

整体知觉依赖于双侧视皮层的协同工作: TMS 研究

张 昕^① 曹 磡^① 韩世辉^{①②*}

(①北京大学心理系, 北京 100871; ②首都师范大学学习与认知实验室, 北京 100037)

摘要 以往研究表明, 右侧和左侧大脑半球分别主要负责复合图形的整体和局部知觉。本研究使用经颅磁刺激(TMS)研究对复合刺激的整体知觉是否需要双侧皮层的协同工作。在实验一中, 被试辨别复合字母的整体或者局部属性, 在施加单脉冲 TMS 或者伪 TMS 的同时记录反应时。尽管观测到了整体优势效应(即对整体目标的反应快于局部目标, 整体对于局部有更强的干扰), 但是 TMS 减弱了整体对局部加工的干扰并且增强局部对整体加工的干扰。实验二排除了实验一中观测到的效应是知觉学习后果的可能性。实验三利用复合图形刺激, 观测到了与实验一相似的 TMS 效应, 而且发现 TMS 延长对整体的反应时(RTs)并减少对局部的反应时。最后, 实验一和实验三中观测到的 TMS 效应在左半球或者右半球没有显著差异。这些结果支持了协同假设, 该假设认为复合刺激的整体知觉依赖于双侧视皮层的协同工作。

关键词 整体知觉 视皮层 TMS 复合刺激

对于复杂视觉场景的整体知觉是视知觉研究的核心问题之一。一种研究整体和局部知觉关系的经典方法是测量对于分级组织的图形的整体或者局部水平的行为反应。Navon^[1]使用如图 1 所示的由局部字母组成的整体字母, 要求被试分别对复合刺激的整体或局部做出反应。他发现对整体目标的反应时(以下简称整体反应时)快于对局部目标的反应时(整体反应时优势), 并且局部反应时被不一致的整体字母减慢(整体对局部干扰), 而反之不然。Navon 的发现支持了整体优先性假设, 该假设认为整体信息首先被编码, 而局部信息在视知觉的更晚阶段被加工。

脑损伤研究发现左侧颞顶损伤会损坏其对局部图形的记忆及减慢对局部图形的反应, 而右半球对应区域的损伤则导致其对整体图形的记忆损坏及反应减慢^[2~5]。这些发现表明, 在左右半球存在分别对

应局部和整体加工的子系统^[6]。最近的脑成像研究支持了这个单侧化假设。研究发现辨认整体字母会增加右侧舌回的活动, 而辨认局部字母则增加左侧下枕叶的活动^[7,8]。尽管这些研究强调右侧半球在整体知觉中所扮演的角色, 但是一个关于整体加工的事实却被忽略了。例如, 呈现在注视点的复合刺激一半投射到左半球而另一半投射到右半球。整体知觉需要综合来自左右视皮层的信息。相反, 这种综合对于局部知觉也许不是必要的, 因为每个半球至少接收到一个完整的局部字母, 从而获得足够的局部信息。这个协同假设强调了整体知觉中两半球的协同工作。这与强调右半球在整体知觉的主导作用的单侧化假设不同。以往的脑成像研究仅仅显示了右侧枕区在注意整体图形时会比注意局部图形时有更强的活动^[7,8], 而对两个半球的信息综合则言之甚少。

