

·临床研究·

脑卒中运动功能障碍的局部一致性fMRI研究*

杨 浩¹ 余秋蓉¹ 魏 彧¹ 徐国军¹ 王鹤玮² 尹大志³ 孙莉敏² 贾 杰² 范明霞^{1,4}

摘要

目的:运用静息态功能性磁共振成像探究不同程度运动功能障碍脑卒中的脑局部一致性(regional homogeneity, ReHo)变化。

方法:对单侧皮质下脑卒中患者(其中轻度和重度运动功能障碍患者各13例)和13例健康志愿者分别进行静息态功能磁共振成像检查。分别计算三组被试的全脑ReHo值,运用双样本 t 检验得到组间的差异脑区,进一步将差异脑区的ReHo值与临床肢体运动功能评分及手腕运动功能评分作相关性分析。

结果:与健康对照组比较,轻度组病灶同侧皮质下的尾状核和丘脑的ReHo显著减小,辅助运动区及病灶对侧颞下回、梭状回及小脑的ReHo显著增高。重度组病灶同侧的初级运动皮质、扣带前回、颞下回、脑岛、枕中回及丘脑的ReHo显著减小,病灶对侧额上回、颞下回及小脑的ReHo显著增高。患者子组比较,重度组病灶同侧枕中回和病灶对侧额上回的ReHo均显著低于轻度组,其中枕中回的ReHo值与上肢和“手+腕”FMA(Fugl-Meyer Assessment)评分显示正相关(分别为 $r=0.647$, $r=0.682$, $P<0.001$),颞上回的ReHo值亦与上肢和“手+腕”FMA评分显示正相关(分别为 $r=0.646$, $r=0.718$, $P<0.001$)。

结论:单侧皮质下脑卒中运动功能障碍静息态神经功能活动异常与运动功能严重程度密切相关,主要涉及邻近病灶的皮质下组织和远离病灶的脑皮质。其中一些脑区的ReHo值与患者运动功能评分存在相关性,或许说明ReHo分析可以作为评估卒中患者运动功能障碍的一个重要影像学指标。

关键词 脑卒中;局部一致性;静息态功能磁共振成像;运动功能障碍

中图分类号:R743.3,R493 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1242(2020)-01-0010-07

Brain regional homogeneity alterations at resting state in the patients with motor deficits after stroke/
YANG Hao,YU Qiurong,WEI Yu,et al./Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 35(1): 10—16

Abstract

Objective: To investigate abnormal regional homogeneity in stroke patients with different severity of motor deficit.

Method: The unilateral subcortical stroke survivors ($n=13$, mild motor deficits, $n=13$, severe motor deficits, respectively) relative to healthy participants ($n=13$) were enrolled. The Kendall's coefficients of concordance of the whole brain of each group was calculated. Two-sample t -test was performed to compare the differences in brain regions between the two groups, and we further investigated the relationship between the motor deficits and ReHo of these areas.

Result: Compared with healthy controls, the ReHo in the ipsilesional caudate nucleus and thalamus decreased significantly, while the ReHo in the supplementary motor area and the contralesional inferior temporal gyrus, fusiform gyrus and cerebellum increased significantly in the mild stroke group. In the severe stroke group, the ReHo in the ipsilesional primary motor area, anterior cingulate gyrus, inferior temporal gyrus, insula, occipital middle gyrus and thalamus decreased significantly, but the ReHo in the contralesional superior frontal gyrus, in-

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2020.01.003

*基金项目:国家自然科学基金面上项目(81471651);国家自然科学基金青年项目(81401859);国家重点研发计划(2018YFC2002301)

1 华东师范大学上海市磁共振重点实验室,上海市,200062; 2 复旦大学附属华山医院康复医学科; 3 中国科学院上海生命科学研究院灵长类神经生物学重点实验室; 4 通讯作者

第一作者简介:杨浩,男,硕士研究生; 收稿日期:2019-04-25

ferior temporal gyrus and cerebellum increased significantly. Further comparison was made between the two subgroups of stroke. In the severe stroke survivors, the ReHo in the ipsilesional occipital gyrus and contralesional superior temporal gyrus were significantly lower than those in the mild motor stroke survivors, with their ReHo values positively correlated with the FMA scores (both the upper extremity section and the hand+wrist section of the Fugl-Meyer Scale).

