



电子、语音版

· 论 著 ·

¹⁸F-FDG PET/CT 和 MRI 对疑似阿尔茨海默病患者 1 年内临床进展的评估意义

张会朵, 齐伟静, 耿丽颖, 康丽娟
保定市第一中心医院神经内科, 河北保定 071000

摘要:目的 分析¹⁸F-氟代脱氧葡萄糖正电子发射断层成像/计算机断层扫描(¹⁸F-FDG PET/CT)和磁共振成像(MRI)对疑似阿尔茨海默病(AD)的遗忘型轻度认知障碍(aMCI)患者1年内疾病进展的评估价值。方法 前瞻性纳入2021年8月至2022年8月在保定市第一中心医院治疗的表征AD的临床aMCI患者(146例,60~90岁)作为研究对象。记录随访1年内患者疾病进展结局,进展为AD的患者为进展组(49例),其余为未进展组(97例)。采用¹⁸F-FDG PET/CT和MRI对患者的疾病进展情况进行评估。结果 进展组患者的年龄、基线脑脊液总tau蛋白(T-tau)含量以及MRI总脑室容积高于未进展组($P<0.05$),而基线简易精神状态检查量表评分、¹⁸F-FDG PET/CT脑灰质和白质标准化摄取比值(SUVR)低于未进展组($P<0.05$)。单因素及多因素Logistics回归分析显示,SUVR及MRI总脑室容积均为随访1年内进展为AD的风险因素。SUVR+MRI总脑室容积预测aMCI患者随访1年内疾病进展为AD的受试者操作特征曲线下面积为0.753(95%CI:0.674~0.832),优于两者单独预测。在多变量模型中,每增加1个异常标志物(SUVR<1.063、MRI总脑室容积>44 472 mm³或脑脊液T-tau>400 ng/L),进展为AD的风险就会逐渐增加。结论 ¹⁸F-FDG PET/CT联合MRI对表征AD的aMCI患者1年内发生疾病进展具有预测价值。

关键词:阿尔茨海默病;遗忘型轻度认知障碍;¹⁸F-氟代脱氧葡萄糖正电子发射断层成像;计算机断层扫描;磁共振成像;疾病进展

中图分类号:R742

DOI:10.16636/j.cnki.jinn.1673-2642.2025.03.003

Significance of ¹⁸F - flurodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography and magnetic resonance imaging in assessing clinical progression within 1 year in patients with suspected Alzheimer disease

ZHANG Huiduo, QI Weijing, GENG Liying, KANG Lijuan

Department of Neurology, Baoding First Central Hospital, Baoding, Hebei 071000, China

Corresponding author: ZHANG Huiduo, Email: zhanghuiduo@163.com

Abstract: **Objective** To investigate the significance of ¹⁸F-flurodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography (¹⁸F-FDG PET/CT) and magnetic resonance imaging (MRI) in assessing disease progression within 1 year in amnesic mild cognitive impairment (aMCI) patients suspected of Alzheimer disease (AD). **Methods** A prospective study was conducted among 146 patients with aMCI, aged 60-90 years, who were treated in Baoding First Central Hospital from August 2021 to August 2022. The outcome of disease progression was recorded within 1 year of follow-up, and the 49 patients with progression to AD were enrolled as progression group, and the 97 patients without progression to AD were enrolled as non-progression group. The methods of ¹⁸F-FDG PET/CT and MRI were used to assess disease progression in patients. **Results** Compared with the non-progression group, the progression group had significantly higher age, content of total tau (T-tau) in cerebrospinal fluid at baseline, and total ventricular volume on MRI ($P<0.05$), as well as significantly lower Mini-Mental State Examination score and standardized uptake value ratio (SUVR) of the gray matter and white matter

