MRI IVIM对妊娠中晚期脑室扩张胎儿脑组织扩散与灌注功能的研究

杨维新[1,2],王荣品[2],韦金鼎[2],夏 坤[2],蔡登华[2]

1.遂宁市中心医院放射影像科,四川 遂宁 629000;2.贵州省人民医院医学影像科/贵州省先进医学成像与智能计算全省重点实验室/贵州省精准影像诊疗国际科技合作基地,贵州 贵阳 550000

[摘要] **目的**:采用MRI体素内不相干运动(IVIM)分析妊娠中晚期脑室扩张胎儿脑内水分子扩散和灌注功能变化。**方法**:选取轻度脑室扩张(SVM)胎儿43例(SVM组)及中度脑室扩张(MVM)胎儿9例(MVM组),同期收集44例正常胎儿作为正常对照组。3组均行IVIM检查,比较各组不同脑区纯扩散系数(D)、假扩散系数(D*)及灌注分数(f)。绘制ROC曲线,评估组间差异有统计学意义的指标对脑室扩张及其程度的鉴别诊断效能。**结果**:相比正常对照组,SVM组、MVM组额叶白质、顶叶白质、颞叶白质的D值显著降低,差异均有统计学意义(均$P<0.05$)。SVM组与MVM组额叶白质的D值差异有统计学意义($P<0.05$)。ROC曲线分析表明,额叶、顶叶、颞叶白质的D值可以鉴别正常对照组与SVM组,以额叶白质为著(AUC=0.89,$P<0.05$)。**结论**:额叶白质D值降低的程度可作为产前评价脑室扩张胎儿脑白质损伤的指标,有助于临床监测胎儿脑白质损伤的进展。

[关键词] 磁共振成像;体素内不相干运动;胎儿;脑室扩张;脑白质

[中图分类号] R445.2;R714.53 [文献标识码] A **DOI**:10.3969/j.issn.1672-0512.2026.05.004

Analysis on diffusion and perfusion function of brain tissue in fetuses with ventriculomegaly in middle and late stages of pregnancy by IVIM

YANG Weixin[1,2], WANG Rongpin[2], WEI Jinding[2], XIA Kun[2], CAI Denghua[2]

[1]Department of Radiology, Suining Central Hospital, Suining 629000, China; [2]Department of Radiology in Guizhou Provincial People's Hospital, Key Laboratory of Intelligent Medical Imaging Analysis and Accurate Diagnosis of Guizhou Province, International Exemplary Cooperation Base of Precision Imaging for Diagnosis and Treatment, Guiyang 550000, China.

[**Abstract**] **Objective**: To analyze the changes in the brain water molecular diffusion and perfusion in fetuses with ventriculomegaly in middle and late stages of pregnancy using MRI intravoxel incoherent motion (IVIM). **Methods**: Forty-three fetuses with slight ventriculomegaly (SVM group) and 9 fetuses with moderate ventriculomegaly (MVM group) were enrolled, and 44 normal fetuses were recruited as the control group. All fetuses in the three groups underwent IVIM examination. The pure diffusion coefficient (D), pseudo-diffusion coefficient (D*), and perfusion fraction (f) in different brain regions were compared among 3 groups. ROC curves were drawn to evaluate the efficacy of the indicators with group differences in the differential diagnosis of ventricular dilatation and its degree. **Results**: Compared with the control group, significantly decreased D values were observed in the frontal white matter, parietal white matter and temporal white matter in both the SVM group and MVM group (all $P<0.05$). The D value in the frontal white matter had significant difference between the MVM group and the SVM group ($P<0.05$). ROC curve analysis demonstrated that D values of the frontal, parietal and temporal white matter could distinguish the control group from the SVM group, with the frontal white matter showing the highest performance (AUC=0.89, $P<0.05$). **Conclusion**: The degree of reduction in the D value of the frontal white matter can serve as an indicator for evaluating white matter injury in fetuses with ventriculomegaly, which facilitates clinical monitoring of the progression of fetal cerebral white matter injury.

