

· 中枢神经系统放射学 ·

功能 MRI 研究左侧前额下回在汉字双音节
真假词判断中的作用

肖壮伟 许伟雄 张学新 王晓怡 吴仁华 胡小平 翁旭初

【摘要】 目的 采用快速事件相关功能 MRI(event-related functional MRI, ER-fMRI) 设计, 比较人脑对真词和假词的认知加工过程。方法 实验材料选用由 2 个汉字单音节构成的真词和假词。假词由真词中的单音语素(即对应的汉字词汇中的单个汉字音节)重新组合而成, 用以控制亚词汇信息的平衡。在 fMRI 扫描过程当中, 真词与假词的呈现顺序由伪随机方法确定, 以听觉形式呈现给 14 名受试者, 让其判断所听到的是真词还是假词。结果 14 名受试者听力词汇判断结果表明判断“假词”的速度明显要慢于判断“真词”的速度, 而且“假词”判断的正确率明显要低于“真词”判断的正确率(平均错误率分别为 9.9% 和 3.9%, 平均反应时间分别为: 1618 ms 和 1143 ms)。对真假词的判断激活了两侧额下回、颞上回、颞中回、距状回、舌回及左侧缘上回等脑区。同词汇判断的行为结果一致, 左侧额下回对假词的反应明显强于其对真词的反应。结论 左侧额下回在真假词任务判断中的作用, 与形素到音素的转换过程无关, 而是来源于对肯定和否定判断的不同反应模式。

【关键词】 语言试验; 听觉; 大脑皮质; 磁共振成像

Differential activity in left inferior frontal gyrus for pseudo and real words: an event-related functional MRI study on auditory lexical decision XIAO Zhuang-wei*, XU Wei-xiong, ZHANG Xue-xin, WANG Xiao-yi, WU Ren-hua, HU Xiao-ping, WENG Xu-chu. *Guangdong Key Laboratory of Medical Molecular Imaging, Shantou 515041, China

【Abstract】 **Objective** To study lexical processing of pseudo words and real words by using a fast event-related functional MRI (ER-fMRI) design. **Methods** Participants did an auditory lexical decision task on a list of pseudo-randomly intermixed real and pseudo Chinese two-character (or two-syllable) words. Pseudo words were constructed by recombining constituent characters of the real words to control for sublexical codes properties. **Results** The behavioral performance of fourteen participants indicated that response to pseudowords was significantly slower and less accurate than to real words (mean error rate: 9.9% versus 3.9%, mean reaction time: 1618 ms versus 1143 ms). Processing of pseudo words and real words activated a highly comparable network of brain regions, including bilateral inferior frontal gyrus, superior, middle temporal gyrus, calcarine and lingual gyrus, and left supramarginal gyrus. Mirroring a behavioral lexical effect, left inferior frontal gyrus (IFG) was significantly more activated for pseudo words than for real words. **Conclusion** The results indicate that the processing of left inferior frontal gyrus in judging pseudo words and real words is not related to grapheme-to-phoneme conversion, but rather to making positive versus negative responses in decision making.

【Key words】 Language tests; Auditory perception; Cerebral cortex; Magnetic resonance imaging

词汇判断任务是心理词库研究中常见的研究模

式。本研究采用快速事件相关功能 MR 成像(event-related functional MRI, ER-fMRI) 方法观察受试者在做纯粹的听力词汇判断任务时的脑活动状况, 比较人脑在提取汉语“真”、“假”词汇信息时的状态差异。笔者对左额下回能否表征词汇信息给予了特别的注意, 同时也观察了其他语言区的激活情况。

材料与方

1. 研究对象: 14 名母语为汉语的右利手健康受试者参与了本实验(其中 6 名为女性, 年龄在 18 ~

基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作项目(30420120048); 国家自然科学基金面上项目青年科学基金(30200068); 霍英东教育基金会第九届高等院校青年教师基金(91038); 广东省自然科学基金(20010434)

作者单位: 515041 汕头, 广东省医学分子影像重点实验室(肖壮伟、许伟雄、张学新); 中国科学院心理研究所脑高级功能实验室(王晓怡、翁旭初); 汕头大学医学院第二附属医院放射科(吴仁华); 美国亚特兰大 Georgia 理工大学 Emory 大学联办 W. H. Coulter 生物医学工程系(胡小平)