收稿日期: 2006-12-28; 接受日期: 2007-01-16

国家自然科学基金(批准号: 30630025, 30225026, 30328016)和中国科技部(批准号: 2002CCA01000)资助项目

* 联系人, E-mail: shan@pku.edu.cn

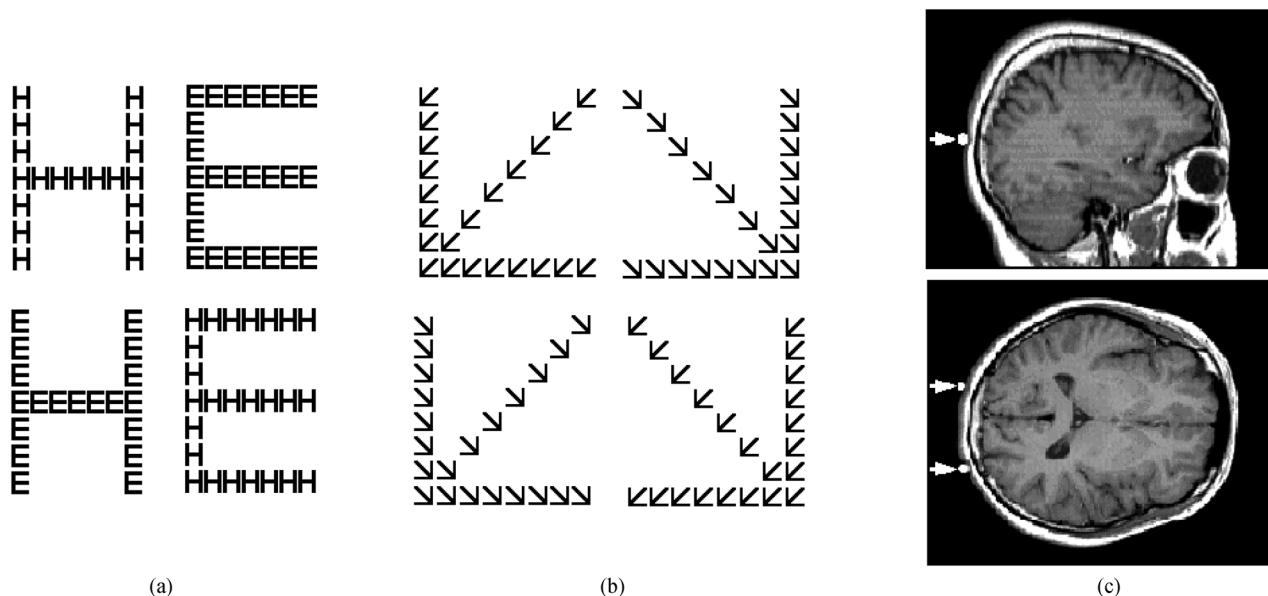


图 1 复合刺激和 TMS 的位置

(a) 实验一和二中用到的复合字母, 第一行和第二行分别为整体和局部字母一致和不一致的情况; (b) 实验三中用到的复合图形, 第一行和第二行分别为整体和局部箭头一致和不一致的情况; (c) 枕区单脉冲 TMS 的位置, 第二行的水平切面所示为左右(O1 和 O2)刺激点。第一行的径向切面所示为右半球 O2 的位置。白色箭头表示磁刺激

本研究利用经颅磁刺激(TMS)检验协同假设。TMS 脉冲所产生的磁场会导致随机的神经活动从而暂时性地干扰皮层的信息加工^[9]。我们刺激了右侧视皮层在脑成像研究中对整体加工有增强活动的区域^[8,10]以及左半球中的对应区域。根据单侧化假设, 对右半球的TMS 应该干扰整体加工而对左半球的TMS 则不然, 或者至少相对于对左半球的TMS, 对右半球的TMS 应该产生对整体加工更大的影响, 于是, 我们应该预期对右侧枕叶的TMS或者降低整体RT优势, 或者减弱整体对局部的干扰, 另外, 对左侧半球的TMS 应该干扰局部加工。然而, 根据协同假设, 对任意半球视皮层的刺激应该干扰整体知觉, 因为它会破坏双侧纹状皮层以及纹外皮层的协同工作。从而, 由于对任意一侧半球的TMS会破坏双侧视皮层的协同工作, 我们应该预期对任意一侧半球TMS对整体知觉的影响应该没有不同。最后, 对单侧视皮层的刺激应该不会破坏局部加工, 因为局部加工不依赖于双侧半球的协同工作。

实验一, 记录了用真实单脉冲TMS或者伪TMS刺激左右枕区时, 对于复合刺激整体或者局部水平的行为反应。以前的事件相关电位(ERP)研究表明, 一个在外侧枕区皮层有较大强度并且在刺激呈现后 100 ms 达到峰值的正波(P1)会被指向复合刺激整体或者局部目标的选择性注意所调节^[11-14], 说明局部和整体加工在

刺激呈现后 100 ms 时开始不同。所以, 在本研究中, 为了干扰皮层中区分整体或局部知觉的过程, 我们在复合刺激呈现后 90 ms 对左或右视皮层施加TMS刺激(图 1(c))。由于实验一中, 真TMS总是在伪TMS后施加, 所以, 真TMS和伪TMS条件下行为表现上的不同可能是知觉学习的结果。于是, 我们设计了实验二来排除这种可能性。实验二中, 除了没有施加真TMS或者伪TMS之外, 其他均与实验一相同。对应于实验一中的伪TMS和真TMS阶段, 实验二中的早期和晚期阶段的数据被用来对比, 以检测知觉学习的影响。实验三利用复合图形刺激(图1(b))进一步支持了协同假设^[15,16]。被试被要求辨别整体或者局部箭头的朝向。如果协同假设是正确的, 不论我们使用的是复合字母还是复合图形, TMS对整体加工的影响都应该存在。另外, 如以往的研究所表明的, 纹状和纹外皮层内的细胞对朝向反应敏感^[17], 对这些区域施加TMS脉冲可能强烈的影响对大小箭头朝向的辨别。

1 方法

1.1 被试

3 组不同的被试自愿有偿参加了这个研究。10 个正常健康的成人(6 男, 4 女; 年龄 19~23 岁)参加了实验一。10 个正常健康的成人(8 男, 2 女; 年龄 19~22 岁)参

加了实验二。11个正常健康的成人(7男,4女;年龄19~26岁)参加了实验三。所有被试均为右利手,视力或矫正视力正常,没有神经病史。被试均签署了知情同意书。实验过程获得了北京大学心理系伦理委员会的批准。

1.2 刺激和过程

(1) 实验一:

刺激: 刺激呈现在距被试眼睛57 cm处的显示器上, 黑色图形呈现在灰背景上。每个刺激为一个由位于 7×7 矩阵中的小字母组成的大字母(图1(a))。一半的试次整体和局部字母是一致的(图1(a)的第一行), 而另一半是不一致的(图1(a)的第二行)。整体和局部字母分别为 $6.1^\circ\times4.2^\circ$ 和 $0.67^\circ\times0.44^\circ$ (高×宽)。每个试次首先呈现一个 $0.3^\circ\times0.2^\circ$ 的十字注视点, 刺激呈现在注视点的位置100 ms。两个相邻试次中开始呈现复合刺激的间隔在4000~4200 ms之间随机变化。在不同的实验区组中, 被试要求辨别整体或者局部字母并按标准键盘上两个不同按键中的一个。

