

# Theoretical Models and Neural Mechanisms of Mirror Printed Words Processing

Yanqun Lai<sup>1,2</sup>, Qi Yang<sup>3\*</sup>, Baozhen Huang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Psychology, Fujian Normal University, Fuzhou Fujian

<sup>2</sup>College of Education and Art, Ningde Normal University, Ningde Fujian

<sup>3</sup>Department of Philosophy, Tongji University, Shanghai

Email: 1126331939@qq.com, \*yangqpsy@tongji.edu.cn

Received: Jul. 27<sup>th</sup>, 2018; accepted: Aug. 8<sup>th</sup>, 2018; published: Aug. 15<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Mirror processing refers to visual discrimination ability of the original stimulus and its mirror-image. Researchers have proposed some theoretical models for mirror processing, such as multi-system input model, inhibitory processing model, and visual-spatial conversion processing models. Some studies of the neural mechanisms for mirror processing on animals, normal populations and injury patients with electrophysiological and imaging techniques found that visual word form area could be the neural generator of mirror printed word processing. Moreover, there is a neural separation between mirror printed word processing and general mirror object processing. Further research should be intended to understand the contribution of multi-system to mirror processing and to reveal the neural mechanism of mirror processing from the developmental perspective.

## Keywords

Mirror Processing, Theoretical Model, Neural Mechanism, Printed Word

---

# 文字镜像加工的理论模型与神经机制

赖燕群<sup>1,2</sup>, 杨琪<sup>3\*</sup>, 黄宝珍<sup>2</sup>

<sup>1</sup>福建师范大学心理学院, 福建 福州

<sup>2</sup>宁德师范学院教育与艺术学院, 福建 宁德

<sup>3</sup>同济大学哲学系, 上海

Email: 1126331939@qq.com, \*yangqpsy@tongji.edu.cn

收稿日期: 2018年7月27日; 录用日期: 2018年8月8日; 发布日期: 2018年8月15日

---

\*通讯作者。

## 摘要

镜像加工指个体对原始刺激和其镜像进行视觉辨别的能力。研究者已经提出一些镜像加工的理论模型，如跨通道协调与合作模型，抑制加工模型，以及视空间转换加工模型等。借助于电生理和脑成像技术对动物、正常人类以及脑损伤病人进行镜像加工的神经机制的研究发现，视觉词形区可能是文字镜像加工的中枢，且文字镜像加工和一般物体镜像加工存在神经机制上的分离。未来的研究应加强考察多通道对镜像加工的贡献，以及从发展的角度揭示镜像加工的机制。

## 关键词

镜像加工，理论模型，神经机制，文字

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在儿童读书识字初始阶段，经常出现将 b 字母和 d 字母认为是相同的现象，即把 b 字母的镜像 d 与 b 认为是相同的，该现象被命名为“镜像概括化” (mirror generalization)。镜像概括化是对原型刺激和其镜像刺激(例如，b 和 d)进行视觉辨别时，虽然这两个刺激在视网膜的成像不同，但个体快速辨认而将其左右方向忽略，进而将这两个刺激加工为相同的现象(Pegado et al., 2014a)。镜像概括化不仅广泛存在于人类中，还存在于动物界(短尾猴、鸽子、章鱼) (Sutherland, 1960; Mello, 1965; Hollard & Delius, 1982; Tarr & Pinker, 1989; Rollenhagen & Olson, 2000)，该现象表明，镜像概括化是生物在进化过程中的一个重要的适应性机制，譬如，当人们遇见一只老虎时，不需要仔细辨别老虎的头部是朝向左方向还是右方向，只要能成功地辨认其身份“老虎”即可，明确可能会对生存造成危险。