[**Key words**] Magnetic resonance imaging; Incoherent motion in voxel; fetus; Ventriculomegaly; Fetus; Ventriculomegaly; Cerebral white matter

胎儿脑室扩张是指胎儿脑室宽度≥10 mm,是产前筛查中最常见的一种中枢神经系统异常[1]。美国母胎医学学会建议将脑室扩张分为轻度脑室扩张(slight ventriculomegaly,SVM)(脑室宽度10～12 mm)、中度脑室扩张(moderate ventriculomegaly,MVM)(脑室宽度13～15 mm)[2]。SVM胎儿预后一般良好,且较少合并其他罕见遗传性疾病[3]。研究显示,侧脑室宽度为10～12 mm胎儿的不良结果和其他异常的发生率较侧脑室宽度为13～15 mm的胎儿更低[2]。随着脑室扩张程度加重,胎儿患有其他脑结构异常和染色体异常的概率越大[4-5]。此外,侧脑室扩张胎儿即使无其他系统及染色体异常,仍有部分胎儿出生后有神经发育迟滞风险[6]。因此,早期发现和定量评估胎儿中枢神经系统异常是临床及早采取有效治疗与干预措施的关键。MRI体素内不

[基金项目] 贵州省科技计划项目[黔科合支撑(2019)2810号]。

[通信作者] 王荣品,Email:wangrongpin@126.com。

相干运动(intravoxel incohernet motion,IVIM)可以探测活体组织的水分子扩散和灌注能力,通过测量纯扩散系数(D)值、假扩散系数(D*)值及灌注分数(f)值间接反映大脑发育的功能信息。本研究利用IVIM技术,对比分析脑室扩张胎儿与正常胎儿脑灌注和扩散参数的差异,旨在探讨脑室扩张胎儿的水分子扩散和灌注的功能变化。

1　资料与方法

1.1　一般资料

纳入遂宁市中心医院2020年6月至2022年6月经产前超声检查诊断或怀疑脑室扩张,并经常规MRI诊断的脑室扩张胎儿52例。其中SVM 43例(SVM组),胎龄25～37周;左侧脑室扩张20例,右侧脑室扩张18例,双侧脑室扩张5例。MVM 9例(MVM组),胎龄24～36周;左侧脑室扩张4例,右侧脑室扩张4例,双侧脑室扩张1例。同期纳入胎龄相匹配的正常胎儿44例(正常对照组),胎龄24～37周。SVM组与MVM组纳入标准:①孕周>18周,MRI检查示侧脑室宽度≥10 mm;②单胎妊娠;③图像清晰无伪影,父母无遗传性疾病,产前综合检查无重要畸形。排除标准:①有妊娠期糖尿病或其他妊娠并发症的孕妇;②有胎盘功能不全影响胎儿正常生长发育者。本研究经过遂宁市中心医院伦理委员会批准(批号:2018053),所有受试者均签署MRI检查知情同意书。

1.2　仪器与方法

采用Siemens MAGNETOM 1.5 T MRI扫描仪行T_2WI、T_1WI及IVIM序列扫描。孕妇取半仰卧位或侧卧位。常规MRI序列和IVIM序列在同一时段以相同的顺序进行扫描。使用单次激发快速自旋回波(single-shot fast-spin echo,SSFSE)序列获得胎儿颅脑的标准三平面位置,T_2WI使用单次激发半傅里叶采集快速自旋回波序列来提供初始定位,从初始定位确定胎儿颅脑标准横断位、冠状位和矢状位。扫描参数:T_1WI,TR 3.7 ms,TE 1.42 ms,层厚4 mm,层距4 mm,视野192 mm×256 mm;T_2WI,TR 960 ms,TE 80 ms,层厚5 mm,矩阵256×256,视野380 mm×380 mm,扫描时间约1 min。IVIM选取9个b值(0、50、100、150、200、300、500、700、800 s/mm^2),为获得良好的信噪比,每个b值对应的激励次数依次为1、1、1、2、2、2、3、3、3;TR 4 000 ms,TE 60 ms,层厚3.5 mm,无间隔,视野400 mm×400 mm。每例胎儿IVIM扫描时间为4～5 min。

