

关于中文书写和其他形式书写脑区激活的研究综述

Research on the activation of brain regions in Chinese writing and other forms of writing

韩平，兰雅静，吴若宁，曾一扬，吴婧，赖锦昌

摘要：中文是一种表意书写系统，与字母的线性结构有很大不同的。已有很多研究探究其他形式，如英文、日语、图形等的书写脑区激活情况。然而，有关中文书写的神经机制以及脑区的激活却少有研究，在临床医学中也未受到足够的重视。随着功能性脑功能成像技术的发展，越来越多的脑功能成像技术运用到书写机制的探究当中，尤其是功能性近红外光谱的运用。

关键词：书写，中文书写，脑功能成像，功能性近红外光谱成像，书写脑功能区

1. 引言

书写作为语言功能的一种表达形式，无论是简单的听写或者抄写过程，还是复杂的创作过程，书写均是由一系列复杂的高级神经认知过程共同参与所完成的，其包含了从语言分析阶段到进行文字书写的运动执行阶段。通过书写，我们可以将字义-字形信息转化为字形-运动轨迹，并将其映射到 2D 空间上^[1]。多项研究已经证实大脑的 Broca's area 在手写过程中活跃度更高，其负责语言运动的中枢，主要负责编码发音程序，对语言学习至关重要。

在以往的研究中发现，有五个区域在写作过程中表现出优先参与语言或运动处理：左侧背侧运动前皮层、顶叶上小叶、梭状回和额下回，以及右侧小脑。书写的其它形式包括其它语言与图画的书写，这涉及多个脑区的协同工作。此外，书写涉及到几个与语言无关的视觉运动成分，比如几个手指、手腕和手臂运动的快速和精确的协调，以控制笔画的大小和速度，计划连续的动作，管理视觉地标和手在空间中的位置。为了控制书面生产任务的运动方面，大多数已发表的关于手写的神经影像学研究都使用了非常简单和/或快速自动化的运动(例如，手指敲击)或书写运动(例如，重复画圆圈)任务。无论采用何种写作形式，书写的过程都包含了几种认知和运动功能的参与。一组复杂的神经基础支持这种高度特异性的技能。

现如今随着科学技术的发展，研究者们可以利用多种脑功能成像技术对受试者书写时大脑的活动进行观察。这使得书写时的脑区激活成为了全世界炙手可热的话题，不断有不同国家的研究者用不同的语言与难易度不同的图画对受试者进行研究，这些研究为我们揭示了正常人书写中文和其他形式时的脑区激活。

2. 书写脑区激活研究现状

2.1 书写其他形式脑区激活的研究现状

2.1.1 书写法语

而在对于法语书写的研究中,对成人和儿童对于法语字母与单词的书写进行了测试,结果观察发现,儿童的主要书写网络的组织已经建立起来,并且与成人的组织非常相似。其中成人的右中央前回和右前小脑的激活程度强于儿童,而儿童的左梭状回的激活程度强于成人。且成年人与 8 到 11 岁的儿童,单词和字母比循环更容易被激活^[2]。

2.1.2 书写日语

在对于日语假名书写的研究中,研究人员用从动物、植物和建筑物等类别中常用的一到三个音节的单词中挑选出来的图片,为受试者设计了三种条件:(1)书写图片名称(书写命名), (2)安静地命名图片, (3)视觉提示敲击手指。结果表明在左顶上小叶前部、额中回和额上回后部以及右侧小脑中观察到了共同激活。其中顶叶和额叶区域被认为有助于书写过程,而右侧小脑的激活被解释为执行书写所需的复杂手指运动的反映^[2]。

2.1.3 书写图画

少数关注非语言绘画任务(例如,时钟绘画测试,绘制简单几何形状或物体)的大脑基底的研究表明,额顶叶网络的激活与写作任务中激活的网络相似,涉及顶叶上皮层、辅助运动区、背侧运动前皮层和腹侧运动前皮层以及小脑。上面列出的背侧和与动作相关的皮质区域可能被招募,尽管程度不同,不仅是手写,还包括这些非语言的、高阶的运动任务。

