

藏汉双语者汉语阅读理解的静息态功能连接分析*

黄玲珊¹ 陈建林¹ 刘光耀² 张喆³ 董英^{**1}

(¹ 兰州大学外国语学院, 兰州, 730000) (² 兰州大学第二医院核磁共振科, 兰州, 730030)

(³ 兰州大学信息科学与工程学院, 兰州, 730000)

摘要 研究结合静息态全脑功能连接密度和基于种子点的功能连接(FC)分析考察了藏汉双语者汉语(L2)阅读各子能力(细节捕捉和推理判断)的固有脑功能组织特点。结果发现左侧额下回—左侧颞上回和右侧舌回—右侧中央前回之间的FC值均与细节捕捉题得分和推理判断题得分呈显著正相关,但是左侧额下回—右侧顶下小叶之间的FC值只与推理判断题得分呈显著正相关。表明藏汉双语者汉语阅读各子能力之间既有重叠的又有不同的功能连接通路。

关键词 藏汉双语 汉语阅读 功能连接 静息态

1 引言

我国是多民族融合的国家,少数民族众多,其中藏族一般聚居在西藏大部、青海、甘肃以及四川的部分区域,通常汉语是藏族的第二语言(简称“二语”, second language, L2),因此在上述地区分布着大量的第一语言(简称“一语”, first language, L1)为藏语的藏汉双语者。目前,对藏汉双语者汉语习得过程的研究越来越受到人们的关注,已有研究表明藏汉双语者L1和L2的加工机制之间存在显著差异(才让措, 窦秀玉, 2014; 赵小雪, 胡阿旭, 于洪志, 2013),但其确切的脑加工机制尚不明确。对藏汉双语者的汉语加工脑机制进行深入研究,能够更好地了解藏族者汉语语言的加工特点,提高其汉语的学习时效。

阅读作为一种依赖于文字载体进行复杂心理认知活动的过程(Linderholm & Van Den Broek, 2002),是藏汉双语者汉语学习的主要输入方式之一,在汉语习得过程中具有重要的意义。语言理解图式理论指出人脑在有新信息输入时,会自发地将已有的知识关联起来构成一个动态的知识表征系统,以便新信息存储和处理(周明芳, 郑晶, 2010)。阅读过程就是读者原有的图式与文本提

供的信息之间相互作用的过程,即在语言认知系统下对输入信息的关联、猜测与验证(Rose, Feldman, & Jankowski, 2003)。通常,阅读能力被认为具有可分性,其内部包含了多个子能力(闰国利, 何立媛, 宋子明, 2016)。Basaraba, Yovanoff, Alonzo 和 Tindal (2013)将阅读能力分为主旨概括、细节捕捉和推理判断三个子能力。有研究表明,语言学习者在L1学习过程中对阅读材料主旨的回忆多于对细节的回忆(Lund, 1991)。并且,相对于单语者,双语者在阅读理解过程中对不同的理解信息更具有敏感性,表明双语者语言理解能力的各子能力更具差异性(黄敬, 王佳旻, 2013)。虽然目前已有的功能磁共振成像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)研究已经揭示了一些与L1和L2阅读能力均有关的关键脑区,主要包括左侧额下回(Gough, Nobre, & Devlin, 2005)、左侧颞上回(Chang et al., 2010)、左侧梭状回(Cohen & Dehaene, 2004)和中央前回(Koyama et al., 2011)等,并且功能连接(functional connectivity, FC)分析也表明了一些脑区之间的FC,比如左侧颞上回和左侧额下回(Turken & Dronkers, 2011)、左侧梭状回和默认网络(Koyama et al., 2011)、左侧颞上回和视觉分析脑区(Chai et

* 本研究得到国家社会科学基金项目(16BYY085)和中央高校基本科研业务经费专项资金项目(17LZUJBWZY069)的资助。

** 通讯作者: 董英。E-mail: dongy@lzu.edu.cn

DOI:10.16719/j.cnki.1671-6981.20180504

al., 2016)、语音加工脑区和视觉分析脑区(Zhang et al., 2014), 与 L1 和 L2 阅读能力相关。但是, 现有的研究主要从阅读能力的整体层面出发, 而对阅读能力的各子能力未曾涉及, 各子能力相关的脑神经基础有何异同, 大脑是如何来描述各子能力的, 这些问题有待进一步研究。