1.3　图像分析和数据处理

采用MR Body Diffusion toolbox v1.3后处理软件,将多b值DWI原始数据导入后,以体素为单位进行双指数IVIM模型拟合,自动生成D、D*、f参数图(图1)。由2名具有15年以上胎儿影像诊断经验的高年资医师采用盲法分别独立测量。参照同层面T_2WI解剖位置,在b=800 s/mm^{2}的DWI图像上手工勾画双侧额叶白质、顶叶白质、颞叶白质、枕叶脑白质、小脑半球、基底节及脑桥的ROI,勾画时避开脑室、脑脊液、脑沟、大血管及运动伪影区;并将同一ROI同步复制至D、D*、f参数图获得D值、D值、f值。取2名医师测量值的平均值用于统计分析。

1.4　统计学分析

采用SPSS 26.0软件进行数据分析。计量资料先行K-S正态性检验,方差齐性检验行Levene检验。符合正态分布的计量资料以$\bar{x}\pm s$表示。一般资料、D值、D*值和f值组间比较行方差分析,组内两两比较采用Bonferroni法校正。利用MedCalc软件绘制ROC曲线评估组间差异有统计学意义的指标对脑室扩张及其程度的鉴别诊断效能。检验水准α=0.05。

2　结果

2.1　3组一般资料比较

3组孕妇年龄、胎儿胎龄差异均无统计学意义(均P>0.05)(表1)。

表1　3组一般资料比较($\bar{x}\pm s$)

组别	例数	孕妇年龄(岁)	胎儿胎龄(周)	脑室宽度(mm)
正常对照组	44	28.13±3.72	30.65±3.11	7.25±0.35
SVM组	43	30.43±4.15	30.22±4.41	11.23±0.11
MVM组	9	31.41±4.83	30.65±3.11	13.50±0.53
P值		0.42	0.36	

注:SVM为轻度脑室扩张,MVM为中度脑室扩张。

2.2　3组不同脑区ROI差异性分析

与正常对照组比较,SVM组、MVM组额叶白质、顶叶白质、颞叶白质的D值显著降低,差异均有统计学意义(均P<0.05);而枕叶白质、小脑半球、基底节区、脑干的D值差异均无统计学意义(均P>0.05)。SVM组与MVM组额叶白质的D值差异有统计学意义(P<0.05);其他脑区的D值差异均无统计学意义(均P>0.05)。3组间各个脑区的D*值及f值差异均无统计学意义(均P>0.05)(表2)。

2.3　ROC曲线分析

ROC曲线分析表明,额叶白质、顶叶白质、颞叶白质D值鉴别正常对照组与SVM组的AUC分别为0.89、0.82、0.80;额叶白质D值的鉴别诊断效能优于其他脑区(均P<0.05),临界值为1.73 mm^2/s,敏感度为83.72%,特异度为75.00%。额叶白质D值鉴别

表2 3组间D值、D*值及f值比较($\bar{x}\pm s$)