TMS方案: 实验利用一个70 mm的“8”字形线圈给予TMS刺激(MagStim, Whitland, UK), 用于呈现刺激的计算机与引发单脉冲TMS的设备相连, 从而使TMS与刺激发生的时刻是时间锁定的: 在刺激开始呈现90 ms后施加TMS。TMS的输出强度与运动阈限相同(最大输出的53%到74%), 该运动阈限为能够引起可观察到的拇指抽动的最小强度。TMS被施加在左右枕区的两个不同位置: O1和O2(根据国际标准10/20 EEG电极系统)。以往研究表明这些位置是纹状和纹外皮层交叠的区域(BA 17和18)^[18]。TMS的位置通过利用维生素E胶囊作为标记在三个被试的MRI中进一步得到了定位(图1(c))。TMS位置的平均Talairach坐标^[19]为 $x, y, z = \pm 16, -92, 4$ 。

每个被试分两个阶段参与实验, 两阶段不在同一天: 一个阶段刺激左半球; 一个刺激右半球。为了得到与真TMS效应对比的基线并控制TMS特有的声音干扰, 在每个阶段, 我们都首先记录线圈垂直于头皮发出伪TMS的条件下被试对整体和局部知觉任务的反应, 之后, 再记录真TMS时被试的反应。被试舒适的坐在椅子上, 头部通过下颌托架固定。每个阶段, 在进行32个练习试次之后, 在伪TMS的条件下, 被试分别进行辨别整体或者局部字母的实验, 每个实

验均为两组, 每组包含24个试次, 然后, 被试在真实TMS刺激下进行同样的实验。被试被要求尽量又快又准确地做出反应。两个阶段的左或右TMS顺序以及整体或局部任务的顺序在被试间进行了平衡。

数据分析: 我们对反应时和错误率进行了重复测量的方差分析(ANOVA), TMS(伪TMS或者真TMS)、整体性(辨别整体或局部字母)、一致性(整体和局部字母一致或不一致)以及半球(TMS刺激左半球或右半球)作为独立变量。

(2) 实验二:

刺激、TMS方案和数据分析: 实验二除了没有使用任何TMS以外, 其余均与实验一相同。我们对反应时和错误率进行了ANOVA, 并以练习(早期或晚期阶段, 对应于实验一中的伪TMS或真TMS)、整体性(辨别整体或者局部字母)以及一致性(整体或者局部字母是一致的还是不一致的)为独立变量。

(3) 实验三:

刺激、TMS方案和数据分析: 以上方面除了如图1(b)所示将刺激改为复合图形以外, 均与实验一相同。每个刺激为由朝左下或右下的局部箭头组成的整体箭头, 局部箭头的方向或与整体箭头一致或与其不一致, 局部箭头或三角形均在 8×8 的矩阵中, 整体和局部图形分别为 $6.4^\circ\times6.4^\circ$ 和 $0.69^\circ\times0.69^\circ$ 视角。在不同的实验区组中, 被试在被伪TMS或者真TMS刺激的同时, 被要求辨别整体或者局部箭头的方向。

2 结果

2.1 实验一

整体和局部任务的错误率分别为3.7%和5.4%。ANOVA仅仅发现了一致性的主效应($F(1,9) = 10.3, P < 0.01$), 整体和局部字母一致时错误率低于不一致的错误率(3.0%对6.1%)。错误率和平均反应时的比较表明不存在速度-正确率权衡, 所以下文将不再讨论错误率。

图2显示了在伪TMS和真TMS条件下正确反应的平均反应时, 整体性($F(1,9) = 8.62, P < 0.02$)和一致性($F(1,9) = 95.9, P < 0.001$)主效应显著, 被试对整体字母的反应快于局部字母, 在整体与局部字母一致的时候反应快于不一致的反应。整体性和一致性的交互作用显著($F(1,9) = 6.63, P < 0.03$), 反映了对

局部反应比对整体反应有更强的干扰作用。TMS 与整体性的双向交互作用不显著($F < 1$), 表明 TMS 并不影响整体反应时优势。但是 TMS×整体性×一致性的三重交互作用显著($F(1,9) = 5.16, P < 0.047$), 表明相对于伪 TMS 条件, 整体对局部干扰在真 TMS 条件下被减弱了, 而局部对整体干扰则有所增加。图 3 所示的不同刺激条件下的干扰效应(即在不一致条件下的

反应时减去一致条件下的反应时)表明了不同 TMS 条件对整体和局部加工的影响。最后, TMS 刺激左半球还是右半球没有主效应, 也没有与其他因素的交互作用($P > 0.2$)。特别是, TMS×整体性×一致性×半球的交互作用不显著($F < 1$), 表明 TMS 对整体和局部加工的相互干扰的影响在刺激左右半球条件下无显著不同。

