

# 视运动功能的功能性磁共振研究

罗艳琳 赵文利 罗跃嘉 吴宗耀

[关键词] 功能性磁共振;视觉区域;视知觉;视觉刺激

中图分类号:R741.049 文献标识码:A 文章编号:1006-9771(2003)01-0046-03

视觉是人类感知世界、认识世界的主要途径。视觉运动的脑机制目前尚未完全明确。近年来,利用正电子发射断层(PET)、功能性磁共振(functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)等高科技成像技术,人们不仅研究了人脑视觉的解剖结构,还对视觉的功能活动区进行了测量。

## 1 视觉皮质中枢的解剖定位

运用传统方法,如外科解剖、损毁、化学通道阻断、单细胞反应记录、免疫组化等进行的动物实验,使我们对于猴、猫等动物的大脑皮层视觉通道和定位有了一些了解。如利用单细胞技术对猴脑视皮层进行分析,定位了大约 30 个视区域<sup>[1-2]</sup>。但损伤性方法显然不能运用于健康人,人脑的研究因此受到极大的限制。fMRI 的运用为人脑视区研究打开了新的窗口。fMRI 是非侵入性检测,并具有很高的分辨率,能够提供不同功能区视皮层神经元活动空间上的精确数据。

在以往的研究中,通过记录神经元对光刺激的反应来进行视觉解剖定位。当 1 个闪烁的圆环不断重复地从视野周边向中心逐步缩小,这个缩小的圆环刺激引起神经元电活动形成一个移动的波,沿着 1 个偏心性角度,从枕叶后端的初级皮层(V1)前部向后部扩展<sup>[3-5]</sup>。这一结果提示,该皮层的前部到后部依次感知从视网膜周边到中心的视知觉。研究还显示,初级视皮层不同感觉野的功能分区类似于视网膜结构<sup>[6,7]</sup>,但空间结构不完全对称,有一定的偏心性。

在视觉皮层的不同功能区域,相同的光刺激引起的电活动空间向量(空间维度)不同。因而神经元电活动波经过不同的视觉区域交界处时会发生空间向量的翻转。以视野中心为轴,一个闪烁的线条绕着轴点缓慢旋转,从上半视野中点旋转到下半视野时,皮层神经元活动波从矩状沟的下唇向上唇移动扩展。这个波在不同的视觉区域交界处改变空间向量方向,如视皮层 V1 和 V2 区空间向量不同,以 V1、V2 交界处移动波方向会出现反转。这样利用闪烁的线性运动刺激能够

区分不同的视觉区域类网膜结构的边界。如果用 fMRI 来探测这些移动波,则可以对人脑进行不同视区边界的定位。目前,已经用这一方法确定了一些视觉区域:

①人的初级视皮层(V1)区约 4 - 8cm 大小,主要分布在人脑左右半球枕叶后极的距状沟内,分别感受对侧整个半侧视野。V1 的背侧、腹侧距离约 4cm,位于大脑表面距状皮层上下唇。从 V1 背侧到腹侧,感受视网膜下野垂直正中线上到上野正中线的视觉刺激。②V2 与 V1 皮层边界相邻,距离 V1 约 1cm。V2 区背侧(V2d)感觉下 1/4 的视野,腹侧(V2v)感受上 1/4 的视野。③带状视皮层 V3 区宽约 1cm,长 6 - 8cm,与狭长的 V2v 区相邻,距离 V2 区约 1.5cm。V3 区也分为腹侧(V3v)与背侧(V3d),它们各是 1/4 视野的感受野。猕猴的 V3 背侧接收来自 V1 区的投射,腹侧有大量的方向选择性细胞,对方向知觉敏感。V3 的腹侧与背侧的边界通过测量胼胝体的输入来划分<sup>[2,8]</sup>,但分开的区域(V3v、V3d)应该视为一个区域还是两个仍不清楚<sup>[9]</sup>。④视区域中有不止 1 个 V4 区。fMRI 发现,对色彩敏感的视皮层由两部分组成,形成复合的人脑 V4。这两部分在解剖上紧密相连,功能上相互合作,这个区域的损伤会引起各种形式的大脑全色盲综合征<sup>[10]</sup>。通过 fMRI 确定的人脑视区类网膜样结构与在猕猴脑区的描述是一致的,但人脑视区的功能是否也与猴脑相似仍需进一步研究。

