

## 论著

## 创伤性颅脑损伤后深部灰质核团结构改变与认知功能的关系\*

陈苗苗<sup>1,2</sup> 李贤军<sup>1</sup> 惠兆元<sup>2</sup>  
朱志敏<sup>2</sup> 李华<sup>3</sup> 贾喆<sup>2</sup>  
卞益同<sup>1</sup> 石峰<sup>4</sup> 路志强<sup>4</sup>  
杨健<sup>1,\*</sup>

- 1.西安交通大学第一附属医院医学影像科 (陕西 西安 710061)
- 2.西安交通大学第一附属医院榆林医院影像中心 (陕西 榆林 719000)
- 3.榆林市第一医院 (陕西 榆林 719000)
- 4.上海联影智能医疗科技有限公司 (上海 200232)

**【摘要】目的** 本研究旨在探讨创伤性颅脑损伤(TBI)后深部灰质核团(尾状核、苍白区、壳核、伏隔核、丘脑)体积变化与认知功能的关系。**方法** 收集2016年01月至2020年12月期间急性TBI患者35例及健康志愿者28例,基于3D-T1WI利用联影图像分析工具获得尾状核、苍白区、壳核、伏隔核、丘脑灰质体积(CV),采用单因素方差分析进行组间比较,同时采用Pearson相关分析CV与外伤后6月简易智能精神状态量表(MMSE)的相关性。**结果** 与对照组相比,认知障碍组(认知+)双侧尾状核、苍白区、壳核、丘脑及伏隔核的体积(CV)均减小,其中双侧丘脑体积缩小( $CV_{左}=6.791\pm 1.08\text{cm}^3$ ,  $P_{左}=0.008$ ;  $CV_{右}=6.498\pm 1.2\text{cm}^3$ ,  $P_{右}=0.002$ )与MMSE评分呈正相关( $r_{左}=0.316$ ,  $P_{左}=0.014$ ;  $r_{右}=0.306$ ,  $P_{右}=0.018$ ),且与记忆力( $r_{左}=0.348$ ,  $P_{左}=0.006$ ;  $r_{右}=0.357$ ,  $P_{右}=0.005$ )、注意力( $r_{左}=0.362$ ,  $P_{左}=0.004$ ;  $r_{右}=0.361$ ,  $P_{右}=0.005$ )、语言能力( $r_{左}=0.417$ ,  $P_{左}=0.001$ ;  $r_{右}=0.418$ ,  $P_{右}=0.001$ )下降相关;认知正常组(认知-)仅左侧尾状核和右侧壳核体积减小,但组间无统计学差异。认知-组与认知+组比较:右侧丘脑体积差异显著( $P<0.05$ ),表明右侧丘脑萎缩可能是区分认知障碍的关键指标。**结论** TBI后丘脑体积缩小可能通过破坏基底神经节-丘脑-皮层环路,导致认知功能下降。丘脑体积可作为评估TBI后遗症期认知障碍的影像学标志物,为临床康复治疗提供新方向。

**【关键词】** 创伤性脑损伤; 深部灰质核团; 丘脑; 认知功能

**【中图分类号】** R651.1+5

**【文献标识码】** A

**【基金项目】** 陕西省重点研发计划项目

(2024SF-ZDCYL-01-01)、

国家自然科学基金委员会地区项目

(82360317)、榆林市科技计划项目

(2024-SF-012)

DOI:10.3969/j.issn.1672-5131.2025.11.001

## The Relationship between Structural Changes in the Deep Gray Matter Nuclei and Cognitive Function Following Traumatic Brain Injury\*

CHEN Miao-miao<sup>1,2</sup>, LI Xian-jun<sup>1</sup>, HUI Zhao-yuan<sup>2</sup>, ZHU Zhi-min<sup>2</sup>, LI Hua<sup>3</sup>, JIA Zhe<sup>2</sup>, BIAN Yi-tong<sup>1</sup>, SHI Feng<sup>4</sup>, LU Zhi-qiang<sup>4</sup>, YANG Jian<sup>1,\*</sup>

- 1.Department of Medical Imaging, The First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, Shaanxi Province, China
- 2.Image Center, Yulin Hospital, the First Affiliated Hospital of Xi'an Jiaotong University, Yulin 719000, Shaanxi Province, China
- 3.The First Hospital of Yulin, Yulin 719000, Shaanxi Province, China
- 4.United Imaging Intelligence Co.,Ltd., Shanghai 200232, China