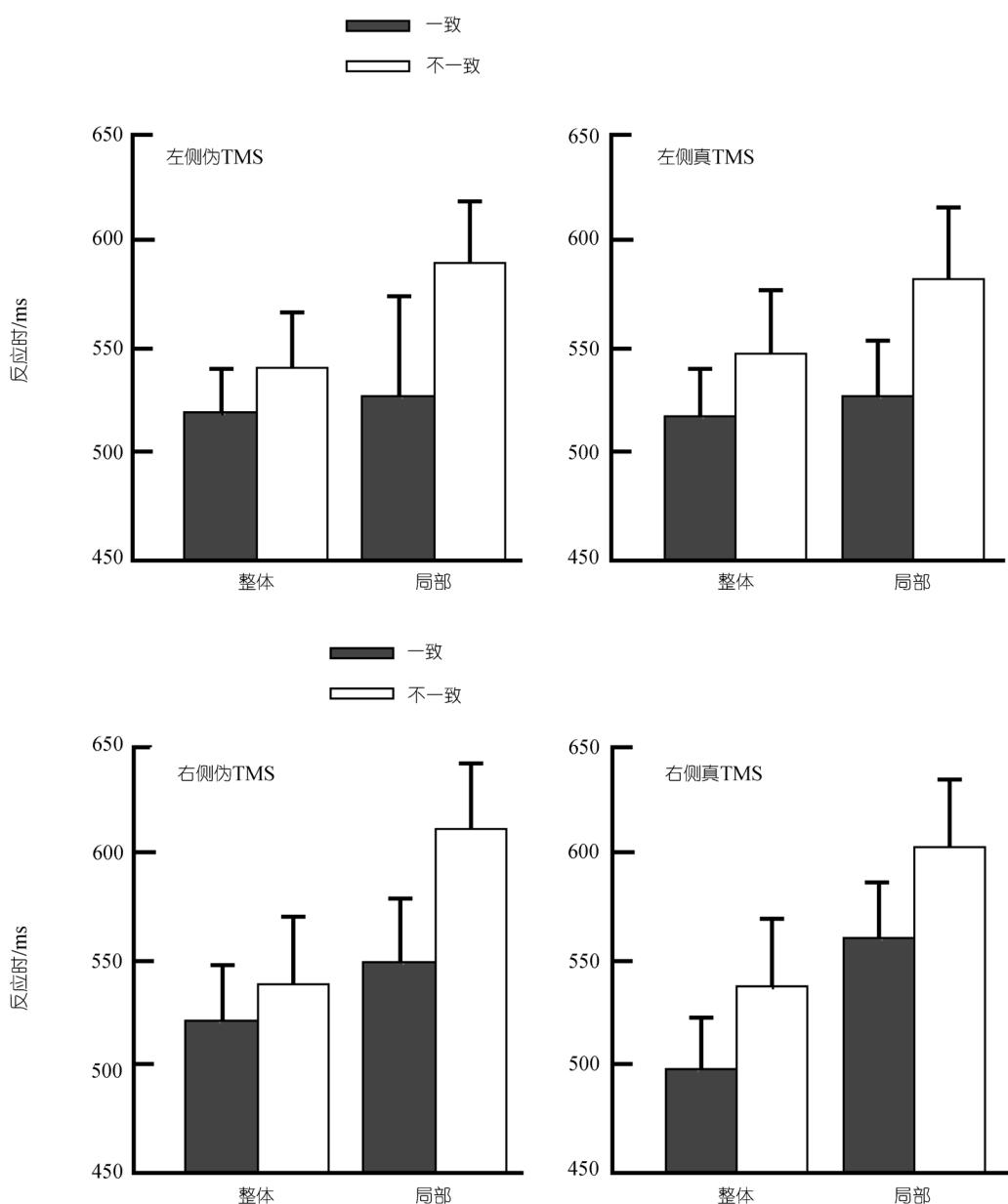


图 2 实验一中真 TMS 刺激和伪 TMS 刺激的平均反应时
因为 ANOVA 并未显示左右半球 TMS 条件的差异, 所以它们的数据被平均起来。误差棒代表标准误差

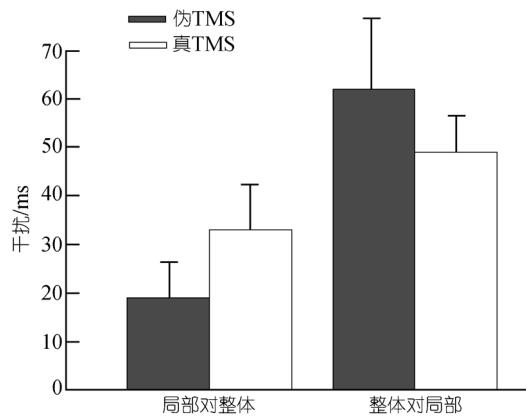


图 3 实验一中伪 TMS 和真 TMS 的干扰效应(不一致条件下的反应时减去一致条件下的反应时)

2.2 实验二

整体和局部任务的错误率分别为 3.7% 和 4.2%。ANOVA 仅仅发现了练习的主效应($F(1,9) = 6.23, P < 0.03$)，早期阶段的错误率稍高于晚期阶段(4.6% 对 3.1%)。