对镜像概括化神经心理机制的阐述主要有以下几种观点：其一，Orton 和 Lachmann 模型，认为镜像概括化与左右脑的颞枕皮质对称有关，即左右脑的颞枕皮质的神经元对刺激的加工呈镜像表征，使大脑左右半球分别储存一个刺激的原型和其镜像。在生理基础上导致同一个字母刺激会同时激活大脑双侧均有的词形表，即在大脑左右半球出镜像表征(例如，呈现 b 字母刺激时，大脑左右半球中分别出现 b 和 d 的表征)，且在加工刺激时同时存储和提取加工，这样会导致出现镜像混乱(mirror confusion)，镜像混淆等同于镜像概括化(Orton, 1925; Lachmann, 2002)。其二，视觉词形区(VWFA)模型，该脑模型认为，当刺激的方向以及位置发生变化后，其识别的形状并未发生改变(Warrington & Shallice, 1980)，该区域已被实证研究证实，Dehaene 等(2002)通过 fMRI 技术发现视觉词形区存在于左侧梭状回，即在大脑腹侧通路，大脑的腹侧通路对镜像物体的认知具有恒常性，能够自发地将不同方位下刺激的原始物体与镜像物体等量齐观。其三，镜像概括化属于视觉系统的一种生而就有的内在属性，对灵长类动物(猴)进行研究发现，相对于其它旋转方向加工，颞枕叶皮层对镜像更容易将其与原型刺激编码为相同(Rollenhagen & Olson, 2000)。同时对婴儿进行 fMRI 研究发现，个体会将原始刺激及其镜像识别为相同(Bornstein, Gross, & Wolf, 1978)，但智力正常、无阅读障碍儿童经过大约一年的读书识字训练后会出现镜像损失，而阅读障碍者需更长时间才出现镜像损失(Cornell, 1985; Terepocki, Kruk, & Willows, 2002)，这也验证了镜像概括化在我

们视觉系统的早期阶段就存在。

镜像概括化从生物进化角度来看有适应性优势，但是从语言习得角度来说是有弊的，因为每个字母都有固定的形式且各自代表的含义不同，因此个体在文字习得过程中需要对文字进行精加工。例如，b 和 d 字母传递给个体的信息是不一样的，需要对其进行区分，因此个体需要获得识别镜像的能力，即镜像加工，指对原型刺激和其镜像刺激间的辨别能力。镜像加工内在机制的研究获得了许多学者的关注，有研究者认为，镜像加工的机制包括阅读能力、方向加工能力、视空转换能力、抑制能力等(Pegado, Nakamura, Cohen, & Dehaene, 2011; Ahr, Houdé, & Borst, 2016; Fernandes & Regine, 2013; Fernandes, Leite, & Kolinsky, 2016; Poldrack, Desmond, Glover, & Gabrieli, 1998)，其中阅读能力主要指的是个体的听说读写能力。近 10 年来，研究者大多从阅读能力的获得会重构大脑的结构和功能的视角来理解镜像加工的潜在运作模型，认为阅读能力的获得是镜像加工的关键因素，并在此基础上提出了不同的理论假说模型来阐明镜像加工的内在机制(Dehaene & Cohen, 2007; Dong et al., 2005; Borst, Ahr, Roell, & Houdé, 2015; Ahr, Houdé, & Borst, 2016)。本文将着重陈述文字镜像加工机制的不同理论模型，并详尽梳理文字镜像加工的神经机制，并对文字镜像加工机制的未来研究方向加以展望。

## 2. 镜像加工的理论模型

镜像研究的核心问题在于解释镜像加工的内在发生机制。目前，研究者先后提出三种理论来解释镜像加工的内在潜在机制，即跨通道协调与合作模型、视空间转换加工模型和抑制加工模型。

### 2.1. 跨通道协调与合作模型

跨通道协调与合作模型(multi-system input model)侧重于从阅读能力的获得过程中，各个语言系统通道之间的相互作用角度来理解并阐明镜像加工的发生机制，是 Pegado 等(2014b)结合其它学者的研究所建构的理论观点，该观点认为，VWFA 是镜像加工的大脑区域，它受到各种通道的影响，通过各种通道能够影响该区域进而增强镜像加工的能力。

阅读能力的习得会影响视觉系统(Szwed, Qiao, Jobert, Dehaene, & Cohen, 2014; Pegado, Nakamura, Cohen, & Dehaene, 2011)，包括初级视觉系统和高级的视觉系统(腹侧通路和背侧通路) (Carreiras et al., 2009; Dehaene et al., 2010)，这表明阅读对镜像加工的影响是通过各个通道之间的协调与合作。听觉系统会对视觉系统产生影响，儿童学习文字初期需要训练听到的声音和看到的文字之间的联结，形成听觉表征-视觉表征联结过程，但这种联结是逐渐获得的过程，且有研究表明阅读能力与其联结效果呈正相关关系，一般来说经过 3~4 个月的训练后其联结会成为自动化的过程(Nicolson, Fawcett, & Dean, 2001; Atteveldt, Formisano, Goebe, & Blomert, 2004; Lachmann & Leeuwen, 2008)，但是对阅读障碍儿童进行的神经影像研究发现，儿童阅读速度慢，且腹侧视觉区(包括视觉词形区)的激活强度也减少(Monzalvo et al., 2012)，而对文盲者研究发现其不能形成听觉表征-视觉表征联结，因为文盲者没有“语音意识”，不能调整语言的发言(Morais, Cary, Alegria, & Bertelson, 1979; Morais & Kolinsky, 1994)。综合这些研究的结果表明，听觉系统和视觉系统的联结通过阅读训练形成。书写运动系统也会对视觉系统产生影响，儿童开始在学习初期(3~7 岁)经常出现镜像书写现状(Cornell, 1985)，对其解释的原因是：镜像书写的成熟理论，当儿童用右手练习写字时，在教师一笔一画，先后顺序的指导下，从左到右反复练习，通过视觉和手指，手臂肌肉形成的运动觉，在大脑中不断形成神经反馈，在大脑两半球中形成相同的视-书写运动图式。儿童开始练习写字时，对汉字的形象认知不够牢固，视-书写运动图式更不牢固，因而在书写过程出现镜像字(李心天, 徐震雷, 崔耀, 吴任刚, 关东秀, & 董京育, 1989)。书写运动图式处于背侧前运动皮质区域(Roux, Draper, Köpke, & Démonet, 2010)，该区域在书写真字时会被激活，而书写假字时不会被激活(Longcamp,