23 岁,平均 20.9 岁,均为在校大学生),受试者均签署了实验知情同意书。

2. MR 成像方法:采用 Philip 公司生产的配有标准头部线圈的 6000 型 1.5 T MR 扫描仪采集图像。功能像扫描采用重 T_2 WI (T_2^* WI) 梯度回波-快速平面回波成像 (gradient-echo EPI) 序列,轴面 20 层,覆盖全脑;TR 2000 ms,TE 45 ms,反转角 (flip angle) 为 90° ,矩阵 64×64 ,采集视野 (FOV) 为 $230 \text{ mm} \times 230 \text{ mm}$,层厚 6 mm,无间距。解剖像采用 T_1 WI SE 序列 (TR 204 ms,TE 14 ms)。

受试者仰卧在 MR 扫描仪里,通过按压专用鼠标键输出对任务的反应。同时采用美国 RT 公司生产的视听刺激仪配备的 MR 专用耳机和眼镜实现听觉刺激的传送和视觉刺激的呈现。

3. 实验方法:汉语单词可以由单个汉字组成,也可以由 2 个或多个汉字组成。在本研究中,笔者采用了由 2 个汉字组成的汉语单词 (即双音节词)。双音节词占了汉字词汇总数的 74%。“假词”同样包含 2 个汉字音节:在确保不组成另外 1 个“真词”的基础上,由 1 个“真词”中的第 1 个汉字和另 1 个“真词”的第 2 个汉字组合而成。“假词”与“真词”在亚词汇层次上的音节构成是相同的,但是在整个词汇的层次上却没有与“真词”相关的语音或语义的表征。

实验设计采用快速的、相邻测试间隔伪随机化的事件相关设计。受试者完成 5 段任务,其中第 1 段为练习,后 4 段属真正实验,每段有 24 个测试。在每个测试中,一段持续时间约 1000 ms 的声音片段通过双声道耳机传给受试者。每个声音段均是由 1 名专业女播音员朗读的 2 个汉字构成的“真词”或“假词”的数字录音。实验要求受试者尽量又快又准确地判断所听到的声音片段是“真词”还是“假词”,然后通过按鼠标按键输出他们的反应。反应时间从声音片段的起始时间点开始计算。

每段实验任务中,“真词”、“假词”各占一半,伪随机排列。每段实验任务中的各次测试间的时间间隔从 6 s 到 14 s 不等,平均间隔为 10 s。因此,在每段任务中,受试者实验任务的时间总共为 240 s (24 次测试,平均每次 10 s)。实验要求受试者在相邻测试的间隔期间双眼注视屏幕中央的圆点。

实验前,笔者首先在《现代汉语词典》(1986 年)中挑选了 120 个“真词”,平均词频为 11.81/百万;然后,再将 1 个“真词”中的第 1 个汉字和另 1 个“真词”中的第 2 个汉字重新任意组合,

形成了 1 个当前汉语词汇库里所没有的“假词”,这样的组合共配置了 120 个,与“真词”的数量相同。

4. 数据分析:图像数据分析处理采用软件 SPM 2 (Wellcome Department of Cognitive Neurology, London)。将每位受试者的各层功能像进行重新排序,进行头动矫正,同时与轴面解剖像对准;按 SPM 标准模板对 T_1 WI 图像进行标准化,将所生成的矩阵应用于已与轴面解剖像对准的功能像;再将功能像内插入 4 mm 的各向同性体素中,用 8 mm 的高斯滤镜进行空间平滑,然后采用广义线性模型对标准化后的功能像进行回归分析^[1],在回归分析之前,去除信号中来自低频噪音的假信号。

回归分析后,构建 3 组线性对照,用分组 t 检验做多组比较。得出每个受试者自身某一状态与另一状态相比较的对照估量值。3 组线性对照分别是:“假词”与“休息状态”的对照、“真词”与“休息状态”的对照、“假词”与“真词”的对照,最后得到标准脑功能激活图和被试者脑解剖像的叠加像。本研究中涉及的所有坐标都是相对于三维的 Talairach 的标准解剖空间。

结 果

1. 受试者听力词汇判断结果:14 名受试者听力词汇判断的平均正确率以及平均反应时间分别为 93.1% 和 1381 ms。配对 t 检验 (自由度 = 13) 显示:判断“假词”的速度明显要慢于判断“真词”的速度,而且“假词”判断的正确率明显要低于“真词”判断的正确率 (平均错误率分别为 9.9% 和 3.9%, $t_{(13)} = 2.48$, $P < 0.05$; 平均反应时间分别为:1618 ms 和 1143 ms, $t_{(13)} = 4.48$, $P < 0.01$)。