图 4 所示为早期阶段和晚期阶段正确反应的反应时。对反应时的分析发现整体性($F(1,9) = 11.3, P < 0.01$)和一致性($F(1,9) = 49.6, P < 0.001$)主效应显著，被试对整体字母的反应快于对局部字母的反应，在一致性条件下反应快于不一致条件下的反应。仅存

在练习和一致性的交互作用($F(1,9) = 6.37, P < 0.03$)，表明干扰效应在晚期阶段要稍小于早期阶段。然而，对整体和局部反应的练习效应没有不同($P > 0.1$)。

2.3 实验三

整体和局部任务的错误率分别为 2.4% 和 2.7%。ANOVA 仅仅发现了一致性的主效应($F(1,10) = 5.32, P < 0.04$)，一致条件下的错误率要低于不一致的条件(1.0% 对 4.1%)。

图 5 显示伪 TMS 和真 TMS 条件下正确反应的反应时。整体性($F(1,10) = 45.0, P < 0.001$)和一致性($F(1,9) = 93.6, P < 0.001$)主效应显著。被试对整体图形的反应快于对局部图形的反应，在一致性条件下反应快于不一致的条件。由于对局部反应比对整体反应更强的干扰作用，整体性和一致性的交互作用显著($F(1,10) = 14.9, P < 0.01$)。有趣的是，TMS 减慢整体反应而加快局部反应，使得 TMS 与整体性的双向交互作用显著($F(1,10) = 6.32, P < 0.03$)。另外，TMS×整体性×一致性的三重交互作用显著($F(1,10) = 6.74, P < 0.03$)，表明相对于伪 TMS 刺激条件，真 TMS 减弱整体对局部干扰而增强局部对整体干扰。图 6 显示了每个刺激条件下的干扰作用，从而显示了 TMS 对整体和局部加工的不同作用。最后，半球的主