书写和绘画任务之间的联系揭示了一个主要的左偏侧网络,涉及左侧初级运动和感觉运动皮层、左侧顶叶上皮层、左侧辅助运动区、左侧上和腹侧运动前皮层、右侧(以及较小程度的左侧)小脑、双侧枕叶和腹侧枕叶皮层。在绘图中,有更大的双侧顶叶内沟激活。这种双侧性可能是由于这些区域已知的视觉运动协调和视觉注意控制功能的需求。这支持了双侧背侧运动前皮层的存在,该区域通常参与准备或生成高度协调和精细的运动命令(如手写、绘画、音乐表演或其他高技能的运动动作),可能作为认知和运动网络之间的接口。一项研究认为该区域的左侧成分已经专门用于产生字素的运动、异体相关^[3]。绘画过程中顶叶脑激活的另一个重要特征是它主要是双侧的。

2.2 书写其他语言和其他形式脑区激活对比的研究现状

2.2.1 书写英文(字母)、数字和符号的对比

有研究选取字母、数字和符号做比较研究,这 3 个元素的加工涉及不同大脑

区域的招募。左侧枕内侧、右侧苍白球、右侧顶叶上回和右侧颞下沟对数字串的激活程度高于字母串。关于与字符位置编码相关的不同神经区域,所有类型的字符(在右下顶叶和上顶叶以及右角回)都有一些转位的共同效应,但与此同时,字母与数字和符号的差异效应(在左顶叶上下皮层有字母特异性效应)。总之,该研究证实了左顶叶皮层在阅读过程早期对字母识别和字母位置编码的优先作用,说明字母识别和字母位置加工不仅局限于腹侧通路,还涉及到背侧视觉通路。这表明顶叶区域参与涉及字母识别的知觉任务相一致,顶叶区域可能参与视觉文字处理的早期阶段,左枕颞叶腹侧皮层不是一个强制性的神经通路或阅读的必经途径,在视觉文字识别过程中,背侧和腹侧通道可以合作^[4]。

2.2.2 书写阿拉伯语和拉丁语的差异

阿拉伯和拉丁字母,具有相似的视觉空间复杂性和语言特征,但在书写运动特征上却存在显著差异。虽然阿拉伯字母和拉丁字母的书写速度和流畅性相同,阿拉伯语和拉丁语在笔画数量上没有差异,但阿拉伯字母需要更多的笔划,包含更多的从右向左笔画和顺时针曲线(阿拉伯语为顺时针,拉丁语为逆时针),并且比拉丁字母需要更长的书写时间。全脑分析也揭示了右半球两种图形系统之间的差异,阿拉伯文比拉丁字母更能激活右侧顶叶上叶(SPL),拉丁字母比阿拉伯字母更能激活右侧枕区。这些区域的活动与另一个字母运动特征有关,即从右向左的笔画数量。这两种文字都涉及所谓的“书写网络”,但在网络中,阿拉伯字母比拉丁字母更强烈地调动了中顶叶皮层,左侧顶叶上叶(SPL)和左侧初级运动皮层(M1)^[5]。表明这些图形系统的特定特征导致了行为 and 大脑层面上不同的运动组织。

2.3 书写中文脑区激活的研究现状

一般来说,书写中文涉及到的主要脑区包括前额叶、颞叶、顶叶和枕叶。前额叶主要负责规划和执行书写动作,颞叶则主要负责语言处理,顶叶和枕叶则主要负责视觉信息的处理。而书写过程主要分为视觉信息的输入和信息处理。首先是视觉信息的输入,主要通过枕叶的视觉皮层进行。然后,这些视觉信息会被传输到前额叶和颞叶进行处理。前额叶的前运动区规划书写动作,而颞叶的语言区则处理语言信息。

先前的研究表明,书写的运动控制始终与左顶叶上小叶、左额上回和右侧小脑有关。左顶叶上小叶、左额上回都在字母的手动运动表示中扮演了角色^[6]。在关于中文的研究中,一项研究表明,掌握书写顺序越好的学生处理汉字的速度越快。该研究发现右额叶下回(IFG)参与抑制控制和运动序列的信息处理^[7]。因此,推断正确的 IFG 引导参与者通过基于现有的书写序列运动图式的自上而下的过程做出正确或错误的判断。不过,新的研究发现,书写中文时,左半脑的活