Anton, Roth, & Velay, 2003), 当对书写体进行视觉加工时, 该区域也会被激活(Longcamp et al., 2003, 2005, 2008)。这说明, 书写运动图式系统和视觉系统的联结是通过阅读训练形成。口语系统对视觉系统产生影响, 额下皮质区域(Broca 区域)是专门加工口语, 该区域激活与书写和文字识别有关(Longcamp et al., 2008), 在熟练阅读者中, Broca 区域与 VWFA 之间的联结强度大(Bitan et al., 2005), 且视觉-口语图式受阅读神经网络影响(Brem et al., 2010)。

阅读能力的习得会造成镜像损失, 且镜像损失与 VWFA 有关联(Kolinsky et al., 2011; Pegado et al., 2011, 2014b), Nakamura 等(2012)通过经颅磁刺激也证实了该观点, 认为镜像识别与左颞枕叶皮质(包括 VWFA)有关。VWFA 不仅单独对镜像识别起作用, 而且还依赖于其它阅读神经网络和 VWFA 相互作用对镜像识别起作用, 即“跨通道协调与合作假说模型”。VWFA 对区分镜像起作用, 其它书写运动系统、听觉系统和口语系统会将获得的信息作用于视觉表征系统(VWFA), 使其更快镜像识别任务。

## 2.2. 视空间转换模型

前一个观点基于镜像加工与语言识别和语言加工有关的角度提出的假说, 即认为字词识别是一个从初级的视觉特征分析(如字体、大小、视网膜呈现位置和空间方位)到抽象的词形表征的过程。这一过程的关键在于, 把字词的各个部分组成一个完整词形, 字词的视觉加工系统对抽象结构表征极为敏感(Borst et al., 2015)。但镜像字使得阅读者难于抽取词形特征, 因此有一些研究者提出: 在镜像加工过程中可能有视空间转换的参与, 试图将心理旋转和认知加工相结合起来, 以期更全面有效解释已有的研究成果(Dong et al., 2005; Poldrack et al., 1998)。视空间转换模型是一种将心理旋转和语言认知均考虑在内的理论模型, 该模型认为, 视空间转换是指对刺激方位、方向特征重新编码的过程, 因此镜像加工过程需要有空间转换的协作来完成(Leek, Atherton, & Thierry, 2007)。该理论的核心观点主要包含四个方面(Leek et al., 2007): 其一, 镜像丧失了原型表征, 即原来所传递的信息编码消失, 因此需对其镜像刺激要进行重新编码, 即需要进行视空间转换, 旋转到与个体长时记忆中储存的表征相一致。其二, 进行视空间旋转是发生在空间坐标轴上, 该坐标轴是以物体为中心轴, 镜像加工在该坐标轴上进行矢量矩阵变化。坐标轴上的镜像加工包括几个过程(Gregory & McCloskey, 2010), 首先, 要构造一个以物体为中心的坐标轴, 其中包括形状、大小等物理特征, 且要将其整理成模块化; 其次, 在加工过程要以物体为中心角度进行信息加工, 对这些信息以集合的形式进行搜索; 最后, 将当前出现的刺激表征与长时间记忆中个体存储表征进行匹配, 若发现不合适, 则进行矢量视空间转换, 转换到与长时记忆中储存的表征相吻合。其三, 尤其在 6~7 岁儿童常见视空间转换失败, 即导致在镜像加工时出现镜像混乱, 但视空间转换能力类似于运动能力, 个体可以通过长期有序的逐步训练来提高其转换速度及正确性。