此外, 静息态功能连接(resting-state functional connectivity, rs-FC)分析作为一种有效的技术手段已经被应用于揭示语言习得脑功能机制的研究(Tomasi & Volkow, 2012)。相对于传统的任务态研究, rs-FC 可以很好地表征大脑非特异外部刺激下的固有功能组织(Fox & Raichle, 2007)。已有研究表明, 个体在 rs-FC 上存在差异, 并且这种差异和个体特定的语言能力之间存在一定关系, 比如, 具有较强脑岛和顶上回之间 FC 的人相应地更容易学习印度语里的卷舌音(Ventura-Campos et al., 2013)。与此同时, rs-FC 分析也逐渐地被用于双语阅读机制的研究。Zhang 等(2014)探究了母语为汉语(L1)的英语(L2)学习者大脑阅读网络内部 FC 与 L1 和 L2 阅读能力之间的关系, 他们发现无论是 L1 还是 L2 的阅读能力均与阅读网络内部 FC 之间存在显著正相关, 并且联合分析结果显示相关的 FC 主要在视觉分析脑区和语音加工脑区之间。另一项研究考察了成年人 L2 学习能力与固有功能连接之间的关系, 研究者们首先对 15 名 L1 为英语的被试进行了静息态 fMRI 数据采集, 然后让他们进行了为期 12 周的高强度法语(L2)课程学习, 并将课程学习完成后法语阅读速率的改进程度与学习前的语言网络内部 FC 强度做了相关分析, 结果发现法语阅读水平的改进程度与相应的 FC 强度之间存在很强的相关性, 预示着 L2 习得阅读能力可以通过语言网络内的固有 FC 来预测(Chai et al., 2016)。但是, 以上研究大多采用基于先验知识的种子点 FC 方法, 这就有可能使得研究结果由于特定种子点的选择而具有主观性。最近, 一种新的 FC 方法—功能连接密度(functional connectivity density, FCD)有效改进了以上不足并被广泛地应用于探究体素水平的全脑 FC。通常, 对于一个特定的体素, 其 FCD 值越大, 意味着该体素在大脑信息加工过程中的作用也越大(Tomasi & Volkow, 2010; Zhang et al., 2016)。

综上所述, 本研究的主要目的是探究藏汉双语者汉语(L2)阅读能力的各子能力与 rs-FC 之间存在何种关系。并且, 基于之前的研究, 本研究假设

藏汉双语者汉语阅读各子能力对应的 rs-FC 通路之间存在差异。我们主要采用静息态下的全脑 FCD 分析, 结合基于种子点的 FC 分析, 考查藏汉双语者汉语阅读能力的不同子能力与 rs-FC 之间的关系, 探讨藏汉双语者汉语阅读各子能力的固有脑功能组织特点。

2 材料与方法

2.1 研究对象

19 名藏族在校大学生志愿者(男 10 名, 女 9 名, 年龄(均值 \pm 标准差): 19.2 ± 1.3 岁, 汉语学习年限: (均值 \pm 标准差) 12 ± 2.3 年, 均为右利手)被招募参与了本研究。所有被试第一语言为藏语(L1), 第二语言为汉语(L2), 其中汉语水平熟练。经临床询问和诊断, 所有被试视力正常, 无精神或神经病史, 无患重大疾病史, 无酗酒和药物滥用史, 常规 MRI 检查无颅内病灶。所有被试被告知本研究的目的并自愿签署了知情同意书。

2.2 汉语阅读能力评估

汉语阅读整体能力的评估采用汉字阅读效率测试(Chinese Character Reading Efficiency Test, CCRET)。该测试改编自英语阅读能力测试, 通过统计给定时间内(45 秒)受试者正确阅读汉字的个数来评估其阅读水平(Zhang et al., 2013, 2014)。该测试包含 104 个子项, 所有子项依据难易程度排列, 所选汉字词频在 4~5636 次之间(平均 196 次), 笔画在 2~14 画之间(平均 7.3 画), 汉字单元在 1~5 个之间(平均 2.4 个)。

同时, 本研究选用汉语水平考试(HSK)(六级)的阅读专项测试题来评估被试汉语阅读的各子能力。HSK 被认为是可以比较客观地评估汉语作为非第一语言学习者的汉语能力测试。通过随机选取历年阅读专项中的部分测试题, 最终形成了由 10 篇阅读短文和 40 个选择题构成的测试题, 并根据文献(黄敬, 王佳旻, 2013)的方法, 将测试题中题型划分为三类:

(1) 概括总结题: 考查受试者理解并抓住阅读材料主要内容的能力; (2) 细节捕捉题: 考查受试者理解并抓住阅读材料有关细节的能力; (3) 推理判断题: 考查受试者理解并根据阅读材料进行推理的能力。此外, 为确保上述题型分类的有效性, 邀请了两位汉语专家对分类结果进行评估, 并对评估不一致的分类题型讨论取得一致。最终该测试题中概括总结题、细节捕捉题和推理判断题各为 6 个、

21 个和 13 个。鉴于概括总结题较少,本研究仅将两种题型纳入研究范畴。评分规则为答对一题记一分,细节捕捉题和推理判断题分别计算分数,满分分别为 21 分和 13 分。考虑到两种题型评分结果之间的可比性,对每种题型的总分进行归一化处理,即总分均为 20 分,细节捕捉题和推理判断题答对一题的得分分别为 20/21 分和 20/13 分。阅读各子能力测试要求被试在 50 分钟内完成。

