

Advances in Magnetic Resonance Imaging Research on Adolescent Non-suicidal Self-injury

LIANG Zhen¹, ZHONG Shuting¹, XU Ying¹, HUANG Yi², ZHANG Li¹, HUANG Gan¹, ZHOU Yongjie^{3*}

(1. School of Biomedical Engineering, Health Science Center, Shenzhen University, Shenzhen 518037, China; 2. Department of Psychology, Lingnan University, Hong Kong NT37, China; 3. Department of Child Health, Shenzhen Maternal and Child Health Hospital, Shenzhen 518028, China)

Abstract: Non-suicidal self-injury (NSSI) is a common high-risk behavior among adolescents and is closely associated with emotion regulation difficulties, increased suicide risk, and a range of psychiatric disorders. In recent years, advances in magnetic resonance imaging (MRI) have provided important tools for elucidating the neurobiological mechanisms underlying adolescent NSSI. This review summarizes neuroimaging evidence related to adolescent NSSI, with a focus on structural magnetic resonance imaging (sMRI) and functional magnetic resonance imaging (fMRI) studies. Existing evidence suggests that adolescents with NSSI show gray matter structural abnormalities and impaired white matter integrity in the anterior cingulate cortex, insula, frontal and temporal regions, as well as reward-related brain areas. Resting-state and task-based fMRI studies have further identified abnormal functional connectivity and neural activation in brain networks associated with emotion processing, pain regulation, reward processing, social cognition, and executive control. In addition, multimodal studies suggest that disrupted structure-function coupling may represent an important neural mechanism of NSSI. However, current research is limited by relatively small sample sizes, the predominance of cross-sectional designs, difficulties in controlling for psychiatric comorbidities, and substantial heterogeneity in analytical methods. Future studies should employ large-scale, multicenter, longitudinal, and multimodal approaches to identify stable and reliable neuroimaging biomarkers, thereby providing a neurobiological basis for the early identification, risk assessment, and precision intervention of adolescent NSSI.

Highlights:

1. Structural MRI consistently reveals gray matter volume reductions and white matter microstructural damage in fronto-limbic circuits, including the anterior cingulate cortex, insula, and uncinate fasciculus, in adolescents with NSSI.
2. Resting-state and task-based fMRI demonstrate convergent abnormalities across four core brain networks—emotion regulation, reward processing, pain modulation, and default mode networks—suggesting NSSI as a multi-network dysfunction rather than a focal deficit.
3. Multimodal structure-function coupling analyses identify disrupted integration between structural connectivity and functional activity within fronto-limbic and default mode circuits, pointing to a potential core neural mechanism of NSSI.

Key words: non-suicidal self-injury (NSSI); adolescent mental health; magnetic resonance imaging (MRI); structural MRI (sMRI); functional MRI (fMRI); neuroimaging

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No.62522608); Guangdong Provincial Project (No.2024TQ08X330); Science and Technology Innovation 2030—Major Projects (No. 2021ZD0200500); Shenzhen-Hong Kong Institute of Brain Science-Shenzhen Basic Research Institution Program (No.2023SHIBS0003); Shenzhen Science and Technology Program (Nos.JCYJ20241202124222027 and JCYJ20241202124209011); Medical-Engineering Interdisciplinary Research Foundation of Shenzhen University (No.2024YG008); Hunan Provincial Key Research and Development Program (No.2025QK3008).

Received: 2026-06-03; **Revised:** 2026-07-10

***Corresponding author, E-mail:** qingzhu1108@126.com.

青少年非自杀性自伤的磁共振成像研究进展

梁臻¹, 钟书婷¹, 徐颖¹, 黄怡², 张力¹, 黄淦¹, 周勇杰³

(1. 深圳大学医学部生物医学工程学院, 深圳 518037; 2. 香港岭南大学心理学系, 香港 NT37; 3. 深圳市妇幼保健院儿童健康科, 深圳 518028)

摘要: 非自杀性自伤 (Non-suicidal self-injury, NSSI) 是青少年常见的高危行为, 与情绪调节障碍、自杀风险增加及多种精神障碍密切相关。近年来, 磁共振成像 (Magnetic resonance imaging, MRI) 技术的发展为揭示青少年 NSSI 的神经生物学机制提供了重要手段。本文围绕结构磁共振成像 (Structural magnetic resonance imaging, sMRI) 与功能磁共振成像 (Functional magnetic resonance imaging, fMRI) 研究, 对青少年 NSSI 相关神经影像学证据进行综述。现有研究表明, NSSI 青少年在前扣带回、岛叶、额叶、颞叶及奖赏相关脑区存在灰质结构异常和白质纤维完整性受损; 静息态及任务态 fMRI 研究进一步发现, 其在情绪加工、疼痛调节、奖赏处理、社交认知及执行控制相关脑网络中存在功能连接和激活异常。此外, 多模态研究提示结构-功能耦合异常可能是 NSSI 的重要神经机制之一。当前研究仍存在样本量较小、横断面设计较多、共病影响难以控制及分析方法异质性较大等问题。未来需进一步开展大样本、多中心、纵向随访及多模态融合研究, 以探索稳定可靠的影像学标志物, 为青少年 NSSI 的早期识别、风险评估及精准干预提供神经生物学依据。

关键词: 非自杀性自伤; 青少年精神健康; 脑磁共振成像; 结构磁共振成像; 功能磁共振成像; 神经影像学

中图分类号: R749.94

文献标志码: A

引用格式: 梁臻, 钟书婷, 徐颖, 等. 青少年非自杀性自伤的磁共振成像研究进展[J]. 数据采集与处理, 2026, 41(4): 946-965. LIANG Zhen, ZHONG Shuting, XU Ying, et al. Advances in magnetic resonance imaging research on adolescent non-suicidal self-injury[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2026, 41(4): 946-965.

引言

非自杀性自伤 (Non-suicidal self-injury, NSSI) 指个体在缺乏自杀意图的情况下, 有意损伤自身身体组织的行为^[1-2], 常见形式包括抓挠、敲打、灼烧、切割及延缓伤口愈合等^[3-4]。青少年是 NSSI 的高发人群, 据系统综述显示, 全球约 17%~18% 青少年在一生中至少经历过一次 NSSI^[5], 发病高峰多在 15~17 岁^[6]。在非临床样本中, 青少年的患病率为 17.2%, 青壮年为 13.4%, 成年人为 5.5%^[1]。NSSI 不仅高发, 还常被视为自杀行为的预警信号^[7-8], 而自杀是青少年死亡的第二大原因^[9]。因此, 深入解析青少年 NSSI 的神经机制, 对于自杀预防及精神健康干预具有重要指导意义。

磁共振成像 (Magnetic resonance imaging, MRI) 是一种重要的无创性神经影像技术, 可利用强磁场和射频脉冲获取高分辨率脑结构与功能图像^[10]。MRI 基于氢原子在磁场中的共振特性, 能够清晰显示脑灰质、白质及脑脊液等软组织结构, 在脑科学研究中具有显著优势^[11]。与 X 线或计算机断层扫描相

基金项目: 国家自然科学基金 (62522608); 广东省项目 (2024TQ08X330); 国家科技重大专项 (2021ZD0200500); 深港脑科学创新研究院-深圳市基础研究机构项目 (2023SHIBS0003); 深圳市科技计划项目 (JCYJ20241202124222027, JCYJ20241202124209011); 深圳大学医工交叉研究基金 (2024YG008); 湖南省重点研发计划项目 (2025QK3008)。

收稿日期: 2026-06-03; **修订日期:** 2026-07-10

比,MRI不存在电离辐射风险,更适用于儿童和青少年等需重复随访的人群^[12]。

MRI主要包括结构磁共振成像(Structural MRI,sMRI)和功能磁共振成像(Functional MRI,fMRI)两类。sMRI主要用于评估脑解剖结构特征,包括灰质体积、皮质厚度及白质纤维完整性等,可用于揭示脑结构异常。fMRI则基于血氧水平依赖(Blood oxygen level-dependent,BOLD)信号变化,反映神经活动相关的脑功能状态^[13]。根据实验范式不同,fMRI可进一步分为静息态 fMRI(Resting-state fMRI,rs-fMRI)和任务态 fMRI(Task-based fMRI,task-fMRI)。rs-fMRI通过分析静息状态下脑区间自发低频信号波动,评估脑功能网络的内在连接特征,广泛应用于精神障碍相关功能网络异常研究^[14-15]。task-fMRI则通过在特定任务条件下监测脑区激活变化,揭示情绪加工^[16-17]、疼痛感知^[18-19]、奖赏处理^[20-21]及社交认知^[22-23]等认知与情绪过程相关的神经活动模式。凭借较高的空间分辨率及良好的安全性,MRI已成为研究精神障碍神经生物学机制的重要工具,在青少年NSSI相关脑结构与功能异常研究中具有重要应用价值。

本文首先综述基于sMRI的脑结构研究,包括基于体素与表面形态学分析以及弥散张量成像相关研究,随后总结rs-fMRI与task-fMRI在NSSI情绪加工、疼痛调节、奖赏处理及社交认知等方面的研究进展,进一步讨论结构与功能磁共振成像的耦合研究,最后分析当前研究存在的局限,并对未来研究方向进行展望。

1 结构磁共振成像

sMRI主要用于评估脑解剖结构特征,包括灰质体积、皮质厚度及白质纤维完整性等。结构磁共振成像的常用方法主要包括基于体素的形态学测量(Voxel-based morphometry,VBM)、基于表面的形态学测量(Surface-based morphometry,SBM)及弥散张量成像(Diffusion tensor imaging,DTI),其分析流程及核心指标如图1所示。