ROI	参数	正常对照组	SVM组	MVM组	F值	P_1值	P_2值	P_3值
额叶白质	D值(mm^2/s)	1.78±0.08	1.61±0.13	1.51±0.16	33.20	<0.01	<0.01	0.02
	D*值(mm^2/s)	12.87±9.10	11.46±8.70	11.04±7.58	0.35	0.71	0.58	0.89
	f值(%)	14.83±15.57	13.58±11.66	22.12±16.96	1.37	0.26	0.21	0.07
顶叶白质	D值(mm^2/s)	1.77±0.11	1.61±0.13	1.53±0.11	19.56	<0.01	<0.01	0.09
	D*值(mm^2/s)	11.75±8.62	10.18±6.46	12.09±7.01	0.56	0.58	0.91	0.43
	f值(%)	13.93±8.73	9.65±7.05	12.87±10.48	3.03	0.05	0.75	0.26
颞叶白质	D值(mm^2/s)	1.67±0.10	1.53±0.13	1.50±0.09	19.32	<0.01	<0.01	0.45
	D*值(mm^2/s)	14.06±8.35	13.40±7.02	14.27±8.80	0.10	0.91	0.95	0.75
	f值(%)	10.85±7.76	14.29±10.20	12.20±9.18	1.57	0.21	0.64	0.57
枕叶白质	D值(mm^2/s)	1.63±0.12	1.57±0.16	1.56±0.16	1.45	0.23	0.15	0.81
	D*值(mm^2/s)	10.50±5.69	14.07±9.15	12.82±9.03	2.34	0.10	0.32	0.71
	f值(%)	13.80±12.27	17.82±15.81	12.07±9.03	1.22	0.30	0.69	0.30
小脑半球	D值(mm^2/s)	1.36±0.23	1.38±0.15	1.35±0.17	1.62	0.20	0.09	0.34
	D*值(mm^2/s)	11.89±8.85	13.22±9.42	11.03±4.42	0.37	0.69	0.78	0.50
	f值(%)	18.41±17.68	19.47±16.92	11.16±5.21	0.94	0.40	0.23	0.15
基底节区	D值(mm^2/s)	1.30±0.14	1.25±0.09	1.22±0.12	3.01	0.05	0.09	0.28
	D*值(mm^2/s)	12.96±7.76	12.70±9.39	11.85±6.77	0.07	0.94	0.69	0.80
	f值(%)	12.79±13.43	11.16±7.72	14.79±8.08	0.53	0.59	0.67	0.21
脑干	D值(mm^2/s)	1.18±0.14	1.14±0.15	1.17±0.20	0.82	0.44	0.77	0.66
	D*值(mm^2/s)	14.43±9.25	14.43±9.25	15.32±9.00	0.48	0.62	0.36	0.50
	f值(%)	16.15±11.85	15.21±10.21	14.93±5.46	0.10	0.90	0.77	0.94

注:D为纯扩散系数,D*为假扩散系数,f为灌注分数,SVM为轻度脑室扩张,MVM为中度脑室扩张。P_1为正常对照组与SVM组进行比较,P_2为正常对照组与MVM组进行比较,P_3为SVM组与MVM组进行比较。