2. fMRI 表现:如图 1 的 a 和 b 所示,与休息状态基线相比,“真词”刺激和“假词”刺激都唤起了相当多的脑区激活,包括双侧颞上回、颞中回及额下回,左侧中央前沟、脑岛及缘上回,辅助运动区皮层,双侧小脑及中、前扣带回。在视觉区也发现激活,包括双侧距状回、舌回以及一些皮层下结构,即双侧丘脑及壳核,左侧尾状核。海马旁回区域在“假词”刺激下也显示了激活状态。

与在休息状态下相比,上述脑区在“真词”刺激下都显示了更活跃的激活状态;而在“假词”刺激下,双侧颞中回,中、后扣带回,左侧楔前叶等区域都显示了抑制效应,即激活程度比休息状态下更低。

“假词”与“真词”刺激下的脑激活状态的直接对比结果在图 1 的 c 和 d 显示。左额下回

(Brodmann 44 区)和右侧额下回(Brodmann 45 区)对“假词”的反应要明显强于其对“真词”的反应,辅助运动区、中扣带回、右侧舌回也有相同的反应。双侧颞中回,以及左后扣带回、左楔前叶交汇处对“真词”刺激比对“假词”刺激反应更为强烈。以上所有对比中所涉及的脑区反应信息汇总见表 1。

讨 论

1. 受试者行为测试结果表明:词汇判断过程的反应时间和反应准确率都体现了显著的词汇效应,

对“假词”的否定判别较难而需要较长的反应时间,对“真词”的肯定性识别则反之。这样的结果与在以往词汇判断研究中得到充分证明的词汇效应结论相一致^[14]。

2. 脑成像结果显示:“假词”和“真词”刺激都引起颞上回(Brodmann 21、22 区)双侧听觉皮层的反应,这正与所预料的本研究听觉刺激任务将会引起的反应相符。辅助运动皮层、中央前沟、扣带回,以及一些皮层下组织(如小脑、尾状核等)的反应很可能反映了动作反应的构建与执行,这种反应过程

表 1 各统计对比中所显示的脑区反应信息表

解剖结构	Brodmann 区	Talairach 坐标(mm)			最强 z 值	激活量 (体素)	Talairach 坐标(mm)			最强 z 值	激活量 (体素)
		X	Y	Z			X	Y	Z		
假词 > 休息状态											
左额下回	45	-32	32	9	3.55	22	-44	23	3	4.00	88
	44	-50	18	10	4.47	21	-	-	-	-	-
右额下回	44, 45	52	13	15	3.91	40	58	11	4	4.42	72
	45	42	33	9	3.89	23	-	-	-	-	-
左中央前沟	6	-32	-4	44	3.58	22	-29	-5	43	3.45	31
左中央前沟,左额下回	6, 44	-50	9	22	5.06	125	-44	5	24	4.12	101
前扣带回,中扣带回	24, 32	0	25	29	4.78	164	0	16	31	4.11	229
左辅助运动区,中扣带回	24, 6, 32	-5	5	43	4.60	159	-3	8	42	4.58	194
左颞上回	22, 21	-54	-3	-3	4.16	205	-58	-7	-4	4.24	217
右颞上回	22, 21, 38	55	-3	-6	3.84	113	58	-4	-4	3.97	104
左颞中回	21, 22	-52	-31	7	4.23	166	-63	-34	7	4.29	148
右颞上回,右颞中回	22, 21	53	-27	5	4.73	168	56	-25	7	4.69	330
左缘上回	40	-47	-33	35	3.52	29	-52	-28	32	4.16	142
左距状回,左舌回	17, 18	-14	-81	-1	4.19	146	-9	-76	2	4.11	129
右距状回,右舌回	17, 18	9	-77	6	4.09	148	9	-73	10	3.86	114
左小脑	-	-13	-57	-16	3.99	155	-6	-67	-14	4.10	150
右小脑	-	15	-70	-18	4.14	196	14	-70	-18	4.17	135
左丘脑	-	-18	-14	8	4.05	58	-15	-16	2	3.65	60
	-	-11	-17	2	4.21	49	-	-	-	-	-
右丘脑	-	19	-11	6	3.94	78	10	-14	5	3.45	43
左尾状核,左壳核	-	-17	13	11	5.47	67	-18	9	16	3.82	41
左壳核,左苍白球	-	-18	9	0	4.81	60	-17	9	0	4.20	38
右壳核	-	23	5	11	3.78	46	30	2	5	3.86	46
左脑岛	-	-34	14	-2	3.88	34	-33	14	-2	3.86	43
右海马旁回	35	19	-28	-8	3.71	43	-	-	-	-	-
休息状态 > 假词											
左颞中回	39	-49	-60	20	-3.86	49	-	-	-	-	-
右颞中回	22, 39	51	-53	15	-4.83	73	-	-	-	-	-
左中扣带回,左后扣带回	23	-10	-36	33	-3.61	32	-	-	-	-	-
左后扣带回,左楔前叶	23	-7	-53	18	-4.08	56	-	-	-	-	-
假词 > 真词											
左额下回	44	-51	15	14	3.87	42	-	-	-	-	-
右额下回	45	49	17	18	3.78	31	-	-	-	-	-
辅助运动区,中扣带回	32, 24	0	18	37	4.04	181	-	-	-	-	-
右舌回	19	-26	-50	-3	3.97	38	-	-	-	-	-
左颞中回	37, 21, 39	-	-	-	-	-	-48	-58	18	4.06	113
右颞中回	21, 37	-	-	-	-	-	50	-47	13	4.02	178
左后扣带回,左楔前叶	23, 31	-	-	-	-	-	-11	-43	28	4.51	143
真词 > 假词											

