

* 学术论文 *

左腹侧枕颞区在颜色特征的直接和间接提取中的功能分离*

王 岩^{1,2,**} 赵晶辉² 杨炯炯³ 马 林⁴ He Sheng⁵ 翁旭初²

1. 首都师范大学心理系学习与认知北京市重点实验室, 北京 100048; 2. 中国科学院心理研究所脑高级功能研究实验室, 北京 100101; 3. 北京大学心理系, 北京 100081; 4. 中国人民解放军总医院放射科, 北京 100853; 5. Department of Psychology, University of Minnesota, Minneapolis, MN 55455-0344, USA

摘要 以往的研究提示, 物体特性的储存/提取与知觉这些特性的脑区有关. 有的研究发现知识的储存和提取恰恰激活了知觉区, 而另一些研究则表明, 知识的储存区并不是知觉区本身, 而是位于知觉区的附近, 比如前部. 而知觉区或其前部与对刺激不同特性的提取是否有关, 尚未有针对性的研究. 文中采用功能磁共振成像技术, 探讨了在颜色知觉和颜色提取过程中, 腹侧枕颞区的激活特点. 实验采用静止的灰度图像做控制条件, 首先对被试进行颜色知觉的功能定位, 然后用 6d 时间在扫描机器外训练被试记住颜色和运动、颜色和字母之间的联系, 最后进行颜色信息的直接和间接提取的功能磁共振扫描. 结果发现, 颜色知觉任务激活了双侧腹侧枕颞区后部, 当以运动为线索, 直接提取相对应的颜色信息时, 这一区域也被激活; 而当呈现运动和字母两种线索, 要求被试(通过间接提取颜色)判断二者是否互相匹配时, 除枕颞区后部外, 其左侧前部也出现激活. 结果为颜色信息的提取中, 左侧枕颞区后部和前部在不同提取任务中的功能分离提供了证据: 与颜色相关的信息储存在腹侧枕颞区两个前后相近的部位, 其中后部和颜色的知觉特性相关, 而前部可能和颜色相关的各种知识联系相关.

关键词 枕颞区 颜色知觉 重激活 提取 功能磁共振功能成像

生活中会接触到许多物体, 这时就会想起关于这些物体的知识. 例如, 当我们看到苹果, 甚至“苹果”这个词时, 就会提取出它的许多知识特征, 如苹果是圆的、红色的、可以吃、很甜等. 有关这些物体的知识(object concept)在大脑中如何储存和提取, 一直是神经科学家们研究的中心问题之一.

脑损伤病人和正常人的功能磁共振成像(fMRI)研究的结果表明, 物体的知识是由其知觉特性(如形状、颜色、运动特征)和功能特性(如社会属性)等组

成的^[1]. 这些知识特性的储存和提取与知觉这些物体特性的脑区有关^[2-6]. 例如, 当给被试呈现有关动作的词(如 bite, touch, kick)或图片^[7], 表示面部、胳膊和腿部动作时, 这些词或图片均激活了运动区及运动前区, 并且与真正的舌、手和脚的运动相关的区域接近或者重合^[3, 7]. 在这些研究中, 有的发现知识的储存和提取恰恰激活了知觉和运动区^[2, 3, 5], 如 Simmons 等^[5]发现, 当呈现表征物体的词, 要求被试提取其颜色特征时(如, 让被试判断“出租车—黄色”

2008-11-20 收稿, 2008-12-19 收修修改稿

* 国家自然科学基金(批准号: 30670674)和北京市重点实验室学习与认知实验室资助项目

** E-mail: wyfMRI@126.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

是否一致), 左侧梭状回的激活增强, 并且与其实验中的颜色知觉任务所激活的部位相重合. 这些研究提示, 物体的不同知识特征(如颜色特征)的存储和提取与其知觉特性有关^[8, 9]. 而另一些研究则表明, 知识的储存区并不是知觉区本身, 而是位于知觉区的附近, 如对物体的颜色信息的提取(如, 让被试对香蕉的白描图, 报告“黄色”)激活了枕颞区的前部^[2, 6, 10]. 这提示颜色知觉区前部可能参与了与知觉特征不同的其他知识特征^[11]的加工.