2.3 静息态数据采集

静息态 fMRI 数据在一台 16 通道线圈的西门子 3.0T 磁共振仪完成采集,采用梯度回波—平面回波成像 (gradient echo-echo planar imaging, GRE-EPI) 序列进行扫描。在数据扫描过程中,要求被试闭眼、放松、清醒地平躺在扫描仪中,并尽量避免特定意向性思维活动。同时为避免扫描过程中被试发生过大的头动,采用专用海绵垫将被试头部固定在矩阵线圈中。在扫描结束后,询问每一位被试是否发生过大的头动或睡着,所有被试均表示无过大头动或者睡着。具体扫描参数如下:重复时间 (TR) = 2000ms, 回波时间 (TE) = 30 ms, 层厚 = 3.8mm, 层间距 = 0.38mm, 视野 (FOV) = 240mm × 240mm, 矩阵 (Matrix) = 64 × 64, 扫描覆盖全脑共 30 层。最终每一位被试共采集 200 个时间点,总计 400 秒。所有数据的采集均由专人负责完成。”

2.4 数据预处理

采用基于 SPM12 (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>) 的 DPARSF (<http://www.restfmri.net>) 软件完成静息态功能数据的预处理,其主要处理步骤为: (1) 为平稳扫描初始时刻的信号状态和适应扫描仪的固有噪声,对所有被试时间序列信号的前 10 个时间点进行剔除; (2) 对剩下的功能像进行层间时间校正和头动校正,校正所有不同扫描时间点到同一个参考点,并剔除头动过大的被试,剔除标准为平动大于 2mm 或转动大于 2°, 本研究中所有被试均未大于此标准; (3) 将所有被试的功能像空间标准化到蒙特利尔神经病学研究所 (Montreal Neurological Institute, MNI) 标准空间模版,并将其重采样为 3mm × 3mm × 3mm; (4) 将头动参数、白质信号、脑脊液以及全脑信号作为协变量剔除; (5) 滤波和去线性漂移,排除 0.01-0.08Hz 频段以外的生理噪声信号的影响和去除机器长时间采集积累的线性趋势。此外,为了进一步降低头动的影响,我们计算了所有被试体素水平的平均 frame-wise displacement (FD)

值 (均值 ± 标准差: 0.12 ± 0.013), 未发现有被试 FD 值大于 0.3。。

2.5 FCD 和 FC 分析

FCD 主要是用来从体素水平评估大脑中任意体素与其它所有剩余体素之间的 FC 情况。其计算过程为: 对于任意给定体素, 计算其与所有其它体素之间的皮尔森相关系数; 统计相关系数大于 .6 的 FC 数作为该给定体素的 FCD 值; 重复以上步骤直到所有体素的 FCD 值都被计算。在此, 我们选择了 0.6 作为功能连接阈值, 该阈值在之前的研究中被认为是计算 FCD 最佳的阈值 (Qin, Xuan, Liu, Jiang, & Yu, 2015; Tomasi & Volkow, 2010)。在所有被试进行全脑 FCD 计算后, 进一步对其进行 Z 变换标准化, 并对标准化后的图像采用 6mm 的高斯核全宽半高 (full width at half maximum, FWHM) 进行平滑处理, 以便减少因个体间大脑功能解剖差异对统计结果的影响。此外, 对全脑 FCD 和 CCRET 得分之间进行皮尔森相关分析, 找到显著相关脑区。

FC 分析的主要目的是寻找大脑功能网络中与阅读各子能力相关的 FC 通路。其主要分析过程是, 以上述 FCD 和 CCRET 得分之间显著相关的脑区为种子区域, 计算各种子区域与全脑各体素之间的 FC, 进一步对所有 FC 值和阅读各子能力 (细节捕捉题和推理判断题) 评分进行相关分析, 找到存在显著相关的 FC, 并采用 Fisher-Z 变换对分析结果进行标准化。

2.6 统计分析

采用配对样本 *t* 检验对比被试阅读细节捕捉题和推理判断题得分之间的差异, 显著性阈值为 $p < .05$, 统计检验采用 SPSS 21.0 完成。采用皮尔森相关分析评估汉字阅读效率和全脑 FCD 值以及阅读各子能力评分和基于种子区域 FC 值之间的相关性, 显著水平阈值为 $p < .05$, 经 AlphaSim 校正, 最小 122 个体素, 个体未校正 $p < .001$, 并且将性别和年龄作为协变量回归去除。基于体素水平的全脑相关分析采用 DPABI (<http://rfmri.org/dpabi>) 来完成。

3 结果

所有被试 CCRET 得分结果为 78.2 ± 13.4 (均值 ± 标准差), 得分范围为 54~99。HSK 阅读能力测试结果显示, 细节捕捉题得分为 17.6 ± 1.4 (均值 ± 标准差), 推理判断题得分为 16.2 ± 1.6 (均值 ± 标准差), 两种题型的得分之间存在显著差

异 ($p=.02$)。相关分析结果显示, CCRET 得分与细节捕捉题得分 ($r=.15$, $p=.11$) 和推理判断题得分 ($r=.09$, $p=.39$) 之间均没有相关性, 但是细节捕捉题得分与推理判断题得分之间存在显著相关 ($r=.47$, $p<.01$)。