动通常比右半脑的活动更为强烈。这可能是因为左半脑主要负责语言处理，而书写中文是一个高度依赖语言的任务。另外，一项研究利用功能磁共振成像(fMRI)分析了汉字自动书写与控制书写分离背后的脑功能网络转变的结果表明，手写速度控制依赖于涉及一般执行控制和任务相关的视觉和运动过程的功能脑网络的大规模重组^[8]。此外，一项书写汉字时的功能性核磁共振(FMRI)研究表明，汉字书写识别过程中涉及广泛的中枢神经活动，包括左侧前额叶(BA9、47)、颞叶皮层(BA37)、右侧视觉系统(BA17-19)、顶叶(BA3)和小脑，特别活跃的是左侧前额叶^[9]。如在需要正交法回忆的任务中，左侧盖层左额下回部和左侧梭状回持续被激活^[10]。此外，左梭状回在正字法长期记忆的获取或存储中具有公认的作用，并且左梭状回的一部分对视觉呈现的字母有特殊反应。梭状回在书面书写过程中也一直被激活^[11]。除此之外，有研究表明，在汉字书写过程中，脑内汉字整体模板是成功构建汉字非常重要的影响因素。笔画启动材料也对笔画构成汉字的过程起到了较强的提示作用。在无意识阈下启动条件下，整字字形和笔画对笔画构成汉字的过程有显著的启动作用^[12]。

2.4 书写中文和其他形式脑区激活的情况

2.4.1 书写中文和日语

在探索日中双语者大脑机制的研究中，发现两种语言在共同语言处理区域的激活存在明显差异以及共同点。无论是在词汇语义还是读音加工任务条件下，相比于 L1、L2 的激活表征更广泛，涉及大脑的认知控制区域。日语和汉语的词汇语义加工在双侧角回(AG)、右侧额下回岛盖部(PO)、颞上回(MTG)和颞中回(STG)的激活上存在较大差异，且右脑的激活差异更为明显。在词汇读音加工中，两种语言在 13 个感兴趣区域(ROI)中的分类准确率均相对较高，其中左侧缘上回(SMG)的差异更明显，而在右侧 STG 可能存在两种语言共同的神经表征区域^[13]。

2.4.2 书写中文和象形字

在以汉字、水书、东巴文和甲骨文这四种文字的象形字和图画为研究对象的研究表明，图画与汉字知觉相似性判断的相似度最低。在语义一致性比较的任务中，研究发现与汉字和图画配对的符号对的加工速度明显快于与甲骨文、东巴文和水书配对的符号对。这显示了不同的文字系统对于符号的认知加工有着不同的影响。在命名或分类的任务中，对汉字和图画的反应速度均显著快于对东巴文、水书和甲骨文的反应。其中，对东巴文和水书的反应速度相对较快，而对甲骨文的分类和命名速度最慢。这一结果揭示了不同文字系统对于命名和分类任务的认知加工效率存在差异。研究还发现，四种象形字的表意能力由高到低依次为：汉

字、东巴文、水书、甲骨文^[14]。这一结果反映了不同象形字系统在意义表达能力上的差异。总之，研究表明对符号的认知加工受到多种因素的影响，包括符号的外形特征和区别性特征、符号与事物的象似性以及符号的性质。这些因素共同作用于符号的认知加工过程，影响着人们对不同文字系统的理解和使用。

2.4.3 书写中文和绘图

在一项研究中参与者被要求完成书写任务(抄写汉字)和控制任务(画无意义的符号)，研究者采用一般线性模型(GLM)方法，为每个参与者生成手写字符和绘画符号的激活图。结果表明与绘制符号相比，书写汉字在男性和女性中引发了相似且广泛的激活模式，男性在左后额叶中回(MFG)表现出更大的大脑激活，且男性在 Exner' s area 和右小脑之间具有更强的功能连通性。男性在书写过程中表现出左侧的 Exner' s area 激活，而女性则表现为双侧。其中写作质量女性表现优于男性^[15]。Exner' s area 和小脑之间的连接代表了支持运动计划到执行之间交流的神经回路。