但是, 由于以往的很多研究并没有对同一组被试进行知觉区的定位, 而是直接扫描了与某一特征提取有关的脑区^[4, 6, 11], 使得知觉区和提取区是否在同一部位并不明确. 虽然 Simmons 等^[5]的研究中发现了颜色信息的提取部位和颜色知觉部位相重合, 但是其所采用的颜色知觉任务激活的区域并不是传统的颜色知觉区($y = -75$ 左右)^[12], 而是位于其前部范围为 $y = -33$ 到 -38 的区域. 更重要的是, 是否知觉区与知觉区的前部激活与刺激不同特性的提取有关, 尚未有针对性的研究. 基于以往实验的不足和上述重要问题, 我们认为有必要对知识的提取是否与知觉区相重合这一问题进行进一步研究, 以明确在提取物体知识的特征时, 枕颞区后部与前部的激活是否与对刺激不同特性的提取有关.

我们拟在被试对小球的颜色与运动特征的联系、字母和颜色特征的联系完全建立之后, 要求他们在两种不同条件下完成颜色信息的提取, 即或呈现小球的运动信息, 直接提取其颜色信息; 或分别呈现运动的小球和字母, 让被试判断小球的运动和字母是否匹配. 由于被试已分别学习了它们与颜色之间的联系, 因而会间接地提取颜色信息. 为避免语词信息的影响, 实验材料和提取线索均使用非语词形式. 为避免先验知识的影响, 采用在实验室中新学习的内容作为实验材料, 并在学习之前进行颜色知觉定位. 我们的实验假设是: 枕颞区后部的激活与颜色特征的知识提取有关; 而枕颞区的前部与不同刺激间的知识联系等加工过程更为相关.

1 材料与方 法

1.1 被 试

8 名健康志愿者, 5 男 3 女, 年龄 21—31 岁,

平均 22 岁. 无精神神经病史, 无色盲色弱. 视力矫正为 1.2.

1.2 实验材料、程序和任务

实验设计如图 1. 实验材料为小球, 分别以 8 种颜色或 8 种运动方式呈现(10×10 个), 以及 8 个有颜色的字母, 控制材料为灰色且不动的小球. 为明确定位被试的知觉与运动功能区, 每位被试首先完成知觉功能的 fMRI 定位任务, 即采用彩色且静止的小球进行颜色知觉定位, 采用灰色但运动的小球进行运动知觉的定位. 刺激材料随机呈现 2s, 要求被试看到刺激图片即按键反应. 之后被试接受 6d 的学习记忆训练, 即记住两种有关同一组颜色的不同联系: 一种为 8 种颜色和 8 种运动方式之间的一一对应的联系; 一种为 8 种颜色和 8 个字母之间的一一对应的联系. 在训练后的线索回忆测试的结果表明, 被试对这两种联系的学习正确率均为 100%. 最后被试进行 fMRI 扫描下的两种颜色提取实验. 在直接提取实验中, 给被试呈现灰色的运动小球 2s, 要求被试回忆运动对应的颜色. 在间接提取实验中, 给被试呈现字母和运动的小球(各 1s), 要求被试判断二者是否都和同一种颜色相匹配.

实验采用事件相关的实验范式. 每个被试共有 3 个扫描序列, 即知觉定位、直接提取和间接提取任务, 每一序列的时长均为 328s, 含有 16 个 Trial, 每个 Trial 长 20s, 其中有 2s 为刺激呈现, 18s 为基线(刺激前 6s, 刺激后 12s), 要求被试做相应的反应. 另有 8s 在序列开始时设置, 只有控制材料呈现, 被试不做任务, 为获取稳定的数据质量, 在数据处理时此 8s 的数据弃去. 知觉扫描序列包含 8 个颜色 trial 和 8 个运动 trial. 直接提取任务也包含 16 个 trial, 呈现的运动和序列与使用的 8 种运动方式一致, 共呈现 2 次. 为了和序列一相匹配, 只选用了第一次呈现的 8 个刺激进行了数据处理. 间接提取任务亦包含 16 个 trial, 其中 8 个为间接提取任务, 另外 8 个为知觉判断任务(被试判断运动和箭头是否匹配). 本研究只讨论和颜色相关的问题, 所以, 对此任务不进行讨论.