基金项目:河北省卫健委医学科学研究课题(20241858)。

收稿日期:2024-10-24;修回日期:2025-03-25

通信作者:张会朵(1984—),女,硕士,副主任医师,主要从事神经内科常见病,如脑梗死、中枢神经系统脱髓鞘疾病、帕金森病、痴呆等的诊治及临床研究工作。Email:zhanghuiduo@163.com。

on ¹⁸F-FDG PET/CT ($P<0.05$). The univariate and multivariate Logistic regression analyses showed that SUVR and total ventricular volume on MRI were risk factors for disease progression to AD within 1 year of follow-up. SUVR combined with total ventricular volume on MRI had an area under the ROC curve of 0.753 (95% confidence interval: 0.674-0.832) in predicting disease progression to AD in aMCI patients within 1 year of follow-up, which was better than each predictor used alone. In multivariable models, for every abnormal marker (SUVR <1.063 , total ventricular volume on MRI $>44\ 472\ \text{mm}^3$ or T-tau $>400\ \text{ng/L}$ in cerebrospinal fluid) added, the risk of progression to AD gradually increased. **Conclusions** The combination of ¹⁸F-FDG PET/CT and MRI has a certain value in predicting disease progression within 1 year in aMCI patients suspected of AD.

Keywords: Alzheimer disease; amnesic mild cognitive impairment; ¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography; computed tomography; magnetic resonance imaging; disease progression

根据联合国数据,痴呆是老年人致残的主要原因之一,已成为世界范围内一个严重的社会紧急问题^[1]。在中国,阿尔茨海默病(Alzheimer disease, AD)是导致痴呆的主要原因,其临床特征是进行性神经退行性疾病和认知障碍^[2-3]。AD通常分为3个阶段:临床前阶段、轻度认知障碍(mild cognitive impairment, MCI)阶段和痴呆阶段。遗忘型轻度认知障碍(amnesic MCI, aMCI)是最常见的MCI类型,最有可能发展为AD。在评估这部分疑似AD患者时,使用反映神经退行性变的生物标志物可能是临床检查的一部分^[4-5],例如通过¹⁸F-氟代脱氧葡萄糖正电子发射断层成像/计算机断层扫描(¹⁸F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography/computed tomography, ¹⁸F-FDG PET/CT)评估的脑低代谢^[6]和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)评估的脑萎缩^[7]。虽然先前已经评估了单个标志物的预后特征,但尚未对标志物的组合进行广泛测试。由于临床医生通常可以为同一患者使用2种或多种生物标志物,因此组合生物标志物的性能可能更实用,并代表了一种更面向临床的诊断策略。此外,尽管MRI和¹⁸F-FDG PET/CT是神经退行性过程中不同方面的指标,但他们是同一过程的标志。因此,尚不确定这2种模式是否包含关于进展风险的补充信息或附加信息。因此,本研究将调查MRI脑萎缩和¹⁸F-FDG PET/CT在评估疑似AD患者临床进展风险方面的有用性。

1 资料与方法

1.1 研究对象

前瞻性招募2021年8月至2022年8月在保定市第一中心医院神经内科就诊的患者(年龄60~90岁)。所有受试者均接受了病史评估、体格检查和认知功能评估。最终共纳入146例符合表征AD临床的aMCI期患者,平均年龄(71.92 \pm 7.28)岁;男性72例,女性74例;简易精神状态检查量表(Mini-Mental State Examination, MMSE)评分(24.98 \pm 1.73)分。

aMCI的诊断标准:根据《精神疾病诊断与统计手册(第5版)》^[8]的诊断标准并结合脑部MRI进行诊断:(1)由

患者、家人或经验丰富的临床医生证实有认知障碍的临床表现;(2)通过MMSE认知评估证实至少一种认知功能领域存在障碍,MMSE评分18~26分(根据受教育程度:文盲18~26分,小学程度21~26分,中学程度23~26分,大学程度24~26分);(3)日常生活活动能力完整或轻度受损;(4)尚未达到AD痴呆症的诊断标准,临床痴呆评定(Clinical Dementia Rating, CDR)量表总评分为0.5分,记忆项目得分为0.5分。