## 2 视觉区域运动功能定位

视觉的基本特征如色彩、运动等视知觉的功能定位是神经科学家们长期探索的问题。一个被广泛接受的理论认为,视觉信息在脑内的加工可以分为解剖和功能上分离两条通路:一条称为腹侧通路(ventral stream),它沿着大脑皮层的枕颞叶分布,从枕叶的初级视皮层 V1、V2 区经 V4 区投射到下颞区;这条通路的神经元对颜色和形状等特征产生反应,主要功能是对客观物体的识别。另一条称为背侧通路(dorsal stream),它沿着枕顶叶分布,从 V1、V2 区经 MT 区投射到后顶叶;这条通路的神经元对运动速度与方向等特征产生反应,主要功能是对空间位置和运动的识别。

多数研究者认为,可以利用 fMRI 定位大脑视运动

作者单位:400038 重庆市,第三军医大学西南医院康复整形中心。

作者简介:罗艳琳(1968-),女,硕士,主治医师,主要研究方向:电生理学、视觉运动的脑机制。

知觉的特异性区域<sup>[11-12]</sup>。Tootell 等利用移动的斑点刺激与闪烁的棋盘刺激进行对照,发现这两种图像在 V1 区的 fMRI 反应信号是相似的,但在顶枕叶结合部,对移动斑点的反应比闪烁棋盘的反应要强;这一区域距离 V1 区后部的中心凹约 3cm,相当于猴脑的 MT 区<sup>[11-13]</sup>,因此将这一区域称为 MT+。

通过 fMRI 还可以检测人脑对运动及形状的神经元活动。给被试者呈现不同的形状及空间位置,对呈现的形状与位置进行判断,发现所有的刺激图形都引起 V1 区的兴奋,但单纯的形状知觉仅引起腹侧通路的颞中回/梭状回(Gyrus Temporalis Medius/Gyrus Fusiformis, GTm/ GF) 功能信号增强,而不引起背侧通路的角回/契前叶(Gyrus Angularis/ Precuneus, Ga/ Pcu) 功能信号增强;相应地,空间位置的知觉仅引起背侧通路的 Ga/ Pcu 功能信号增强。这一结果支持腹侧和背侧两条通路<sup>[14]</sup>。

许多动物实验证实,在初级视区和 MT+ 区对运动刺激反应较强,人脑的 fMRI 研究也得到了同样的结果。下一步研究工作的方向是针对刺激信号传导路径中不同运动知觉之间的相互关系来进行。

### 3 视知觉的物理特性

如果 fMRI 的信噪比足够高,则能够对视觉刺激的一些物理特性,如对比度、速度的功能皮层进行测量。

**3.1 对比度与运动** 目前研究认为,低水平的对比度会对运动、色彩产生明显影响。利用圆形区域中呈现的一个黑白光栅构成运动刺激,在 MT+ 区记录 fMRI 振幅信号,发现黑白光栅对比度为 0.5% 时能测到 MT+ 区的信号,随着对比度的增加, fMRI 信号加强;对比度为 5% 时, fMRI 信号达到饱和,说明 MT+ 区对视觉刺激对比度敏感性高、饱和水平低<sup>[12]</sup>。利用 fMRI 测量同一运动刺激引起的 V1 区神经元反应,发现 V1 区对比度饱和度大约是 MT+ 区饱和度的 4 倍<sup>[15]</sup>,有的甚至达到 15 倍<sup>[12]</sup>。大多数人认为,在 MT+ 区对比度饱和度和 V1 区小,其意义可能是为了减少对比度对运动知觉的影响<sup>[15-16]</sup>。

低水平对比度能较强地影响色彩运动速度知觉<sup>[17]</sup>。视网膜上有 3 种感受不同波长的视锥细胞,记录对比度相同、波长不同时视觉刺激速度与皮层 fMRI 信号,发现短波长(S)视锥细胞感知的运动速度较长波长(L)、中波长(M)视锥细胞要慢,S 细胞需要比 L 细胞、M 细胞更高的对比度水平才能在 MT+ 区引起相同的 fMRI 活动信号。可以认为,对比度对速度影响是通过 MT+ 区对 S 细胞输入的信号有较高的对比度饱和和水平来实现的。