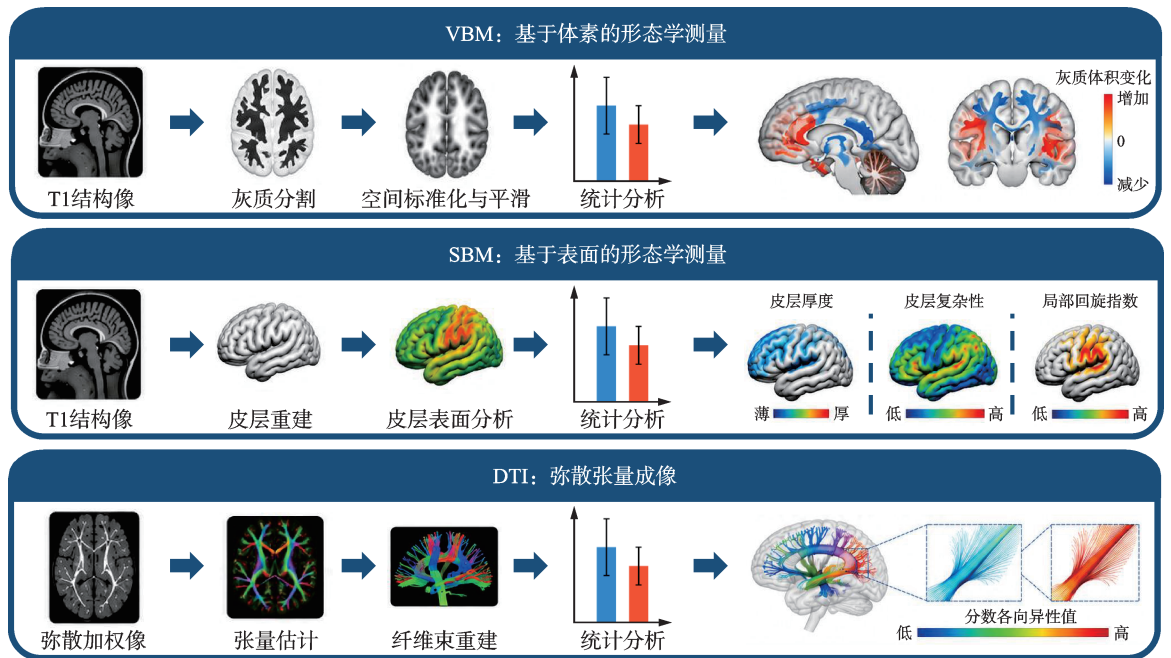


图1 sMRI常用分析方法示意图

Fig.1 Schematic diagram of commonly used analytical methods for sMRI

1.1 基于体素的形态学测量

VBM是一种基于全脑体素水平的结构磁共振成像分析方法,主要用于比较不同群体间灰质体积或密度的差异^[24]。该方法通过对3D-T1WI图像进行空间标准化、灰质分割和平滑等预处理后开展统计分析,可用于评估特定心理或行为表型相关的脑结构异常。

现有VBM研究表明,NSSI青少年在情绪调节与冲动控制相关脑区存在广泛灰质结构异常。Ando等^[25]对29例存在NSSI行为史的青少年女性进行研究发现,与健康对照组相比,NSSI组双侧岛叶及前扣带回(Anterior cingulate cortex, ACC)灰质体积显著减少;其中伴自杀企图史者ACC灰质体积进一步降低,提示ACC结构异常可能参与NSSI相关情绪调节障碍的发生机制。Beauchaine等^[26]对20例NSSI青少年女性开展VBM研究,同样发现其双侧岛叶及右侧额下回灰质体积减小,且岛叶与额下回体积与情绪调节能力呈负相关。由于上述脑区参与情绪控制及冲动抑制,其结构异常可能与NSSI个体情绪不稳定及冲动行为增加有关。此外,Zhang等^[27]研究发现,NSSI青少年的执行功能障碍与ACC代谢异常密切相关,进一步支持了NSSI患者皮质-边缘系统结构异常的观点。Pang等^[28]进一步指出,NSSI青少年左侧岛叶、左侧ACC、左侧壳核及左侧额中回灰质体积均显著减少,而小脑后叶灰质体积增加,提示小脑可能在情绪调节及运动功能中存在代偿性改变。Luo等^[29]基于体素的形态学测量评估灰质体积,并进一步分析青少年抑郁症患者皮质-纹状体环路的结构协方差特征。结果发现,NSSI严重程度显著调节了纹状体、内侧眶额皮层、扣带回及丘脑等区域的结构协方差模式,表现为尾状核及部分奖赏系统相关区域结构协方差增强,而苍白球、壳核及丘脑相关结构协方差降低,提示NSSI可能与奖赏及情绪调节相关脑网络的结构组织异常有关。

总体而言,现有VBM研究一致提示,NSSI青少年在ACC、岛叶、额叶及壳核等与情绪调节、自我控制及决策功能密切相关的脑区存在灰质体积异常。其中,ACC与岛叶异常在不同研究中重复出现,可能是NSSI较为稳定的神经影像学特征;而小脑后叶灰质增加则提示其可能参与NSSI相关功能代偿过程,这些发现为理解NSSI的神经生物学机制提供了重要结构影像学证据。

1.2 基于表面的形态学测量

SBM是一种基于结构磁共振成像数据的脑皮层形态学分析方法^[30-31]。与基于体素的形态学测量不同,SBM通过重建皮层表面模型,对皮质厚度(Cortical thickness, CT)、皮质表面积(Surface area, SA)、局部回旋指数(Local gyrification index, LGI)及皮质复杂性等指标进行定量分析,可更精确地反映脑皮层局部形态学改变^[32]。

Pang等^[28]采用SBM方法对伴NSSI行为的抑郁青少年进行研究发现,与健康对照组相比,NSSI组左侧颞上回、横颞回、中央前回、中央后回及岛盖部皮质厚度增加,而右侧额中回皮质厚度降低。此外,NSSI组右侧额上回及前额中回皮层复杂性下降,左侧岛叶局部回旋指数降低,提示情绪调节及认知控制相关脑区存在发育异常。Xiao等^[33]对伴NSSI行为的青少年边缘型人格障碍(Borderline personality disorder, BPD)患者开展SBM研究发现,其右侧颞上回局部回旋指数降低,且与外部情绪调节能力呈正相关。尽管研究对象主要为BPD患者,但结果提示颞叶皮层折叠异常可能参与NSSI相关情绪调节障碍的形成。Choi等^[34]进一步采用基于表面的分析方法对NSSI青少年进行研究,发现其右侧岛叶沟及左侧颞上沟(Superior temporal sulcus, STS)局部回旋指数升高,而右侧距状裂及左侧顶上沟(Superior parietal sulcus, SPS)局部回旋指数降低。其中,前者可能与焦虑及冲动控制障碍相关,后者则可能与快感缺失有关。该研究提示,NSSI患者可能存在不同脑区皮层折叠发育模式异常,并与临床症状特征相关。此外,Zhao等^[35]研究发现,NSSI青少年右侧扣带峡部皮质厚度显著降低,且该区域皮质厚度与同伴欺凌、童年创伤严重程度及双侧疼痛耐受性呈负相关,提示不良心理社会因素及疼痛低敏感可能与

NSSI青少年的皮层形态异常相关。Huber等^[36]研究发现,在伴NSSI行为者中,双相障碍组右侧尾侧前扣带回皮质厚度显著低于重性抑郁障碍组,且伴NSSI的双相障碍青年自杀企图发生率更高。该结果提示,前扣带回皮质形态异常可能与情绪障碍青年NSSI相关的自杀风险增加有关。

总体而言,现有SBM研究提示,NSSI青少年在岛叶、额叶、颞叶等与情绪调节、自我控制及社会认知相关脑区存在皮质厚度、皮层复杂性及局部回旋指数异常。这些皮层表面形态学改变可能反映了NSSI相关神经发育异常,为进一步理解其神经生物学机制提供了新的结构影像学证据。

1.3 基于弥散张量的磁共振成像

除灰质体积及皮层形态学改变外,白质微结构异常也是NSSI结构影像学研究的重要方向。DTI是一种用于评估白质纤维束微结构完整性的磁共振成像技术^[37],其通过测量水分子在组织中的扩散特性,间接反映神经纤维束的方向性与完整性。常用指标包括分数各向异性(Fractional anisotropy, FA)和平均扩散率(Mean diffusivity, MD)。其中,FA反映水分子扩散方向的一致性,常用于评估白质纤维束完整性;MD则反映水分子整体扩散程度^[38]。近年来,DTI研究逐渐揭示NSSI患者在情绪调节相关白质通路中的微结构异常。

Westlund Schreiner等^[39]采用全脑DTI分析,对13~21岁NSSI青少年及年轻成人的白质微结构进行研究。结果发现,与健康对照组相比,NSSI组在钩状束、扣带束、双侧上下纵束、丘脑前辐射、胼胝体及皮质脊髓束等多条白质纤维束中广义分数各向异性(Generalized fractional anisotropy, GFA)显著降低。进一步分析显示,在控制抑郁症状后,钩状束及左侧扣带束GFA降低程度仍与NSSI行为持续时间及冲动性水平相关,提示白质完整性受损可能参与NSSI行为的发生与维持。此外,Westlund Schreiner等^[40]基于青少年脑认知发展研究队列进行2年随访发现,基线左侧扣带束旁嗅区GFA降低及负性急迫性升高与后续新发NSSI相关,且该关联存在性别差异。该研究提示,白质微结构异常与冲动性特征可能是青少年NSSI发生的前瞻性风险因素。Hu等^[41]采用基于纤维束的空间统计(Tract-based spatial statistics, TBSS)及感兴趣区分析,对伴或不伴NSSI行为的抑郁症患者进行比较研究。结果显示,伴NSSI行为的抑郁症患者左侧背侧扣带束FA显著降低。由于扣带束在前额叶-边缘系统情绪调节环路中具有重要作用,该结果进一步支持了NSSI与情绪调节网络结构异常相关的观点,并提示扣带束完整性可能成为识别伴NSSI行为抑郁患者的潜在影像学指标。Chen等^[42]采用弥散张量成像对未用药NSSI青少年进行研究发现,与健康对照组相比,NSSI组右侧尾状核与右侧嗅皮层、内侧眶额上回及杏仁核之间的白质结构连接增强。治疗后复查显示,白质网络改变主要涉及前额叶、左侧海马旁回及左侧枕中回等区域,提示NSSI青少年可能存在以前额叶和边缘系统相关区域为主的白质结构连接异常。

总体而言,现有DTI研究提示,NSSI患者存在广泛白质微结构异常,主要累及与情绪调节、冲动控制及认知加工相关的白质纤维束。FA或GFA降低是较为一致的研究发现,并与NSSI行为严重程度、持续时间及情绪调节障碍密切相关。这些结果表明,白质连接异常可能是NSSI的重要神经生物学基础之一。

2 功能磁共振成像

2.1 静息态功能磁共振成像

rs-fMRI是一种在无特定任务刺激条件下记录大脑BOLD信号波动的功能影像技术。rs-fMRI主要反映脑区间低频自发神经活动的时间同步性,可用于评估大脑内在功能网络的组织模式及功能连接特征。由于其无需复杂任务配合,尤其适用于儿童及青少年精神障碍研究。

通过分析不同脑区 BOLD 信号的时间相关性及频谱特征,rs-fMRI 能够揭示脑功能网络之间的协同活动模式以及局部脑区的自发活动强度。目前,rs-fMRI 在 NSSI 研究中的常用分析方法主要包括功能连接(Functional connectivity, FC)分析、独立成分分析(Independent component analysis, ICA)、低频振荡振幅(Amplitude of low-frequency fluctuation, ALFF)分析及图论分析,如图 2 所示。上述方法分别从脑区间功能协同、功能网络组织、自发神经活动及脑网络拓扑结构等不同层面,对 NSSI 相关脑功能异常进行刻画,为理解其神经生物学机制提供了重要依据。