## ABSTRACT

**Objective** This study aims to explore the relationship between volumetric changes in deep gray matter nuclei (caudate nucleus, globus pallidus, putamen, nucleus accumbens, and thalamus) and cognitive function following traumatic brain injury (TBI). **Methods** A total of 35 acute TBI patients and 28 healthy volunteers were enrolled from January 2016 to December 2020. The gray matter volumes (CV) of the caudate nucleus, globus pallidus, putamen, nucleus accumbens, and thalamus were obtained using 3D-T1WI sequences and analyzed via United Imaging's uAI image analysis tool. Group comparisons were performed using one-way ANOVA, and Pearson correlation analysis was conducted to assess the relationship between CV and Mini-Mental State Examination (MMSE) scores at 6 months post-injury. **Results** Compared to the control group, the cognitive impairment group (cognitive+) exhibited reduced volumes (CV) in bilateral caudate nucleus, globus pallidus, putamen, thalamus, and nucleus accumbens. Specifically, bilateral thalamic volume reduction ( $CV_{L}=6.791\pm 1.08\text{cm}^3$ ,  $P_{L}=0.008$ ;  $CV_{R}=6.498\pm 1.2\text{cm}^3$ ,  $P_{R}=0.002$ ) was positively correlated with lower Mini-Mental State Examination (MMSE) scores ( $r_{L}=0.316$ ,  $P_{L}=0.014$ ;  $r_{R}=0.306$ ,  $P_{R}=0.018$ ) and associated with declines in memory ( $r_{L}=0.348$ ,  $P_{L}=0.006$ ;  $r_{R}=0.357$ ,  $P_{R}=0.005$ ), attention ( $r_{L}=0.362$ ,  $P_{L}=0.004$ ;  $r_{R}=0.361$ ,  $P_{R}=0.005$ ), and language abilities ( $r_{L}=0.417$ ,  $P_{L}=0.001$ ;  $r_{R}=0.418$ ,  $P_{R}=0.001$ ). In contrast, the cognitively normal group (cognitive-) only showed reduced volumes in the left caudate nucleus and right putamen, with no statistically significant differences compared to the control group. Comparison between the cognitive- and cognitive+ groups revealed a significant difference in right thalamic volume ( $P<0.05$ ), indicating that right thalamic atrophy may serve as a critical biomarker for distinguishing cognitive impairment. **Conclusion** Thalamic volume reduction following TBI may disrupt the basal ganglia-thalamo-cortical circuit, leading to cognitive decline. Thalamic volume could serve as an imaging biomarker for assessing cognitive impairment in the chronic phase of TBI, providing new directions for clinical rehabilitation strategies.

**Keywords:** Traumatic Brain Injury; Deep Gray Matter Nuclei; Thalamus; Cognitive Function

创伤性颅脑损伤(traumatic brain injury, TBI)是一项全球性的公共卫生问题,其致死致残率居于高位,是阿尔茨海默病、血管性痴呆和其他类型痴呆症的危险因素,因此给患者及家庭带来沉重的经济负担,被称为“沉默的流行病”。TBI后大脑灰白质结构会发生变化,基底神经节-丘脑-皮层环路存在连接的改变,其连通性直接影响认知功能。以往文献并未用此环路灰质核团的结构形态变化来评估后遗症期认知功能,由此利用磁共振3D-T1WI序列无创检测大脑尾状核、苍白区、壳核、伏隔核及丘脑体积变化,进一步探讨其与认知功能之间的关系,为早期筛查及认知功能精准性治疗提供新思路及影像学证据<sup>[1]</sup>。

## 1 资料与方法

**1.1 研究对象** 收集西安交通大学第一附属医院榆林医院2016年1月至2020年12月期间急性脑外伤住院患者,所有人均行西门子Spectra3.0T头颅MRI 3D-T1WI扫描。

纳入标准:急性脑外伤,且无手术史;入院后行格拉斯昏迷评分量表(Glasgow coma scale, GCS)评定及头颅MRI检查;TBI后6个月对受试者行简易智力状态检查量表(mini-mental state examination, MMSE)测试及随访。排除标准:本次外伤前存在认知功能障碍,患有精神疾病、意识障碍、癫痫;有乙醇滥用史;患有恶性肿瘤、冠心病、肝硬化等重大疾病。