纳入标准:(1)所有临床诊断都是首次诊断,由保定市第一中心医院神经内科经验丰富的医生进行;(2)患者年龄60~90岁,不受性别限制;(3)老年抑郁量表(Geriatric Depression Scale, GDS)评分 ≤ 10 分;(4)至少达到6年的教育水平;(5)基线时进行脑MRI检查和¹⁸F-FDG PET/CT,包括切片厚度 $<2\ \text{mm}$ 的T1加权MRI图像,其质量足以进行分析;(6)进行至少12个月的随访。

排除标准:(1)CDR量表1~3分;(2)患有创伤性脑疾病和其他精神疾病;(3)患有难治性全身性疾病,如恶性肿瘤、血液病、难治性高血压等;(4)其他可能干扰认知测试的严重听觉、视觉或运动缺陷。

本研究得到了保定市第一中心医院医学伦理委员会的批准(批准号:2021027),试验根据《赫尔辛基宣言》进行。所有参与者或其合法授权的照顾者都被告知本研究的目的,所有入组的参与者都提供了书面知情同意书。

1.2 ¹⁸F-FDG PET/CT检查

患者禁食6 h以上,空腹血糖控制在4.0~10.0 mmol/L, ¹⁸F-FDG PET/CT扫描在静息状态下进行,此状态指静脉注射¹⁸F-FDG [(254 \pm 107) MBq]后40~60 min。采用Siemens BiographSensation 16HR PET/CT扫描仪获得PET/CT图像。通过低剂量快速CT进行衰减校正,对PET和CT的图像融合及重建,采用PHILIPS Syn-tegra软件进行3D处理,并以左侧和右侧额叶、颞叶、顶叶、枕叶作为感兴趣区(region of interest, ROI)。

定义灰质和白质总摄取的ROI。脑灰质和脑白质ROI标准化摄取值比(standardized uptake value ratio,

SUVR)使用小脑白质的平均活动作为参考区域。

1.3 MRI检查

使用FreeSurfer v6.0对T1加权图像进行皮质下结构的自动分割和体积测量。在排除脑干和小脑等扫描覆盖不完全的区域后,获得27个皮质下结构及其体积,以供进一步分析。分割结果由放射科专家单独分析。收集每个患者的总脑室容积进行头部尺寸校正。利用回归模型来考虑个体总脑室容积与平均总脑室容积之间的差异,并据此对观察到的体积进行校正,如ROI(校正)=ROI(观察)-B(个体总脑室容积-平均总脑室容积)。B为每个ROI与个体总脑室容积之间的回归线斜率。

1.4 脑脊液总tau蛋白含量测定

在基线检查时通过腰椎穿刺收集脑脊液,并按照标准操作程序进行处理。采用酶联免疫吸附检测试剂盒(上海江莱生物)测量脑脊液中总tau(total tau, T-tau)含量。共有73例患者测量了脑脊液T-tau水平。

1.5 随访结局

本研究的主要结局是在诊断后1年的临床随访中所评估的疾病进展情况。在随访中,对患者进行了MMSE和CDR评估,以确定病程为进展、波动、稳定或改善。在本研究中,因为被归类为波动(1例)和改善(5例)的患者人数过少,无法进行有意义的分析,因此将波动、改善和稳定患者都归类为未进展组。当患者满足CDR≥1.0、中

风-阿尔茨海默病和相关疾病协会“可能AD”标准时,归类为进展组。根据随访结果,将患者分为进展组(49例)及未进展组(97例)。

1.6 统计学方法

采用SPSS 21.0软件进行统计学分析。首先对连续变量进行Kolmogorov-Smirnov正态性检验,正态分布的计量资料以均数±标准差($\bar{x}\pm s$)表示,两组间比较采用独立样本t检验;不符合正态分布的计量资料以中位数和四分位间距 $[M(P_{25}, P_{75})]$ 表示,两组间比较采用秩和检验。计数资料以例数和百分率 $[n(\%)]$ 表示,两组间比较采用 χ^2 检验。斯皮尔曼相关分析用于评估特征变量与年龄和MMSE评分之间的相关性。采用单因素和多因素Logistic回归分析评估影响表征AD的aMCI患者随访1年内发生疾病进展的风险因素。绘制受试者操作特征(receiver operator characteristic, ROC)曲线,分析SUVR、MRI总脑室容积预测aMCI患者随访1年内疾病进展为AD的曲线下面积(area under the curve, AUC)。P<0.05(双侧)为差异有统计学意义。