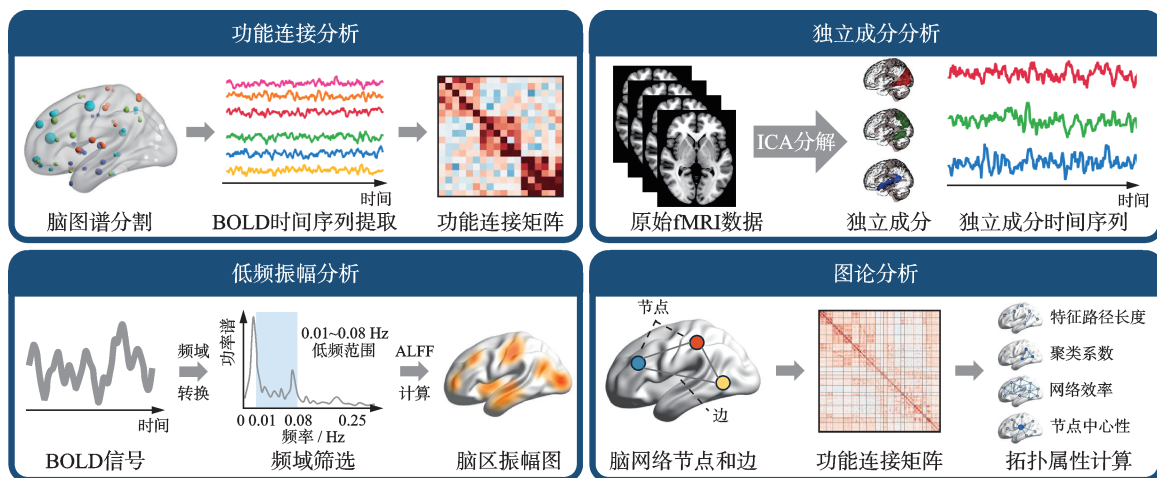


图 2 静息态 fMRI 常用分析方法示意图

Fig.2 Schematic diagram of commonly used analytical methods for rs-fMRI

2.1.1 功能连接分析

FC 分析是静息态功能磁共振成像研究中最常用的方法之一,其通过评估不同脑区 BOLD 信号时间序列之间的相关性,反映脑区间的功能协同模式^[15]。rs-fMRI 无需特定任务参与,能够较稳定地捕捉自发神经活动特征,因此广泛应用于精神障碍相关脑网络异常研究。在 NSSI 研究中,FC 分析主要用于探讨情绪调节、冲动控制、奖赏加工及社会认知相关脑网络的功能异常。

现有研究表明,NSSI 青少年在边缘系统及前额叶调控网络中存在显著功能连接异常。Westlund Schreiner 等^[43]采用静息态 fMRI 研究发现,NSSI 青少年杏仁核与辅助运动区(Supplementary motor area, SMA)及双侧背侧前扣带回功能连接增强,而与额极及颞叶区域功能连接减弱,提示其情绪调节及行为控制相关脑环路异常。Huang 等^[44]比较伴或不伴 NSSI 行为的抑郁青少年发现,NSSI 组右侧梭状回与默认模式网络(Default mode network, DMN)核心区域,包括后扣带回及内侧前额叶皮层之间的功能连接增强,而与背外侧前额叶皮层(Dorsolateral prefrontal cortex, dlPFC)的连接减弱,提示视觉加工网络与情绪调节网络之间可能存在功能失衡。Yan 等^[45]基于种子点的 FC 分析发现,NSSI 青少年右侧舌回与左侧中央前回功能连接增强,而右侧枕中回与右侧中央旁回连接减弱。研究认为,视觉加工区域与运动控制区域间功能异常可能与冲动控制下降及 NSSI 严重程度相关。Liao 等^[46]对未用药 NSSI 青少年进行研究发现,视觉加工相关脑区与前额叶、岛叶及顶叶之间存在广泛功能连接异常。其中,以左侧舌回及梭状回为种子点时,NSSI 组在情绪调节及视觉加工相关脑区间的功能连接发生明显改变,且部分连接强度与自杀意念评分相关,进一步提示视觉-情绪调节环路异常可能参与 NSSI 行为发生。Otto 等^[47]进一步结合压力诱导范式发现,在急性应激状态下,NSSI 青少年额顶叶网络与角回间功能连接减弱,而视觉区域、岛叶及额极相关区域间功能连接增强,提示其在压力条件下存在异常的情绪与警

觉性网络反应。

此外,奖赏相关脑网络异常也受到广泛关注。Chen等^[48]研究发现,NSSI组左侧伏隔核(Nucleus accumbens,NAcc)与右侧舌回、右侧伏隔核与右侧角回之间功能连接增强,而右侧伏隔核与左侧小脑下部、扣带回与颞中回之间功能连接减弱。其中,右侧伏隔核与左侧小脑下部连接减弱与NSSI行为成瘾特征呈正相关,提示奖赏调节环路可能参与NSSI行为维持。此外,Liao等^[49]采用静息态fMRI对具有不同成瘾特征的NSSI青少年进行研究发现,与非成瘾性NSSI组相比,成瘾性NSSI组左侧海马与右侧尾状核之间的功能连接增强,而左侧伏隔核与双侧中扣带回、左侧杏仁核与右侧眶额下回之间的功能连接减弱。

除横断面外,部分研究还探讨了FC作为疗效预测指标的潜在价值。Santamarina-Perez等^[50]发现,NSSI青少年杏仁核与前额叶间较强的负向功能连接与心理治疗后症状改善相关,提示情绪调节网络功能状态可能预测治疗反应。Cullen等^[51]在N-乙酰半胱氨酸治疗研究中发现,治疗后NSSI频率下降与杏仁核-SMA及伏隔核-内侧前额叶功能连接变化相关,提示奖赏及情绪调节环路可能是潜在干预靶点。Mürner-Lavanchy等^[52]纵向研究进一步发现,左侧中央旁回与右侧前扣带回之间较低的基线rs-FC可预测后续症状改善及整体功能恢复。

综上,现有rs-fMRI功能连接研究一致提示,NSSI青少年在杏仁核、前扣带回、内侧前额叶皮层及伏隔核等情绪调节与奖赏相关脑区之间存在广泛功能连接异常。此外,视觉加工网络、额顶叶网络及默认模式网络亦存在不同程度功能失衡。这些脑网络异常可能共同参与NSSI相关情绪调节障碍、冲动控制缺陷及应激反应异常的形成。同时,部分功能连接指标已显示出预测临床疗效的潜力,为NSSI个体化干预提供了新的神经影像学依据。

2.1.2 独立成分分析

ICA是一种常用于静息态功能磁共振成像数据分析的数据驱动方法^[53]。该方法基于信号统计独立性假设,可将复杂的脑功能信号分解为多个相互独立的功能成分,每个成分代表具有特定时空特征的脑功能网络。与基于种子点的分析方法相比,ICA无需预先设定感兴趣脑区,能够较客观地识别大脑内在功能网络,并有效降低呼吸、心跳及头动等生理噪声的影响,因此广泛应用于精神障碍相关脑网络异常研究。

目前关于NSSI的ICA研究相对有限,但已有研究提示其存在大规模脑网络功能异常。Ho等^[54]采用组ICA方法研究伴NSSI行为青少年抑郁患者的脑网络特征。研究发现,与健康对照组及无NSSI行为的抑郁患者相比,NSSI组在DMN、腹侧子网络(DMN-V)及岛叶-显著性网络(Salience network-insula,SN-Ins)中的网络一致性降低,提示其自我参照加工及躯体感知整合功能受损。此外,NSSI组中央执行网络(Central executive network,CEN)与DMN后部子网络(DMN-P)之间跨网络连接增强,可能反映认知控制与负性自我沉思之间的功能失衡。Zhang等^[55]进一步采用组ICA对伴NSSI行为青少年抑郁患者的大规模脑网络进行分析,共识别出14个功能网络。结果显示,NSSI组DMN左侧中扣带回及额顶叶网络(Frontoparietal network,FPN)额中回的网络内功能连接增强,而DMN右侧角回的网络内连接减弱。同时,高阶认知网络与初级感觉网络之间的网络间连接模式也发生异常,提示NSSI患者可能存在多感觉整合及情绪调节功能障碍。

现有ICA研究提示,NSSI青少年存在默认模式网络、显著性网络及中央执行网络等大规模脑功能网络异常。其中,DMN-V及SN-Ins网络一致性降低可能与自我加工及情绪觉知异常有关,而CEN与DMN之间跨网络连接增强则可能反映认知控制与负性情绪加工失衡。此外,高阶认知网络与感觉网络之间连接异常提示NSSI可能伴随更广泛的脑网络整合障碍。这些发现为理解NSSI相关脑网络动态异常提供了新的神经影像学证据。

2.1.3 低频振荡振幅分析

ALFF 是一种基于静息态功能磁共振成像的分析方法,通过计算低频范围(0.01~0.08 Hz)内 BOLD 信号振幅,用于评估局部脑区自发神经活动强度^[56]。ALFF 值越高,提示相应脑区自发神经活动越强;反之则表明局部活动减弱。由于其对局部功能异常较为敏感,ALFF 已广泛应用于抑郁症、精神分裂症等精神障碍相关脑功能异常研究。

目前有关 NSSI 的 ALFF 研究主要集中于视觉加工网络及情绪调节相关脑区。Huang 等^[44]对伴 NSSI 行为的抑郁青少年进行研究发现,与单纯抑郁组相比,NSSI 组右侧梭状回及中扣带回 ALFF 升高。梭状回参与面孔识别及情绪感知,其活动增强可能提示 NSSI 患者对负性情绪刺激存在过度敏感;而中扣带回异常则可能与认知控制及情绪调节功能失衡有关。Yan 等^[45]进一步比较伴或不伴 NSSI 行为的抑郁患者发现,伴 NSSI 行为者右侧舌回及枕中回 ALFF 升高,而右侧额上回 ALFF 降低。研究认为,视觉相关脑区活动增强可能与自伤相关视觉信息加工异常有关,而额叶活动减弱则可能反映情绪调节及冲动控制能力下降。Liao 等^[46]对未用药 NSSI 青少年开展研究发现,其左侧枕下回、枕中回、舌回及梭状回 ALFF 均显著升高,而左侧前扣带回及内侧额上回 ALFF 降低。上述结果进一步提示,NSSI 患者可能同时存在视觉加工系统过度激活及前额叶-扣带回情绪调节网络功能减弱。此外,Lin 等^[57]研究发现,与健康对照组相比,NSSI 青少年的双侧海马低频振荡振幅降低,而右侧辅助运动区低频振荡振幅升高,且双侧海马低频振荡振幅与 NSSI 成瘾特征总分呈负相关。Li 等^[58]采用静息态 fMRI 对伴 NSSI 的青少年精神科住院患者进行研究发现,左侧额中回低频振荡振幅降低,且其活动水平与自杀意念严重程度呈负相关。进一步采用支持向量回归分析发现,左侧额中回局部自发活动可预测个体自杀意念水平,提示前额叶局部功能异常可能与伴 NSSI 青少年的自杀风险相关。