## 2.3. 抑制加工模型

镜像加工的抑制加工模型(the inhibitory model of the mirror-generalization process)侧重于从主动的角度来理解和阐明镜像加工的发生机制。抑制加工模型是一种将能量供应、动机和认知均考虑在内的理论模型, 该模型认为镜像概括化是视觉认知系统中的一个内在属性, 且这个过程是很难“遗忘”, 但镜像概括化与个体需要加工的过程产生冲突, 激发个体去抑制镜像概括化动机, 因此, 个体需要花费一些认知资源去抑制镜像概括化。

考察抑制能力对镜像概括化影响的实验范式主要是负启动实验范式(negative priming paradigm, NP)。NP 范式是基于这样的逻辑: 如果加工过程存在抑制, 先前出现的刺激, 那么后来再出现该刺激或类似加工机制的刺激, 其反应时变慢和正确率变低。该理论假设镜像加工依赖于一种镜像抑制能力, Borst 等人(2015)和 Ahr 等人(2016)等人采用负启动实验范式分别对大学生和小学生(一、三、五年级学生)进行研究

验证了该理论的存在,且 Ahr (2016)的研究中进一步发现,抑制程度与年级不存在相关,暗示镜像加工与阅读能力不存在相关,最近, Fernandes 和 Leite (2017)的研究对于这一点进行了解释,镜像识别并不是与阅读能力无关,而是当阅读能力满足到一定的程度后,阅读能力就不对其产生影响。

### 3. 文字与非文字刺激的镜像加工的神经机制

随着认知神经科学的兴起和脑成像技术的应用,认知神经科学最重要的成就之一,在灵长类动物的大脑皮层上发现了视觉加工的解剖和功能分离的两条通路:一条是与物体形状和颜色等特征(“What”)加工有关的腹侧通路(ventral pathway),沿着大脑皮层的颞枕叶分布,其功能主要在于识别客体,对物体的整体特征(例如形状、颜色、结构)等进行加工;一条是与运动和空间位置特征(“Where”)加工有关的背侧通路(dorsal pathway),沿着枕顶叶分布,其功能主要与物体空间关系和空间运动有关。关于镜像加工观点认为:镜像加工可能需要这两条通路参与,例如, Rollenhagen 和 Olson (2000)认为镜像加工需要腹侧通路参与。

文字镜像加工与物体镜像加工(面孔、房屋、杯子、鞋子、其它工具等)在神经系统上存在诸多不同,因此,对文字镜像加工和物体镜像加工的脑认知研究引起了认知神经心理学界的广泛关注。一个普遍的假设为:文字镜像加工与物体镜像加工存在截然不同的神经心理机制(Pegado et al., 2011)。为此,越来越多的心理学家从神经生物学角度进行探究发现,文字镜像加工神经机制、物体镜像加工神经机制以及镜像加工神经机制存在特异性与一般性。

#### 3.1. 文字镜像加工的神经机制研究

人类大脑左侧梭状回区域(left fusiform gyrus)在一般情况下与语义加工密切联系。脑成像和功能性磁共振技术研究发现个体在进行文字加工时左侧梭状回会被激活(Cohen & Dehaene, 2004; 刘娜, 范国光, 于兵, & 郭启勇, 2009)。Cohen 等(2000)发现被激活的区域与 Talairach 空间( $x = -42, y = -57, z = -6$ )位置相一致,即落在颞枕叶皮层,且 Dehaene 等(2002)等采用事件相关定位和 fMRI 研究发现, VWFA 在左侧梭状回区域内,进一步说明, VWFA 是文字加工特异性区域(刘海程, 2012; Pegado et al., 2010)。

有关镜像加工的普遍结论是:颞枕叶皮层在加工文字镜像加工的时候比加工物体镜像的时候激活更强。首先, VWFA 的作用是对视觉文字表征不变,即当呈现文字的字体、颜色、以及位置等发生变化,但是个体加工的文字表征不变,也就是常说的“正字法意识”(Cohen et al., 2000)在加工文字刺激时,更多强调正字法信息,而加工物体刺激时,较少关注正字法信息,这可能有助于解释为什么在熟练阅读者中, VWFA 能对文字镜像进行识别,但不能识别物体镜像。