1.3 fMRI 成像设备和方法

采用 GE 公司生产的 Signa 1.5T 全身扫描系统, 装备 EPI 软硬件设备, 标准头线圈, 软件版本

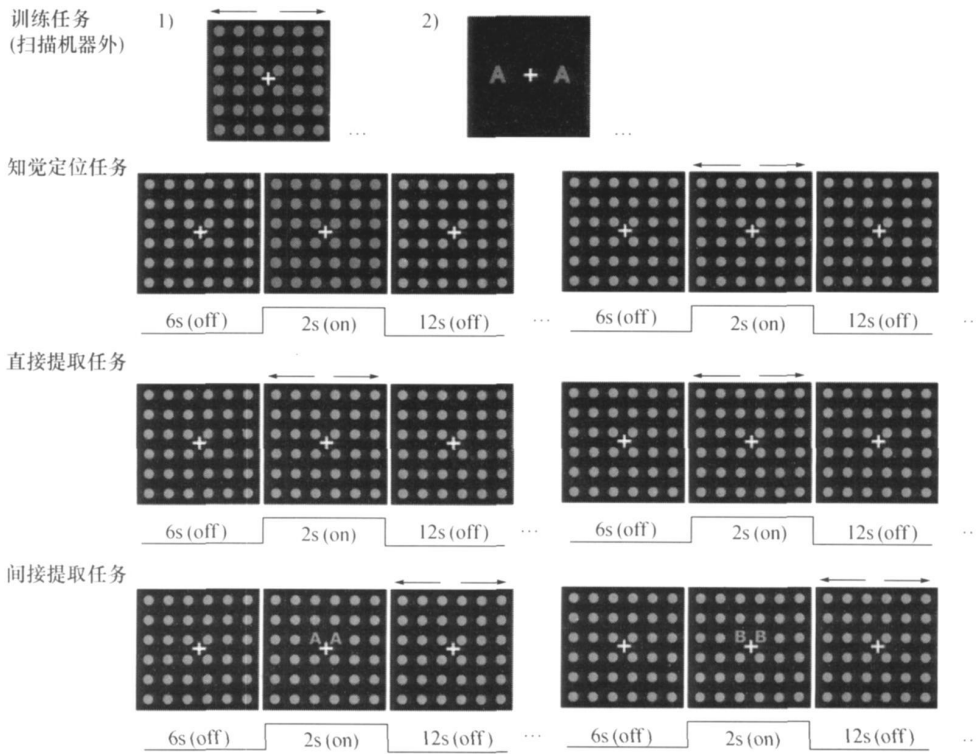


图 1 实验设计示意图

Release 8 3. 扫描时戴耳塞以减少噪音。被试仰卧于磁共振实验床上，双手握按键，目视额头上方的镜子，根据反射到镜中屏幕上的提示做反应任务。

二维结构像扫描: 采用 T1 加权定位像，自旋回波 (SE) 序列，取垂直前后联合的延长线，以胼胝体后缘起始的冠状位成像。成像参数为：重复时间/回波时间 (TR/TE) 为 500 ms/14 ms，扫描视野 (FOV) 24 cm × 24 cm，层数 5 层，层厚 6 mm，间隔 1 mm，矩阵 64 × 64。

功能像扫描: 采用 T2* 加权像，梯度回波平面回波成像 (GRE-EPI) 序列，冠状位。具体成像参数为：重复时间/回波时间 (TR/TE) 为 2000 ms/40 ms，扫描视野 (FOV) 24 cm × 24 cm，层数 5 层，层厚 6 mm，间隔 1 mm，矩阵 64 × 64。帧数 164 帧/层，每次实验扫描时长 328 s。

三维结构像: 采用 SPGR (spoiled gradient recalled acquisition in steady state imaging) 序列，矢状位，回波时间 TE: 2.1 ms，翻转角 30°，层厚 2.5 mm，层数 64 层，平面 FOV 24 × 24 cm，矩阵 256 × 256。