Conclusion: The abnormal resting brain function activity of unilateral subcortical stroke motor dysfunction mainly involved the subcortical tissue adjacent to the lesion and the cerebral cortex far away from the lesion, which was closely related to the severity of motor dysfunction. ReHo in specific brain regions was significantly correlated with patients' motor function scores, indicating that ReHo method may be used as an important reference for the assessment of motor dysfunction in stroke patients.

Author's address Shanghai Key Laboratory of Magnetic Resonance, Department of Physics, East China Normal University, Shanghai, 200062

Key word stroke; regional homogeneity; magnetic resonance imaging; motor deficits

BOLD-fMRI研究证实皮质下脑卒中会导致远离病灶以外的大脑皮质的可塑性变化,具体表现为皮质功能活动改变及功能重组。但目前对于皮质下脑卒中后运动功能损伤的严重程度与脑功能活动改变之间的联系尚不清楚。基于静息态fMRI(resting-state functional Magnetic Resonance Imaging, rs-fMRI)的局部一致性^[1](regional homogeneity, ReHo)分析方法采用肯德尔和谐系数(Kendall's coefficient of concordance, KCC)来衡量一个功能团块内所有体素时间序列的一致性,可以间接反映局部脑区自发神经功能活动的同步性。局部一致性分析可在全脑范围内对局部功能活动差异性脑区进行准确定位,其值的增高或降低则提示该脑区神经元功能活动异常。本研究拟运用静息态fMRI探究不同程度运动功能障碍脑卒中患者的脑局部一致性,并与临床运动功能评分作相关性分析,以期了解脑卒中运动功能障碍严重程度与脑自发神经活动变化之间的关系。

1 资料与方法

1.1 研究对象

招募26例仅具有运动功能障碍的脑卒中患者。所有被试在进行静息态fMRI实验之前均接受认知功能量表评测(Mini-mental State Examination, MMSE)以及上肢运动功能评定测试,确保所有患者认知能力正常且仅具有运动功能障碍。该评估由华山医院康复科的两名经验丰富的医生完成。

患者入组标准:①右利手;②首次发病;③单侧肢体运动功能损伤;④发病时间3—6个月之间;⑤

被试年龄在18—75岁之间;⑥认知能力正常(MMSE≥27)。排除标准:①有磁共振检查禁忌证;②卒中前有过手运动功能障碍史;③患有严重的四肢偏瘫的被试;④有神经或精神疾病病史的被试。另筛选入组性别、年龄均匹配的13例健康志愿者(healthy controls, HC),其中包括12例男性,平均年龄为56.5±5.3岁,均为右利手。

上肢运动功能Fugl-Meyer(Fugl-Meyer Assessment of upper extremity, FMA-UE)评测满分为66分。参考已有文献对上肢运动功能障碍严重程度的分级方法^[2],我们将筛选入组的患者分为两个子组,分别为:轻度运动功能障碍组(mild motor deficits, MMD, FMA-UE≥42分)和重度运动功能障碍组(severe motor deficits, SMD, FMA-UE<29)。其中轻度运动功能障碍组(以下简称为轻度组, MMD)共13例,包含11例男性,平均年龄为56.1±3.0岁,上肢运动功能评分平均值为49.7±7.9,其中手+腕运动功能评分平均值为16.4±4.3。重度运动功能障碍组(以下简称为重度组, SMD)共13例,包含11例男性,平均年龄为56.7±9.4岁,上肢运动功能评分平均值为14.7±4.6,其中手+腕运动功能评分平均值为3.5±3.0。所有患者的人口统计学与临床信息见表1。本实验研究设计得到了本校伦理委员会的批准,扫描前所有被试均签署知情同意书。

1.2 fMRI扫描参数

使用3.0 Tesla磁共振成像仪(Trio system, Siemens, Erlangen, Germany)进行MRI数据采集。扫描线圈是标准12通道相控阵头部线圈。扫描时告