Dehaene (2010)采用 fMRI 技术检验镜像认知加工,发现在熟练阅读者中,对文字的镜像识别时腹侧视觉通路激活更强,更为正确的区域是左侧视觉词形区。脑损伤研究发现,顶枕叶萎缩但腹侧通道完好的病人在对工具、面孔和字词进行镜像区分时,工具和面孔刺激的表现仅为机遇水平,而她对字词镜像区分的正确率非常高(Oliver & Rosleen, 1996; Davidoff & Warrington, 2001),同时, He 等(2009)采用 fMRI 技术对中国非文盲、文盲呈现文字,结果发现,文盲在大脑的 VWFA 不能激活,只有非文盲在大脑的 VWFA 激活。随后,刘海程等(2012)对 11 名女性文盲被试进行为期 1 个月的识字培训,发现这批被试的 VWFA 能迅速形成,且 VWFA 的快速形成与正字法意识的迅速提高相关。因此,可以认定 VWFA 在文字镜像加工中起得非常重要的作用,相当于文字镜像中枢,且阅读能力的提高会增强颞枕间的弓状纤维束连接,使得的 VWFA 的激活增(Schotten, 2014)。

#### 3.2. 非文字镜像加工的神经机制研究

通过考察非文字镜像加工的神经机制,研究者可以确定文字镜像加工的特异性问题。Dehaene 等(2010)

和 Pegado 等(2011)对镜像加工进行一系列的 fMRI 的研究发现, VWFA 能区分文字以及镜像,但不能区分物体及其镜像,因此,推测物体镜像不需要 VWFA 的参与,但一些研究者对该观点提出反驳,当 VWFA 受损时,不仅会患失读症,即不能识别单词、单个字母、阿拉伯字母,而且也不能识别其它物体(面孔),这说明物体识别与 VWFA 有关,因此,认为文字镜像加工能力延伸到物体镜像加工,即物体镜像加工需要颞枕叶区参与,只不过相比于文字镜像加工,对物体的镜像加工会有所延迟。

### 3.3. 文字镜像加工和一般物体镜像加工在神经机制上的分离

大脑的腹侧通路对镜像物体的认知具有恒常性,能够自发地将原型物体与镜像物体等量齐观。例如, Rollenhagen 等(2000, 2005)利用微电极单细胞记录发现,猴子的颞下皮质区对原始刺激与镜像刺激的反应相同; Biederman 和 Cooper (1991)采用图片命名任务的结果表明,原始刺激和镜像刺激的启动不存在差异。但是,大脑腹侧通路对镜像物体的恒常性现象对字词加工而言是一个例外,即大脑的腹侧通道能够有效地将字词镜像区分开。Dehaene 和 Cohen (2007)认为,镜像概括化是灵长类动物的视觉系统的一种内在属性,但是这种属性在学习阅读时将被个体“遗忘”。Vinckier (2006)等人发现,一位顶叶萎缩但腹侧通道完好的病人在对工具、面孔和字词进行镜像区分时,工具和面孔刺激的表现仅为机遇水平,而对字词镜像区分的正确率非常高。总之,大脑对物体镜像与字词镜像的区分存在差异,前者是在枕顶通道进行的,需要顶叶的参与,而后者在腹侧通道就可以完成。

## 4. 研究展望

### 4.1. 镜像加工的发展性研究

综上所述,镜像加工的认知神经科学家主要从跨通道、心理旋转、抑制能力等角度探讨镜像加工的现象,提供多种理论来阐明镜像加工的发生机制。目前镜像加工理论的核心焦点在于阐明“镜像加工为什么会发生”,不同理论观点对此问题的答复存在分歧,主动抑制和 VWFA 对镜像加工作用的分歧焦点是阅读能力还是抑制能力对镜像加工产生影响呢?新近有研究者认为,镜像加工会受阅读能力影响,但当阅读能力达到一定程度后就不受其影响,与阅读能力不呈线性关系,所以推测镜像加工前期受阅读能力和抑制能力影响,后期抑制能力影响比较大,且关于“镜像加工何时发生”的问题,未有研究者对其进行专门化研究,因此,未来研究可以尝试从发展的角度来说明在哪个阶段受阅读能力影响大,在哪个阶段受抑制能力影响较大,以及探讨不同范畴的镜像加工的发展情况。

### 4.2. VWFA 的特异性研究

VWFA 的确切功能到底是什么,目前也尚无定论。Dehaene-Lambertz 等人(2002)提出, VWFA 参与镜像加工且只对文字的镜像加工而不参与物体镜像加工,但有的观点认为是物体镜像加工需要 VWFA 参与,关于 VWFA 的特异性值得研究者在未来研究探索,以及探索其对文字镜像加工是怎么样进行,是否借助正字法意识进行镜像加工?总的来看,虽然 VWFA 得到了广泛研究,但是关于这一大脑区域的确切功能,目前仍不是很清楚。这样,将来研究的一个重要研究方向是更精确地确定 VWFA 的作用。