2.4.4 手写中文字符对中文和英文词汇认知的影响

一项通过探讨中文和英文中普通和阅读障碍读者的手写效果，特别是拼音写法与绘画形写法的区别的研究结果表明，在中文书写对正常阅读者的行为和 N170 有促进作用，图画对阅读障碍者的英文单词识别有促进作用，结果表现在行为指标和 N170 指标（一个事件相关脑电位（ERP）组件，用于测量早期的视觉词汇识别）上^[18]。该研究揭示了在正常但非诵读困难的读者中，与阅读汉语相比，书写具有偏侧性效应，这表明正常读者在阅读发展方面具有更大的专业化，在正常发展的阅读者中，书写直线汉字导致了更大的左脑 N170 偏侧效应和更快的行为反应^[16]。对于正常的阅读者，书写的横向效应仅在直线刺激试验中得到支持，而在曲线笔划笔迹试验中则没有。对于阅读障碍的读者，曲线形状的绘制支持了英文单词识别的绘制效果，而不是直线形状的绘制。在正常发展的阅读者中，书写直线汉字导致了更大的左脑 N170 偏侧效应和更快的行为反应，而书写运动技能有助于字母表征的构建。对于阅读困难的读者来说，画曲线形状在英语单词识别方面有更好的表现。视觉-运动整合机制可能是关键的潜在机制。通过大脑视觉和运动区域的有效整合，视觉表征这个词可能会得到加强。这是汉字识别的基本要求，这种左半球的偏侧性效应（横向效应）在正常而非诵读困难的读者中表现出来。

3. 功能性脑区检测手段的现状，近红外优点

随着现代神经影像学技术的飞速进步，脑功能研究迎来了巨大的推动力。在以往的研究中，功能性神经影像学技术在时间及空间分辨率上存在着一定的矛盾。

脑电图（electroencephalo-graph，EEG）具备毫秒级的时间分辨率，然而其空间分辨率仅有几厘米。相比之下，功能磁共振成像（functional magnetic resonance imaging，fMRI）技术可以观察到大脑功能区域的血液动力学变化，从而间接了解相关皮层的兴奋性，也提供较好的空间分辨率，但其时间分辨率却不尽如人意。

因此，近年来另一种基于近红外光谱学的非侵袭性技术（Near infrared spectral imaging technique，fNIRS）也逐步发展。fNIRS 在这一问题上取得了一定的平衡：fNIRS 较 EEG 拥有更好的空间分辨率。此外，相比 fMRI，fNIRS 具备更好的时间分辨率，可达到毫秒级。同时，研究者发现与其他影像技术相比，fNIRS 的结果具有较好的同质性。不仅如此，fNIRS 具有成本较低、便携、无噪音、无创以及对受试者动作不敏感等优点。因此，它逐渐在脑认知功能研究中得到应用，特别是在老年人、婴幼儿以及涉及动作的认知功能研究中。

fNIRS 已被广泛应用于精神病学、发展神经认知科学以及自然情境下的高级神经认知科学研究。相较于 fMRI 等技术，fNIRS 能够在正常生理状态下对健康受试者和患者的书写过程进行无创监测，从而更深入地理解触觉、视觉运动等多种功能在书写中的作用，并有助于我们更好地认识书写过程^[1]。

4. 结论和展望

4.1 结论

总而言之，我们通过总结和分析对比中文和其他书写系统的不同以及脑区激活情况，目前世界上对于书写其他形式的脑区激活研究已经非常成熟，但还是存在许多不足，尤其是关于中文书写和其他形式书写脑区激活的异同尚不清楚，还需要做进一步的研究。对于所有的图形系统来说，书写相关的运动表征和大脑网络的组织是否相同，仍然是一个悬而未决的问题。另外，目前对于研究书写的脑区激活所用的检测设备还存在一些缺陷。例如，EEG 具备毫秒级的时间分辨率，然而其空间分辨率仅有几厘米；fMRI 可以提供空间分辨率较高的脑区激活图，但其时间分辨率较低，无法捕捉到书写过程中的瞬时脑活动。总之，先前研究中的功能性脑成像技术对于研究书写时脑区存在的瞬间活动存在局限性，而 fNIRS 能够更好的揭示正常人和书写困难患者书写过程中大脑皮层激活情况，能够更好地运用到有关书写机制的研究当中。