现有 ALFF 研究表明,NSSI 青少年局部脑功能异常主要累及视觉加工、情绪调节、记忆及运动控制相关脑区。其中,舌回、梭状回及枕叶区域活动增强提示其可能对负性或自伤相关视觉刺激存在异常敏感性,而前扣带回、额叶及左侧额中回活动减弱则可能与情绪调节、冲动控制及自杀意念风险相关。此外,双侧海马低频振荡振幅降低并与 NSSI 成瘾特征相关,提示记忆、情绪加工及行为强化相关脑区的局部自发活动异常也可能参与 NSSI 的维持。总体而言,视觉信息加工异常、前额叶-扣带回情绪调节功能失衡以及海马相关局部活动改变可能是 NSSI 的重要神经机制之一。

2.1.4 图论分析

图论分析是近年来静息态功能磁共振成像研究中用于评估脑功能网络拓扑结构的重要方法^[59]。该方法通过将大脑划分为多个感兴趣区(Region of interest, ROI),并构建脑区间功能连接矩阵,将大脑视为由“节点”和“边”组成的复杂网络,从而定量评估脑网络的全局及局部拓扑属性,包括特征路径长度、聚类系数、网络效率、节点中心性及模块化程度等。

目前有关 NSSI 的图论研究较少,但已有研究提示其存在整体脑网络组织异常。Mürner-Lavanchy 等^[60]采用图论方法对伴 NSSI 行为青少年女性进行研究发现,与健康对照组相比,NSSI 组表现出更长的特征路径长度及更少的加权枢纽节点,提示其脑网络信息传递效率下降及整体网络整合能力减弱。在局部网络层面,NSSI 组眶额皮层(Orbitofrontal cortex, OFC)及楔前叶等区域功能连接减弱,而枕叶皮层功能连接增强。由于 OFC 及楔前叶在情绪调节、自我参照加工及冲动控制中具有重要作用,其网络属性异常可能与 NSSI 相关情绪调节障碍有关。此外,NSSI 组中央旁回连接度降低,提示运动控制及情绪加工相关脑区之间的网络协同减弱。Li 等^[61]研究发现,NSSI 组在功能连接及网络拓扑两个层面的神经变异性均升高,且相关指标对 NSSI 与无 NSSI 精神科患者具有中等区分效能。进一步随访显示,较高的功能连接变异性与较好的情绪和注意功能及 3 个月后 NSSI 行为较大幅度下降相关,而较高的网络拓扑变异性则与冲动性增加及行为改善较差相关,提示 NSSI 的脑网络动态异常可能同时具

有代偿性和失调性特征。

图论分析提示,NSSI青少年不仅存在局部脑区功能异常,还伴随脑功能网络整体拓扑结构改变,表现为网络整合能力下降及关键节点功能失衡。尽管目前相关研究数量有限,但图论分析为理解NSSI脑网络异常提供了新的系统神经科学视角。

综上所述,静息态fMRI研究从不同层面揭示了NSSI青少年广泛的脑功能网络异常。功能连接分析提示杏仁核-前额叶、伏隔核-小脑及视觉加工相关环路存在异常;ICA研究显示默认模式网络、显著性网络及中央执行网络之间的功能失衡;ALFF研究提示视觉加工区域活动增强及情绪调节相关脑区活动减弱;图论分析则进一步表明了脑网络拓扑组织异常及信息整合能力下降。这些研究结果共同表明,NSSI青少年在情绪调节、冲动控制、自我参照加工及应激反应等核心神经功能模块中存在广泛异常,且部分功能连接指标已显示出预测临床干预反应的潜在价值。

2.2 任务态功能磁共振成像

task-fMRI是一种通过在扫描过程中向受试者呈现特定任务或刺激,同步记录脑区BOLD信号变化的功能影像技术。与静息态fMRI相比,task-fMRI能够更直接地反映特定认知、情绪或行为过程中相关脑区的激活模式及功能协同状态,从而揭示脑功能活动与行为表现之间的关系。

近年来,task-fMRI已广泛应用于青少年NSSI相关神经机制研究。根据实验范式不同,现有研究主要集中于情绪加工、疼痛感知、奖赏加工以及社交与自我参照等任务。其中,情绪加工任务主要用于评估NSSI个体对负性情绪及自伤相关刺激的脑反应特征;疼痛刺激任务用于探讨其异常疼痛感知及调节机制;奖赏任务则用于分析奖赏敏感性及相关学习相关脑环路功能;社交与自我参照任务主要关注其社会排斥、自我评价及人际情绪加工异常。此外,部分研究还采用执行功能任务及反刍诱导范式,以评估NSSI患者在认知控制及负性思维加工中的脑功能特点。task-fMRI研究为理解NSSI相关情绪调节障碍、冲动控制缺陷、奖赏加工异常及社会认知功能受损提供了重要的神经影像学证据。

2.2.1 情绪加工任务

情绪加工任务是任务态功能磁共振成像研究中应用最广泛的范式之一,主要用于评估个体对情绪刺激、自伤相关线索及社会情感信息的神经反应特征。现有研究表明,NSSI青少年在情绪刺激加工过程中存在边缘系统、前额叶及社会认知相关脑区的异常激活。

Plener等^[62]采用情绪图片与自伤相关图片刺激发现,NSSI青少年在观看负性情绪图片时,杏仁核、海马等边缘系统脑区及前扣带回激活增强;而在观看自伤相关图片时,眶额皮层及额叶区域激活进一步增强,提示其对负性情绪及自伤线索存在较高敏感性。然而,Hooley等^[63]研究发现,NSSI组在观看负性情绪及自伤相关图片时杏仁核激活减弱,而扣带回及眶额皮层激活增强。研究者认为,不同研究结果之间的差异可能与样本年龄、抑郁共病情况及刺激材料差异有关,但均提示NSSI患者存在异常情绪加工模式。Mayo等^[64]结合面部肌电与fMRI技术研究发现,NSSI组在观看负性图片时,前岛叶激活与面部肌电反应呈正相关,但其主观情绪评分未见明显变化,提示NSSI个体可能存在情绪表达抑制或内省能力受损。Westlund Schreiner等^[43]进一步采用情绪面孔匹配任务发现,NSSI青少年在处理负性情绪面孔时,杏仁核与右侧舌回、枕叶及顶叶之间功能连接增强,而与前额叶之间功能连接减弱,提示情绪反应系统与认知控制系统之间存在功能失衡。此外,Demers等^[65]采用掩蔽情绪面孔任务发现,伴较高外向型思维(Externally oriented thinking,EOT)水平的NSSI青少年,在观看掩蔽快乐面孔时右侧缘上回及右侧额下回激活减弱,而在观看掩蔽恐惧面孔时上述区域激活增强,提示其存在情绪觉察及情绪加工异常。Santana-Gonzalez等^[66]采用情绪调节任务fMRI对有NSSI行为的青年进行研究发现,在调节自伤相关图像诱发的负性情绪时,NSSI组杏仁核与楔前叶及顶下小叶之间的功能连接增强,且与自伤频率呈正相关;在观看自伤及正性图像时,腹侧纹状体与梭状回、海马旁回之间的功能连接增

强,并与自伤频率及自伤后的情绪缓解程度相关。该研究提示,NSSI个体在自伤线索加工过程中可能同时存在负性情绪调节及奖赏加工相关环路异常。此外,Moon等^[67]采用眼睛心智阅读测试(Reading the mind in the eyes test, RMET)研究未用药NSSI青少年的情感心理理论加工机制。结果显示,NSSI组左侧内侧前额叶皮层激活增强,而右侧角回激活减弱。进一步分析发现,右侧角回激活程度与述情障碍及情绪调节困难评分呈负相关,提示社会情绪认知相关脑区功能异常可能参与NSSI相关情绪调节障碍及社会认知偏差。

情绪加工任务研究提示,NSSI青少年在杏仁核、前扣带回、岛叶、眶额皮层及内侧前额叶等情绪调节相关脑区存在异常激活,同时伴随视觉加工及社会认知相关脑区功能异常。这些结果表明,NSSI患者可能存在对负性情绪及自伤线索的异常敏感性,以及情绪反应系统与认知控制系统之间的功能失衡,从而共同参与NSSI行为的发生与维持。

2.2.2 疼痛刺激加工任务

疼痛刺激加工任务是NSSI任务态fMRI研究中的重要范式之一,主要用于探讨NSSI个体异常疼痛感知及情绪调节机制。大量研究表明,NSSI患者不仅表现出较高的疼痛耐受性,还伴随疼痛加工与奖赏调节相关脑区的异常激活。

Osuch等^[68]采用冷刺激任务比较NSSI青少年与健康对照组的脑功能反应,结果发现,NSSI组在自我施加冷痛刺激时,中脑-脑桥区及边缘系统,包括杏仁核和海马旁回激活增强。同时,OFC等奖赏相关脑区亦表现出过度激活,而OFC与ACC之间功能连接减弱。研究提示,NSSI患者可能存在奖赏调节异常,从而将负性刺激错误地加工为具有缓解作用的体验。Bonenberger等^[69]采用逐级增强电刺激任务发现,随着刺激强度增加,NSSI组与健康对照组后脑岛激活均增强,但仅健康对照组出现前脑岛活动的适应性调节,而NSSI组前脑岛激活缺乏明显变化。由于前脑岛参与疼痛情绪体验及内感受加工,其功能异常可能导致NSSI个体对疼痛相关情绪体验感知减弱。Lalouni等^[70]结合条件性疼痛调制(Conditioned pain modulation, CPM)及热痛fMRI实验发现,与健康对照组相比,NSSI女性表现出更强的中枢性疼痛下调能力,即CPM效应增强。同时,其感觉皮层与ACC、下丘脑等疼痛调节相关脑区之间功能耦合增强。研究提示,NSSI患者可能存在增强的疼痛抑制机制及异常疼痛调节网络活动。Fust等^[71]进一步结合位移镇痛(Offset analgesia, OA)及起始高痛(Onset hyperalgesia, OH)范式研究NSSI患者动态疼痛调节特征。结果显示,NSSI组OH反应减弱,而OA效应与健康对照组差异无统计学意义。此外,在OH条件下,NSSI组初级躯体感觉皮层激活增强。研究认为,NSSI患者可能存在异常的疼痛动态调节过程,其较高的疼痛耐受性可能与疼痛感觉加工及调节机制改变有关。Jiang等^[72]采用疼痛共情任务fMRI对未用药NSSI青少年进行研究发现,与健康对照组相比,NSSI组在观察他人躯体疼痛时,外侧前额叶、岛叶、颞叶及躯体运动网络相关脑区神经反应增强,而对情感性疼痛的加工未见显著异常。进一步分析显示,NSSI青少年日常生活中的个人痛苦体验升高,且与观察躯体疼痛时边缘系统反应增强相关,提示其可能存在对他人躯体疼痛的特异性神经高反应。