2 结果

2.1 两组患者基线特征比较

进展组患者的年龄、基线脑脊液T-tau含量以及MRI总脑室容积高于未进展组,差异有统计学意义(P<0.05);基线MMSE评分和SUVR低于未进展组,差异有统计学意义(P<0.05)。见表1。

表1 两组患者基线特征比较

指标	未进展组(n=97)	进展组(n=49)	Z/t/ χ^2 值	P值
年龄/岁; $(\bar{x}\pm s)$	70.59±6.91	74.54±7.36	-3.191	0.002
男性 $[n(\%)]$	49(50.52)	23(46.94)	0.167	0.683
基线MMSE评分/分; $(\bar{x}\pm s)$	25.28±1.48	24.39±2.03	3.017	0.003
受正规教育年限/年; $(\bar{x}\pm s)$	11.13±3.24	11.47±2.94	0.617	0.538
基线脑脊液T-tau/(ng/L); $(\bar{x}\pm s)$	377.91±226.80	521.48±271.14	-2.530	0.013
MRI总脑室容积/ mm^3 ; $[M_{50}(P_{25}, P_{75})]$	46 145(31 895, 68 454)	65 193(45 342, 87 201)	-2.584	0.010
SUVR $[M_{50}(P_{25}, P_{75})]$	1.09(1.03, 1.18)	1.06(0.99, 1.10)	-3.214	0.001

2.2 患者基线特征相关性分析

患者的基线MRI总脑室容积与年龄呈强正相关,与随访1年MMSE评分及基线MMSE评分与随访MMSE评分差异呈弱负相关。患者基线SUVR与年龄呈弱负相关,与基线MMSE评分、随访1年MMSE评分及基线MMSE评分与随访MMSE评分差异呈弱正相关,与基线MRI总脑室容积呈弱负相关。见表2。

2.3 脑萎缩和低代谢模式与疾病进展的关系分析

根据基线SUVR及MRI总脑室容积值将aMCI患者进行四分位分组,分析患者随访1年内进展为AD的风险。模型1为单因素Logistic回归分析,模型2为校正年龄、性别、受正规教育年限、基线脑脊液T-tau含量和基线MMSE

表2 患者基线特征相关性分析

项目	MRI总脑室容积		SUVR	
	r_s 值	P值	r_s 值	P值
年龄	0.522	<0.001	-0.293	<0.001
基线MMSE评分			0.332	<0.001
随访1年MMSE评分	-0.301	<0.001	0.373	<0.001
基线MMSE评分与随访MMSE评分差异	-0.256	0.002	0.255	0.002
基线MRI总脑室容积			-0.307	<0.001

评分后的多因素Logistic回归分析。单因素和多因素分析均显示,SUVR及MRI总脑室容积为随访1年内进展为AD的风险因素(P<0.05)。见表3。

表3 单因素及多因素 Logistic 回归分析

亚组	模型1		模型2	
	OR(95%CI)	P值	OR(95%CI)	P值
SUVR				
≥1.15	1.000	-	1.000	-
1.08~1.14	5.101(1.278~20.369)	0.021	5.199(1.286~21.019)	0.021
1.03~1.07	7.111(1.704~29.672)	0.007	6.728(1.418~31.930)	0.016
<1.03	7.758(2.017~29.844)	0.003	7.058(1.808~27.554)	0.005
MRI总脑室容积/mm ³				
<36 370	1.000	-	1.000	-
36 370~57 788	4.870(1.418~16.720)	0.012	5.727(1.555~21.093)	0.009
57 789~80 935	5.714(1.666~19.602)	0.006	5.878(1.609~21.478)	0.007
≥80 936	7.481(1.968~28.434)	0.003	6.095(1.788~20.773)	0.004