表1 26例慢性期脑卒中患者人口统计学与临床资料

被试	性别	年龄(岁)	病灶位置	病程(d)	FMA-UE	FMA-HW
轻度组						
1	男	63	L,BG	142	46	18
2	男	65	L,BG	106	48	20
3	男	52	R,BG	100	58	20
4	男	65	L,BG	143	42	12
5	男	56	L,Th	137	57	16
6	男	62	R,BG	102	60	15
7	男	57	R,BG,CR	180	62	18
8	男	70	R,BG	97	54	22
9	女	60	R,Th	162	40	13
10	男	63	L,Th	138	42	15
11	男	41	R,BG	124	42	14
12	男	39	R,BG	93	53	19
13	男	36	L,BG	93	42	11
重度组						
1	男	32	L,BG	126	20	4
2	男	59	R,BG	89	17	4
3	男	58	R,BG	90	8	1
4	男	62	R,BG,CR	145	14	0
5	女	56	L,BG,Th	108	20	9
6	男	61	L,BG,Th	102	11	3
7	男	59	L,BG	114	20	2
8	男	63	R,BG,CR,Hip	97	10	4
9	男	43	R,BG	178	12	2
10	男	63	R,BG	112	13	2
11	男	59	L,BG	140	17	5
12	女	55	L,BG	162	18	10
13	男	67	R,BG	142	9	0

注释:L:左侧;R:右侧;BG:基底节;Th:丘脑;CR:放射冠;HIP:海马;FMA:Fugl-Meyer评分

知被试保持头部稳定并保持清醒。受试者在扫描过程中佩戴一次性耳塞,并将海绵固定在被试头部两侧,以减轻噪音并减小头动。

本研究所需的实验数据扫描顺序依次为:定位像、常规T2加权像、T1加权结构像、静息态功能像。

各扫描序列具体参数如下:

①高分辨T1加权结构像:快速梯度回波序列(magnetization prepared rapid gradient echo imaging,MPRAGE),TR=1900ms,TE=3.42ms,层厚1mm,层间距0.5mm,矢状位192层,FOV=240mm×240mm,采集矩阵为256×256;扫描时间共363s。

②T2加权像:快速自旋回波序列,TR=6000ms,TE=93ms,层厚5mm,无层间距,横断位30层,FOV=220mm×220mm,采集矩阵为320×320;扫描时间共86s。

③静息态功能磁共振成像:平面回波序列(echo planar imaging,

EPI),TR=2000ms,TE=30ms,层厚4mm,层间距0.8mm,横断位30层,倾斜角=90°,FOV=220mm×220mm,采集矩阵为64×64。采集时间共486s,前6s为空扫,后480s时间内采集获取到240个时间点。

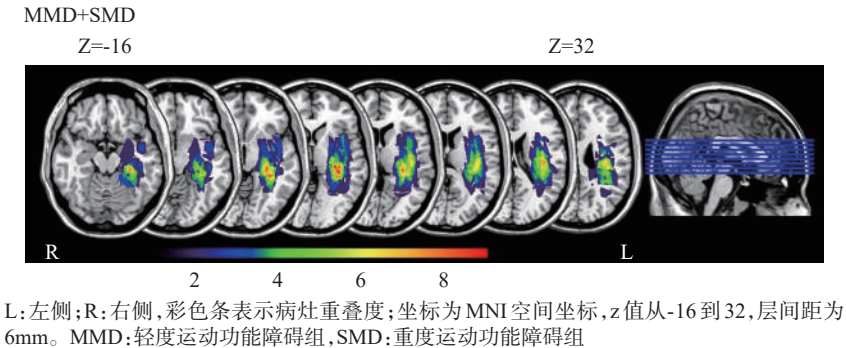
每位患者的病灶位置与大小均由一名经验丰富的放射科医生确定。首先在MRIcroN软件中(<http://www.mricro.com>)手动描绘出每位患者T2加权像所显示的病灶,得到每位患者的个体空间的病灶mask,之后在matlab中将14例患者的右侧病灶翻转到左侧,之后将所有患者的病灶mask标准化到MNI空间上。然后将每位患者的病灶mask相叠加得到病灶叠加图,最终展示在MRIcroN的标准模板上。每位患者的病灶位置与大小均由一名经验丰富的放射科医生确定,见图1。