### 4.3. 不同感觉通道对镜像加工的贡献

大部分研究者均赞同阅读经验的习得影响镜像加工,但是关于阅读经验的习得一般是通过听说读写等过程,也就是说,以往的研究更倾向于探讨这些混合的过程对镜像加工的影响,鲜有研究者考察单一过程对镜像加工的影响,甚至未有研究考察不同感觉通道对镜像加工的贡献程度。已有研究初步暗示书写能力的获得对镜像加工会产生显著的影响(如键盘打字与书写文字对镜像加工的影响),因此,未来的研

究可以将不同通道对镜像加工的影响, 以及将不同通道获得的阅读经验对镜像加工发展的影响作为一个重要的研究方向, 从而可以从诸多角度为理解镜像加工的基础提供科学的证据。

## 基金项目

宁德师范学院 2017 年创新团队(2017T08); 福建省中青年教师教育科研项目立项(社科类)(JAS170576); 福建省大学生创新训练计划项目(201610398051); 宁德师范学院 2018 年教学改革项目(JG2018017)。

## 参考文献

- Ahr, E., Houdé, O., & Borst, G. (2016). Inhibition of the Mirror Generalization Process in Reading in School-Aged Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *145*, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.12.009>
- Atteveldt, N. V., Formisano, E., Goebel, R., & Blomert, A. L. (2004). Integration of Letters and Speech Sounds in the Human Brain. *Neuron*, *43*, 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.06.025>
- Biederman, I., & Cooper, E. E. (1991). Evidence for Complete Translational and Reflectional Invariance in Visual Object Priming. *Perception*, *20*, 585-593. <https://doi.org/10.1068/p200585>
- Bitan, T., Booth, J. R., Choy, J., Burman, D. D., Gitelman, D. R., & Mesulam, M. M. (2005). Shifts of Effective Connectivity within a Language Network during Rhyming and Spelling. *Journal of Neuroscience*, *25*, 5397-5403. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0864-05.2005>
- Bornstein, M. H., Gross, C. G., & Wolf, J. Z. (1978). Perceptual Similarity of Mirror Images in Infancy. *Cognition*, *6*, 89-116. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(78\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(78)90017-3)
- Borst, G., Ahr, E., Roell, M., & Houdé, O. (2015). The Cost of Blocking the Mirror Generalization Process in Reading: Evidence for the Role of Inhibitory Control in Discriminating Letters with Lateral Mirror-Image Counterparts. *Psychonomic Bulletin & Review*, *22*, 228-234. <https://doi.org/10.3758/s13423-014-0663-9>
- Brem, S., Bach, S., Kucian, K., Guttorm, T. K., Martin, E., Lyytinen, H., et al. (2010). Brain Sensitivity to Print Emerges When Children Learn Letter-Speech Sound Correspondences. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*, 7939-7944. <https://doi.org/10.1073/pnas.0904402107>
- Carreiras, M., Seghier, M. L., Baquero, S., Estévez, A., Lozano, A., Devlin, J. T., et al. (2009). An Anatomical Signature for Literacy. *Nature*, *461*, 983-986. <https://doi.org/10.1038/nature08461>
- Cohen, L., & Dehaene, S. (2004). Specialization within the Ventral Stream: The Case for the Visual Word form Area. *Neuroimage*, *22*, 466-476. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.12.049>
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M. A., & Michel, F. (2000). The Visual Word form Area: Spatial and Temporal Characterization of an Initial Stage of Reading in Normal Subjects and Posterior Split-Brain Patients. *Brain*, *123*, 291-307. <https://doi.org/10.1093/brain/123.2.291>
- Cornell, J. M. (1985). Spontaneous Mirror-Writing in Children. *Canadian Journal of Psychology Revue Canadienne De Psychologie*, *39*, 174-179. <https://doi.org/10.1037/h0080122>
- Davidoff, J., & Warrington, E. K. (2001). A Particular Difficulty in Discriminating between Mirror Images. *Neuropsychologia*, *39*, 1022-1036. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(01\)00039-2](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(01)00039-2)
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, *56*, 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>
- Dehaene, S., Le Clec'H, G., Poline, J. B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2002). The Visual Word form Area: A Prelexical Representation of Visual Words in the Fusiform Gyrus. *Neuroreport*, *13*, 321-325. <https://doi.org/10.1097/00001756-200203040-00015>
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Nunes, F. G., Jobert, A. et al. (2010). How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language. *Science*, *330*, 1359-1364. <https://doi.org/10.1126/science.1194140>
- Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., & Hertz-Pannier, L. (2002). Functional Neuroimaging of Speech Perception in Infants. *Science*, *298*, 2013-2015.
- Dong, Y., Nakamura, K., Okada, T., Hanakawa, T., Fukuyama, H., Mazziotta, J. C. et al. (2005). Neural Mechanisms Underlying the Processing of Chinese Words: An fMRI Study. *Neuroscience Research*, *52*, 139-145. <https://doi.org/10.1016/j.neures.2005.02.005>
- Fernandes, T., & Leite, I. (2017). Mirrors Are Hard to Break: A Critical Review and Behavioral Evidence on Mirror-Image