SVM组与MVM组的AUC=0.70,顶叶白质、颞叶白质D值对SVM组与MVM组没有区别能力(图2)。

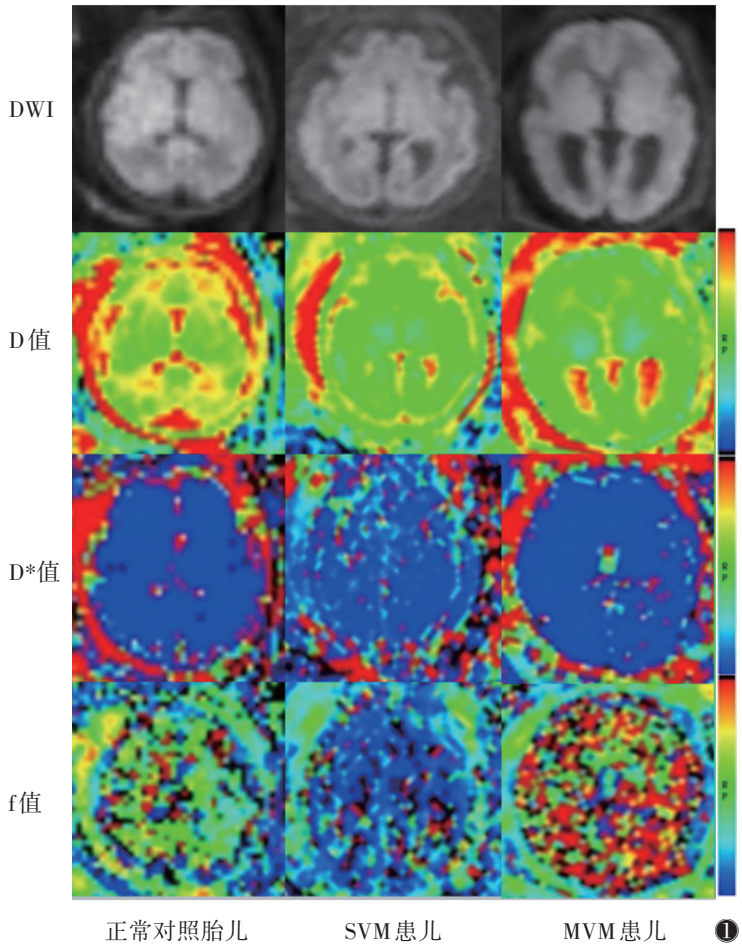
3 讨论

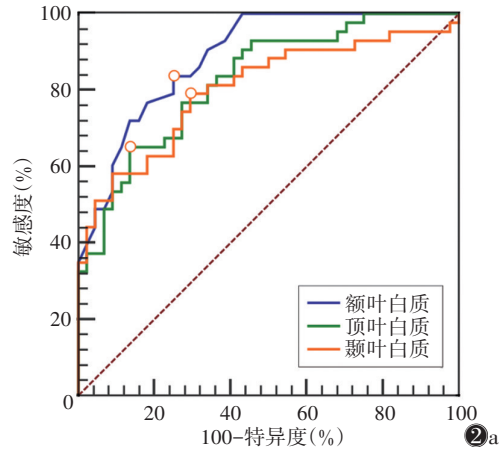
胎儿脑组织内的水分子运动包括两部分:一部分是组织内慢速流动的水分子,代表扩散信息;另一部分是微血管内快速流动的水分子,反映灌注情况。IVIM技术能定量评价组织内水分子的扩散与微循环灌注信息[7],在成人脑卒中及脑肿瘤灌注监测方面已有较多报道。近年来IVIM技术开始用于评价胎盘正常微循环灌注信息,D*值与f值可以准确预测胎盘植入,显示生长受限胎儿的胎盘微观结构变化[8],而用于胎儿脑部检查尚处于探索阶段。

胎儿脑室扩张是最常见的神经系统异常,脑室扩张新生儿重症监护病房的入住率显著高于正常新生儿,从长期结局来看,脑室扩张胎儿神经发育异常的比例高于正常对照组[9]。重度脑室扩张胎儿中,仅23.6%的患儿存活年龄超过2岁,24.2%的胎儿存在发育迟缓[5]。一项对脑室扩张胎儿出生后进行长期随访的研究发现,12%的患儿在2~7岁出现神经发育迟滞,5%的患儿被诊断为自闭症谱系障碍、癫痫和心理运动发育障碍[10],说明胎儿脑室扩张与出生后儿童神经发育障碍相关。产前了解胎儿脑白质微观结果变化,对其出生后结局及远期预后追踪具有重要意义。

本研究显示,与正常对照组比较,SVM组与MVM组胎儿双侧额叶白质、顶叶白质、颞叶白质的D值均明显减低(均$P<0.05$),提示脑室扩张胎儿脑白质水分子的扩散速度明显降低,证明其脑部存在微观结构改变。Braun等[11]认为,颅内压增高和脑血流量减低是脑室扩张导致脑损伤的原因。颅内压力增加导致脑血流减少,血流量与新陈代谢之间失衡,即脑积水时正常能量代谢率下的血运受限,可导致细胞缺氧,刺激无氧糖酵解,细胞内乳酸浓度增高,细胞膜钠钾泵功能障碍,使细胞内水分子增多,细胞外空间缩小,水分子扩散功能受到一定限制,从而导致D值降低。此外,本研究发现,脑室扩张胎儿D*值与f值并未显著降低,与部分研究结果存在差异,Jakab等[12]的研究结果表明,胎儿脑部D*值与f值的可重复性较低。因此,需进一步研究获得稳定的D*值与f值。

另外,本研究中SVM组与MVM组额叶白质的D值差异有统计学意义,证明随着脑室扩张程度加重,脑白质损伤程度也增高,且额叶白质是最易受到损伤。额叶与认知功能密切相关[13];Barrett等[14]研究