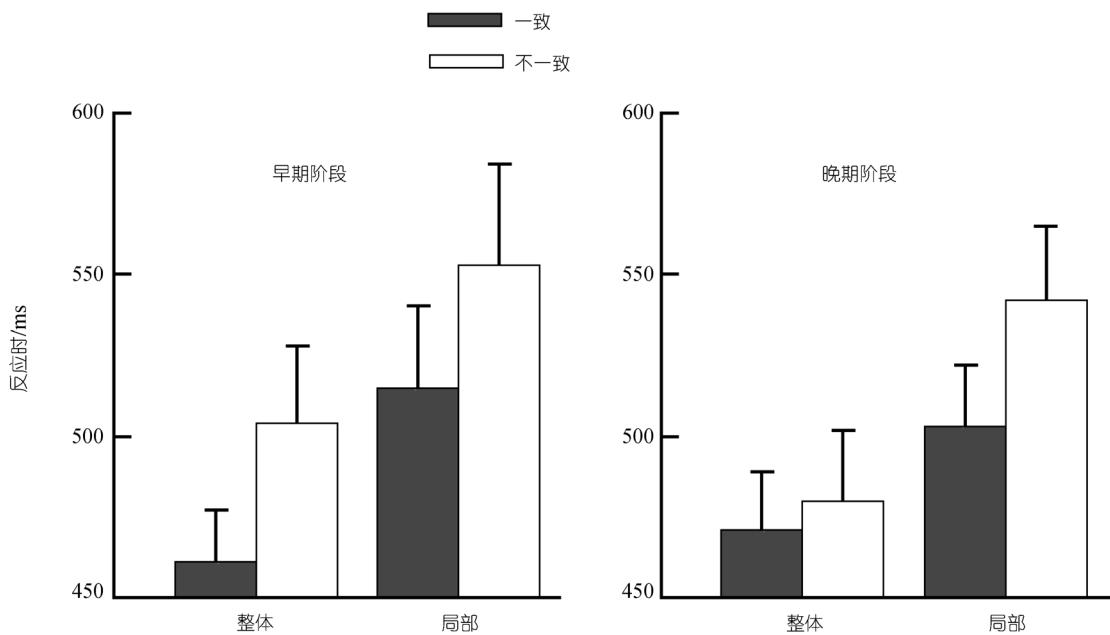


图 4 实验二中早期和晚期阶段的平均反应时
误差棒代表标准误差

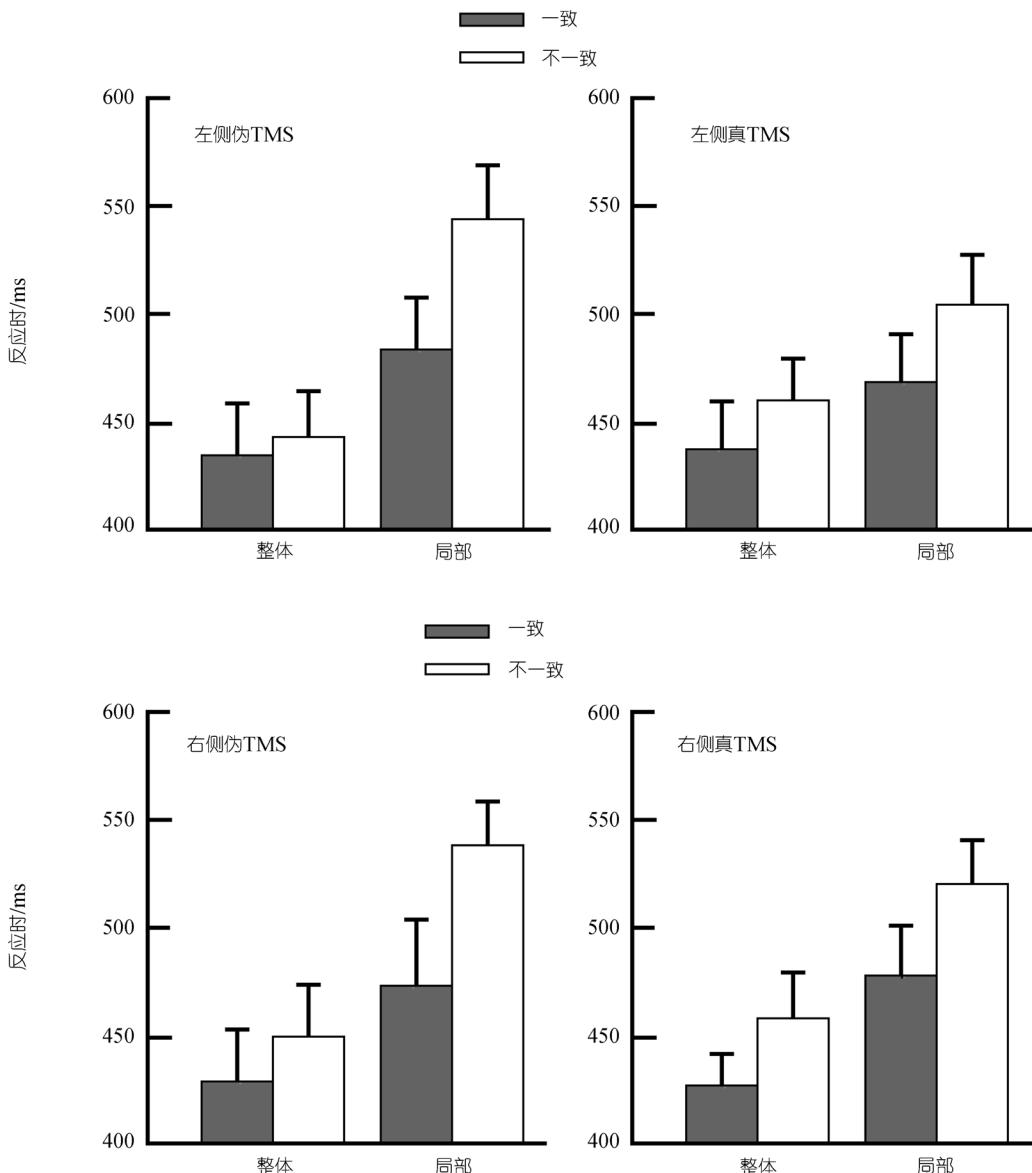


图 5 实验三中真 TMS 刺激和伪 TMS 刺激的平均反应时

因为 ANOVA 并未显示左右半球 TMS 条件的差异，所以它们的数据被平均起来。误差棒代表标准误差

效应以及它与其他因素的交互作用均不显著($P > 0.2$)。特别的，TMS×整体性×半球($P > 0.09$)以及 TMS×整体性×一致性×半球($F < 1$)的交互作用均不显著，表明 TMS 对整体反应时优势以及整体和局部加工的干扰的影响在不同半球条件下没有显著差异。

3 讨论

本研究利用 TMS 来研究对视皮层神经活动的暂时性干扰对复合刺激整体性和局部性反应的影响。在实验一中，被试辨别复合字母中的整体或者局部

目标，反应时结果显示了整体反应时优势以及整体对局部更强的干扰作用。因此，我们如以前的工作一样得到了整体优势效应 [1,20]。有趣的是，我们发现相对于伪 TMS 刺激，对纹状和纹外皮层施加单脉冲 TMS 会减弱整体对局部干扰而增强局部对整体干扰。实验二进一步表明任务的顺序(例如，早期或晚期阶段)对整体对局部干扰以及局部对整体干扰没有不同的影响，这些结果排除了实验一中观察到的 TMS 对整体和局部加工的影响仅仅是知觉学习的结果的可能性。实验三利用复合图形进一步确认了 TMS 对整

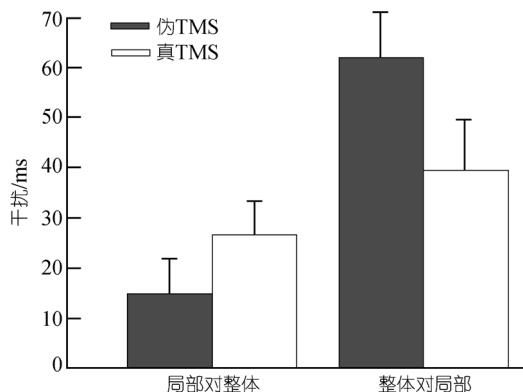


图6 实验三中伪TMS和真TMS的干扰效应(不一致条件下的反应时减去一致条件下的反应时)