按照纳入及排除标准共收入35例患者,同时遵照排除标准纳入年龄、性别等与病组相仿的健康志愿者28例。所有受试者均被告知实验目的及注意事项,并签署知情同意书。此研究获本院伦理委员会批准。

**1.2 研究方法** 根据MMSE评分,将27-30分设定为认知正常组(认知-), <27分设定为认知障碍组(认知+)。

所有受试者均行西门子Spectra 3.0T MRI检查,采用12通道头线圈扫描,嘱受试者去除周身金属异物及活动性义齿行仰卧位头先进扫描。选用序列为轴位3D-T1WI,

**【第一作者】** 陈苗苗,女,副主任医师,主要研究方向:主要中枢神经系统及腹部MRI诊断。E-mail: 263286419@qq.com

**【通讯作者】** 杨健,男,主任医师,主要研究方向:脑发育与损伤的MRI评估。E-mail: yj1118@mail.xjtu.edu.cn

参数如下: TR=1900 ms, TE=24 ms, 反转时间(inversion time)=900 ms, 反转角(flip angle, FA)=9°, FOV=250 mm×250 mm, 矩阵=256×256, 层厚=1 mm, 层数=192。

**1.3 图像分析** 所有的图像采用uAI图像分析工具(上海联影智能医疗科技有限公司)<sup>[2]</sup>进行处理。主要预处理包括偏置校正、颅骨剥离和组织分割<sup>[3]</sup>, 获得感兴趣区包括尾状核、苍白区、壳核、伏隔核、丘脑双侧10个灰质区域的体积(如图1所示)。

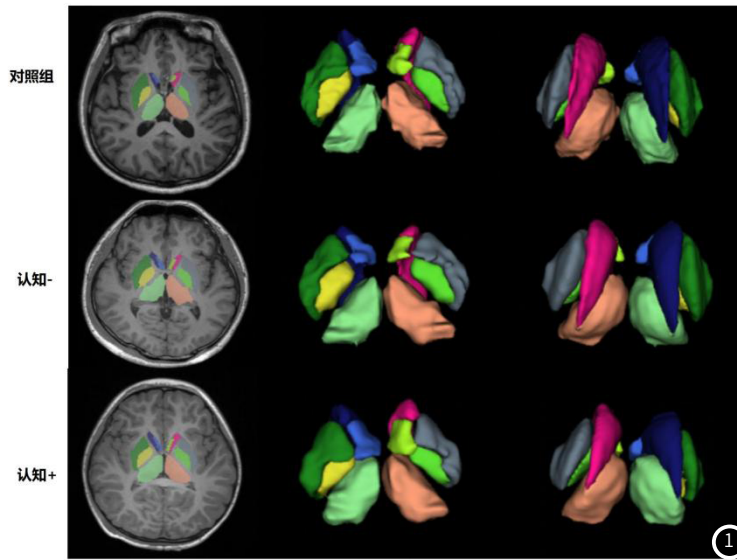


图1 各组感兴趣区基底神经节及丘脑体积分割。

**1.4 统计学分析** 使用SPSS 17.0软件进行统计学分析。呈正态分布的连续变量采用均值(标准差)来描述。多组间比较采用单因素方差分析或单变量分析。两独立样本比较采用t检验。CV与MMSE的相关性采用Pearson相关分析。P<0.05被认为具有统计学意义。

**2.2 认知障碍的深部灰质核团参数均值比较** 认知+组与对照组比较: 认知障碍组(认知+)双侧尾状核、苍白区、壳核、丘脑及伏隔核的体积(CV)均显著减小。其中, 双侧丘脑体积减少具有统计学意义(P<0.05)。

**2 结果**

**2.1 基本资料及人口学分析** 认知-与认知+比较, 年龄有统计学意义; 校正后分析, 与对照组比较, 认知-组及认知+组中年龄、性别无统计学意义; MMSE、定向力、记忆力、注意力和计算力、回忆能力、语言能力有显著差异。(见表1)

认知-组与对照组比较: 认知正常组(认知-)仅左侧尾状核和右侧壳核体积减小, 但组间无统计学差异。值得注意的是, 认知-组中右侧尾状核、双侧苍白球、左侧壳核、双侧丘脑及伏隔核体积反而增大, 可能与年龄较小或代偿机制相关。