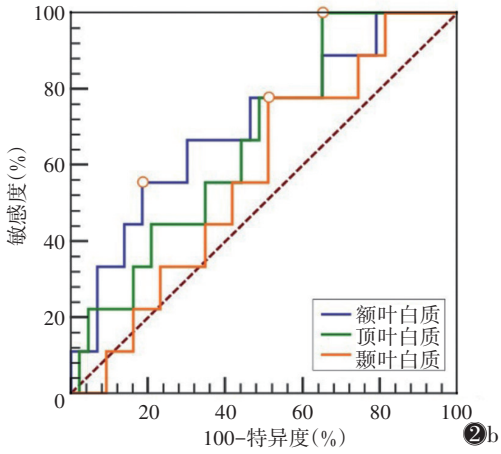


图1　正常对照胎儿、轻度脑室扩张(SVM)及中度脑室扩张(MVM)的体素内不相干运动(IVIM)参数图　注:色带颜色越亮,代表参数值越高　**图2　不同脑区纯扩散系数(D)值鉴别脑室扩张程度ROC曲线**　注:图2a为不同脑区D值鉴别正常对照组与SVM组的ROC曲线;图2b为不同脑区D值鉴别SVM组与MVM组的ROC曲线

表明,通过延伸至额叶内外的白质纤维束占总大脑白质的66%。脑室扩张导致的脑白质低灌注会引发神经纤维束的损伤[15]。这也解释了脑室扩张胎儿出生后存在智力发育障碍的原因[16]。

本研究发现,额叶白质、顶叶白质、颞叶白质的D值能很好地鉴别正常胎儿与脑室扩张胎儿,以额叶白质的AUC最大,提示额叶是脑白质损伤中最敏感的一个脑区,当脑室扩张胎儿D值<1.73 mm^2/s时脑白质存在潜在损伤的可能。胎儿大脑成熟遵循一定的梯度,且大脑白质髓鞘形成缓慢[17],因此脑室周围脑白质相对基底节区、小脑半球及脑干更易受到外在因素的损伤。研究表明,许多产前发育异常胎儿均存在脑白质损伤[18-19]。本研究发现,额叶白质的D值最高,表明额叶白质髓鞘成熟最晚。

本研究存在的局限性:为单中心样本,且MVM胎儿例数较少,可能影响统计结果的可靠性,有待扩大样本量进一步研究。正常对照组来源于颅脑MRI检查结构正常但其他部位可有异常而行MRI检查的胎儿,尽管这些异常不属于重要畸形,但可能会忽略这类胎儿中存在的潜在神经发育异常。

综上所述,脑室扩张胎儿额叶白质、顶叶白质、颞叶白质的D值明显降低,以额叶白质最敏感,且与脑室扩张程度明显相关。额叶白质D值降低的程度可作为评价脑室扩张胎儿脑白质损伤程度的指标,有助于临床监测胎儿脑白质损伤的进展。

[参考文献]

[1] Moens A, Albersnagel Z, Veenhof M B, et al. Clinical outcome and risk factors for progression of prenatally diagnosed fetal ventriculomegaly: a retrospective multicenter study[J]. Prenat Diagn, 2025, 45(9): 1089-1099.

[2] Society for Maternal-Fetal Medicine (SMFM), Fox N S, Monteagudo A, et al. Mild fetal ventriculomegaly: diagnosis, evaluation, and management[J]. Am J Obstet Gynecol, 2018, 219(1): B2-B9.

[3] Scelsa B, Rustico M, Righini A, et al. Mild ventriculomegaly from fetal consultation to neurodevelopmental assessment: a single center experience and review of the literature[J]. Eur J Paediatr Neurol, 2018, 22(6): 919-