体和局部加工的影响, TMS 减弱整体对局部加工干扰而增强局部对整体加工的干扰。另外, TMS 减慢整体反应而加速局部反应。更重要的是, 实验一和实验三都显示了 TMS 效应对于刺激左右半球没有显著差异。

单脉冲TMS产生的对纹状和纹外皮层神经活动的功能性干扰削弱了整体知觉(例如, 减弱整体对局部干扰和减慢整体反应)这一事实, 首先证明了视皮层在复合刺激整体结构知觉过程中所扮演的重要角色, 这与脑成像研究一致 [7,8,10]。另外, TMS促进局部加工(如增强局部整体干扰和加快局部反应)而不是干扰它。如果TMS效应反映了由干扰视皮层神经活动而导致的对低级感觉加工(如阈限敏感度的变化)或者高级认知(如辨别和再认)的普遍干扰作用, 那么我们应该预期TMS对整体和局部加工均有负面影响, 因为二者在行为反应前均需要经历这样的低级感觉加工和高级认知加工的过程。TMS对整体和局部加工的相反效应表明TMS特异性地损坏整体知觉加工(例如知觉组织, 见下面的讨论)。

最重要的是, 我们发现了TMS对整体知觉的影响并不因为TMS所施加的半球不同而不同, 这与假设整体知觉主要被右半球调节的单侧化假设相悖 [6]。即使考虑到可能的能使TMS刺激延迟 30 ms引起对侧枕区活动的经胼胝体的连接 [21], 如果根据单侧化假设我们仍应预期右侧枕区TMS对整体知觉的影响应该大于对左侧枕区TMS的影响。然而, 结果表明事实并非如此。我们的结果与协同假设相一致, 该假设认为对复合刺激的整体知觉依赖于左右视皮层的同时且协同工作以综合来自两个半球的信息, 对任意一

个半球的功能性干扰都会损坏两侧视皮层的协同工作, 从而产生对整体知觉的负效应。

以前的一些研究曾关注在干扰效应中, 两半球的交互作用所扮演的角色。例如, 对病人的研究发现, 任一半球的颞顶联合处损伤会消除整体对局部干扰, 不论复合刺激呈现在哪里 [3,4]。另外, 皮层连接被切除的割裂脑病人对复合刺激的反应虽然仍然有整体反应时优势, 但是整体和局部加工之间的干扰效应却没有了 [22], 表明正常的整体和局部加工中的干扰效应需要分别与倾向于整体和局部机制相联系的右、左颞顶区域通过胼胝体的通讯才能产生。

然而, 对正常被试的研究表明, 半球间的交互作用会减弱刺激间的干扰作用 [23]。研究者要求被试根据预先决定的水平判断是否一个单侧呈现在注视点以下的复合刺激与单侧呈现在注视点以上的两个探测复合刺激相同。与探测刺激不相关水平下形状不一致的反应时慢于相关水平下形状一致的反应时。这种干扰效应在相关水平一致的刺激投射在不同视野时小于投向相同视野时, 说明半球间的交流不是增强而是减弱整体和局部加工间的干扰效应。

不管这些研究如何的相互矛盾, 它们中没有能够对本研究的结果作出解释。基于病人 [3,4,22] 和正常被试 [23] 的分析预言了对半球间交互作用的干扰或者增强或者减弱整体和局部加工的干扰作用。然而, 我们在这里显示了对左右视皮层功能性的干扰会产生对整体对局部和局部对整体干扰相反的作用。

TMS对整体和局部加工的相反效应可以在我们以前研究所提出的框架内进行解释 [15,16,24]。根据这个框架, 对分级图形的加工有两个重要的方面, 即对局部元素的知觉组织以及对单个局部元素的选择, 前者对整体知觉至关重要, 后者则对局部知觉很重要。对整合局部元素成一个整体的倾向与对选择单个局部元素的倾向既平行又竞争, 从而决定了复合刺激的整体水平或是局部水平主导分级加工。本研究中的对左视皮层或右视皮层的TMS可能通过削弱双侧视皮层的联系而干扰了局部元素的整合, 这会削弱整体加工对局部元素分离和选择的竞争性, 从而, 在较弱的整体加工的条件下, 局部加工被促进了。减弱的整体对局部干扰和增强的局部对整体干扰反映了分级分析中既平行又竞争的过程。

怎样协调本研究和以往脑成像的结果呢? 在以前研究中所观察到的右侧纹外皮层在整体条件下比

局部条件有更强的激活，并不一定意味着整体知觉全部是在右半球完成的^[7,8]，仅仅反映了右半球和左半球分别主导整体和局部加工。我们的研究结果并不代表在整体/局部加工中没有半球不对称性，相反，其表明了整体知觉中双侧视皮层协同工作的重要性，除了右侧半球主导整体加工以外，双侧半球的协同工作也对整体加工有所贡献。

协同假设还为脑损伤研究提供了另一个解释，左右颞顶区域可能负责高级的认知加工，例如分别负责局部和整体的辨认和识别。然而，半球的损坏或者割裂脑手术会破坏两个半球对应区域的通信，从而导致对来自两半球信息整合的失败，而根据协同假设，该整合对整体知觉是重要的，所以，对病人研究的结果至少部分地反映了对双侧半球协同工作被破坏的影响。