对全脑 FCD 和 CCRET 得分进行相关分析结果显示, CCRET 得分分别与左侧额下回和右侧舌回的 FCD 值之间呈显著正相关, 而与右侧楔前叶的 FCD 值之间呈显著负相关 (图 1, 表 1)。进一步以上述三个脑区为种子点进行 FC 分析, 并分别与细节捕捉题得分和推理判断题得分进行全脑体素水平的相关分析, 结果发现, 细节捕捉题得分和推理判断题得分均与左侧额下回—左侧颞上回和右侧舌回—右侧中央前回之间的 FC 值呈显著正相关, 并且推理

判断题得分还与左侧额下回—右侧顶下小叶之间的 FC 值呈显著正相关 (图 2A, 表 2)。未发现以右侧楔前叶为种子区的 FC 与各子能力得分之间存在显著相关性。上述结果经 AlphaSim 校正, 显著性水平为 $p<.05$ 。此外, 各相关脑区 FC 均值与细节捕捉题得分和推理判断题得分之间的相关性分析散点图如图 2B 所示。

4 讨论

藏汉双语者的汉语习得机制已经被学者们广泛地研究, 但是已有研究大多从语言学行为量表方面开展, 鲜有研究借助先进的 fMRI 技术对藏汉双语者的汉语习得机制进行探讨。本研究采用静息态下全脑 FCD 和基于种子点 FC 相结合的分析方法, 考

表 1 藏汉双语者 CCRET 得分与全脑 FCD 显著相关的簇

解剖脑区	缩写	BA	MNI 坐标			体素大小	最大 r 值	p 值
			X	Y	Z			
左侧额下回	IFG.L	46	-48	15	8	167	.66	< .05
右侧舌回	LG.R	16	18	-93	-8	182	.69	< .05
右侧楔前叶	PCU.R	7	18	-51	60	126	-.69	< .05

注: BA 为布罗德曼脑区, MNI 为蒙特利尔神经病学研究所, r 为相关值, 统计结果经 AlphaSim 校正, $p<.05$ 。

表 2 藏汉双语者各阅读子能力得分与基于种子点的 FC 显著相关的簇

种子区域	阅读子能力	解剖脑区	缩写	BA	MNI 坐标			体素大小	最大 r 值	p 值
					X	Y	Z			
左侧额下回	细节捕捉题	左颞上回	STG.L	22	-66	-21	3	202	.80	< .05
	推理判断题	左颞上回	STG.L	22	-48	-15	3	175	.79	< .05
		右顶下小叶	IPL.R	40	39	-57	39	139	.66	< .05
右侧舌回	细节捕捉题	右中央前回	PCG.R	2/4	60	0	12	338	.73	< .05
	推理判断题	右中央前回	PCG.R	4	54	-6	18	235	.74	< .05