注:模型1为单因素Logistic回归分析;模型2为校正性别、年龄、受正规教育年限、基线脑脊液T-tau含量和基线MMSE评分后的多因素Logistic回归分析。

2.4 ROC曲线分析

SUVR+MRI总脑室容积预测aMCI患者随访1年内进展为AD的AUC为0.753(95%CI:0.674~0.832),阳性似

然比为2.85,优于SUVR、MRI总脑室容积单独预测,见表4、图1。

表4 ROC曲线分析

变量	AUC	P值	灵敏度/%	特异度/%	约登指数	截断值	阳性似然比	阴性似然比	95%CI	
									下限	上限
SUVR+MRI总脑室容积	0.753	<0.001	73.5	74.2	0.477	-	2.85	0.36	0.674	0.832
MRI总脑室容积	0.721	<0.001	89.8	45.4	0.352	44 472/mm ³	1.64	0.22	0.639	0.803
SUVR	0.703	<0.001	79.6	43.3	1.100	1.063	1.40	0.47	0.617	0.789

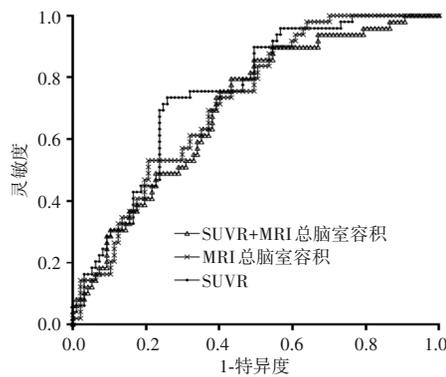


图1 SUVR、MRI总脑室容积预测aMCI患者随访1年内疾病进展为AD的ROC曲线

2.5 预测模型验证

在多变量模型中,每增加一个异常标志物(SUVR<1.063、MRI总脑室容积>44 472 mm³或脑脊液T-tau>400 ng/L),当与无异常标志物比较时,进展为AD的风险就会增加(1个异常标志物:OR=2.682;2个异常标志物:OR=3.454;3个异常标志物:OR=4.107)(表5)。该模型在10倍1 000次交叉验证中的准确度为0.63,平衡准确度为0.58。

表5 神经退行性变的标志物及其与临床进展的关系分析

变量	单因素分析		多因素分析	
	OR(95%CI)	P值	OR(95%CI)	P值
年龄(每增加1岁)	1.061(1.018~1.105)	0.005	1.042(0.992~1.081)	0.103
性别(女性 vs 男性)	1.154(0.580~2.296)	0.683	1.050(0.655~2.087)	0.387
基线MMSE评分(每增加1分)	0.749(0.611~0.918)	0.005	0.829(0.621~1.106)	0.202
脑脊液T-tau(>400 ng/L vs ≤400 ng/L)	2.929(1.142~7.513)	0.025		
MRI总脑室容积(>44 471.50 mm ³ vs ≤44 472 mm ³)	3.451(1.374~8.672)	0.008		
SUVR(<1.063 vs ≥1.063)	4.529(1.708~12.009)	0.002		
异常标志物				
0个			-	-
1个			2.682(1.008~7.121)	0.045
2个			3.454(1.167~10.278)	0.026
3个			4.107(1.242~10.578)	0.017

3 讨论

本研究调查了2种不同的神经退行性变指标对疑似神经退行性疾病患者1年后病程的预测能力。结果显示,146例aMCI患者中有49例发展为AD。

aMCI是介于正常认知和AD之间的过渡阶段。随着时间的推移,被诊断为患有MCI的人可能会稳定或恢复到正常状态,而其中一些人可能会发展为AD^[4,9]。aMCI是最常见的MCI类型,最有可能进展为AD^[10]。本研究发现,在随访1年内进展为AD的aMCI患者(进展组)除了年龄更大、基线MMSE评分更低,还存在SUVr及MRI总脑室容积差异。单因素和多因素分析均显示,SUVr及MRI总脑室容积为随访1年内进展为AD的风险因素。SUVr及MRI总脑室容积联合预测aMCI患者随访1年内进展为AD的效能良好。本研究结果有助于对aMCI患者进行风险分层。