1.4 数据分析

采用 fMRI 分析软件 AFNI (Analysis of Functional NeuroImages) (<http://afni.nimh.nih.gov>) 分析和显示图像。首先对功能图像和解剖图像 (结构像和三维解剖像) 进行配准。去头动，去线性漂移，结构像和功能像按照 Talairach-Tournoux 进行空间标准化。功能像取每像素 3 mm 重采样，并进行空间高斯平滑，取半高宽为 4 mm。

采用基于体素的反卷积分析和多重线性回归分析，得到单个被试的刺激和基线的平均激活图像和 *t* 检验结果，(激活阈值标准: $p < 10^{-4}$ ，体积大于 135 mm³)。组分析结果为被试的 *t* 检验平均结果，激活阈值取 $p < 10^{-16}$ ，体积阈值为 270 mm³。依据以往的实验结果^[12, 13]，我们以 $y = -60$ mm 为界定枕颞区激活的前后区域。

2 实验结果

被试在直接和间接提取实验中均表现出较高的反应正确率。在直接提取实验中，要求被试看到运动线索想颜色，所以扫描时未记录其反应。扫描之

后的测试表明被试的正确率为 100%；在间接提取实验中，正确率为 (87.5 ± 11.2)%。反应时记录因仪器问题未能报告。

在知觉定位实验中，当颜色刺激呈现时，所有被试双侧腹侧枕颞区后部(被试平均坐标: 左侧: -22, -68, -9, 右侧: 26, -73, -6)激活, 前后范围($y = -63, -82$), 激活部位和传统认为的颜色知觉区一致^[12, 14]。当运动刺激呈现时, 所有被试的运动知觉区双侧 MT⁺ 激活(平均坐标: 左侧: -44, -71, 7, 右侧: 44, -68, 8), 与前人的研究结果一致^[15, 16](图 2)。

在直接提取实验中, 被试对呈现的运动刺激直接回忆其对应的颜色, 结果表明, 被试的颜色知觉区激活, 与颜色知觉定位所激活的区域相比, 二者最大激活像素坐标非常临近(左侧, 颜色知觉区: -22, -68, -9, 直接提取实验: -26, -74, -10), 提示对颜色信息的提取重激活了颜色知觉区(图 2)。在间接提取实验中, 被试运用非直接的线索提取颜色, 即判断运动和字母是否和相同的颜色相联系时, 在左

侧梭状回出现两处激活区, 其中后部的激活与颜色知觉区相重合(最大激活点坐标-25, -71, -12), 而前部激活最大激活点位于(-37, -51, -13)(图 2)。也就是说, 前部脑区只在间接提取中被激活, 而在直接提取中未见激活。可以看出, 提取实验的激活呈现一种左侧优势。

单个被试的激活模式与组分析相似(图 3)。在知觉任务中, 全部被试都表现出了组分析的激活模式; 在直接提取和间接提取任务中, 8 名被试中, 各有 7 名表现出了组分析的激活模式。具体地, 在颜色知觉定位实验中, 所有被试的腹侧枕颞区后部的颜色知觉区激活(左侧激活的前后范围 $y = -63$ 至 -82); 在直接提取实验中, 只有枕颞区后部激活(左侧激活的前后范围 $y = -60$ 至 -78); 而在间接提取实验中, 则发现前后两处激活(前部激活范围 $y = -48$ 至 -66 , 后部 $y = -61$ 至 -75)。