Seidemann 等利用 fMRI 测量猴脑对短波长色彩信号(由 S 视锥细胞接收)的反应,在 MT 区, S 视锥的对

比度敏感值为 1.0 - 1.3 Log 单位,较亮度对比低<sup>[18]</sup>,支持 MT+ 区的色彩信号影响运动速度判断的假说。

**3.2 运动边缘** 当被试者运动时,物体的局部差异可以形成深度的知觉,常常与物体的边界相关;而视网膜上图像运动的局部差异一般也是对物体边界的反应。这两种运动的整合完成单个视觉景物的知觉。

利用包含两类运动的视觉刺激进行 fMRI 研究<sup>[19-20]</sup>。由具有不同运动方向的两种斑点组成运动刺激,上半部分的斑点向右移动,下半部分的斑点向左移动,两部分交界处系由相对的斑点运动构成的运动边缘的感觉。目前对运动边缘的报道不尽一致。有人认为运动边缘引起神经元活动比运动区域内部引起的活动多,并将运动边缘的脑内反应区称为运动枕叶(Kinetic Occipital, KO),该区与 V3a 邻近<sup>[19-20]</sup>。Reppas 等报道,用同一视觉刺激量在 V1、V2、V3 均发现显著变化,没有发现类似于 KO 的区域<sup>[21]</sup>。Mendola 等报道,运动边缘可以引起 MT+ 区的显著反应<sup>[22]</sup>。有的单细胞资料证实, V1 区的神经元能对运动边缘作出反应<sup>[23]</sup>。另有资料显示,在猴 MT 区也能对运动边缘作出反应,并随着运动边缘的刺激量增加而增加<sup>[24]</sup>。

尽管对运动边缘是否存在脑内特化区意见不一,但可以肯定的是,在视皮层的较大范围都会对运动刺激产生较强反应,其中 MT+、V3a 区的神经元反应与运动刺激的刺激量一致。

**3.3 色彩与运动** 色彩知觉是通过视网膜上 3 种视锥细胞(L、M、S)不同比例地吸引光线并进行编码,再经皮层神经元处理后产生的<sup>[16]</sup>。神经生理学证据显示,视网膜中心区域是感知色彩信号的主要区域,其中红/绿途径接收 L、M 细胞的复合信号,蓝/黄途径接收来自 S、L、M 细胞的复合信号,亮度途径接收 L、M 细胞的信号。这种复合色彩假说可以解释许多视知觉现象,包括视分辨率和色彩现象。

Zeigler 等曾用 PET 来确定人脑中红/绿复合色彩和蓝/黄复合色彩进行反应的特定区域,他们用矩形斑点的颜色图与单色图进行对比,结果发现,梭形脑回对复合色彩刺激显示出显著的神经活动<sup>[11]</sup>。根据同源性的猕猴脑的 V4 区是色彩感觉特化结构,因而将该区域称为人类 V4。但 fMRI 的研究显示,在 V1 和 V2 区均对色彩有显著的神经元活动信号<sup>[25-27]</sup>。fMRI 能够对 L、M 视锥细胞接受的不同色彩、不同比例形成的信号产生反应并进行整合,但对 S 细胞则不能。