大脑衰老经历了多个关键的形态变化,其中脑萎缩是最显著的特征之一。虽然正常人的大脑衰老也是以这些变化为特征,但神经退行性疾病,如AD和相关痴呆症的脑萎缩轨迹与正常人大脑不同,其表现出脑萎缩显著加速^[11]。这些脑结构萎缩,可以通过MRI等神经成像技术进行检测^[12]。由于脑萎缩而丢失的脑组织体积被液体取代。在结构上,表现为明显的脑室扩大以及褶皱间隙的增加,即脑沟增宽。脑室扩大是纵向医学影像中最突出的特征之一,代表了大脑拓扑结构的重大变化^[11]。脑室扩大在MCI和AD患者中都 very 常见^[13]。脑室扩大可以通过脑室体积和脑室表面形态学来描述^[14]。本研究分析了患者的MRI总脑室容积,未进展组aMCI患者的基线MRI总脑室容积明显小于进展组,且MRI总脑室容积是aMCI患者进展为AD的风险因素。MRI总脑室容积与患者年龄呈强正相关,这与大脑正常衰老引起的脑萎缩相关。

有研究表明,¹⁸F-FDG PET/CT可显示AD患者脑皮质中的低代谢变化范围及部位,同时,¹⁸F-FDG PET/CT对检出形态学改变之前的AD生理、病理情况更具优势,可为临床早期诊断AD或不典型AD提供可靠参考^[15]。¹⁸F-FDG PET/CT能够检测体内神经元功能障碍和神经变性,因为脑葡萄糖代谢主要由突触活动决定。在神经退行性疾病中,突触活动和葡萄糖代谢可能在神经元丢失发生之前就受到干扰。¹⁸F-FDG PET/CT可以检测这些变化,以识别葡萄糖代谢降低的大脑区域^[16]。Gramkow等^[17]的研究发现,联合MRI与¹⁸F-FDG PET/CT对脑萎缩及脑代谢减退进行评估,可以预测疑似神经退行性疾病患者1年内疾病进展的发生。有研究显示,¹⁸F-FDG PET/CT在区分aMCI与健康对照组方面比动态磁敏感对比增强MRI更准确,而在区分MCI与AD时,二者准确性相似^[18]。本研究结果显示,联合¹⁸F-FDG PET/CT和MRI对aMCI随访

1年内进展的预测效能较优。且每增加一个异常标志物(SUVr<1.063、MRI总脑室容积>44 472 mm³),当与无异常标志物进行比较时,进展为AD的风险就会逐渐增加。

本研究固有的局限性包括:(1)这种未经外部验证的临床进展评估方法存在主观性,可能会产生偏见;(2)患者纳入标准过于宽泛,没有考虑病因诊断的预后价值;(3)受到医疗资源和侵入性操作的限制,临床实践中相对较多的患者没有接受脑脊液生物标志物检测;(4)没有调整颅内体积,这可能会导致结果产生偏倚。尽管如此,本研究结果仍然扩展了神经退行性变生物标志物在临床环境中的应用价值。然而,这些都是初步发现,需要进一步验证。

总之,¹⁸F-FDG PET/CT联合MRI对表征AD的aMCI患者1年内发生疾病进展具有预测价值。未来应在该领域进行更大规模的研究,以验证我们的发现,并进一步阐明这些影像学标志物的预测价值。