- Processing in Developmental Dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 159, 66-82. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.02.003>
- Fernandes, T., & Regine, K. (2013). From Hand to Eye: The Role of Literacy, Familiarity, Graspability, and Vision-for-Action on Enantiomorphy. *Acta Psychologica*, 142, 51. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.11.008>
- Fernandes, T., Leite, I., & Kolinsky, R. (2016). Into the Looking Glass: Literacy Acquisition and Mirror Invariance in Pre-school and First-Grade Children. *Child Development*, 87, 2008-2025. <https://doi.org/10.1111/cdev.12550>
- Gregory, E., & McCloskey, M. (2010). Mirror-Image Confusions: Implications for Representation and Processing of Object Orientation. *Cognition*, 116, 110-129. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.04.005>
- He, S., Liu, H., Jiang, Y., Chen, C., Gong, Q., & Weng, X. (2009). Transforming a Left Lateral Fusiform Region into Vwfa through Training in Illiterate Adults. *Journal of Vision*, 9, 853-853. <https://doi.org/10.1167/9.8.853>
- Hollard, V., & Delius, J. (1982). Rotational Invariance in Visual Pattern Recognition by Pigeons and Humans. *Science*, 218, 804-806. <https://doi.org/10.1126/science.7134976>
- Kolinsky, R., Verhaeghe, A., Fernandes, T., Mengarda, E. J., Grimmcabral, L., & Morais, J. (2011). Enantiomorphy through the Looking Glass: Literacy Effects on Mirror-Image Discrimination. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140, 210-238. <https://doi.org/10.1037/a0022168>
- Lachmann, T. (2002). Reading Disability as a Deficit in Functional Coordination. In E. Witruk, A. D. Friederici, & T. Lachmann (Eds.), *Basic Functions of Language, Reading and Reading Disability* (pp. 165-198). New York, NY: Springer Science + Business Media. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1011-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1011-6_11)
- Lachmann, T., & Leeuwen, C. V. (2008). Differentiation of Holistic Processing in the Time Course of Letter Recognition. *Acta Psychologica*, 129, 121-129. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.05.003>
- Leek, E. C., Atherton, C. J., & Thierry, G. (2007). Computational Mechanisms of Object Constancy for Visual Recognition Revealed by Event-Related Potentials. *Vision Research*, 47, 706-713. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.10.021>
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. (2003). Visual Presentation of Single Letters Activates a Premotor Area Involved in Writing. *Neuroimage*, 19, 1492-1500. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00088-0)
- Longcamp, M., Anton, J.-L., Roth, M., & Velay, J.-L. (2005). Premotor Activations in Response to Visually Presented Single Letters Depend on the Hand Used to Write: A Study on Left-Handers. *Neuropsychologia*, 43, 1801-1809. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.01.020>
- Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J. C., Anton, J. L., Roth, M., Nazarian, B. et al. (2008). Learning through Hand or Typewriting Influences Visual Recognition of New Graphic Shapes: Behavioral and Functional Imaging Evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20, 802-815. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20504>
- Mello, N. K. (1965). Interhemispheric Reversal of Mirror-Image Oblique Lines after Monocular Training in Pigeons. *Science*, 148, 252-254. <https://doi.org/10.1126/science.148.3667.252>
- Monzalvo, K., Fluss, J., Billard, C., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2012). Cortical Networks for Vision and Language in Dyslexic and Normal Children of Variable Socio-Economic Status. *Neuroimage*, 61, 258-274. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.02.035>
- Morais, J., & Kolinsky, R. (1994). Perception and Awareness in Phonological Processing: The Case of the Phoneme. *Cognition*, 50, 287. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90032-9)
- Morais, J., Cary, L., Alegria, J., & Bertelson, P. (1979). Does Awareness of Speech as a Sequence of Phones Arise Spontaneously? *Cognition*, 7, 323-331.
- Nakamura, K., Kuo, W. J., Pegado, F., Cohen, L., Tzeng, O. J., & Dehaene, S. (2012). Universal Brain Systems for Recognizing Word Shapes and Handwriting Gestures during Reading. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 20762-20767. <https://doi.org/10.1073/pnas.1217749109>
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental Dyslexia: The Cerebellar Deficit Hypothesis. *Trends in Neurosciences*, 24, 508-511. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01896-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01896-8)
- Oliver, H. T., & Rosleen, A. M. (1996). Failure to Discriminate between Mirror-Image Objects: A Case of Viewpoint-Independent Object Recognition? *Neurocase*, 2, 63-72.
- Orton, S. T. (1925). "Word-Blindness" in School Children. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 14, 581. <https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1925.02200170002001>
- Pegado, F., Nakamura, K., & Hannagan, T. (2014a). How Does Literacy Break Mirror Invariance in the Visual System? *Frontiers in Psychology*, 5, 703.
- Pegado, F., Nakamura, K., Braga, L. W., Ventura, P., Nunes, F. G., Pallier, C. et al. (2014b). Literacy Breaks Mirror Invariance for Visual Stimuli: A Behavioral Study with Adult Illiterates. *Journal of Experimental Psychology General*, 143, 887-894. <https://doi.org/10.1037/a0033198>