4.2 展望

书写是一个需要复杂功能结合的过程，关于使用不同的书写任务，如复制、拼写、自由书写等；或不同的书写内容，如汉字、单词、图形、句子等；以及不同的研究方法和不同的设备等等是否会得到不同脑区激活的结果，尚未有明确的定论。因此，在未来的研究中，可以通过设计不同的书写任务和内容，通过功能

性脑成像技术比较分析各种形式下书写脑区激活的情况,尤其是使用功能性近红外光学成像技术(fNIRS)。并通过探究正常人书写各种形式下脑区激活的异同,揭示书写各种形式的神经机制和通路,在未来能够指导更多患有书写困难的人群重返书写。

【参考文献】

- [1] 梁毅博.基于近红外光学成像技术的汉字书写功能激活模式研究[D].天津医科大学,2018.
- [2] Katanoda K, Yoshikawa K, Sugishita M. A functional MRI study on the neural substrates for writing. *Hum Brain Mapp*. 2001 May
- [3] Planton S, Longcamp M, Péran P, Démonet JF, Jucla M. How specialized are writing-specific brain regions? An fMRI study of writing, drawing and oral spelling. *Cortex*. 2017 Mar
- [4] Carreiras M, Quiñones I, Hernández-Cabrera JA, Duñabeitia JA. Orthographic Coding: Brain Activation for Letters, Symbols, and Digits. *Cereb Cortex*. 2015 Dec;25(12):4748-60. doi: 10.1093/cercor/bhu163. Epub 2014 Jul 30. PMID: 25077489.
- [5] Fabiani E, Velay JL, Younes C, Anton JL, Nazarian B, Sein J, Habib M, Danna J, Longcamp M. Writing letters in two graphic systems: Behavioral and neural correlates in Latin-Arabic biculturals. *Neuropsychologia*. 2023 Jul 4;185:108567. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2023.108567. Epub 2023 Apr 20.
- [6] Exner, S. (1881). Untersuchungen über die Localisation der Functionen in der Grosshirnrinde des Menschen. Braumüll
- [7] Zhang Z, Yuan Q, Liu Z, Zhang M, Wu J, Lu C, Ding G, Guo T. The cortical organization of writing sequence: evidence from observing Chinese characters in motion. *Brain Struct Funct*. 2021 Jun;226(5):1627-1639. doi: 10.1007/s00429-021-02276-x. Epub 2021 Apr 18. PMID: 33866405.
- [8] Li J, Hong L, Bi HY, Yang Y. Functional brain networks underlying automatic and controlled handwriting in Chinese. *Brain Lang*. 2021 Aug;219:104962. doi: 10.1016/j.bandl.2021.104962. Epub 2021 May 10. Erratum in: *Brain Lang*. 2021 May 26;:104969. PMID: 33984629.
- [9] Eden, G.F. and T.A. Zeffiro, Neural systems affected in developmental dyslexia revealed by functional neuroimaging. *Neuron*, 1998. 21(2): p. 279-82.
- [10] Planton, S., Jucla, M., Roux, F.-E., & Démonet, J.-F. (2013). The « handwriting brain » : A meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 49(10), 2772-2787.
- [11] Purcell, J. J., Turkeltaub, P. E., Eden, G. F., & Rapp, B. (2011a). Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis. *Frontiers in Psychology*, 2, 239.
- [12] 罗艳琳,陈墨,彭聃龄.整字与部分对笔画构成汉字的影响[J].中国组织工程研究与临床康复,2007,(35):7037-7040.
- [13] 李修军,刘小迪,杨菁菁.fMRI 揭示日中双语者的语义和读音加工脑机制[J].长春理工大学学报(自然科学版),2023,46(05):97-104.
- [14] 李惠娟,张积家.不同类型的象形字与图画的认知加工比较[C]//中国心理学会.第十七届全国心理学学术会议论文摘要集.华南师范大学心理学院;中国人民大学心理学系;2014:4.

- [15] Yang Y, Tam F, Graham SJ, Sun G, Li J, Gu C, Tao R, Wang N, Bi HY, Zuo Z. Men and women differ in the neural basis of handwriting. *Hum Brain Mapp.* 2020 Jul
- [16] Guan CQ, Li Y, Meng W, Morett LM. Curved vs. Straight-Line Handwriting Effects on Word Recognition in Typical and Dyslexic Readers Across Chinese and English. *Front Psychol.* 2021 Oct 28