目前研究尚没有明确存在着色彩的脑内特异性区域。但皮层的许多区域均对色彩产生反应。

fMRI 可以从新的视角对单细胞记录、行为测量进行补充。无创性的 fMRI 已成为研究人脑的新的工具。

## [ 参考文献 ]

- [ 1 ] Zeki SM. Representation of central visual fields in prestriate cortex of monkey[ J ]. Brain Res, 1969, 14: 271 - 291 .
- [ 2 ] Helleman DJ, Van Essen DC. Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex[ J ]. Cereb Cortex, 1991, 1: 1 - 47 .
- [ 3 ] Sereno MI, Dale AM, Reppas JB, et al. Borders of multiple human visual areas in human revealed by functional MRI[ J ]. Science, 1995, 268: 889 - 893 .
- [ 4 ] De Yoe EA, Carman GJ, Bandettini P, et al. Mapping striate and extrastriate visual areas in human cerebral cortex[ J ]. Proc Natl Acad Sci USA, 1996, 93: 2382 - 2386 .
- [ 5 ] Engel SA, Glover GH, Wandell BA. Retinotopic organization in human visual cortex and the spatial precision of functional MRI[ J ]. Cereb Cortex, 1991, 7(2): 181 - 192 .
- [ 6 ] Holmes G. The organization of the visual cortex in man[ J ]. Proc R Soc London Ser, 1944, B132: 348 - 361 .
- [ 7 ] Horton J, Hoyt W. The representation of the visual field in human striate cortex[ J ]. Arch Ophthalmol, 1991, 109: 816 - 824 .
- [ 8 ] Buckner RL, Bandettini PA, O'Craven KM, et al. Detection of cortical activation during averaged single trials of a cognitive task using functional magnetic resonance imaging[ J ]. Proc Natl Acad Sci USA, 1996, 93(10): 14878 - 14883 .
- [ 9 ] Tootell RBH, Mendola JD, Hadjikhani NK, et al. Functional analysis of V3a and related areas in human visual cortex[ J ]. J Neurosci, 1997, 17(18): 7060 - 7078 .
- [ 10 ] Benson PJ, Guo K, Hardiman MJ. Cortical evoked potentials due to motion contrast in the blind hemifield[ J ]. Neuroreport, 1999, 10(17): 3595 - 3600 .
- [ 11 ] Zeki S, Watson JDG, Lueck CJ, et al. A direct demonstration of functional specialization in human visual cortex[ J ]. J Neurosci, 1991, 11(3): 641 - 649 .
- [ 12 ] Tootell RBH, Reppas JB, Kwong KK, et al. Functional analysis of human MT and related visual cortical areas using magnetic resonance imaging[ J ]. J Neurosci, 1995, 15: 3215 - 3230 .
- [ 13 ] Tootell RBH, Taylor JB. Anatomical evidence for MT and additional cortical visual areas in humans[ J ]. Cereb Cortex, 1995, 1: 39 - 55 .
- [ 14 ] 孟明, 周天罡, 陈霖, 等. 形状和空间位置知觉两条通路的功能磁共振研究[ J ]. 心理物理学报, 1999, 15(4): 689 - 693 .
- [ 15 ] Heeger DJ, Simoncelli EP, Movshon JA. Computational models of cortical visual processing[ J ]. Proc Natl Acad Sci USA, 1996, 93: 623 - 627 .
- [ 16 ] Wandell BA. Foundations of Vision[ M ]. Sunderland MA: Sinauer, 1995 .
- [ 17 ] Stone LS, Thompson P. Human speed perception is contrast dependent[ J ]. Vis Res, 1992, 32: 1535 - 1549 .
- [ 18 ] Seidemann E, Poirson AB, Wandell BA, et al. Color signals in area MT of the macaque monkey[ J ]. Neuron, 1999, 24(4): 911 - 917 .
- [ 19 ] Van Ortonde S, Van Hecke P, Marchal G, et al. The kinetic occipital (KO) region in man: an fMRI study[ J ]. Cereb Cortex, 1997, 7(7): 690 - 701 .
- [ 20 ] Dupont P, De Bruyn B, Vandenberghe R, Rosier AM, et al. The kinetic occipital region in human visual cortex[ J ]. Cereb Cortex, 1997, 7(3): 283 - 292 .
- [ 21 ] Reppas JB, Niyogi S, Dale AM, et al. Representation of motion boundaries in retinotopic human visual cortical areas[ J ]. Nature, 1997, 388(6638): 175 - 179 .
- [ 22 ] Mendola JD, Dale AM, Liu AK, et al. The representation of real and illusory contours in human visual cortical areas revealed by fMRI[ J ]. Proc Soc Neurosci, 1997, 27: 550 .
- [ 23 ] Chaudhary A, Albright TD. Neuronal responses to edges defined by luminance vs. Temporal texture on macaque area V1[ J ]. Vis Neurosci, 1997, 14: 949 - 962 .
- [ 24 ] Born RT, Tootell RBH. Segregation of global and local motion processing in primate middle temporal visual area[ J ]. Nature, 1992, 357(6378): 497 - 499 .
- [ 25 ] Engel SA, Zhang X, Wandell BA. Color tuning in human visual cortex measured using functional magnetic resonance imaging[ J ]. Nature, 1997b, 388(6637): 68 - 71 .
- [ 26 ] Kleinschmidt A, Lee BB, Requart M, et al. Functional mapping of color processing by magnetic resonance imaging of responses to selective P- and M- pathway stimulation[ J ]. Exp Brain Res, 1996, 110(2): 279 - 288 .
- [ 27 ] Wandell BA, Poirson AB, Newsome WT, et al. Color signals in human motion-selective cortex[ J ]. Neuron, 1999, 24(4): 901 - 909 .

( 收稿日期: 2002-09-05 )