疼痛刺激任务研究表明,NSSI青少年在脑干、边缘系统、岛叶、ACC及OFC等疼痛与情绪调节相关脑区存在异常激活及功能连接改变。现有证据提示,NSSI患者可能具有增强的疼痛耐受性及异常的疼痛调节机制,而这种异常可能通过负性情绪缓解或奖赏强化作用参与NSSI行为的维持。

2.2.3 奖赏处理任务

奖赏加工异常被认为是NSSI的重要神经机制之一,task-fMRI研究显示,NSSI青少年在奖励预期及获得阶段的脑激活模式与健康对照存在显著差异。Sauder等^[73]通过货币激励延迟任务(Monetary incentive delay, MID)发现,NSSI青少年在奖励预期阶段纹状体及OFC激活减弱,双侧杏仁核响应亦下降。纹状体及杏仁核的激活水平与冲动性及抑郁症状呈负相关,提示奖励回路功能障碍可能与情绪调

节困难及冲动行为相关,从而增加自伤风险。Vega等^[74]在成人BPD样本中观察到,NSSI行为个体在意外奖励后OFC过度激活,进一步支持奖励系统异常在NSSI中的作用。Lin等^[75]研究表明,在奖励预期阶段,NSSI组OFC与楔前叶及辅助运动区(Supplementary motor area,SMA)之间功能连接增强,尤其在获得预期奖励条件下显著,而损失预期条件下未见明显差异。中介分析显示,OFC-楔前叶功能连接通过反刍思维水平影响NSSI行为,提示奖赏回路功能异常可能通过认知因素增加NSSI风险。

Poon等^[76]研究早期青少年(12~14岁)发现,有自伤想法者在获得奖励时双侧壳核激活增强,提示其对奖励刺激的神经敏感性异常,可能在青少年时期促进NSSI行为的发生。Case等^[77]结合金钱及社会奖励任务发现,NSSI青少年在奖励获得后,ACC、腹侧纹状体(Ventral striatum,VS)、背侧纹状体(Dorsal striatum,DS)、OFC、腹外侧前额叶皮层(Ventrolateral prefrontal cortex,vlPFC)、腹内侧前额叶皮层(Ventromedial prefrontal cortex,vmPFC)及岛叶均表现激活减弱,该效应在控制抑郁症状后仍显著。此外,PPI分析显示,NSSI组在背侧纹状体、vmPFC、岛叶及顶叶岛盖皮层(Parietal operculum cortex,POC)之间的功能连接中断,这些脑区在奖赏评估、情绪调节及疼痛加工中均发挥关键作用。Nicolau等^[78]采用概率性刺激选择任务结合fMRI,对伴或不伴边缘型人格障碍的NSSI年轻成人进行研究发现,与健康对照组相比,NSSI个体在回避惩罚性选项时的准确性降低,且伏隔核在回避惩罚相较于选择奖励时激活减弱。该结果提示,NSSI可能伴随惩罚回避学习受损及伏隔核相关奖赏-惩罚加工异常。

任务态fMRI奖赏加工任务研究提示,NSSI青少年存在纹状体-前额叶及杏仁核-OFC等关键奖赏网络激活减弱及功能连接异常。这些神经机制可能导致奖励处理偏离正常模式,从而通过增强冲动性及情绪调节缺陷,增加NSSI行为的发生与维持。

2.2.4 社交与自我处理任务

社交互动及自我参照加工异常被认为是青少年NSSI的重要心理神经机制。近年来,多项任务态fMRI研究通过社交排斥、自我评价及社会奖惩等范式,揭示了NSSI个体在社会情绪加工及自我认知相关脑区中的异常神经活动。

Groschwitz等^[79]采用Cyberball社交排斥范式比较伴NSSI行为抑郁青少年、单纯抑郁患者及健康对照组,结果发现,NSSI组在社交排斥条件下内侧前额叶皮层(Medial prefrontal cortex,mPFC)及vlPFC激活增强,提示其对社交排斥可能存在过度情绪反应或异常情绪调节策略。Brown等^[80]同样采用Cyberball范式发现,NSSI青少年在“社会排斥>社会接纳”条件下左侧壳核激活增强,同时腹侧前扣带回(Ventral anterior cingulate cortex,vACC)共同激活增加。研究提示,NSSI患者可能对负性社会反馈存在特异性神经敏化,而vACC可能在社交排斥相关负性情绪加工中发挥重要作用。Pollak等^[81]采用社会奖惩延迟(Social incentive delay,SID)任务对青少年开展纵向研究发现,杏仁核对社交惩罚刺激的反应性能够预测未来1年NSSI行为发生,尤其在高社交排斥个体中更为明显。研究提示,社交惩罚相关边缘系统高反应性可能增加青少年在社交逆境中的情绪脆弱性,从而提高NSSI风险。Perini等^[82]通过模拟在线社交互动任务发现,NSSI青少年在预期他人评价时,背内侧前额叶皮层(Dorsomedial prefrontal cortex,dmPFC)、亚属前扣带回(Subgenual anterior cingulate cortex,sgACC)及后扣带回(Posterior cingulate cortex,PCC)激活异常,且相关神经模式可较好地区分NSSI组与健康组。此外,其分类得分与拒绝敏感性呈正相关,提示NSSI个体可能对负性社会反馈高度敏感。Quevedo等^[83]采用人际自我加工任务研究发现,NSSI青少年在从母亲视角进行自我评价时,杏仁核、海马旁回及梭状回激活增强,且上述脑区反应与母亲情感支持水平呈负相关。在从同伴视角进行自我加工时,NSSI组楔前叶及PCC激活增强。研究提示,NSSI个体在自我及他人相关信息加工过程中存在过度情绪化及异常自我

参照加工模式,并可能与现实人际关系冲突密切相关。Nicolaou等^[84]采用模拟社交媒体互动任务对年轻女性进行fMRI研究发现,伴NSSI的临床组在接受正性相对负性社会反馈时,伏隔核、尾状核及内侧额叶等核心奖赏脑区激活减弱;无共病NSSI个体则对负性反馈表现出选择性敏感。该研究提示,NSSI个体在社会媒体评价加工中存在社会奖赏系统异常,且其神经反应可能随NSSI严重程度呈连续性变化。

社交与自我处理任务研究表明,NSSI青少年在mPFC、vIPFC、ACC、杏仁核、PCC、楔前叶和伏隔核等社会认知与自我参照相关脑区存在异常激活。这些异常可能导致其对社会排斥、负性评价及人际冲突表现出更高敏感性,并进一步加剧情绪调节障碍及NSSI行为风险。

2.2.5 执行功能任务

执行功能任务主要用于评估个体在认知冲突监测、反应抑制及认知控制等方面的神经活动特征。近年来,task-fMRI研究发现,NSSI青少年在前额叶-扣带回执行控制网络中存在异常激活模式,这可能与其冲动控制缺陷及情绪调节障碍密切相关。

Dahlgren等^[85]采用多源干扰任务(Multi-source interference task, MSIT)研究NSSI患者的认知冲突加工机制。结果显示,NSSI组在执行任务过程中扣带回皮层激活增强,而背外侧前额叶皮层(Dorsolateral prefrontal cortex, dlPFC)激活减弱。此外,dlPFC激活程度与情绪反应性及自我报告冲动性呈负相关。研究认为,NSSI患者可能需要通过增强扣带回活动来代偿前额叶认知控制功能不足,从而导致情绪控制能力下降及冲动行为增加。Malejko等^[86]进一步采用执行/不执行任务结合fMRI,对伴NSSI行为抑郁青少年、无NSSI行为抑郁患者及健康对照组进行比较研究。结果发现,伴NSSI行为组在错误加工过程中背侧前扣带回皮层(Dorsal anterior cingulate cortex, dACC)及额下回(Inferior frontal gyrus, IFG)激活显著低于其他两组。由于dACC及IFG是反应抑制及错误监测的重要脑区,该结果提示NSSI患者在抑制失败及认知控制过程中存在核心执行网络功能减弱,其冲动行为可能与前额叶-扣带回网络低效激活密切相关。

执行功能任务研究表明,NSSI青少年在认知控制及反应抑制相关脑区存在异常激活,主要表现为dlPFC、dACC及IFG等前额叶-扣带回网络功能减弱,而部分扣带回区域可能存在代偿性激活增强。这些结果提示,执行控制网络异常可能是NSSI冲动行为及情绪调节障碍的重要神经基础之一。

2.2.6 反刍诱导任务

反刍作为一种重复性负性思维模式,与青少年NSSI行为密切相关。目前关于反刍诱导任务的神经影像学研究相对有限,但已有证据显示,NSSI青少年在反刍状态下脑功能调控存在异常。Westlund Schreiner等^[87]通过反刍诱导任务比较NSSI青少年在反刍与分心条件下的脑活动差异。结果显示,在分心条件下,DMN核心脑区,包括楔前叶及后扣带回(Posterior cingulate cortex, PCC)激活随NSSI行为次数增加而降低;而在反刍阶段,认知控制网络(Cognitive control network, CCN)相关脑区,如dlPFC及额上回激活增强,且与终身NSSI次数呈正相关。研究提示,NSSI青少年在脱离反刍状态时可能需要更多认知资源,而DMN低激活可能反映其难以有效抑制负性思维,从而依赖自伤行为调节情绪。

任务态fMRI研究表明,青少年NSSI涉及多种认知和情绪加工环路异常,为更直观地展示不同任务态fMRI任务所揭示的主要异常脑区,本文对6类任务研究结果进行了归纳总结,如图3所示。情绪加工任务显示杏仁核、ACC及OFC等核心情绪调节区在负性或自伤刺激下呈过度或抑制性反应;疼痛刺激任务提示中脑-桥脑、前脑岛及躯体感觉皮层-ACC通路异常伴随中枢疼痛下调能力增强;奖赏任务显示纹状体、OFC及前额叶-楔前叶环路激活及功能连接异常;社交与自我加工任务显示mPFC、vIPFC、PCC、楔前叶及杏仁核过度或不足激活;执行功能及反刍诱导任务揭示冲突抑制和负性思维分心相

任务态fMRI任务类型	主要涉及的异常脑区			
 情绪加工任务 对负性情绪刺激的感知、评价与情绪反应调节	 杏仁核	 眶额皮层	 前扣带回	 内侧前额叶
 疼痛刺激加工任务 对疼痛刺激的感知、耐受以及利用疼痛调节情绪	 前扣带回	 岛叶	 海马旁回	 杏仁核
 奖赏处理任务 奖赏预期、奖赏获得及奖赏学习与强化	 纹状体	 前扣带回	 腹外侧前额叶皮层	 伏隔核
 社交与自我处理任务 社会排斥敏感性、他人评价加工及自我参照与自尊感	 内侧前额叶	 楔前叶	 前扣带回	 杏仁核
 执行功能任务 反应抑制、错误监测及认知控制与灵活性	 背外侧前额叶	 背侧前扣带回	 额下回	 扣带回皮层
 反刍诱导任务 负性思维的持续和注意脱离困难	 楔前叶	 后扣带回	 背外侧前额叶	 额上回