1.3 静息态fMRI数据分析

1.3.1 数据预处理:数据预处理前,首先采用Matlab软件通过代码将14例病灶位于右侧半球的患者图像进行左右翻转,定义左侧为病灶同侧,右侧为病灶对侧。采用DPARSFA(<http://www.restfmri.net>)和SPM8(<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>)软件包对静息态功能磁共振成像数据进行预处理。首先去除前10个时间点的数据,然后对数据进行时间层校正和头动校正,将每个受试者的T1加权像先配准到各自的功能像上,然后将图像标准化到MNI空间。之后对图像进行重采样处理,重采样体素大小为3mm×3mm×3mm,之后对数据做去线性漂移和带通滤波处理(选取0.01—0.08Hz)处理。

1.3.2 ReHo的计算:在REST软件包(<http://www.restfmri.net>)对预处理后的数据计算肯德尔和谐系数(KCC, Kendall's Coefficients of Concordance)来

图1 患者组病灶分布图



评估每个体素与其相邻体素(相邻的26个体素)时间序列的相似性。计算得到每名被试的全脑 ReHo 图后,将每名被试 ReHo 图除以该个体全脑的平均局部一致性值,减少个体差异带来的误差。最后我们以半高全宽为6mm的高斯核对数据进行平滑处理。

1.4 统计学分析

利用SPM8将计算得到的ReHo图进行双样本 t 检验来比较重度组、轻度组和健康对照组的组间差异。并在REST中对统计结果进行阈值为 $P < 0.05$ 的Alphasim矫正(单个体素的阈值为 $P < 0.01$,最小团块大小为648mm³)。

使用SPSS 22.0计算ReHo显著差异脑区的肯德尔系数与临床运动功能评分的斯皮尔曼相关性系数。首先,我们把重度组与健康对照组,轻度组与健康对照组之间双样本 t 检验得到存在显著差异的脑区制作成mask,然后提取每个脑卒中患者对应mask脑区的ReHo值,并作平均;然后利用斯皮尔曼相关性分析来计算重度组或轻度组脑卒中患者各个差异脑区的ReHo值与其相对应的上肢及“手+腕”FMA分数的相关系数。同时,我们也制作由重度组与轻度组双样本 t 检验得到的差异脑区的mask,采用相同的步骤,将所有卒中患者各个差异脑区的ReHo值和与其对应的上肢FMA及“手+腕”FMA分数作斯皮尔曼相关性分析(统计阈值为 $P < 0.05$)。

2 结果

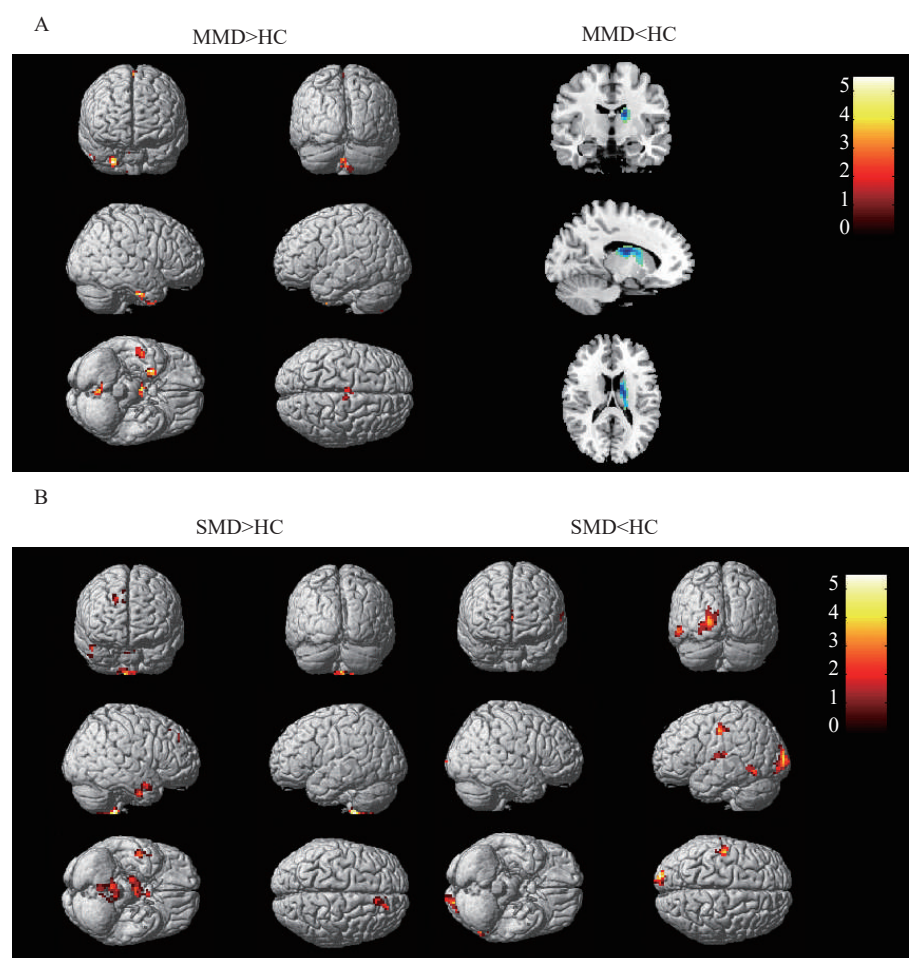
与健康对照组相比,轻度组的病灶对侧小脑、梭状回、颞下回、辅助运动区ReHo显著增高,而病灶同侧皮质下的尾状核和丘脑的ReHo显著减小,见图2-A。重度组与健康对照组比较,重度组的病灶对侧小脑、