注:显示坐标为激活区域中心点在 Talairach 标准空间中的坐标;最强 z 值为该区域最强激活体素的 z 值(由 t 值转换而来)

与刺激的感知过程很类似,其对应的血氧水平依赖(BOLD)反应都同词汇判断过程混合在一起,无法利用 MR 在时间上把它们区分开。其他区域如颞中回、额下回和缘上回都位于语言相关区域,这些区域在语言加工中的作用在以往报道的脑成像研究的相关文献中都得到了很好的阐明^[5-7]。也有些区域在“假词”刺激环境下(图 1 a)呈现抑制的状态。

总体上来讲,2 种刺激所引起的脑的激活模式可比性非常强。所有由“假词”所引起的激活区(海马旁回除外),在“真词”刺激下同样呈激活状态。在对“真”、“假”词 2 种刺激所引起的激活区做直接对比时,这些对 2 种刺激均有反应的交叠区域大部分都未出现,这说明了这些区域对“真词”和“假词”的反应无论在激活位置、激活程度上,还是在相应的空间范围上都是非常相似的。对 2 种刺激有不同反应的区域,其不同之处也只是在于反应的程度上。这些结果再次证明并进一步支持了以往的词汇判断研究中的一个普遍的结论:大致相同的脑皮层神经网络参与了“真”、“假”词加工^[8]。

本研究的主要发现在于额下回。额下回位于 Brodmann 44、45 区,该区域相对基线状态来说,对“假词”和“真词”刺激均有反应,而且对前者的反应要明显强于对后者的反应。本研究虽然在

Brodman 6 区也发现了激活,然而,这些激活与“真”、“假”词的区别无关。到目前为止,相关的研究还为数甚少。尽管到目前为止这些为数甚少的词汇听力判断的影像学研究表明“真”、“假”词刺激在左额下回所引起的认知差异效应为“零”,但是本研究确实发现了很明显的差异。结果不一致的部分原因可能归结于方法上的差异。

以往的一些词汇判断研究中,认为额下回对“假词”的反应程度强于其对“真词”的反应主要是由于字素向词素进行转换而引起的^[9,10]。而本研究却不支持这种观点,因为本研究的实验任务是纯粹的听力词汇判断,不涉及字素向词素进行转换的过程,但结果仍显示额下回对“假词”的反应程度强于其对“真词”的反应。

“假词”和“真词”刺激的区别之一在于:前者要求受试者做出肯定的反应,而后者要求受试者做出否定的反应,以此来判断受试者所听到的词汇是否是其既有的词汇表征。传统的观点认为,做出否定反应要比做出肯定反应要更加费力^[11],本研究中的词汇效应与此观点是相符的。因此,左额下回对“假词”的反应强于其对“真词”的反应也有可能既与词汇加工无关,也与语义加工无关,而是反映了一般的做出肯定反应和否定反应的认知过程的特