图3 NSSI青少年在不同任务的fMRI研究中涉及的主要异常脑区

Fig.3 Major abnormal brain regions involved in different task-based fMRI studies of adolescents with NSSI

关神经控制失衡。这些发现共同支持NSSI行为与情绪调节、冲动控制及自我参照加工相关的神经动力学异常密切相关。

3 结构磁共振成像和功能磁共振成像的联合研究与耦合分析

sMRI与fMRI的耦合,主要指脑结构特征与脑功能活动模式之间的关联关系。其中,sMRI通过灰质体积、皮质厚度及白质纤维完整性等指标反映脑解剖学基础,而fMRI则通过BOLD信号揭示脑区间动态功能活动。结构与功能之间的耦合关系体现了脑网络“结构支撑功能、功能塑造结构”的神经生物学特征。在青少年NSSI研究中,结构-功能耦合分析有助于从多模态角度揭示脑网络异常的整体机制。NSSI不仅涉及局部脑区结构损伤,还伴随功能网络动态失衡。通过整合sMRI与fMRI数据,可进一步阐明脑结构异常如何影响功能连接及行为表型,为识别潜在影像学标志物及制定精准干预策略提供依据。

Westlund Schreiner等^[88]综合应用扩散MRI、静息态及任务态fMRI技术,对NSSI青少年进行研究。结果发现,NSSI组钩状束及扣带束等白质纤维完整性下降,同时杏仁核、背侧前扣带回等脑区存在功能连接异常,包括杏仁核与前额叶连接减弱以及背侧前扣带回与颞枕叶连接异常。进一步分析显示,健康对照组结构连接与功能连接之间呈正相关,而NSSI组该相关性减弱,提示白质微结构损伤可能导致脑功能协同能力下降。该研究首次从白质连接角度揭示了NSSI结构损伤与功能失衡之间的联系。Kang等^[89]采用多模态影像方法研究伴NSSI行为的抑郁患者。VBM结果显示,NSSI组颞上回及小脑相关区域灰质体积异常;静息态功能连接分析发现,小脑与前额叶、颞上回与岛叶之间功能连接改变。进一步通过随机森林模型整合灰质体积与功能连接数据后发现,颞上回灰质体积及小脑功能网络

可较好预测 NSSI 行为,提示结构-功能联合指标可能成为潜在生物标志物。Xu 等^[90]采用主成分分析方法整合扩散 MRI 与静息态 fMRI 数据,对伴 NSSI 行为青少年抑郁患者进行研究。结果显示,NSSI 亚组 DMN 及视觉网络结构-功能耦合增强,同时小脑与边缘系统之间耦合强度与生活事件暴露水平相关。此外,与自杀未遂亚组相比,NSSI 亚组表现出不同的结构-功能耦合模式,其中自杀未遂组海马旁回耦合降低,提示不同自伤相关行为可能具有特异性神经网络机制。Yi 等^[91]对伴 NSSI 行为青少年 BPD 患者开展研究发现,其左侧壳核及枕中回灰质体积减小,同时左侧壳核与右侧岛叶、枕中回与额上回之间功能连接增强。进一步相关性分析显示,部分脑区灰质体积与 NSSI 严重程度及自杀意念评分呈负相关,提示结构异常与功能失衡可能共同参与 NSSI 行为形成。此外,Thai 等^[92]采用结构磁共振成像、静息态功能磁共振成像及自我评价任务功能磁共振成像,对有或无 NSSI 史的女性青少年进行多模态研究发现,较低的整体自我价值感、更频繁且更快速的负性自我评价、较低的前部自我网络任务激活以及前、后部自我网络静息态功能连接减弱均与 NSSI 严重程度相关。进一步分析显示,多层次自我知识指标联合模型对 NSSI 严重程度的解释优于仅纳入协变量的模型,提示自我加工相关脑网络异常可能是 NSSI 的重要神经机制之一。Yang 等^[93]采用局部回旋指数及静息态功能连接分析,对女性青少年抑郁症患者进行研究发现,与健康对照组相比,伴 NSSI 的患者组在右侧吻侧/尾侧额中回、中央前回、中央后回及左侧吻侧额中回、额下回岛盖部等区域局部回旋指数降低;进一步以中央后回和吻侧额中回为种子点进行功能连接分析发现,前扣带回、岛叶、中央后回及枕叶等区域存在异常静息态功能连接。该研究提示,伴 NSSI 的女性抑郁青少年可能同时存在皮层折叠异常及感觉-情绪调节相关功能网络失衡。

现有研究表明,结构-功能耦合异常是青少年 NSSI 的重要神经机制之一,主要表现为白质纤维束完整性下降、灰质结构异常及功能网络失衡之间的协同改变。其中,情绪调节相关前额叶-边缘系统、默认模式网络及视觉加工网络的结构-功能耦合异常在不同研究中反复出现,并可能与 NSSI 严重程度、情绪调节障碍及生活事件暴露密切相关。这些多模态影像学证据为理解 NSSI 的神经生物学基础及开发个体化干预策略提供了新的研究方向。

4 总结与展望

本文从神经影像学视角系统综述了青少年 NSSI 的神经机制研究,包括 sMRI、fMRI 及其耦合分析的主要进展。总体来看,现有研究表明,NSSI 并非由单一脑区异常所致,而是多个脑区及脑网络共同参与的复杂神经生物学过程。综合现有研究结果,NSSI 相关异常主要集中于情绪调节网络、奖赏加工网络、疼痛调节网络及默认模式网络(表 1)。上述网络分别对应情绪调控、奖赏学习、疼痛加工及自我参照加工等关键神经功能,并非彼此独立,而是通过广泛的功能耦合共同参与 NSSI 的发生和维持。尽管不同研究之间仍存在一定差异,但从脑网络层面对现有研究进行整合,可以发现上述核心神经环路已成为当前较为一致的研究结论,为进一步探索 NSSI 神经生物学机制及寻找客观影像学生物标志物提供了重要依据。

尽管现有研究取得了重要进展,但仍存在若干局限:(1)样本量较小,多为横断面设计,且研究对象多集中于女性或伴有抑郁症、边缘型人格障碍等精神疾病的共病群体,共病因素可能对脑结构与功能异常产生混杂效应,现有多数阳性发现尚难以明确区分哪些是 NSSI 行为本身的特异性神经改变,哪些是伴随精神疾病的共同病理改变,为结果解释与特异性标志物筛选带来了较大挑战;(2)研究方法与分析流程差异较大,结果可重复性有待验证。为克服这些局限,未来研究可从以下几个方面拓展:(1)扩大样本量并开展多中心协作,纳入性别均衡及非共病群体,通过严格匹配临床特征、统一 NSSI 界定和评估工具降低样本异质性,有效控制共病因素的混杂影响,提高结果的普适性与特异性;(2)采用纵向

表1 青少年NSSI核心脑网络的一致性影像学证据汇总

Table 1 Summary of consistent neuroimaging evidence for core brain networks of adolescent non-suicidal self-injury

核心脑网络	关键脑区	主要一致性影像学发现
情绪调节网络	ACC、岛叶、杏仁核、前额叶	ACC与岛叶灰质体积降低;杏仁核-前额叶环路功能连接异常;执行功能及情绪加工任务中前额叶激活异常。
奖赏加工网络	NAcc、尾状核、壳核、OFC	壳核结构及功能连接异常;NAcc及纹状体奖赏反应异常;OFC奖赏相关激活异常;纹状体-前额叶功能连接异常。
疼痛调节网络	ACC、岛叶、OFC、躯体感觉皮层	疼痛刺激时OFC激活增强,ACC相关功能连接异常;岛叶激活异常;疼痛调节相关功能连接发生改变。
默认模式网络	PCC、楔前叶、mPFC	DMN腹侧子网络一致性下降;PCC及楔前叶激活异常;DMN网络内及网络间功能连接异常。

随访设计,结合青少年神经发育特点,动态监测NSSI发生前后脑结构(如灰质体积、白质纤维束完整性)及功能(如情绪网络连接、疼痛调节环路激活)的变化,以明确神经异常与行为的因果关系;(3)整合多模态影像数据,构建多模态融合建模框架,将sMRI结构指标(如皮质厚度、弥散张量参数)与fMRI功能特征(如静息态功能连接、任务态激活模式)深度耦合,并结合机器学习或深度学习算法挖掘NSSI特异性神经标志物,精准区分其与共病精神障碍的影像学差异^[94];(4)优化分析方法标准化及创新,引入动态功能连接、网络因果分析、动态因果建模和图论高阶分析等技术,从系统神经科学视角解析脑网络异常的潜在机制;(5)推动临床转化研究,探索影像指标(如脑区结构异常或功能连接模式)与NSSI严重程度、自杀风险及干预效果之间的关联,为早期识别、精准干预及预后评估提供客观影像学依据。

总体而言,多模态神经影像学研究为揭示青少年NSSI的神经生物学机制及指导临床干预提供了重要基础。现有研究已初步构建了NSSI相关脑网络异常的整体图景,提示其可能涉及前额叶-边缘系统、默认模式网络、奖赏网络及疼痛调节网络等多个功能系统的协同失衡。本文梳理的核心神经环路与关键脑区结论,也可作为脑电图、近红外脑功能成像等非磁共振神经影像技术提供候选靶点,为神经调控、行为实验及基础神经科学研究提供重要参考。未来将结合纵向、多中心及多模态影像融合研究,有望进一步明确NSSI相关脑结构与功能异常的动态演变,阐明神经异常与情绪调节障碍、冲动控制缺陷及社会认知偏差之间的因果关系。同时,随着机器学习、深度学习及精准神经调控技术的发展,基于影像学特征的客观生物标志物筛选及个体化风险预测将成为重要方向,为青少年NSSI的早期识别、精准干预及预后评估提供可靠依据。下一步研究还应加强基础研究 with 临床实践的转化应用;一方面,可结合遗传学、神经内分泌、炎症因子及数字行为学等多维数据,构建跨尺度的NSSI神经生物学模型,以提高对个体风险异质性的识别能力;另一方面,可探索影像指标在临床分型、疗效监测及复发预测中的应用价值,推动影像学成果向临床辅助决策工具转化。随着人工智能辅助分析及实时神经反馈技术的发展,未来有望建立基于脑网络特征的精准干预体系,为青少年NSSI的个体化治疗与长期管理提供新的研究方向与技术路径。

参考文献:

[1] KLONSKY E D, MUEHLENKAMP J J. Self-injury: A research review for the practitioner[J]. Journal of Clinical Psychology, 2007, 63(11): 1045-1056.