颞下回、额上回的ReHo显著增高,而病灶同侧颞下回、枕中回、丘脑、脑岛、扣带前回、初级运动皮质的ReHo显著减小,见图2-B。两患者子组比较,重度组的病灶同侧枕中回和病灶对侧颞上回的ReHo显著低于轻度组,见图3-A;其中病灶同侧枕中回与上肢和“手+腕”FMA评分存在正相关($r=0.647$, $r=0.682$, $P < 0.001$),病灶对侧颞上回与上肢和“手+腕”FMA评分也存在正相关($r=0.646$, $r=0.718$, $P < 0.001$),见图3-B。见表2。

3 讨论

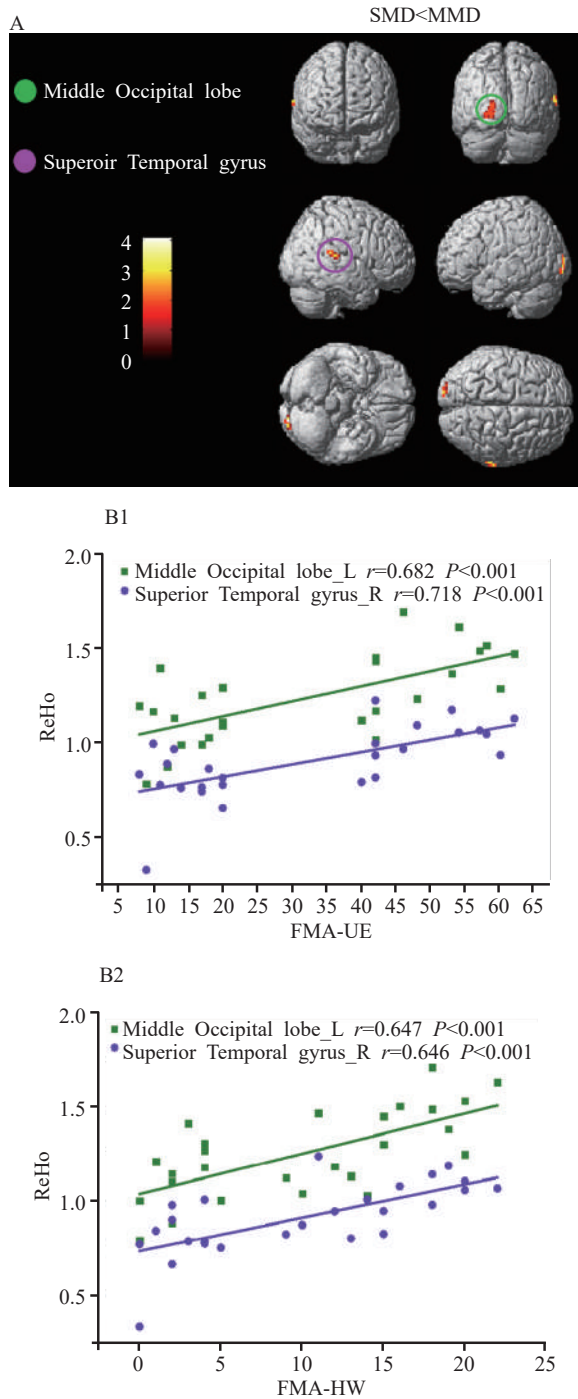
本研究采用局部一致性静息态fMRI研究发现,单侧皮质下脑卒中ReHo值显著降低的脑区主要集中在病灶同侧脑区:其中轻度组的ReHo值降低的