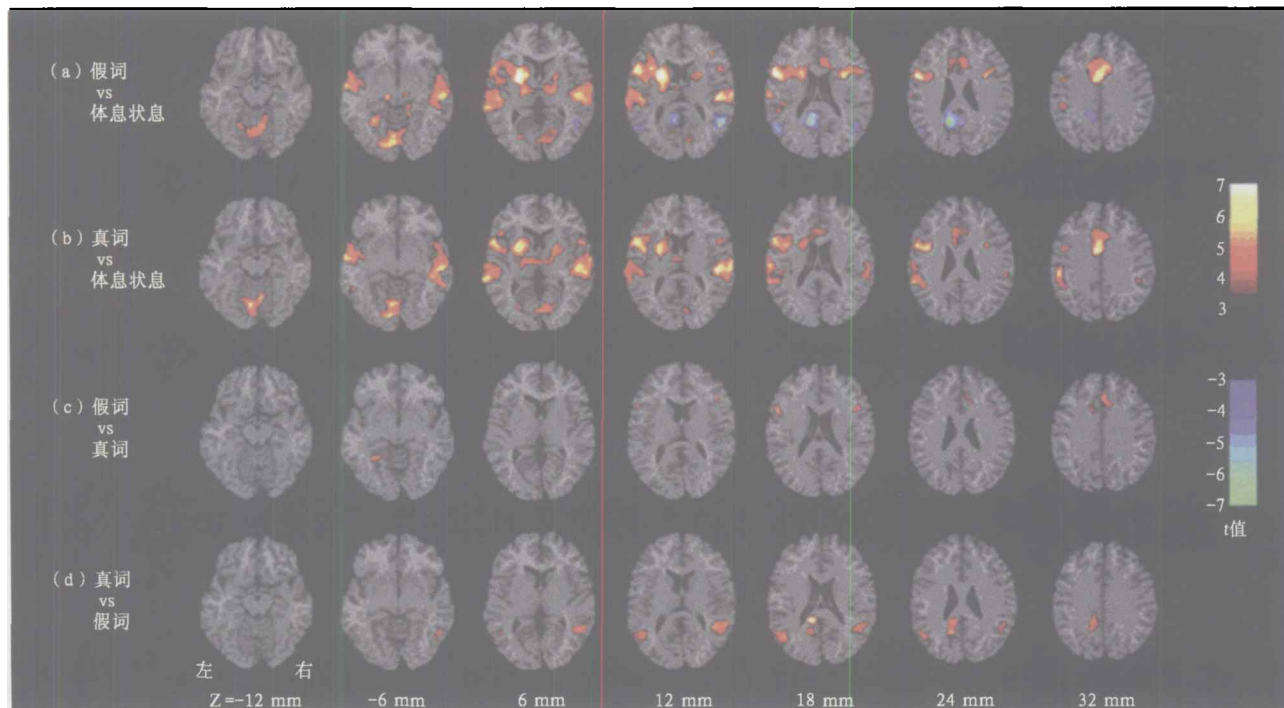


图 1 真假词判断时的脑激活图,即把脑激活状态的相应 t 检验值,用伪彩色的方式显示在标准的 SPM 脑解剖模板上;按神经学惯例,图的左侧是左脑,右侧是右脑; Z 值表示相应轴位像在 Talairach 标准空间中的 Z 坐标。(a)“假词”刺激减去休息状态;(b)“真词”刺激减去休息状态;(c)“假词”刺激减去“真词”刺激;(d)“真词”刺激减去“假词”刺激。为了避免重复,(c)及(d)中负的激活区域没有标明

点^[12]。近期的 1 个研究采用语言工作记忆任务设计,发现否定反应引起的左额下回(Brodman 44、45 区)激活要强于肯定反应所引起的反应^[13]。决断过程中的某些神经过程(如选择机制^[14,15]或受指引控制机制^[16])参与了这种相对普遍的认知过程。

本研究主要有 2 个方面的结果。第一,再次印证了相关文献中的研究结果,即“真词”和“假词”的加工过程激活了可比性非常强的脑皮层神经网络,包括双侧额下回,颞上、中回,距状回和舌回,左缘上回等。第二,同行为上的词汇效应对应,左额下回对“假词”的反应要强于其对“真词”的反应。因为本研究中的实验任务纯粹采用听觉刺激,所以这一结果不支持以往认为左额下回起着将字素转换为词素的作用的观点。本研究认为,该区域对“假词”的较强反应是由一般决断过程的差异性所引起的,尤其来源于做肯定与否定反应的不同。