注: BA 为布罗德曼脑区, MNI 为蒙特利尔神经病学研究所, r 为相关值, 统计结果经 AlphaSim 校正, $p<.05$ 。

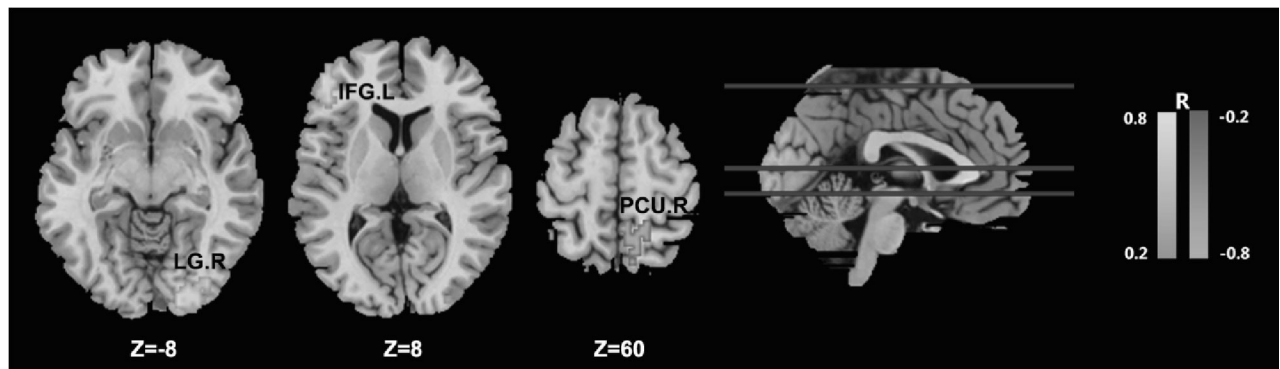


图 1 藏汉双语者全脑体素 FCD 与 CCRET 得分相关体素的空间分布图

注: LG.R: 右侧舌回, IFG.L: 左侧额下回, PCU.R: 右侧楔前叶。

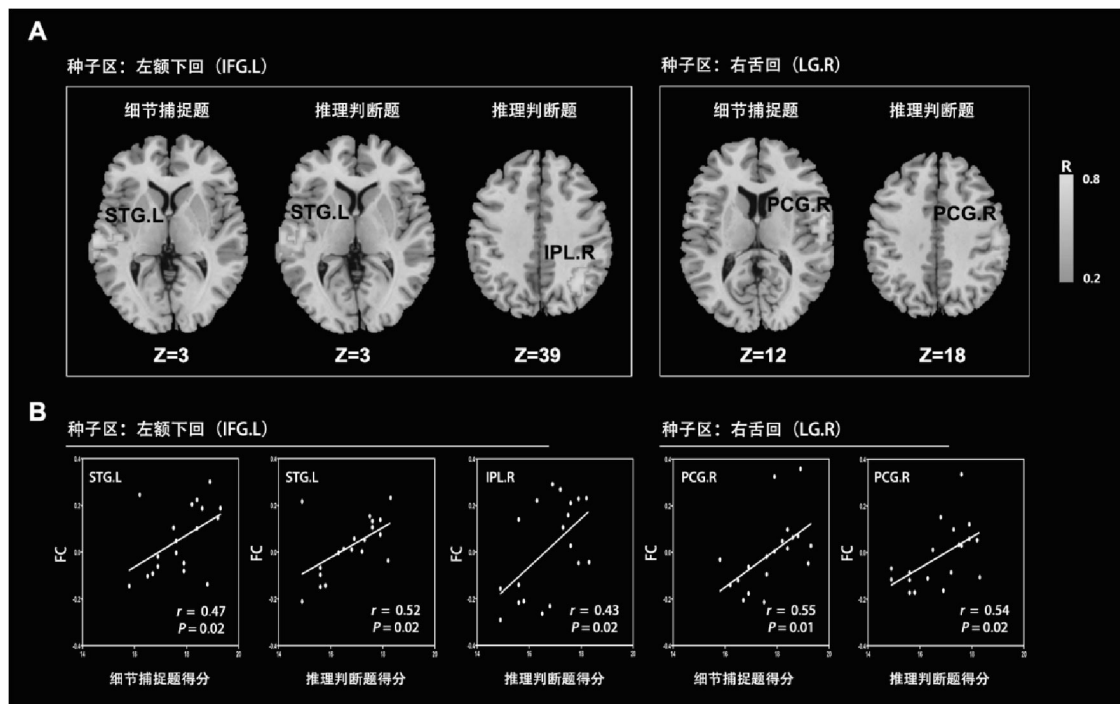


图2 基于 FCD 种子区的 FC 与阅读各子能力得分之间的相关性

注：藏汉双语者各阅读子能力得分与基于 FCD 种子点的 FC 相关体素的空间分布图 (A) 和各相关簇 FC 均值之间相关性散点图 (B)。AlphaSim 校正, $p < .05$ 。STG.L: 左侧额上回, IPL.R: 左侧顶下小叶, PCG.R: 右侧中央前回。

察了藏汉双语者汉语阅读细节捕捉能力和推理判断能力对应的 FC 通路之间的异同, 探究了与汉语阅读子能力有关的大脑固有功能组织特点。

本研究阅读子能力测试结果显示, 藏汉双语者的 HSK 阅读细节捕捉题得分显著高于推理判断题得分。细节捕捉题主要考察的是阅读者对文本中文字面信息的提取能力, 是阅读理解比较基础的层面 (Carnine, Silbert, Kame' enui, & Tarver, 2010), 而推理判断题主要评估阅读者对文本中隐含的信息进行提取、关联并做出推断的能力, 是细节捕捉的进一步拓展 (Applegate, Quinn, & Applegate, 2002)。已有研究表明, 阅读者对文本信息进行推理判断比细节捕捉具有更大的难度 (Basaraba et al., 2013)。本研究结果预示着在 L2 阅读中推理判断同样比细节捕捉更具难度。同时, 相关分析结果显示, CCRET 得分与两阅读子能力得分之间均没有相关性, 但是两阅读子能力得分之间存在显著相关。CCRET 通过统计规定时间内被试正确阅读汉字的个数达到评估其阅读效率的目的 (Zhang et al., 2013), 其主要考察阅读理解最基础的层面—词汇理解。而细节捕捉和推理判断除了对文本中词汇的理解, 往往还需要阅读者对大量的句子、段落和语篇进行理解 (Basaraba et al., 2013)。本研究表明藏汉双语者汉

语阅读理解单个词汇的能力与理解句子甚至语篇的能力之间没有必然性, 预示着 L2 阅读能力的提高不应局限于词汇层面。相反地, 两阅读子能力得分之间的相关性表明 L2 阅读各子能力之间存在一致性或迁移性。

本研究结果也显示, 藏汉双语者的左侧额下回和右侧舌回的 FCD 值分别与 CCRET 得分之间呈正相关, 而右侧楔前叶的 FCD 值与 CCRET 得分之间呈负相关。左侧额下回作为与阅读有关的脑区已经被之前的研究发现 (Koyama et al., 2011; Zhang et al., 2014), 本研究结果表明左侧额下回也是藏汉双语者汉语阅读加工的关键脑区。舌回被认为是视觉记忆的重要脑区, 已有研究发现其在阅读理解任务中被显著激活 (Henderson, Choi, Lowder, & Ferreira, 2016)。本研究舌回 FCD 值与汉字阅读效率的相关性表明了舌回可能在语言理解过程中具有重要作用。楔前叶通常被认为是默认网络的重要脑区, 其与情景记忆、环境监测、意识等多个高级认知功能相关。既往研究发现英语阅读能力与默认网络和梭状回之间的 FC 值呈负相关 (高寒等, 2013)。本研究结果表明楔前叶可能作为关键脑区参与到与记忆有关的阅读信息加工过程, 并且其自发功能活动在一定程度上可以反向表征汉语阅读效率水平。