认知-组与认知+组比较: 右侧丘脑体积差异显著(P<0.05), 表明右侧丘脑萎缩可能是区分认知障碍的关键指标。(见表2、图2)

表1 研究对象的基本临床资料

项目	对照组(n=28)	认知-(n=13)	认知+(n=22)	F	P
年龄(岁)	42.5(25~53.75)	26.5(21.5~33.25)	46(33~54)	2.165	0.125
性别(男/女)	16(57.1%)/12(42.9%)	8(66.7%)/4(33.3%)	14(66.7%)/7(33.3%)	1.323	0.276
MMSE(分)	29(28.75~30)	29(28~29)	23(20~25)	31.006	0.000*
定向力	8.35(9~10)	9(9~10)	9(8~9)	11.017	0.000*
记忆力	3(3~3)	3(3~3)	3(2~3)	4.831	0.005*
注意力和计算力	5(5~5)	5(4~5)	3(3~4)	16.841	0.000*
回忆能力	3(3~3)	3(3~3)	1(1~2)	60.110	0.000*
语言能力	9(9~9)	9(9~9)	7(5~8)	45.498	0.000*
GCS n(%)				23.051	0.000*
正常	28(100%)	-	-	-	-
轻中度	-	13(37.1%)	-	-	-
重度	-	-	22(62.9%)	-	-

注\*: P<0.05。

**2.3 各感兴趣区与MMSE的相关性分析** CV与MMSE呈正相关, 有统计学差异区域为: 双侧壳核、丘脑、右侧伏隔核。其中左侧壳核CV与定向力呈正相关, 左侧尾状核、双侧壳核、丘脑CV与注

意力及回忆力呈正相关, 双侧壳核、丘脑、伏隔核CV与语言能力呈正相关。(见图3、表3)

表2 各感兴趣区深部灰质核团体积均值比较

	对照组(cm <sup>3</sup> )	认知-(cm <sup>3</sup> )	认知+(cm <sup>3</sup> )	F	P
尾状核_L	3.351±0.527	3.27±0.466	2.959±0.564	3.167	0.05
尾状核_R	3.366±0.53	3.435±0.502	3.109±0.66	1.587	0.213
苍白球_L	1.758±0.216	1.813±0.284	1.676±0.36	0.968	0.386
苍白球_R	1.863±0.228	1.923±0.294	1.789±0.413	0.737	0.483
壳核_L	4.909±0.737	4.932±0.807	4.381±0.858	2.899	0.063
壳核_R	4.926±0.699	4.924±0.753	4.282±0.99	3.999	0.024*
丘脑_L	7.610±0.773	7.739±1.113	6.791±1.08	5.236	0.008*
丘脑_R	7.372±0.748	7.583±0.844	6.498±1.207	6.703	0.002*
伏隔核_L	0.476±0.138	0.496±0.191	0.415±0.128	1.388	0.258
伏隔核_R	0.513±0.132	0.561±0.169	0.462±0.138	1.844	0.168

注\*: P<0.05。

表3 深灰质核团体积与MMSE相关性分析

	MMSE		定向力		记忆力		注意力		回忆力		语言能力	
	r	P	r	P	r	P	r	P	r	P	r	P
尾状核_L	0.233	0.073	0.232	0.074	0.084	0.521	0.271	0.036*	0.310	0.016*	0.250	0.054
尾状核_R	0.118	0.369	0.145	0.270	-0.017	0.897	0.183	0.161	0.233	0.074	0.176	0.179
苍白球_L	-0.017	0.896	0.197	0.131	-0.116	0.377	0.122	0.354	0.090	0.496	0.080	0.543
苍白球_R	0.112	0.393	0.212	0.104	0.106	0.422	0.189	0.149	0.149	0.255	0.135	0.304
壳核_L	0.287	0.026*	0.272	0.036*	0.142	0.280	0.334	0.009*	0.345	0.007*	0.360	0.005*
壳核_R	0.304	0.018*	0.224	0.086	0.175	0.180	0.389	0.002*	0.365	0.004*	0.333	0.009*
丘脑_L	0.316	0.014*	0.203	0.120	0.151	0.248	0.362	0.004*	0.348	0.006*	0.417	0.001*
丘脑_R	0.306	0.018*	0.246	0.058	0.104	0.429	0.361	0.005*	0.357	0.005*	0.418	0.001*
伏隔核_L	0.220	0.091	0.204	0.119	0.163	0.215	0.181	0.166	0.202	0.121	0.256	0.048*
伏隔核_R	0.269	0.038*	0.208	0.111	0.226	0.083	0.243	0.062	0.211	0.106	0.306	0.018*