(志谢 陈少杏、伍秋林及广东省医学分子影像重点实验室的其他工作人员对本研究做了大量的辅助工作)

参 考 文 献

- 1 Riston KJ, Holmes AP, Poline JB, et al. Analysis of fMRI time-series revisited. *Neuroimage*,1995,2:45-53.
- 2 Forman SD, Cohen JD, Fitzgerald M, et al. Improved assessment of significant activation in functional magnetic resonance imaging (fMRI): use of a cluster-size threshold. *Magn Reson Med*,1995,33:636-647.
- 3 Poline JB, Worsley KJ, Evans AC, et al. Combining spatial extent and peak intensity to test for activations in functional imaging. *Neuroimage*,1997, 5:83-96.
- 4 Ratcliff R, Gomez P, McKoon G. A diffusion model account of the

- lexical decision task. *Psychol Rev*, 2004, 111:159-182.
- 5 Binder JR, Frost JA, Hammeke TA, et al. Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *J Neurosci*,1997,17:353-362.
- 6 Levelt WJ. Spoken word production: a theory of lexical access. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98:13464-13471.
- 7 Poeppel D, Guillemin A, Thompson J, et al. Auditory lexical decision, categorical perception, and FM direction discrimination differentially engage left and right auditory cortex. *Neuropsychologia*, 2004,42:183-200.
- 8 Mechelli A, Gorno-Tempini ML, Price CJ. Neuroimaging studies of word and pseudoword reading: consistencies, inconsistencies, and limitations. *J Cogn Neurosci*,2003, 15:260-271.
- 9 Herbster AN, Mintun MA, Nebes RD, et al. Regional cerebral blood flow during word and nonword reading. *Hum Brain Mapp*, 1997,5 :84-92.
- 10 Rumsey JM, Nace K, Donohue B, et al. A positron emission tomographic study of impaired word recognition and phonological processing in dyslexic men. *Arch Neurol*,1997, 54 :562-573.
- 11 Ratcliff R. Theoretical interpretations of the speed and accuracy of positive and negative responses. *Psychol Rev*, 1985,92 : 212-225.
- 12 Binder JR, McKiernan KA, Parsons ME, et al. Neural correlates lexical access during visual word recognition. *J Cogn Neurosci*,2003, 15:372-393.
- 13 Zhang JX, Leung HC, Johnson MK. Frontal activations associated with accessing and evaluating information in working memory: an fMRI study. *Neuroimage*,2003,20:1531-1539.
- 14 Zhang JX, Feng CM, Fox PT, et al. Is left inferior frontal gyrus (LIFG) a general mechanism for working memory selection? *Neuroimage*,2004,23 :596-603.
- 15 Zhang JX, Zhuang J, Ma L, et al. Semantic processing of Chinese in left inferior prefrontal cortex studied with reversible words. *Neuroimage*,2004,23: 975-982.
- 16 Wagner AD, Pare-Blagoev EJ, Clark J, et al. Recovering meaning: left prefrontal cortex guides controlled semantic retrieval. *Neuron*, 2001, 31:329-338.

(收稿日期:2006-05-09)
(本文编辑:薛爱华)

· 书 讯 ·

《活体形态学》出版发行

由巫北海教授主编的《活体形态学》2006 年 5 月已由科学出版社出版,各地书店发行。该书是作者们总结了 40 余年来对活体形态学众多课题的研究成果,广泛收集国内外有关资料,以现代医学影像学技术为观察手段编写而成的。它全面、系统地介绍了活体各系统器官、组织(甚至细胞分子)的形态结构、功能状态及物质代谢变化情况。其特点是:活体、实时、无创或微创,而非活体形态学所见与之有较大差别。活体形态学可作为临床各科检查和观察患者的必备基础知

识。该书共分颅脑、面颈、胸心、腹盆(上、下)和脊柱脊髓与肌骨系统 6 卷(书号分别是 ISBN 7-03-016393-1, ISBN 7-03-014906-8, ISBN 7-03-016392-3, ISBN 7-03-014871-1, ISBN 7-03-016391-5, ISBN 7-03-014907-6),是一套方便、实用的工具书。

(秦将均)