusion-weighted MR imaging[J]. *Neuroradiology*, 2008, 50(3): 205-211.
- [17] 韩鸿宾, 王俭, 阎军浩, 等. 层面选择方向扩散加权成像在中脑大脑脚间产生高信号的机制[J]. *中华放射学杂志*, 2008, 42(9): 936-940.
- [18] 金辉, 张树桐, 刘松, 等. 多b值扩散加权成像对急性期脑梗死的诊断价值探讨[J]. *临床放射学杂志*, 2012, 31(8): 1091-1093.
- [19] Asao C, Hirai T, Yoshimatsu S, et al. Human cerebral cortices: signal variation on diffusion-weighted MR imaging[J]. *Neuroradiology*, 2008, 50(3): 205-211.
- [20] Hiwatashi A, Kinoshita T, Moritani T, et al. Hypointensity on diffusion-weighted MRI of the brain related to T2 shortening and susceptibility effects[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2003, 181(6): 1705-1709.
- [21] 窦郁, 雷军强, 郭顺林, 等. 3.0T MR三维重建脑干小脑上脚纤维交叉的研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2013, 31(1): 56-59.
- [22] Meier C, Dreher W, Leibfritz D. Diffusion in compartmental systems. I. A comparison of an analytical model with simulations[J]. *Magn Reson Med*, 2003, 50(3): 500-509.
- [23] Helenius J, Soenne L, Perkiö J, et al. Diffusion-weighted MR imaging in normal human brains in various age groups[J]. *AJNR Am J Neuroradiol*, 2002, 23(2): 194-199.
- [24] Watanabe M, Sakai O, Ozonoff A, et al. Age-related apparent diffusion coefficient changes in the normal brain[J]. *Radiology*, 2013, 266(2): 575-582.
- [25] Engelter ST, Provenzale JM, Petrella JR, et al. The effect of aging on the apparent diffusion coefficient of normal-appearing white matter[J]. *AJR Am J Roentgenol*, 2000, 175(2): 425-430.
- [26] Nagesh V, Welch KM, Windham JP, et al. Time course of ADCw changes in ischemic stroke: beyond the human eye![J]. *Stroke*, 1998, 29(9): 1778-1782.
- [27] Purushotham A, Campbell BC, Straka M, et al. Apparent diffusion coefficient threshold for delineation of ischemic core[J]. *Int J Stroke*, 2013.

(收稿日期: 2013-12-26)

(本文编辑: 吴莹)