3 讨论

本研究的新异之处在于采用非语词线索, 发现

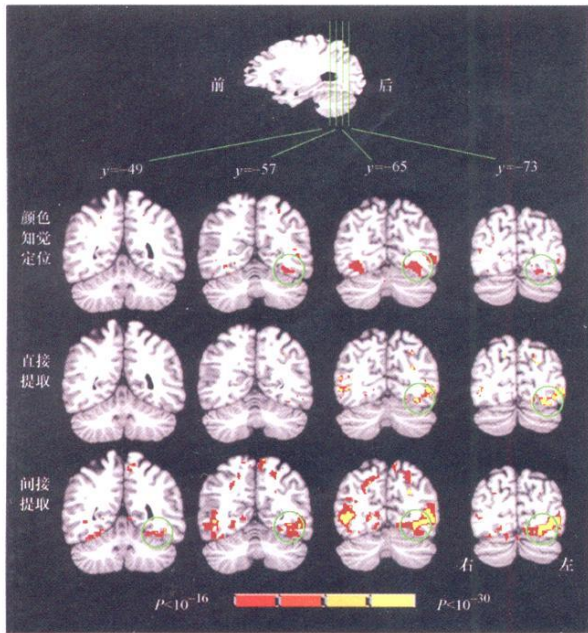


图 2 颜色知觉定位实验和直接提取实验、间接提取实验的被试平均激活图

将激活叠加到 AFNI 的 Talairach 空间的 N27 脑结构模板上。y 所示为冠状位所在前后层面。图中圈处所示为左侧腹侧枕颞区后部在 3 种条件下的激活。可以看出, 腹侧枕颞区前部只在间接提取下激活

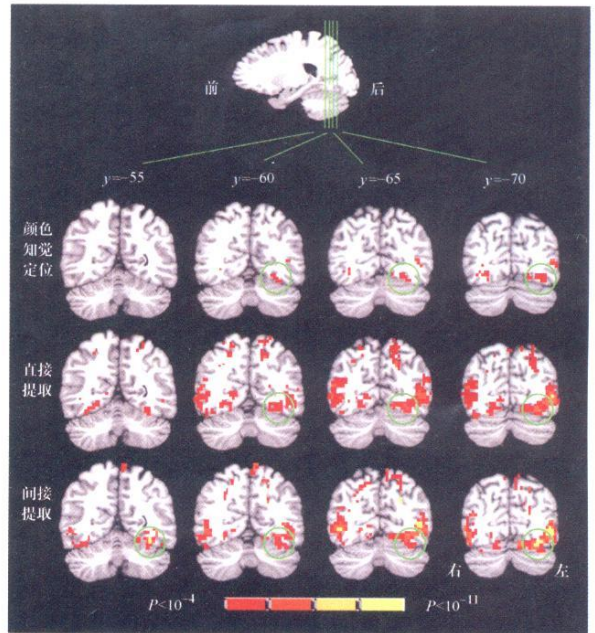


图 3 一名典型被试在 3 种实验条件下的激活图(冠状位)

将激活叠加到 AFNI 的 Talairach 空间的 N27 脑结构模板上。y 所示为冠状位所在前后层面。图中圈处所示为左侧腹侧枕颞区后部在 3 种条件下的激活

腹侧枕颞区的后部(颜色知觉区)和前部区域在不同提取条件下的功能分离。通过在一组被试中进行颜色知觉定位和颜色信息提取任务,发现在直接和间接提取条件下,被试的枕颞区后部都被激活,这提示对小球颜色信息的提取与其颜色的知觉特征(perceptual feature)的加工相关^[12, 13, 17]。更重要的是,当以运动和字母两种线索,间接提取颜色信息时,枕颞区的前部也出现了独立的激活区。

我们的研究发现枕颞区的后部在直接提取颜色特征时激活明显。这一结果也得到了以往实验的支持。例如在 Wheeler 等^[18]的研究中,使用语词与图片或声音相联系,当以语词为线索提取图片时,图片的知觉区左侧枕颞区(-45, -69, -6)激活。在另一项研究中^[19],要求有联觉感的被试对听到的词回想相应的颜色,结果激活了梭状回后部的区域(-33, -66, -13)。这些激活均与我们的后部激活的位置非常接近。结合我们的实验结果,我们认为,后部的激活可能是一种形象的、知觉性的激活,也就是说,枕颞区后部的激活与提取知识的知觉特性有关。