图2 重度组(SMD)、轻度组(MMD)和健康对照组(HC)的组间ReHo差异脑区



彩色条表示 t 值大小。

图3 重度组(SMD)、轻度组(MMD)的组间 ReHo 差异脑区及与FMA评分的相关性



彩色条表示 t 值大小。B1: 重度组与轻度组之间差异脑区(患侧枕中回、健侧颞上回)与患者上肢FMA分数的相关性。B2: 重度组与轻度组之间差异脑区(患侧枕中回、健侧颞上回)与患者FMA(手+腕)分数的相关性。Middle Occipital lobe: 枕中回, Superior Temporal gyrus: 颞上回, FMA-UW: 上肢FMA评分, FMA-HW: “手+腕”FMA评分

表2 轻度组、重度组和健康对照组的组间 ReHo 差异脑区

脑区	BA 分区	x	y	z	体素	t
MMD>HC						
小脑(R)		0	-66	-45	49	4.31
梭状回(R)		24	6	-48	35	4.85
颞下回(R)	20	54	-12	-36	31	4.39
辅助运动区	6	-3	-15	72	24	3.46
MMD<HC						
尾状核(L)		-12	3	15	74	5.15
丘脑(L)		-12	-21	6	28	2.69
SMD>HC						
小脑(R)		6	-42	-57	127	4.01
颞下回(R)	20	48	-6	-36	54	4.42
额上回(R)	8	9	33	39	57	3.80
SMD<HC						
颞下回(L)	37	-57	-60	-12	33	4.06
枕中回(L)	18	-18	-99	6	136	5.54
丘脑(L)		-21	-18	24	251	5.71
脑岛(L)		-36	-9	0	26	3.60
扣带回前(L)		-3	33	21	63	4.42
颞上回(L)		-63	-21	12	25	3.81
初级运动皮质(L)	3,4	-48	-18	45	51	4.65
SMD>MMD						
枕中回L	17	-18	-96	-3	44	3.61
颞上回R	22	66	-39	15	26	4.10

脑区出现在邻近病灶的尾状核和丘脑,重度组除了累及丘脑以外,在远离病灶的同侧大脑皮质出现了多个脑区的 ReHo 值显著降低。而两患者组 ReHo 值显著增加的脑区主要出现在远离病灶以外的对侧大脑皮质和小脑。

两患者组均显示脑皮质下邻近病灶的丘脑区 ReHo 值显著下降。本课题组王想敏等^[3]采用比率低频振幅(fractional amplitude of low frequency fluctuation, fALFF)方法研究类似一组脑卒中对象发现基底节区病灶同侧丘脑 fALFF 显著降低,而 Yin 等^[4]采用磁共振弥散张量成像研究同样发现邻近病灶的丘脑区 FA(fractional anisotropy, FA)值显著降低。上述研究结果均一致表明丘脑作为运动感觉信息传输中继站的功能遭到损伤,或许暗示在单侧皮质下基底节区脑卒中运动康复中,应该重视如何促使病灶同侧丘脑功能恢复正常化^[5]。

重度组显示病灶同侧的初级运皮质 ReHo 值显著下降。手的运动功能主要依赖有初级运动皮质起始的以皮质脊髓束为主的运动通路^[6-7]。以往研究发现猴脑丘脑的腹前侧核和腹外侧核与大脑初级运动皮质、运动前区(premotor cortex, PMC)、次级运动皮质(supplementary motor area, SMA)及扣带回之间存在结构连接^[8]。根据皮质-丘脑-皮质环路理