注\*: P<0.05。

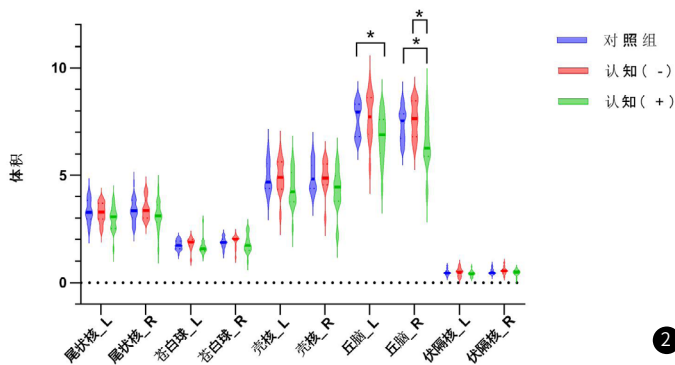
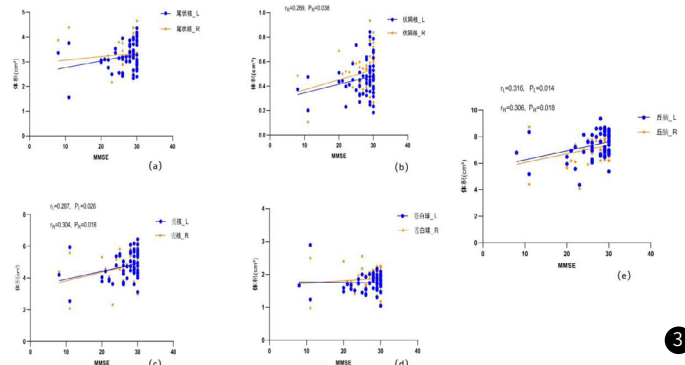


图2 感兴趣区深部灰质核团体积均值比较。图3 深部灰质核团体积与MMSE相关性分析。



### 3 讨论

TBI发生后, 神经元丢失、凋亡<sup>[1]</sup>, 脑组织水肿, 神经炎性改变, 低氧低灌注, 甚至发生华勒氏变性, 大脑灰白质体积变小。笔者发现急性TBI后尾状核、壳核、苍白区、伏隔核、丘脑体积减少, 但是只有丘脑体积的缩小与MMSE呈正相关, 也就是说丘脑体积缩小与后遗症期认知障碍相关。

既往研究<sup>[4-5]</sup>表明健康国人深部灰质核团体积范围分别约7~10.5cm<sup>3</sup>(丘脑)、4.0~5.2cm<sup>3</sup>(尾状核)、2.0~3.6cm<sup>3</sup>(苍白球)、

3.5~5.2cm<sup>3</sup>(壳核)、0.8~1.6cm<sup>3</sup>(伏隔核), 在最初的几年CV明显增加, 其中基底神经节结构(尾状核、苍白球、壳核、伏隔核)12~14岁达到峰值, 其次是丘脑约19岁达峰值, 随后CV随年龄增长呈线性或非线性降低<sup>[6]</sup>。本组受试者年龄段为16-68岁, 与健康国人数据比较, 笔者发现丘脑CV在认知+组减少, 认知-和对照组在正常范围内; 尾状核、苍白球和伏隔核CV在各组中均减少; 壳核CV在正常范围内; 与以往文献一致, 大多数受试者深部灰质

CV随年龄增长会发生不同程度减少,校正后无统计学差异。但是在认知-组中右侧尾状核、双侧苍白球、左侧壳核、双侧丘脑及伏隔核CV较对照组增大,可能是因为认知-组内年龄段较其他两组年龄小,故体积下降速度缓慢。男性深部灰质体积较女性占比大,但性别在各组间无统计学差异,说明男女性别深部灰质核团体积缩小具有相同下降轨迹。TBI严重程度与全脑或局部脑组织萎缩相关<sup>[7-8]</sup>,本研究结果与文献一致。