[2] ZETTERQVIST M. The DSM-5 diagnosis of nonsuicidal self-injury disorder: A review of the empirical literature[J]. Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health, 2015, 9(1): 31.

- [3] POUDEL A, LAMICHHANE A, MAGAR K R, et al. Non suicidal self injury and suicidal behavior among adolescents: Co-occurrence and associated risk factors[J]. *BMC Psychiatry*, 2022, 22(1): 96.
- [4] KUENTZEL J G, ARBLE E, BOUTROS N, et al. Nonsuicidal self-injury in an ethnically diverse college sample[J]. *American Journal of Orthopsychiatry*, 2012, 82(3): 291-297.
- [5] SWANNELL S V, MARTIN G E, PAGE A, et al. Prevalence of nonsuicidal self-injury in nonclinical samples: Systematic review, meta-analysis and meta-regression[J]. *Suicide and Life-Threatening Behavior*, 2014, 44(3): 273-303.
- [6] PLENER P L, SCHUMACHER T S, MUNZ L M, et al. The longitudinal course of non-suicidal self-injury and deliberate self-harm: A systematic review of the literature[J]. *Borderline Personality Disorder and Emotion Dysregulation*, 2015, 2(1): 2.
- [7] KIEKENS G, HASKING P, BOYES M, et al. The associations between non-suicidal self-injury and first onset suicidal thoughts and behaviors[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2018, 239: 171-179.
- [8] ANDOVER M S, MORRIS B W, WREN A, et al. The co-occurrence of non-suicidal self-injury and attempted suicide among adolescents: Distinguishing risk factors and psychosocial correlates[J]. *Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health*, 2012, 6(1): 11.
- [9] CHA C B, FRANZ P J, GUZMÁN E M, et al. Annual research review: Suicide among youth-epidemiology, (potential) etiology, and treatment[J]. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 2018, 59(4): 460-482.
- [10] KATTI G, ARA S A, SHIREEN A. Magnetic resonance imaging (MRI)—A review[J]. *International Journal of Dental Clinics*, 2011, 3(1): 65-70.
- [11] KIM B, KIM H, KIM S, et al. A brief review of non-invasive brain imaging technologies and the near-infrared optical bioimaging[J]. *Applied Microscopy*, 2021, 51(1): 9.
- [12] LENROOT R K, GIEDD J N. Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2006, 30(6): 718-729.
- [13] GORE J C. Principles and practice of functional MRI of the human brain[J]. *Journal of Clinical Investigation*, 2003, 112(1): 4-9.
- [14] UDDIN L Q, CASTELLANOS F X, MENON V. Resting state functional brain connectivity in child and adolescent psychiatry: Where are we now?[J]. *Neuropsychopharmacology*, 2025, 50(1): 196-200.
- [15] VAN DEN HEUVEL M P, HULSHOFF POL H E. Exploring the brain network: A review on resting-state fMRI functional connectivity[J]. *European Neuropsychopharmacology*, 2010, 20(8): 519-534.
- [16] OCHSNER K N, BUNGE S A, GROSS J J, et al. Rethinking feelings: An fMRI study of the cognitive regulation of emotion [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2002, 14(8): 1215-1229.
- [17] BO K, KRAYNAK T E, KWON M, et al. A systems identification approach using Bayes factors to deconstruct the brain bases of emotion regulation[J]. *Nature Neuroscience*, 2024, 27(5): 975-987.
- [18] QUITON R L, KEASER M L, ZHUO J, et al. Intersession reliability of fMRI activation for heat pain and motor tasks[J]. *NeuroImage: Clinical*, 2014, 5: 309-321.
- [19] BOTVINIK-NEZER R, PETRE B, CEKO M, et al. Placebo treatment affects brain systems related to affective and cognitive processes, but not nociceptive pain[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 6017.
- [20] POCHON J B, LEVY R, FOSSATI P, et al. The neural system that bridges reward and cognition in humans: An fMRI study [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(8): 5669-5674.
- [21] SACU S, DUBOIS M, HEZEMANS F H, et al. Early-life adversities are associated with lower expected value signaling in the adult brain[J]. *Biological Psychiatry*, 2024, 96(12): 948-958.
- [22] EISENBERGER N I, LIEBERMAN M D, WILLIAMS K D. Does rejection hurt? an fMRI study of social exclusion[J]. *Science*, 2003, 302(5643): 290-292.
- [23] MILLER A B, JENNESS J L, ELTON A L, et al. Neural markers of emotion reactivity and regulation before and after a targeted social rejection: Differences among girls with and without suicidal ideation and behavior histories[J]. *Biological Psychiatry*, 2024, 95(12): 1100-1109.
- [24] ASHBURNER J, FRISTON K J. Voxel-based morphometry: The methods[J]. *NeuroImage*, 2000, 11(6): 805-821.
- [25] ANDO A, REICHL C, SCHEU F, et al. Regional grey matter volume reduction in adolescents engaging in non-suicidal self-injury[J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2018, 280: 48-55.

- [26] BEAUCHAINE T P, SAUDER C L, DERBIDGE C M, et al. Self-injuring adolescent girls exhibit insular cortex volumetric abnormalities that are similar to those seen in adults with borderline personality disorder[J]. *Development and Psychopathology*, 2019, 31(4): 1203-1212.
- [27] ZHANG Y, LAI S, WU W, et al. Associations between executive function impairment and biochemical abnormalities in depressed adolescents with non-suicidal self-injury[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2022, 298: 492-499.
- [28] PANG X, WU D, WANG H, et al. Cortical morphological alterations in adolescents with major depression and non-suicidal self-injury[J]. *NeuroImage: Clinical*, 2024, 44: 103701.
- [29] LUO Z, CHEN Y, XU Y, et al. Structural covariance network in the striatum is modulated by non-suicidal self-injury in adolescents with major depressive disorder[J]. *BMC Psychiatry*, 2025, 26(1): 50.
- [30] DALE A M, FISCHL B, SERENO M I. Cortical surface-based analysis I : Segmentation and surface reconstruction[J]. *NeuroImage*, 1999, 9(2): 179-194.
- [31] FISCHL B, SERENO M I, DALE A M. Cortical surface-based analysis II : Inflation, flattening, and a surface-based coordinate system[J]. *NeuroImage*, 1999, 9(2): 195-207.
- [32] RICCELLI R, TOSCHI N, NIGRO S, et al. Surface-based morphometry reveals the neuroanatomical basis of the five-factor model of personality[J]. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2017, 12(4): 671-684.
- [33] XIAO Q, WANG X, YI X, et al. Alteration of surface morphology and core features in adolescents with borderline personality disorder[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2023, 333: 86-93.
- [34] CHOI S, MOON H, HUR J W. Altered cortical gyrification morphology in nonsuicidal self-injury[J]. *European Psychiatry*, 2024, 67(S1): S618-S619.
- [35] ZHAO G, ZHENG J, LI Y, et al. Altered cortical structure and networks associated with psychosocial adversity and pain hyposensitivity in adolescents with non-suicidal self-injury[J]. *BMC Psychiatry*, 2025, 25(1): 1171.
- [36] HUBER R S, SUBRAMANIAM P, HEINRICH L, et al. Cingulate cortex cortical thickness associated with non-suicidal self-injury and suicide risk in youth with mood disorders[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2025, 381: 518-524.
- [37] BASSER P J, MATTIELLO J, LEBIHAN D. MR diffusion tensor spectroscopy and imaging[J]. *Biophysical Journal*, 1994, 66(1): 259-267.
- [38] MILLS K L, TAMNES C K. Methods and considerations for longitudinal structural brain imaging analysis across development [J]. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2014, 9: 172-190.
- [39] WESTLUND SCHREINER M, MUELLER B A, KLIMES-DOUGAN B, et al. White matter microstructure in adolescents and young adults with non-suicidal self-injury[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2020, 10: 1019.
- [40] WESTLUND SCHREINER M, MANUELE S J, WASHBURN J J, et al. White matter and impulsivity are prospectively associated with non-suicidal self-injury in youth: Evidence for sex differences[J]. *Neuropsychopharmacology*, 2026: 1-8.
- [41] HU C, JIANG W, WU Y, et al. Microstructural abnormalities of white matter in the cingulum bundle of adolescents with major depression and non-suicidal self-injury[J]. *Psychological Medicine*, 2024, 54(6): 1113-1121.
- [42] CHEN Y, YANG X, LIAO K, et al. Intractable prefrontal and limbic white matter network disruption in adolescents with drug-naïve nonsuicidal self-injury[J]. *BMC Psychiatry*, 2025, 25(1): 662.
- [43] WESTLUND SCHREINER M, KLIMES-DOUGAN B, MUELLER B A, et al. Multi-modal neuroimaging of adolescents with non-suicidal self-injury: Amygdala functional connectivity[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2017, 221: 47-55.
- [44] HUANG Q, XIAO M, AI M, et al. Disruption of neural activity and functional connectivity in adolescents with major depressive disorder who engage in non-suicidal self-injury: A resting-state fMRI study[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2021, 12: 571532.
- [45] YAN R, HUANG Y, SHI J, et al. Alterations of regional spontaneous neuronal activity and corresponding brain circuits related to non-suicidal self-injury in young adults with major depressive disorder[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2022, 305: 8-18.
- [46] LIAO K, YU R, CHEN Y, et al. Alterations of regional brain activity and corresponding brain circuits in drug-naïve adolescents with nonsuicidal self-injury[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 24997.
- [47] OTTO A, JARVERS I, KANDSPERGER S, et al. Stress-induced alterations in resting-state functional connectivity among