论^[9](cortico-thalamo-cortico loop theory),来自初级感觉传入的信息到达皮质后,丘脑会对信息进行初步加工整合再将这些信号传递给其他皮质区域。因此,病灶侧基底节区延及皮质脊髓束和基底节-丘脑-皮质回路的逆行性神经退变会导致病灶以远的相关脑区的功能和结构损伤。此外,重度组在远离病灶的颞下回和枕中回等非运动相关脑皮质也出现了ReHo值的显著降低。该两个脑区被认为是皮质-丘脑-皮质环路下运动相关的感觉信息整合的重要节点^[10]。由此可见,重度组通过丘脑的多个回路均出现了不同程度的紊乱。尤其是重度组相比轻度组的病灶同侧枕中回和病灶对侧颞上回的ReHo值均与上肢和“手+腕”运动FMA评分显著正相关,这也进一步暗示“皮质-丘脑-皮质环路”信息传输回路紊乱与上肢运动功能障碍程度密切相关。

轻度组SMA的ReHo增高,而重度组的病灶对侧额上回ReHo增高。通常一个动作的完成需要包含运动的计划(motor planning)、运动的编码(motor programming)和运动的执行(motor execution)三个必不可少的步骤^[11],人体任何一个随意动作都需要一系列运动相关脑区的协同工作。前额叶是负责运动计划的脑区,不仅在功能上与运动的高级控制有关,并且在结构上也与手运动执行核心脑区(初级运动皮质,M1区)存在连接^[12]。而SMA接受来自前额叶高级运动调控脑区的信号,通过“programming”将信号传递给运动执行的脑区,例如初级运动皮质和运动前区^[13-14]。两患者组显示累及运动高级调控脑区的不同,或许说明重度组比轻度组可能需要调动更高级运动调控脑区(例如前额叶)的参与功能代偿。

另外,两患者组的病灶对侧小脑ReHo均出现显著增加。小脑的主要功能是维持躯体的平衡、协调随意运动并发挥运动学习作用^[15]。以往研究表明,小脑在脑卒中患者的运动恢复过程中发挥着必不可少的作用^[16-18]。小脑损伤会导致精细动作、运动平衡以及运动学习等功能障碍^[19-20]。单手运动受同侧小脑控制协调,病灶对侧小脑ReHo值的增高说明该脑区也参与了功能代偿,这也与基于任务态的fMRI研究结果相一致^[20]。另有纵向研究报道^[22],伴随运动功能的改善,病灶侧相关脑区包括感觉运动区、前运动区、辅助运动区及两侧的顶下小叶的激活

强度明显增加,而健侧脑区,包括PMC、前额叶、楔前叶等的激活增加则预示较差的运动功能恢复。这也与本研究发现单侧皮质下基底节区脑卒中所致病灶同侧运动相关脑区ReHo降低,而病灶对侧皮质相关脑区ReHo增高代偿的上述研究结果相吻合。

4 结论

本研究采用局部一致性fMRI研究进一步揭示了皮质下脑卒中后脑神经功能活动异常与运动损伤之间的关系。研究发现单侧皮质下脑卒中所致脑静息态神经功能活动异常与运动功能障碍严重程度密切相关;卒中患者脑ReHo异常不局限在邻近病灶的皮质下组织,同时也会影响病灶以远的大脑皮质;其中病灶同侧枕中回和病灶对侧颞上回的ReHo值与患者上肢和“手+腕”运动功能FMA评分存在显著相关性,或许暗示对卒中患者全脑局部一致性分析可以作为评估单侧皮质下脑卒中患者上肢运动功能障碍的一个生物影像学指标。