基底神经节-丘脑-皮层环路是大脑中一条重要的神经通路,负责调节运动控制、认知功能和情感反应。Rostowsky等<sup>[9]</sup>、吴迪等<sup>[10]</sup>学者观察到慢性TBI丘脑与皮层之间存在精确双向连接,丘脑作为中继站将信息向皮层及基底神经节结构双向投射,参与认知调控。主要与认知相关的脑区有额中回、颞中回、丘脑、基底节区(优势侧供血)<sup>[11-13]</sup>,其中丘脑、下丘脑、额叶萎缩与认知功能下降密切相关<sup>[14-15]</sup>。Meysami S等发现TBI后神经元数量减少,髓鞘周围淀粉样物质沉积,主要见于额顶叶皮质、纹状体、苍白球、丘脑和脑桥基底部<sup>[16-17]</sup>,发生神经纤维缠结,兴奋性降低,皮层与皮层下神经核连通性降低,执行力下降。同时,TBI后继发性损伤加速 $\beta$ -淀粉样蛋白(A $\beta$ )的积累<sup>[18-20]</sup>,影响认知功能的水平<sup>[21]</sup>。笔者发现,本组研究结果与文献一致,TBI后尾状核、苍白球、壳核、丘脑、伏隔核体积均缩小,左侧尾状核CV与注意力和回忆力呈正相关,双侧壳核、丘脑CV与回忆力、注意力、语言能力呈正相关,左侧壳核CV与定向力呈正相关,双侧伏隔核CV与语言能力呈正相关;所测深部核团与记忆力关联不大,因为记忆力主要与海马相关。但是只有丘脑的变化与认知障碍相关,主要表现为回忆力、注意力和语言能力的降低,且具有统计学差异,可能的原因为丘脑特殊的中转性能,连通皮层与基底神经节之间的信息传递。由此认知障碍与基底神经节-丘脑-皮层环路的完整性及核团体积缩小息息相关,而且为多种神经疾病的治疗提供了新的思路<sup>[22]</sup>。

目前最常用的脑体积测量自动分割技术有FreeSurfer、FSL(FMRIB Software Library)和联影(United Imaging)三种。FreeSurfer分割高精度,但耗时长,对图像质量要求高,学习门槛高<sup>[23-24]</sup>;FSL适用于大规模队列研究,对亚皮层小结构分割不精确,需要手动优化,学习成本高<sup>[25-26]</sup>;联影是针对中国人群的脑影像数据进行的算法优化,操作简单,处理速度分钟级,适用于临床<sup>[2]</sup>,由此本实验选择联影自动分割技术。

本研究样本量不大,可能会产生偏倚,更大的样本量将提供更强的可靠性;本组受试者损伤部位多样,可能弱化深部灰质的影响,也能反映出在TBI发生后,皮层受到的剪切力和对冲力大于深部灰质,深部核团损伤轻一些;在认知-及认知+组间年龄因素影响认知改变,在本组中进行校正后显示无差异。

总之,本研究发现急性TBI后丘脑体积缩小,影响基底神经节-丘脑-皮层环路的连通性,降低认知功能,可评价TBI后认知功能,作为的影像学评估指标,有助于制订合理的康复治疗方,延缓TBI后遗症期认知障碍的发生,提高患者的幸福感。

## 参考文献

- [1] 陈苗苗,李华,张玉利,等.基于DTI对轻中重度对脑创伤白质改变及其与康复期认知功能相关性的量化评估[J].中国CT和MRI杂志,2020,8(10):1-4.
- [2] Wu J, Xia Y, Wang X, et al. uRP: an integrated research platform for one-stop analysis of medical images[J]. Front Radiol, 2023, 3: 1153784.
- [3] Rodrigo Santa Cruz, Léo Lebrat, Darren Fu, et al. CorticalFlow++: boosting cortical surface reconstruction accuracy, regularity, and interoperability[C]. International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (2022).
- [4] Li S, et al. Age-related changes in brain structures of healthy Chinese adults: a voxel-based morphometry study[J]. NeuroImage, 2014, 84: 320-332.
- [5] Zhou Y, et al. Volumetric changes in subcortical structures across the lifespan: A cross-sectional study in healthy Chinese individuals[J]. Frontiers in Aging Neuroscience, 2018, 10: 123.
- [6] Narvacan K, Treit S, Camicioli R, et al. Evolution of deep gray matter volume across the human lifespan[J]. Hum Brain Mapp, 2017, 38(8): 3771-

3790.