- adolescents with non-suicidal self-injury[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2023, 339: 162-171.
- [48] CHEN X, CHEN H, LIU J, et al. Functional connectivity alterations in reward-related circuits associated with non-suicidal self-injury behaviors in drug-naïve adolescents with depression[J]. *Journal of Psychiatric Research*, 2023, 163: 270-277.
- [49] LIAO K, LIU Q, YU R, et al. Altered functional connectivity of reward circuits in adolescents with addictive nonsuicidal self-injury[J]. *Brain Research Bulletin*, 2025, 232: 111574.
- [50] SANTAMARINA-PEREZ P, ROMERO S, MENDEZ I, et al. Fronto-limbic connectivity as a predictor of improvement in nonsuicidal self-injury in adolescents following psychotherapy[J]. *Journal of Child and Adolescent Psychopharmacology*, 2019, 29(6): 456-465.
- [51] CULLEN K R, SCHREINER M W, KLIMES-DOUGAN B, et al. Neural correlates of clinical improvement in response to N-acetylcysteine in adolescents with non-suicidal self-injury[J]. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 2020, 99: 109778.
- [52] MÜRNER-LAVANCHY I, JOSI J, KOENIG J, et al. Resting-state functional connectivity predicting clinical improvement following treatment in female adolescents with non-suicidal self-injury[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2023, 327: 79-86.
- [53] CALHOUN V D, LIU J, ADAL T. A review of group ICA for fMRI data and ICA for joint inference of imaging, genetic, and ERP data[J]. *NeuroImage*, 2009, 45(1): S163-S172.
- [54] HO T C, WALKER J C, TERESI G I, et al. Default mode and salience network alterations in suicidal and non-suicidal self-injurious thoughts and behaviors in adolescents with depression[J]. *Translational Psychiatry*, 2021, 11: 38.
- [55] ZHANG J, WU D, WANG H, et al. Large-scale functional network connectivity alterations in adolescents with major depression and non-suicidal self-injury[J]. *Behavioural Brain Research*, 2025, 482: 115443.
- [56] ZANG Y F, HE Y, ZHU C Z, et al. Altered baseline brain activity in children with ADHD revealed by resting-state functional MRI[J]. *Brain and Development*, 2007, 29(2): 83-91.
- [57] LIN X, SUN Y, HU Y, et al. Impaired neural activity and functional connectivity in the hippocampus of adolescents with non-suicidal self-injury addiction[J]. *BMC Psychiatry*, 2025, 25(1): 895.
- [58] LI Q, QI L, GAO Z, et al. Resting-state spontaneous brain activity as a neural marker for suicidal ideation in adolescents with non-suicidal self-injury: A voxel-wise and machine learning study[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2025, 16: 1671813.
- [59] FARAHANI F V, KARWOWSKI W, LIGHTHALL N R. Application of graph theory for identifying connectivity patterns in human brain networks: A systematic review[J]. *Frontiers in Neuroscience*, 2019, 13: 585.
- [60] MÜRNER-LAVANCHY I, KOENIG J, REICHL C, et al. Altered resting-state networks in adolescent non-suicidal self-injury: A graph theory analysis[J]. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2022, 17(9): 819-827.
- [61] LI J, XIE Y, NI F, et al. Hierarchical neural variability reveals adaptive and maladaptive mechanisms of non-suicidal self-injury[J]. *Molecular Psychiatry*, 2026: 1-11.
- [62] PLENER P L, BUBALO N, FLADUNG A K, et al. Prone to excitement: Adolescent females with non-suicidal self-injury (NSSI) show altered cortical pattern to emotional and NSS-related material[J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2012, 203(2/3): 146-152.
- [63] HOOLEY J M, DAHLGREN M K, BEST S G, et al. Decreased amygdalar activation to NSSI-stimuli in people who engage in NSSI: A neuroimaging pilot study[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2020, 11: 238.
- [64] MAYO L M, PERINI I, GUSTAFSSON P A, et al. Psychophysiological and neural support for enhanced emotional reactivity in female adolescents with nonsuicidal self-injury[J]. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 2021, 6(7): 682-691.
- [65] DEMERS L A, SCHREINER M W, HUNT R H, et al. Alexithymia is associated with neural reactivity to masked emotional faces in adolescents who self-harm[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2019, 249: 253-261.
- [66] SANTANA-GONZALEZ C, RANATUNGA J, NGUYEN G, et al. Emotion regulation in self-injurious youth: A tale of two circuits[J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2025, 347: 111944.
- [67] MOON H, NAM G, HUR J W. Neural correlates of affective theory of mind in medication-free nonsuicidal self-injury: An fMRI study[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2022, 13: 850794.
- [68] OSUCH E, FORD K, WRATH A, et al. Functional MRI of pain application in youth who engaged in repetitive non-suicidal

- self-injury vs. psychiatric controls[J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2014, 223(2): 104-112.
- [69] BONENBERGER M, PLENER P L, GROSCHWITZ R C, et al. Differential neural processing of unpleasant haptic sensations in somatic and affective partitions of the insula in non-suicidal self-injury (NSSI) [J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2015, 234(3): 298-304.
- [70] LALOUNI M, FUST J, BJUREBERG J, et al. Augmented pain inhibition and higher integration of pain modulatory brain networks in women with self-injury behavior[J]. *Molecular Psychiatry*, 2022, 27(8): 3452-3459.
- [71] FUST J, KASTRATIG, BJUREBERG J, et al. Offset analgesia and onset hyperalgesia: A comparison between women with non-suicidal self-injury and healthy women[EB/OL].(2025-02-07)[2026-06-23]. <https://10.1101/2025.02.07.637056>.
- [72] JIANG H, HE J, ZHOU B, et al. Adolescents with non-suicidal self-injury exhibit increased pain empathic neural reactivity and personal distress to physical but not affective pain[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2026, 399: 121145.
- [73] SAUDER C L, DERBIDGE C M, BEAUCHAINE T P. Neural responses to monetary incentives among self-injuring adolescent girls[J]. *Development and Psychopathology*, 2016, 28(1): 277-291.
- [74] VEGA D, RIPOLLÉS P, SOTO À, et al. Orbitofrontal overactivation in reward processing in borderline personality disorder: The role of non-suicidal self-injury[J]. *Brain Imaging and Behavior*, 2018, 12(1): 217-228.
- [75] LIN L, LIU Y, QIU S, et al. Orbital frontal cortex functional connectivity during gain anticipation linking the rumination and non-suicidal self-injury in late adolescence[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2024, 350: 673-680.
- [76] POON J A, THOMPSON J C, FORBES E E, et al. Adolescents' reward-related neural activation: Links to thoughts of nonsuicidal self-injury[J]. *Suicide and Life-Threatening Behavior*, 2019, 49(1): 76-89.
- [77] CASE J A C, MATTONI M, OLINO T M. Examining the neurobiology of non-suicidal self-injury in children and adolescents: The role of reward responsivity[J]. *Journal of Clinical Medicine*, 2021, 10(16): 3561.
- [78] NICOLAOU S, PASCUAL J C, SOLER J, et al. Mapping punishment avoidance learning deficits in non-suicidal self-injury in young adults with and without borderline personality disorder: An fMRI study[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2025, 370: 489-498.
- [79] GROSCHWITZ R C, PLENER P L, GROEN G, et al. Differential neural processing of social exclusion in adolescents with non-suicidal self-injury: An fMRI study[J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2016, 255: 43-49.
- [80] BROWN R C, PLENER P L, GROEN G, et al. Differential neural processing of social exclusion and inclusion in adolescents with non-suicidal self-injury and young adults with borderline personality disorder[J]. *Frontiers in Psychiatry*, 2017, 8: 267.
- [81] POLLAK O H, KWON S J, JORGENSEN N A, et al. Neural reactivity to social punishment predicts future engagement in nonsuicidal self-injury among peer-rejected adolescents[J]. *Biological Psychiatry*, 2023, 94(1): 40-49.
- [82] PERINI I, GUSTAFSSON P A, HAMILTON J P, et al. Brain-based classification of negative social bias in adolescents with nonsuicidal self-injury: Findings from simulated online social interaction[J]. *EClinicalMedicine*, 2019, 13: 81-90.
- [83] QUEVEDO K, MARTIN J, SCOTT H, et al. The neurobiology of self-knowledge in depressed and self-injurious youth[J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2016, 254: 145-155.
- [84] NICOLAOU S, JULIÀ A, OTERO D, et al. Reward-related neural activation during social media exposure in young women with non-suicidal self-injury: Evidence for a continuum of severity in the reward network[J]. *Translational Psychiatry*, 2025, 15: 308.
- [85] DAHLGREN M K, HOOLEY J M, BEST S G, et al. Prefrontal cortex activation during cognitive interference in nonsuicidal self-injury[J]. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 2018, 277: 28-38.
- [86] MALEJKO K, HAFNER S, BROWN R C, et al. Neural signatures of error processing in depressed adolescents with comorbid non-suicidal self-injury (NSSI)[J]. *Biomedicine*, 2022, 10(12): 3188.
- [87] WESTLUND SCHREINER M, ROBERTS H, DILLAHUNT A K, et al. Negative association between non-suicidal self-injury in adolescents and default mode network activation during the distraction blocks of a rumination task[J]. *Suicide and Life-Threatening Behavior*, 2023, 53(3): 510-521.
- [88] WESTLUND SCHREINER M. Functional and structural connectivity of limbic and interpersonally relevant regions in non-suicidal self-injury[D]. Minneapolis: University of Minnesota, 2019.
- [89] KANG L, WANG W, ZHANG N, et al. Superior temporal gyrus and cerebellar loops predict nonsuicidal self-injury in major

- depressive disorder patients by multimodal neuroimaging[J]. *Translational Psychiatry*, 2022, 12: 474.
- [90] XU M, LI X, TENG T, et al. Reconfiguration of structural and functional connectivity coupling in patient subgroups with adolescent depression[J]. *JAMA Network Open*, 2024, 7(3): e241933.
- [91] YI X, FU Y, DING J, et al. Altered gray matter volume and functional connectivity in adolescent borderline personality disorder with non-suicidal self-injury behavior[J]. *European Child & Adolescent Psychiatry*, 2024, 33(1): 193-202.
- [92] THAI M, BAŞGÖZE Z, WESTLUND SCHREINER M, et al. A multi-modal assessment of self-knowledge in adolescents with non-suicidal self-injury: A research domains criteria (RDoC) study[J]. *Psychological Medicine*, 2024, 54(12): 3273-3284.
- [93] YANG L, WANG S, et al. Altered local gyrification index and corresponding functional connectivity in female depressed adolescents with suicide attempts and non-suicidal self-injury[J]. *Psychoradiology*, 2025, 5: kkaf023.
- [94] 汪美玲, 刘青山, 张道强. 基于机器学习的脑影像基因组学分析方法综述[J]. *数据采集与处理*, 2025, 40(4): 869-886.
- WANG Meiling, LIU Qingshan, ZHANG Daoqiang. A review of machine learning for brain imaging genomic analysis[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2025, 40(4): 869-886.

作者简介:



梁臻(1986-),女,教授,博士生导师,研究方向:脑机智能、情感脑机接口、跨模态神经工程、脑机接口大模型、神经科学与重大神经精神疾病, E-mail: jane-zliang@szu.edu.cn。



钟书婷(2002-),女,硕士研究生,研究方向:神经影像与脑科学。



徐颖(2002-),女,硕士研究生,研究方向:脑机接口和脑电解码。



黄怡(1989-),女,博士生导师,研究方向:决策过程、社会心理学、成功老化、社会神经科学和神经经济学。



张力(1988-),男,硕士生导师,研究方向:智能影像遗传学、计算神经科学和情感与疼痛。



黄淦(1982-),男,博士生导师,研究方向:脑机接口,神经调控和神经假肢。



周勇杰(1976-),通信作者,女,副主任医师,研究方向:儿童青少年情绪障碍, E-mail: qingzhu1108@126.com。

(编辑:张黄群)