- Pegado, F., Nakamura, K., Cohen, L., & Dehaene, S. (2011). Breaking the Symmetry: Mirror Discrimination for Single Letters But Not for Pictures in the Visual Word Form Area. *Neuroimage*, 55, 742-749. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.043>
- Poldrack, R. A., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1998). The Neural Basis of Visual Skill Learning: An fMRI Study of Mirror Reading. *Cerebral Cortex*, 8, 1-10. <https://doi.org/10.1093/cercor/8.1.1>
- Rollenhagen, J. E., & Olson, C. R. (2000). Mirror-Image Confusion in Single Neurons of the Macaque Inferotemporal Cortex. *Science*, 287, 1506-1508. <https://doi.org/10.1126/science.287.5457.1506>
- Rollenhagen, J. E., & Olson, C. R. (2005). Low-Frequency Oscillations Arising from Competitive Interactions between Visual Stimuli in Macaque Inferotemporal Cortex. *Journal of Neurophysiology*, 94, 3368-3387. <https://doi.org/10.1152/jn.00158.2005>
- Roux, F. E., Draper, L., Köpke, B., & Demonet, J. F. (2010). Who Actually Read Exner? Returning to the Source of the Frontal "Writing Centre" Hypothesis. *Cortex*, 46, 1204-1210. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.03.001>
- Schotten, M. T. D. (2014). Learning to Read Improves the Structure of the Arcuate Fasciculus. *Cerebral Cortex*, 24, 989-995. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs383>
- Sutherland, N. (1960). Theories of Shape Discrimination in Octopus. *Nature*, 186, 840-844. <https://doi.org/10.1038/186840a0>
- Szwed, M., Qiao, E., Jobert, A., Dehaene, S., & Cohen, L. (2014). Effects of Literacy in Early Visual and Occipitotemporal Areas of Chinese and French Readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26, 459-475. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00499](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00499)
- Tarr, M. J., & Pinker, S. (1989). Mental Rotation and Orientation-Dependence in Shape Recognition. *Cognitive Psychology*, 21, 233-282. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(89\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0010-0285(89)90009-1)
- Terepocki, M., Kruk, R. S., & Willows, D. M. (2002). The Incidence and Nature of Letter Orientation Errors in Reading Disability. *Journal of Learning Disabilities*, 35, 214. <https://doi.org/10.1177/002221940203500304>
- Vinckier, F., Naccache, L., Papeix, C., Forget, J., Hahn-Barma, V., Dehaene, S., & Cohen, L. (2006). "What" and "Where" in Word Reading: Ventral Coding of Written Words Revealed by Parietal Atrophy. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18, 1998-2012. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.12.1998>
- Warrington, E. K., & Shallice, T. (1980). Word-Form Dyslexia. *Brain A Journal of Neurology*, 103, 99.
- 李心天, 徐震雷, 崔耀, 吴任刚, 关东秀, 董京育(1989). 儿童镜像书写的研究. *心理学报*, 21(3), 32-38.
- 刘海程(2012). *视觉文字加工脑区的形成与发展: 来自成年文盲的证据*. 博士论文, 北京: 中国科学院大学.
- 刘娜, 范国光, 于兵, 郭启勇(2009). 功能磁共振观察儿童文盲与非文盲语言加工相关脑区. *中国医学影像技术*, 25(3), 390-393.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7273，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ap@hanspub.org](mailto:ap@hanspub.org)