- [7] Boone DR, Weisz HA, Willey HE, et al. Traumatic brain injury induces long-lasting changes in immune and regenerative signaling[J]. PLoS One, 2019, 14(4): e0214741.
- [8] Hong Y T, Veenith T, Dewar D, et al. Amyloid imaging with carbon 11-labeled Pittsburgh compound B for traumatic brain injury[J]. JAMA neurology, 2014, 71(1): 23-31.
- [9] Rostowsky KA, Irimia A; Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative. Acute cognitive impairment after traumatic brain injury predicts the occurrence of brain atrophy patterns similar to those observed in Alzheimer's disease[J]. Geroscience, 2021, 43(4): 2015-2039.
- [10] 吴迪, 许凤燕, 孙亮, 等. 外伤性脑损伤诱发阿尔茨海默病的相关机制研究进展[J]. 卒中与神经疾病, 2019, 26(3): 381-384.
- [11] Leunissen I, Coxon JP, Caeyenberghs K, et al. Subcortical volume analysis in traumatic brain injury: the importance of the fronto-striato-thalamic circuit in task switching[J]. Cortex, 2014, 51: 67-81.
- [12] 王俊. 中国卒中后认知障碍防治研究专家共识[J]. 中国卒中杂志, 2020, 02: 158-166.
- [13] 王毅, 耿德勤, 郭欣怡, 等. 静息态功能磁共振成像在血管性认知障碍中的应用进展[J]. 慢性病学杂志, 2022, 23(1): 8-11.
- [14] Xue Q, Wang L, Zhao Y, et al. Cortical and Subcortical Alterations and Clinical Correlates after Traumatic Brain Injury[J]. J Clin Med, 2022, 11(15): 4421.
- [15] Meysami S, Raji CA, Merrill DA, et al. MRI volumetric quantification in persons with a history of traumatic brain injury and cognitive impairment[J]. J Alzheimers Dis, 2019, 72(1): 293-300.
- [16] 许春燕, 陈淑芬, 孙云阁, 等. 皮质基底节综合征患者临床及影像学特点分析[J]. 中华神经科杂志, 2022, 55(06): 626-633.
- [17] Tsai ST, Chen SY, Lin SZ, et al. Rostral intralaminar thalamic deep brain stimulation ameliorates memory deficits and dendritic regression in  $\beta$ -amyloid-infused rats[J]. Brain Struct Funct, 2020, 225(2): 751-761.
- [18] Smith D H, Johnson V E, Stewart W. Chronic neuropathologies of single and repetitive TBI: substrates of dementia? [J]. Nature reviews Neurology, 2013, 9(4): 211-221.
- [19] Levine B, Kovacevic N, Nica E I, et al. The Toronto traumatic brain injury study: injury severity and quantified MRI[J]. Neurology, 2008, 70(10): 771-8.
- [20] 刘溪林, 周梦良, 江晓春, 等. 创伤性脑损伤后认知功能障碍的研究进展[J]. 创伤外科杂志, 2020, 22(10): 791-792, 797.
- [21] 尚劲, 刘杨颖秋, 王微微. Alzheimer病患者脑内扩大的血管周围间隙的临床意义[J]. 中国临床医学影像杂志, 2017, 06: 387-390.
- [22] Tsai ST, Chen LJ, Wang YJ, et al. Rostral intralaminar thalamic deep brain stimulation triggered cortical and hippocampal structural plasticity and enhanced spatial memory[J]. Stereotact Funct Neurosurg, 2016, 94(2): 108-117.
- [23] Fischl B. FreeSurfer. NeuroImage, 2012, 62(2), 774-781.
- [24] Iglesias JE, Augustinack JC, Nguyen K, et al. A computational atlas of the hippocampal formation using ex vivo, ultra-high resolution MRI[J]. NeuroImage, 2015, 115: 117-137.
- [25] Jenkinson M, Beckmann CF, Behrens TE, et al. FSL[J]. NeuroImage, 2012, 62(2): 782-790.
- [26] Patenaude B, Smith SM, Kennedy DN, et al. A Bayesian model for subcortical brain segmentation[J]. NeuroImage, 2011, 56(3): 907-922.

(收稿日期: 2025-03-02)

(校对编辑: 姚丽娜)