参考文献

- [1] Zang Y, Jiang T, Lu Y, et al. Regional homogeneity approach to fMRI data analysis[J]. Neuroimage, 2004, 22(1): 394—400.
- [2] Woytowicz EJ, Rietschel JC, Goodman RN, et al. Determining levels of upper extremity movement impairment by applying a cluster analysis to the Fugl-Meyer assessment of the upper extremity in chronic stroke[J]. Archives of Physical Medicine & Rehabilitation, 2017, 98(3):456—462.
- [3] 王想敏,赵智勇,尹大志,等.脑卒中静息态下脑活动异常的比率低频振幅fMRI研究[J].磁共振成像,2016,7(06):401—406.
- [4] Yin D, Yan X, Fan M, et al. Secondary degeneration detected by combining voxel-based morphometry and tract-based spatial statistics in subcortical strokes with different outcomes in hand function[J]. American Journal of Neuroradiology, 2013, 34(7):1341—1347.
- [5] Elias GJB, Namasivayam AA, Lozano AM. Deep brain stimulation for stroke: Current uses and future directions[J]. Brain Stimulation,2018,1(1): 3—8.
- [6] Kwan HC, Mackay WA, Murphy JT, et al.Spatial organization of precentral cortex in awake primates[J]. Journal of Neurophysiology, 1978, 41(5): 1120—1130.
- [7] Makary MM, Eun S, Soliman RS, et al. Functional topography of the primary motor cortex during motor execution and motor imagery as revealed by functional MRI[J]. Neuro-

- Report, 2017, 28(12): 731—738.
- [8] Wang Z, Yuan Y, Bai F, et al. Altered functional connectivity networks of hippocampal subregions in remitted late-onset depression: a longitudinal resting-state study[J]. Neuroscience Bulletin, 2015, 31(1):13—21.
- [9] Basso MA, Uhlrich D, Bickford ME. Cortical function: a view from the thalamus[J]. Neuron, 2005, 45(4):485—488.
- [10] Kumar V, Mang S, Grodd W. Direct diffusion-based parcellation of the human thalamus[J]. Brain Structure and Function, 2015, 220(3):1619—1635.
- [11] Azouz R, Gray CM, Nowak LG, et al. Physiological properties of inhibitory interneurons in cat striate cortex[J]. Cerebral Cortex, 1997, 7(6):534—545.
- [12] Morecraft RJ, Van Hoesen GW. Frontal granular cortex input to the cingulate (M3), supplementary (M2) and primary (M1) motor cortices in the rhesus monkey[J]. Journal of Comparative Neurology, 1993, 337(4):669—689.
- [13] Fregosi M, Rouiller EM. Ipsilateral corticotectal projections from the primary, premotor and supplementary motor cortical areas in adult macaque monkeys: a quantitative anterograde tracing study[J]. European Journal of Neuroscience, 2017, 46(8): 2406—2415.
- [14] Arai N, Muller-Dahlhaus F, Murakami T, et al. State-dependent and timing-dependent bidirectional associative plasticity in the human SMA-M1 network[J]. Journal of Neuroscience, 2011, 31(43):15376—15383.
- [15] Zeeuw CID, Brinke MMT. Motor learning and the cerebellum[J]. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology, 2015, 7(9): 1—20.
- [16] Schulz R, Frey BM, Koch P, et al. Motor output in chronic stroke[J]. Cerebral Cortex, 2015, 1(27):635—645.
- [17] Yanna T, Pendy JT, Li WA, et al. Motor imagery-based rehabilitation: potential neural correlates and clinical application for functional recovery of motor deficits after stroke[J]. Aging and Disease, 2017, 8(3):364—371.
- [18] Cheng L, Wu Z, Sun J, et al. Reorganization of motor execution networks during sub-acute phase after stroke[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2015, 23(4):713—723.
- [19] Isabelle L, Dechaumont-Palacin S, Castel-Lacanal, et al. Prognostic value of FMRI in recovery of hand function in subcortical stroke patients[J]. Cerebral Cortex, 2007, 17(12):2980—2987.
- [20] Fran AC, De Andrade DC, Teixeira MJ, et al. Cerebellum as a possible target for neuromodulation after stroke[J]. Brain Stimulation, 2018, 11(6): 1395—1396.
- [21] Small SL, Hlustik P, Noll DC. Cerebellar hemispheric activation ipsilateral to the paretic hand correlates with functional recovery after stroke[J]. Brain, 2002, 125(7): 1544—1557.
- [22] Loubinoux I, Carel C, Pariente J, et al. Correlation between cerebral reorganization and motor recovery after subcortical infarcts[J]. NeuroImage, 2003, 20(4): 2166—2180.