参 考 文 献

- [1] ATHAR T, BALUSHI KAL, KHAN SA. Recent advances on drug development and emerging therapeutic agents for Alzheimer's disease[J]. Mol Biol Rep, 2021, 48(7): 5629-5645.
- [2] 韩玉梁,王凯,贾建军. 阿尔茨海默病非药物治疗研究进展[J]. 中华老年心脑血管病杂志, 2020, 22(4): 435-437.
- [3] 范文凭,齐金蕾,刘江美,等. 2013-2021年中国阿尔茨海默病和其他痴呆死亡水平及趋势分析[J]. 疾病监测, 2025, 40(2): 245-250.
- [4] 张嘉嘉,秦瑶,韩红娟,等. 基于Landmark模型动态预测老年人轻度认知障碍向阿尔茨海默病的转化[J]. 中国卫生统计, 2022, 39(4): 534-537.
- [5] 陶帅,韩星,孔丽文,等. 基于步态的机器学习模型识别遗忘型轻度认知障碍和阿尔茨海默病[J]. 中国全科医学, 2022, 25(31): 3857-3865.
- [6] DUMAN SASTIM D, ELBOGA G, ELBOGA U, et al. Evaluation of the relationship between FDG - PET hypometabolism and retinal layer thickness in patients with Alzheimer's disease[J]. Acta Neurol Belg, 2024, 124(3): 987-993.
- [7] FREUND P, BOLLER V, EMMENEGGER TM, et al. Quantifying neurodegeneration of the cervical cord and brain in degenerative cervical myelopathy: a multicentre study using quantitative magnetic resonance imaging[J]. Eur J Neurol, 2024, 31(7): e16297.
- [8] VANWOERDEN S, STEPP SD. The diagnostic and statistical manual of mental disorders, fifth edition, alternative model conceptualization of borderline personality disorder: a review of the evidence[J]. Personal Disord, 2022, 13(4): 402-406.
- [9] ZHENG QY, WANG X. Alzheimer's disease: insights into pathology, molecular mechanisms, and therapy[J]. Protein Cell, 2025, 16(2): 83-120.
- [10] APPLETON J, FINN Q, ZANOTTI - FREGONARA P, et al.

- Brain inflammation co-localizes highly with tau in mild cognitive impairment due to early-onset Alzheimer's disease[J]. *Brain*, 2025, 148(1): 119-132.
- [11] BLINKOUSKAYA Y, WEICKENMEIER J. Brain shape changes associated with cerebral atrophy in healthy aging and Alzheimer's disease[J]. *Front Mech Eng*, 2021, 7: 705653.
- [12] HU X, MEIER M, PRUESSNER J. Challenges and opportunities of diagnostic markers of Alzheimer's disease based on structural magnetic resonance imaging[J]. *Brain Behav*, 2023, 13(3): e2925.
- [13] GOUKASIAN N, PORAT S, BLANKEN A, et al. Cognitive correlates of hippocampal atrophy and ventricular enlargement in adults with or without mild cognitive impairment[J]. *Dement Geriatr Cogn Dis Extra*, 2019, 9(2): 281-293.
- [14] DONG QX, ZHANG W, STONNINGTON CM, et al. Applying surface-based morphometry to study ventricular abnormalities of cognitively unimpaired subjects prior to clinically significant memory decline[J]. *Neuroimage Clin*, 2020, 27: 102338.
- [15] 娜姿·伊力哈木,李肖红,张奇洲,等. ¹⁸F-氟代脱氧葡萄糖PET/CT在阿尔茨海默病中应用价值研究[J]. *临床军医杂志*, 2023, 51(4): 384-386.
- [16] FRINGS L, BLAZHENETS G, BRUMBERG J, et al. Deformation-based morphometry applied to FDG PET data reveals hippocampal atrophy in Alzheimer's disease[J]. *Sci Rep*, 2024, 14(1): 20030.
- [17] GRAMKOW MH, GJERUM L, KOIKKALAINEN J, et al. Prognostic value of complementary biomarkers of neurodegeneration in a mixed memory clinic cohort[J]. *Peer J*, 2020, 8: e9498.
- [18] WABIK A, TRYPKA E, BLADOWSKA J, et al. Comparison of dynamic susceptibility contrast enhanced MR and FDG - PET brain studies in patients with Alzheimer's disease and amnesic mild cognitive impairment[J]. *J Transl Med*, 2022, 20(1): 259.

责任编辑:龚学民