进一步基于种子点的 FC 分析发现, 细节捕捉题得分和推理判断题得分均与左侧额下回—左侧额上回和右侧舌回—右侧中央前回之间的 FC 值呈正相关。左侧额下回和左侧额上回均被认为是阅读网络中的关键脑区 (Roncaglia-Denissen & Kotz, 2016)。一项结合任务态和静息态 fMRI 的研究表明, 左侧额下回的损伤可以导致语言理解功能的缺失 (Hallam et al., 2018)。另一项研究探究了蒙汉双语者汉语词汇命名加工的脑机制, 结果发现相对于单语者, 双语者在进行汉语词汇命名任务时左侧额上回表现出更强的激活 (赵澄等, 2013)。并且, 也有研究发现左侧额下回和左侧额上回之间的 FC 强度与阅读能力之间具有显著相关性 (Zhang et al., 2014)。传统观点认为中央前回为初级运动和躯体感知相关脑区, 但现有研究表明其也与阅读信息加工有关 (Bolger, Perfetti, & Schneider, 2005)。中央前回通常和其它一些运动相关脑区, 如中央后回和颞平面等, 构成一个听觉—运动语音协调网络, 该网络在大脑信息感知中扮演着重要角色 (Hickok & Poeppel, 2004)。本研究结果预示着中央前回可能参与藏汉双语者汉语阅读信息的感知过程, 并且与舌回之间的功能一致性可以反应阅读能力。同时, 本研究也发现推理判断题得分与左侧额下回—右侧顶下小叶之间的 FC 值呈正相关。顶下小叶被认为是与人脑记忆相关的脑区, 该脑区在英文单词记忆任务中呈现激活 (罗琳, 翟洪昌, 2013)。最近一项研究考察了成年英语者 (L1) 在学习法语 (L2) 过程中顶下小叶的功能改变, 结果发现, 只有 L2 任务与顶下小叶激活之间呈显著相关, 表明顶下小叶可能是与 L2 加工有关的特异脑区 (Barbeau et al., 2017)。本研究结果预示着左侧额下回—右侧顶下小叶之间的 FC 强度可以反应藏汉双语者的阅读推理判断能力。总之, 本研究结果不仅表明特定的脑功能连接通路同时参与藏汉双语者汉语阅读理解中细节信息和推理信息的加工, 而且表明, 相对于细节捕捉, 推理判断作为一种较为复杂的阅读理解过程具有更多的脑功能连接通路参与其中, 这为后期开展阅读理解能力可分性研究提供了神经基础支撑。

此外, 本研究结果也可以为藏族学生的汉语阅读教学提供一定的启示, 在学习者的汉语阅读过程中, 汉语阅读教学需具有针对性、层次性和递进性, 首先应该明确地考察和提高学生对汉语阅读细节信息的掌握能力, 然后根据学习者的个体差异, 通过

对阅读材料的有效编排, 侧重于提高学生的推理判断能力。

本研究也存在一些局限。首先, 被试样本数量偏少, 可能会因个体误差造成统计差异, 后期开展大样本的研究对印证本研究结论尤为必要。其次, 本研究没有对藏汉双语者的藏语 (L1) 阅读能力进行有效评估, 这就使得本研究结果有可能受到被试者 L1 阅读能力的影响, 后期需对藏汉双语者与 L1 阅读能力有关的静息态固有脑功能组织特点进行考察。再次, 本研究采用 HSK 的方法评估藏汉双语者汉语阅读各子能力时, 鉴于概括总结题较少, 只考虑了细节捕捉和推理判断能力, 后期需选取更详实的测试题来考察概括总结能力的固有脑功能组织特点。

总之, 本研究考察了与藏汉双语者汉语阅读子能力有关的固有功能组织特点。研究发现藏汉双语者的汉语细节捕捉题得分和推理判断题得分均与左侧额下回—左侧额上回和右侧舌回—右侧中央前回之间的 FC 值呈正相关, 并且推理判断题得分还与左侧额下回—右侧顶下小叶之间的 FC 值呈正相关, 预示着与藏汉双语者汉语阅读各子能力有关的 FC 存在异同, 这些结果对于认识藏汉双语者的固有功能组织特点, 揭示藏汉双语者汉语习得内在神经机制提供了一些新的参考依据。