总之，我们发现了TMS引发的对左右视皮层的功能性干扰破坏整体知觉(如减弱整体对局部干扰和减慢整体反应)，但是促进局部知觉(如增强局部对整体干扰和加速局部反应)。我们的结果支持协同假设，该假设强调双侧视皮层的协同工作对复合刺激整体结构的加工是至关重要的。对整体和局部加工相反的TMS效应与平行且竞争的分级分析模型一致，该模型认为知觉组织和局部选择彼此交互并分别对整体和局部知觉有所贡献^[15,16,24]。

参 考 文 献

- 1 Navon D. Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 1979, 9: 353—383
- 2 Delis D, Robertson L C, Efron R. Hemispheric specialization of memory for visual hierarchical stimuli. *Neuropsychologia*, 1986, 24: 205—214[DOI]
- 3 Lamb M R, Robertson L C, Knight R T. Attention and interference in the processing of global and local information: effects of unilateral temporal-parietal junction lesions. *Neuropsychologia*, 1989, 27: 471—483[DOI]
- 4 Lamb M R, Robertson L C, Knight R T. Component mechanisms underlying the processing of hierarchically organized patterns: inferences from patients with unilateral cortical lesions. *J Exp Psychol: Learn Mem Cogn*, 1990, 16: 471—483[DOI]
- 5 Robertson L C, Lamb M R, Knight R T. Effects of lesions of temporal-parietal junction on perceptual and attentional processing in humans. *J Neurosci*, 1988, 8: 3757—3769
- 6 Robertson L C, Lamb M R. Neuropsychological contributions to theories of part/whole organization. *Cogn Psychol*, 1991, 23: 299—330[DOI]
- 7 Fink G R, Halligan P W, Marshall J C, et al. Where in the brain does visual attention select the forest and the trees? *Nature*, 1996, 382: 626—628[DOI]
- 8 Han S, Weaver J, Murray S, et al. Hemispheric asymmetry in global/local processing: Effects of stimulus position and spatial frequency. *NeuroImage*, 2002, 17: 1290—1299[DOI]
- 9 Walsh V, Cowey A. Transcranial magnetic stimulation and cognitive Neuroscience. *Nature Neuroscience Review*, 2000, 1: 73—79[DOI]
- 10 Sasaki Y, Hadjikhani N, Fischl B, et al. Local and global attention are mapped retinotopically in human occipital cortex. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2001, 98: 2077—2082[DOI]
- 11 Evans M A, Shedd J M, Hevenor S J, et al. The effect of variability of unattended information on global and local processing: evidence for lateralization at early stages of processing. *Neuropsychologia*, 2000, 38: 225—239[DOI]
- 12 Han S, Fan S, Chen L, et al. On the different processing of wholes and parts: A psychophysiological study. *J Cogn Neurosci*, 1997, 9: 686—697
- 13 Han S, Fan S, Chen L, et al. Modulation of brain activities by hierarchical processing: A high-density ERP study. *Brain Topography*, 1999, 11: 171—183[DOI]
- 14 Han S, He X, Woods D L. Hierarchical processing and level-repetition effect as indexed by early brain potentials. *Psychophysiology*, 2000, 37: 817—830[DOI]
- 15 Han S, Humphreys G W. Interactions between perceptual organization based on Gestalt laws and those based on hierarchical processing. *Perception & Psychophysics*, 1999, 6: 1287—1298
- 16 Han S, Humphreys G W, Chen L. Parallel and competitive processes in hierarchical analysis: Perceptual grouping and encoding of closure. *J Exp Psychol: Human Perception and Performance*, 1999, 25: 1411—1432[DOI]
- 17 Livingstone M, Hubel D. Segregation of form, color, movement, and depth: Anatomy, physiology, and perception. *Science*, 1988, 240: 740—749[DOI]
- 18 Homan R W, Herman J, Purdy P. Cerebral location of international 10—20 system electrode placement. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 1987, 66: 376—382[DOI]
- 19 Talairach J, Tournoux P. Co-Planar stereotaxic atlas of the human brain. New York: Thieme, 1988
- 20 Han S, Chen L. Processing of global and local properties—An analysis with event-related brain potentials. *Sci China, ser C*, 1996, 39: 179—188
- 21 Ilmoniemi R J, Virtanen J, Ruohonen J, et al. Neuronal responses to magnetic stimulation reveal cortical reactivity and connectivity. *NeuroReport*, 1997, 8: 3537—3540[DOI]
- 22 Roberson L C, Lamb M R, Zaidel E. Interhemispheric relations in processing hierarchical patterns: Evidence from normal and commissurotomy subjects. *Neuropsychology*, 1993, 7: 325—342[DOI]
- 23 Weissman D H, Banich M T. Global-local interference modulated by communication between the hemispheres. *J Exp Psychol: General*, 1999, 8: 283—308[DOI]
- 24 Han S, Humphreys G W. Segmentation and selection contribute to local processing in hierarchical analysis. *Q J Exp Psychol A*, 2002, 55: 5—21