与枕颞区后部不同,枕颞区前部只在间接提取任务中被激活,这一区域可能与不同刺激的知识特征之间的联系等复杂的加工过程有关^[6, 17]。依据 Martin^[1]提出的理论观点,知觉区前部的激活是基于物体与颜色间新的联系,以及对这种联系的提取。在间接提取任务中,被试需要判断所呈现的运动和字母是否匹配,由于运动和字母都与它们的颜色特征相联系,这就要求被试必须提取与它们相关的颜色信息,从而引起枕颞区前部的激活。而在直接提取任务中,由于被试已学习了小球的颜色与运动特征的联系,因此通过运动信息,其颜色信息可以被直接提取,所以,只激活了枕颞区的后部。因此,虽然枕颞皮层的后部与对物体颜色的知觉加工有关,而腹侧枕颞区的前部可能与不同刺激的知识特征之间的联系有关^[1]。这样,我们的研究通过在两种提取任务中表现出来的功能分离,为 Martin^[1]的理论假设提供了有力的支持证据。

以往的研究结果提示,枕颞区前部的激活与语义知识的提取有关^[2, 6, 17],例如,在命名无色线条图所示物体的颜色或命名彩色物体的颜色时,都发现了枕颞区前部的激活(激活部位中心坐标: -46,

-46, -12; -52, -36, -16)^[6, 17]。当采用语词刺激为线索,提取物体的颜色特征时,也激活了枕颞区的前部(-33, -36, -16)^[2]。由于这些研究均涉及与物体知识相关的语义信息的提取,提示枕颞区前部的激活与颜色的知识(或语义)特征的存储和提取过程有关,而提取线索是否语词影响不大。在本实验中,约经一周训练后,被试已经获得了有关小球的知識特征间的联系(运动、颜色),以及字母与其颜色特征间的联系。但与以往研究不同的是,由于我们采用了非语词刺激,并且所采用的颜色是很难命名的,因而在直接提取任务中仅仅激活了枕颞区的后部,而只有在间接提取小球运动与字母间的共同特征时,枕颞区的前部才激活。相应地,我们的研究进一步表明枕颞区前部的重要功能之一是对物体知识特征联系的间接提取。

我们的实验结果与 Simmons 等^[5]的研究结果并不矛盾。虽然他们的研究结果提示颜色的知觉加工区与特征提取区相重合,但是,其左侧腹侧枕颞区的激活是位于前部(激活中心在-33, -36, -16)。这是由于被试完成的任务是对颜色进行判断,而不是如传统上所用的被动的注视颜色刺激^[12],因而出现了颜色知觉区的前部^[13]的激活。综合以往研究及我们的结果,可以更进一步地看出,前部区域的激活与更为复杂的颜色知识的加工相关^[1],如对物体颜色相关知识的判断,以及与颜色相关的联系的间接提取等。

颜色的知觉特征与知识联系特征的功能分离也与脑损伤患者的研究结果相符合。例如,位于腹侧枕颞区域后部(如舌回)损伤,会导致色盲,但对颜色知识的认知(如草—绿色)正常^[20]。而腹侧颞叶损伤则会导致颜色失认症(color agnosia),但颜色视觉正常^[21]。这说明,颜色知觉和颜色知识信息在腹侧枕颞侧皮层的表征是可以分离的。

有趣的是,提取引起的激活呈现一种左侧优势。类似结果在很多研究中都能发现^[2, 5, 6, 11, 18]。而右侧激活较弱,表明右侧在颜色信息回忆提取中的作用与左侧不同。可能也表明,与颜色相联系的语义加工的提取在枕颞区域存在着左侧优势^[6]。

需要指出的是,本研究因故未能记录反应时,而两种任务潜在的反应时/任务难度差异可能对实验结果产生一定影响。这是本研究的一个不足之

处, 需要在以后的研究中加以改进. 但我们认为, 这个缺陷不会影响我们的基本结论. 第一, 我们对被试进行了长达 6d 的过度训练, 两种任务都达到了较高的正确率, 从而很大程度上减小了任务难度和心理负荷对结果的影响^[13]; 第二, 任务难度和心理负荷加大一般导致神经网络更为广泛的激活, 而本研究中, 与直接提取任务相比, 间接提取任务所增加的激活脑区只限于左腹侧枕颞区前部; 第三, 大量文献显示, 左腹侧枕颞区前部与语义信息的提取有关^[5, 6, 11, 17], 因此本研究间接任务中额外的前部激活可能是对相关知识的提取所致.