参考文献

- 才让措, 窦秀玉. (2014). 藏族学生藏汉双语认知加工比较. *中国藏学*, 4, 120-126.
- 高寒, 韩立新, 白红民, 李天栋, 王伟, 刘一兵等. (2013). 晚双语者语言区的功能磁共振研究. *中华神经外科杂志*, 29(11), 1097-1100.
- 黄敬, 王佑昱. (2013). 基于结构方程模型的高级水平汉语学习者语言理解能力结构探究. *华文教学与研究*, 13(2), 24-35.
- 罗琳, 翟洪昌. (2013). 记忆汉字和英语单词的差异脑区研究. *心理与行为研究*, 11(2), 211-216.
- 闰国利, 何立媛, 宋子明. (2016). 中文阅读的基本信息加工单元初探. *心理与行为研究*, 14(1), 120-126.
- 赵澄, 王晓怡, 陈学志, 刘巨涛, 卢洁, 李坤成. (2013). 蒙汉双语者的汉语词汇命名加工脑机制的功能磁共振成像. *放射学实践*, 28(12), 1246-1249.
- 赵小雪, 胡阿旭, 于洪志. (2013). 基于 ERP 信号的藏族大学生藏汉英词汇认知研究. *西北民族大学学报 (自然科学版)*, 34(1), 26-30.
- 周明芳, 郑晶. (2010). 工作记忆与文本理解相关性实证探究. *外语电化教学*, 32(1), 73-75, 47.
- Applegate, M. D., Quinn, K. B., & Applegate, A. J. (2002). Levels of thinking required by comprehension questions in informal reading inventories. *The Reading Teacher*, 56(2), 174-180.
- Barbeau, E. B., Chai, X. J., Chen, J. K., Soles, J., Berken, J., Baum, S., et al. (2017). The role of the left inferior parietal lobule in second language learning: An

- intensive language training fMRI study. *Neuropsychologia*, 98, 169–176.
- Basaraba, D., Yovanoff, P., Alonzo, J., & Tindal, G. (2013). Examining the structure of reading comprehension: Do literal, inferential, and evaluative comprehension truly exist? *Reading and Writing*, 26(3), 349–379.
- Bolger, D. J., Perfetti, C. A., & Schneider, W. (2005). Cross-cultural effect on the brain revisited: Universal structures plus writing system variation. *Human Brain Mapping*, 25(1), 92–104.
- Carnine, D. W., Silbert, J., Kame'enui, E. J., & Tarver, S. G. (2010). *Direct instruction reading*. Boston, MA: Merrill.
- Chai, X. J., Berken, J. A., Barbeau, E. B., Soles, J., Callahan, M., Chen, J. K., & Klein, D. (2016). Intrinsic functional connectivity in the adult brain and success in second-language learning. *The Journal of Neuroscience*, 36(3), 755–761.
- Chang, E. F., Rieger, J. W., Johnson, K., Berger, M. S., Barbaro, N. M., & Knight, R. T. (2010). Categorical speech representation in human superior temporal gyrus. *Nature Neuroscience*, 13(11), 1428–1432.
- Cohen, L., & Dehaene, S. (2004). Specialization within the ventral stream: The case for the visual word form area. *NeuroImage*, 22(1), 466–476.
- Fox, M. D., & Raichle, M. E. (2007). Spontaneous fluctuations in brain activity observed with functional magnetic resonance imaging. *Nature Reviews Neuroscience*, 8(9), 700–711.
- Gough, P. M., Nobre, A. C., & Devlin, J. T. (2005). Dissociating linguistic processes in the left inferior frontal cortex with transcranial magnetic stimulation. *The Journal of Neuroscience*, 25(35), 8010–8016.
- Hallam, G. P., Thompson, H. E., Hymers, M., Millman, R. E., Rodd, J. M., Lambon Ralph, M. A., et al. (2018). Task-based and resting-state fMRI reveal compensatory network changes following damage to left inferior frontal gyrus. *Cortex*, 99, 150–165.
- Henderson, J. M., Choi, W., Lowder, M. W., & Ferreira, F. (2016). Language structure in the brain: A fixation-related fMRI study of syntactic surprisal in reading. *NeuroImage*, 132, 293–300.
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: A framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92(1–2), 67–99.
- Koyama, M. S., Di Martino, A., Zuo, X. N., Kelly, C., Mennes, M., Jutagir, D. R., et al. (2011). Resting-state functional connectivity indexes reading competence in children and adults. *The Journal of Neuroscience*, 31(23), 8617–8624.
- Linderholm, T., & Van Den Broek, P. (2002). The effects of reading purpose and working memory capacity on the processing of expository text. *Journal of Educational Psychology*, 94(4), 778–784.
- Lund, R. J. (1991). A comparison of second language listening and reading comprehension. *Modern Language Journal*, 75(2), 196–204.
- Qin, W., Xuan, Y., Liu, Y., Jiang, T. Z., & Yu, C. S. (2015). Functional connectivity density in congenitally and late blind subjects. *Cerebral Cortex*, 25(9), 2507–2516.
- Roncaglia-Denissen, M. P., & Kotz, S. A. (2016). What does neuroimaging tell us about morphosyntactic processing in the brain of second language learners? *Bilingualism: Language and Cognition*, 19(4), 665–673.
- Rose, S. A., Feldman, J. F., & Jankowski, J. J. (2003). The building blocks of cognition. *Journal of Pediatrics*, 143(4), 54–61.
- Tomasi, D., & Volkow, N. D. (2010). Functional connectivity density mapping. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(21), 9885–9890.
- Tomasi, D., & Volkow, N. D. (2012). Resting functional connectivity of language networks: Characterization and reproducibility. *Molecular Psychiatry*, 17(8), 841–854.
- Turken, A. U., & Dronkers, N. F. (2011). The neural architecture of the language comprehension network: Converging evidence from lesion and connectivity analyses. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 5, 1.
- Ventura-Campos, N., Sanjuan, A., González, J., Palomar-García, M. Á., Rodríguez-Pujadas, A., Sebastián-Gallés, N., et al. (2013). Spontaneous brain activity predicts learning ability of foreign sounds. *The Journal of Neuroscience*, 33(22), 9295–9305.
- Zhang, M. X., Li, J., Chen, C. S., Mei, L. L., Xue, G., Lu, Z. L., et al. (2013). The contribution of the left mid-fusiform cortical thickness to Chinese and English reading in a large Chinese sample. *NeuroImage*, 65, 250–256.
- Zhang, M. X., Li, J., Chen, C. S., Xue, G., Lu, Z. L., Mei, L. L., et al. (2014). Resting-state functional connectivity and reading abilities in first and second languages. *NeuroImage*, 84, 546–553.
- Zhang, Y. X., Xie, B., Chen, H., Li, M. L., Liu, F., & Chen, H. F. (2016). Abnormal functional connectivity density in post-traumatic stress disorder. *Brain Topography*, 29(3), 405–411.