928.
[4] Tao H, Zhang L, Tan F, et al. Pregnancy outcomes and genetic analysis for fetal ventriculomegaly [J]. Front Genet, 2023, 14: 1186660.
[5] Kumar M, Garg N, Hasija A, et al. Two-year postnatal outcome of 263 cases of fetal ventriculomegaly [J]. J Matern Fetal Neonatal Med, 2020, 33(9): 1492-1498.
[6] Giorgione V, Haratz K K, Constantini S, et al. Fetal cerebral ventriculomegaly: what do we tell the prospective parents?[J]. Prenat Diagn, 2022, 42(13): 1674-1681.
[7] Shen L, Zhou L, Liu X, et al. Comparison of biexponential and monoexponential DWI in evaluation of Fuhrman grading of clear cell renal cell carcinoma[J]. Diagn Interv Radiol, 2017, 23(2): 100-105.
[8] Bao Y, Pang Y, Sun Z, et al. Functional diagnosis of placenta accreta by intravoxel incoherent motion model diffusion-weighted imaging[J]. Eur Radiol, 2021, 31(2): 740-748.
[9] Chen H, Bai P, Yang S, et al. Short-term and long-term outcomes of fetal ventriculomegaly beyond gestational 37 weeks: aretrospective cohort study[J]. J Clin Med, 2023, 12(3): 1065.
[10] Thorup E, Jensen L N, Bak G S, et al. Neurodevelopmental disorder in children believed to have isolated mild ventriculomegaly prenatally[J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2019, 54(2): 182-189.
[11] Braun K P, Dijkhuizen R M, De Graaf R A, et al. Cerebral ischemia and white matter edema in experimental hydrocephalus: a combined in vivo MRI and MRS study[J]. Brain Res, 1997, 757(2): 295-298.
[12] Jakab A, Tuura R, Kottke R, et al. Intra-voxel incoherent motion MRI of the living human foetus: technique and test-retest repeatability[J]. Eur Radiol Exp, 2017, 1(1): 26.
[13] Henri-Bhargava A, Stuss D T, Freedman M. Clinical assessment of prefrontal lobe functions [J]. Continuum (Minneap Minn), 2018, 24(3): 704-726.
[14] Barrett R L C, Dawson M, Dyrby T B, et al. Differences in frontal network anatomy across primate species[J]. J Neurosci, 2020, 40(10): 2094-2107.
[15] Urushihata T, Takuwa H, Seki C, et al. Water diffusion in the brain of chronic hypoperfusion model mice: astudy considering the effect of blood flow[J]. Magn Reson Med Sci, 2018, 17(4): 318-324.
[16] Pagani G, Thilaganathan B, Prefumo F. Neurodevelopmental outcome in isolated mild fetal ventriculomegaly: systematic review and meta-analysis[J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2014, 44(3): 254-260.
[17] 徐梦莹, 李春花, 李健, 等. b值1 000 s/mm² DWI正常胎脑区域ADC值与孕龄的相关性分析[J]. 中国医学影像技术, 2019, 35(11): 1707-1711.
[18] Schönberg N, Weisstanner C, Wiest R, et al. The influence of various cerebral and extracerebral pathologies on apparent diffusion coefficient values in the fetal brain[J]. J Neuroimaging, 2020, 30(4): 477-485.
[19] Jouannic J M, Blondiaux E, Senat M V, et al. Prognostic value of diffusion-weighted magnetic resonance imaging of brain in fetal growth restriction: results of prospective multicenter study[J]. Ultrasound Obstet Gynecol, 2020, 56(6): 893-900.

（收稿日期 2025-10-27）

信息

《中国中西医结合影像学杂志》2027年征订启事

《中国中西医结合影像学杂志》是中国中西医结合学会系列杂志之一，由中国科学技术协会主管、中国中西医结合学会和山东中医药大学附属医院主办，于2003年第1季度正式创刊。本刊已被中国知网、万方数据、维普网等收录。自2022年起连续5年被收录为中国科技核心期刊，2023年入选T2级中医药中文科技期刊。

本刊以中西医结合影像学临床与实验研究为主要内容，重视影像学研究的新进展、新理论及新技术，以普及和提高相结合，促进中西医结合影像学的发展。主要栏目有专家论坛、针灸影像学、中西医结合研究、神经影像学、头颈部影像学、胸部影像学、腹部影像学、骨骼肌肉影像学、儿科影像学、智能影像学、介入放射学、影像技术、继续教育园地等。读者对象为广大医学影像工作者及中西医临床医师。目前，杂志网站、微信公众号及维普网均已实现了本刊文献的开放获取(OA)。

本刊为双月刊，国内外公开发行，国内统一连续出版物号CN 11-4894/R，国际标准连续出版物号ISSN 1672-0512；国内邮发代号24-200，国外发行代号BM1760；每期定价30元，全年180元，可通过邮局征订，也可直接汇款至本刊编辑部。

地址：山东省济南市经十路16369号《中国中西医结合影像学杂志》编辑部；邮编：250014；电话：(0531)68616919；Email：yxbjb@vip.163.com；网址：http://jhyx.cbpt.cnki.net；微信公众号：中国中西医结合影像学杂志。