总之, 本研究在同一组被试进行颜色知觉定位和颜色信息提取任务的结果表明, 颜色知觉任务激活了双侧腹侧枕颞区后部. 直接提取颜色信息时, 这一区域也被激活, 而间接提取时, 颜色知觉区的前部也出现激活. 这提示, 左侧枕颞区后部与颜色信息的知觉特性相关, 而前部可能与颜色信息有关的各种知识联系相关. 本研究首次为腹侧枕颞区前后区域在颜色信息提取中的功能分离提供了直接证据, 进一步明确了物体知识在大脑中的组织和加工机制.

参 考 文 献

- Martin A. The representation of object concepts in the brain. *Annu Rev Psych*, 2007, 58: 25—45
- Goldberg RF, Perfetti CA, Schneider W. Perceptual knowledge retrieval activates sensory brain regions. *J Neurosci*, 2006, 26: 4917—4921
- Hauk O, Johnsrude I, Pulvermüller F. Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex. *Neuron*, 2004, 41: 301—307
- Khader P, Burkea M, Bien S, et al. Content-specific activation during associative long-term memory retrieval. *NeuroImage*, 2005, 27(4): 805—816
- Simmons WK, Ramjee V, Beauchamp MS, et al. A common neural substrate for perceiving and knowing about color. *Neuropsychologia*, 2007, 45(12): 2802—2810
- Martin A, Haxby JV, Lalonde FM, et al. Discrete cortical regions associated with knowledge of color and knowledge of action. *Science*, 1995, 270: 102—105
- Buccino G, Binkofski F, Fink GR, et al. Action observation ac-
- tivates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: An fMRI study. *Eur J Neurosci*, 2001, 13: 400—404
- Damasio AR. Time-locked multiregional retroactivation: A systems-level proposal for the neural substrates of recall and recognition. *Cognition*, 1989, 33: 24—62
- Reijmers LG, Perkins B L, Matsuo N, et al. Localization of a stable neural correlate of associative memory. *Science*, 2007, 317: 1230—1234
- Pulvermüller F, Hauk O. Category-specific conceptual processing of color and form in left fronto-temporal cortex. *Cerebral Cortex*, 2006, 16(8): 1193—1201
- Nyberg L, Habib R, McIntosh RA, et al. Reactivation of encoding-related brain activity during memory retrieval. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97: 11120—11124
- Zeki S, Watson JDG, Lueck CJ, et al. A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex. *J Neurosci*, 1991, 11: 641—649
- Beauchamp MS, Haxby JV, Jennings JE, et al. An fMRI version of the Farnsworth-Munsell 100 hue test reveals multiple color-selective areas in human ventral occipitotemporal cortex. *Cerebral Cortex*, 1999, 9: 257—263
- Sakai K, Watanabe E, Onodera Y, et al. Functional mapping of the human color centre with echo-planar magnetic resonance imaging. *Proc R Soc Lond B Biol Sci*, 1995, 261: 89—98
- McCarthy G, Spicer M, Adrignolo A, et al. Brain activation associated with visual motion studied by functional magnetic resonance imaging in human. *Hum Brain Mapp*, 1995, 2: 234—243
- Shulman GL, Schwarz J, Miezin FM, Petersen SE. Effect of motion contrast on human cortical responses to moving stimuli. *J Neurophysiol*, 1998, 79: 2794—2803
- Chao LL, Martin A. Cortical regions associated with perceiving, naming, and knowing about colors. *J Cogn Neurosci*, 1999, 11: 25—35
- Wheeler EM, Petersen ES, Buckner LR. Memory's echo: Vivid remembering reactivates sensory-specific cortex. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2000, 97: 11125—11129
- Nunn JA, Gregory LJ, Brammer M, et al. Functional magnetic resonance imaging of synesthesia: Activation of V4/V8 by spoken words. *Nat Neurosci*, 2002, 5: 371—375
- Bouvier SE, Engel SA. Behavioral deficits and cortical damage loci in cerebral achromatopsia. *Cerebral Cortex*, 2006, 16: 183—191
- Miceli G, Fouch E, Capasso R, et al. The dissociation of color from form and function knowledge. *Nature Neurosci*, 2001, 4: 662—667