Resting-State Functional Connectivity Analysis of Tibetan-Chinese Bilinguals' Chinese Reading Comprehension

Huang Lingshan¹, Chen Jianlin¹, Liu Guangyao², Zhang Zhe³, Dong Ying¹

(¹ School of Foreign Languages and Literatures, Lanzhou University, Lanzhou, 730000)

(² Department of MR, Lanzhou University Second Hospital, Lanzhou, 730030)

(³ School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou, 730000)

Abstract Resting-state functional connectivity (FC) studies have revealed that second language (L2) reading comprehension can be predicted by intrinsic functional organization (IFO) within language network. However, these studies select some specific seed regions in language network according to priori knowledge before FC analysis, which can result in some biased results and neglect of some important unpredictable findings. Additionally, most previous studies explore L2 reading comprehension largely taking reading as a global construct without considering the multidimensional structure of reading, thus little is known about the features of IFO related to subskills of reading ability in L2 learning. Therefore, the present study combined resting-state whole-brain functional connectivity density (FCD) with the FC analysis based on seed regions to investigate the characteristics of IFO associated with specific dimensions of L2 reading.

Nineteen Tibetan-Chinese bilinguals were recruited in the present study, and resting-state functional magnetic resonance imaging (fMRI) data were acquired in each participant. Then, the Chinese Character Reading Efficiency Test (CCRET) and the reading comprehension section of Hanyu Shuiping Kaoshi (HSK) were used to evaluate the global level and two dimensions (literal comprehension and inferential comprehension) of L2 reading respectively. Next, a novel voxel-level whole-brain FCD analysis was applied to find the key brain regions associated with L2 reading. Furthermore, the FC between key brain regions and each voxel was computed by conducting seed-based FC analysis, and the correlation between each FC and two dimensions of Chinese reading comprehension were also evaluated respectively.

The results showed that literal comprehension scores in L2 reading were not only significantly correlated with inferential comprehension scores, but also higher than inferential comprehension scores. FCD analysis found that the three key brain regions including the left inferior frontal gyrus, right lingual gyrus and right precuneus had significant correlations with CCRET scores. Further seed-based FC analysis revealed that both literal comprehension scores and inferential comprehension scores were positively correlated with the FC between the left inferior frontal gyrus and the left superior temporal gyrus as well as between the right lingual gyrus and the right precentral gyrus. Moreover, inferential comprehension scores also showed positive correlations with the FC between the left inferior frontal gyrus and the right parietal lobule.

These findings indicate that different dimensions of L2 reading comprehension of Tibetan-Chinese bilinguals in L2 learning have significant correlations with FC in resting state, and some specific FC circuits are involved in the processing of inferential comprehension compared with the processing of literal comprehension in L2 reading. More generally, this study also suggests that different dimensions of L2 reading comprehension can be reflected by intrinsic functional organization, thus may provide important theoretical implications in our understanding of neural processing mechanisms for L2 reading.

This study differentiates itself from previous research in that it chooses seed regions of FC analysis based on a data-driven approach by conducting correlation analysis between FCD and CCRET. In addition, the present study takes reading as a multidimensional structure rather than a global construct, investigating the characteristics of intrinsic brain functional organization related to different dimensions of reading comprehension (literal comprehension and inferential comprehension) in L2 learning.

Key words Tibetan-Chinese bilinguals, reading comprehension, functional connectivity, resting-state