

论 文

拓扑差异物体的构型处理: 一项脑电研究

张俊俊^①, 诸薇娜^{②③④}, 丁晓君^①, 周昌乐^①, 胡新天^②, 马原野^{②③*}

① 厦门大学信息科学与技术学院, 艺术认知与计算实验室, 厦门 361005;

② 中国科学院, 昆明动物研究所, 昆明 650223;

③ 中国科学院生物物理研究所, 脑与认知科学国家重点实验室, 北京 100101;

④ 云南大学信息学院, 昆明 650223

* 联系人, E-mail: yuanma0716@vip.sina.com

收稿日期: 2009-05-08; 接受日期: 2009-05-19

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2005CB522800)、国家高技术研究发展计划(批准号: 2006AA01Z129)和云南大学校级科研经费(批准号: KL080012)资助项目

摘要 根据陈霖的拓扑知觉理论, 在视觉感知中, 拓扑差异的检测要快于局部特征的检测. 本课题组认为, 这一现象可能是对“洞”图形和无“洞”图形的感知差异所造成的. 本文旨在检验这两类图形所存在的知觉差异究竟是什么. 利用脑电(ERP)技术, 测量“洞”和“非洞”图形所引起的视觉诱发电位(VEP), 探究“洞”和“非洞”的区别. 两类图形引起的 VEP 区别体现在 N170 上, “洞”图形的反转使得 N170 的潜伏期显著变化, 而“非洞”图形的反转不会引起 N170 潜伏期的变化. 人脸与非人脸物体的反转引起的 N170 变化与本结果相似. 本研究认为, 对“洞”的感知更偏向于整体加工, 而对于“非洞”则更偏向于特征加工.

关键词

视觉诱发电位
拓扑知觉
N170

视觉模式识别理论一般认为, 视觉场景的分析是由对局部特征的分析开始的, 如线段的长度、朝向、位置和曲率等^[1]. 然而其他的一些实验结果表明, 对视觉整体特征的加工要先于局部特征^[2]. 本课题组先前的实验结果表明(未发表资料), 被试对有“洞”图形(如圆环, 三角形^[3])的检测反应时要短于“非洞”图形(如 S 和箭头^[3]). 但是产生这种结果的原因现在还不清楚. 所说的“洞”图形, 指的是在这个图形里面, 包围了一块与背景相同的区域, 例如相同的颜色或者纹理等. 换句话说, “洞”可以被抽象为图论中的一个有环图(cyclic graph), “非洞”可以被抽象为一个无环图(acyclic graph). 本研究认为, 对“洞”和“非洞”的视觉感知神经机制是不同的, 对“洞”的检测更倾向于整体特征的加工, 而对“非洞”的检测更倾向于对局部特征的加工. 为了验证此理论, 本实验给被试呈现不同朝向的三角形和箭头图形, 并同时记录被试的脑

电数据(EEG). 本实验中, 三角形和箭头图形都是由完全相同的线段元素构成的, 从而消除了两者之间视觉物理特征之间的差异(如空间频率和空间维度)(图 1).

由于具有良好的时间分辨率, 时间诱发电位(event-related potentials, ERPs)被广泛地用来研究与认

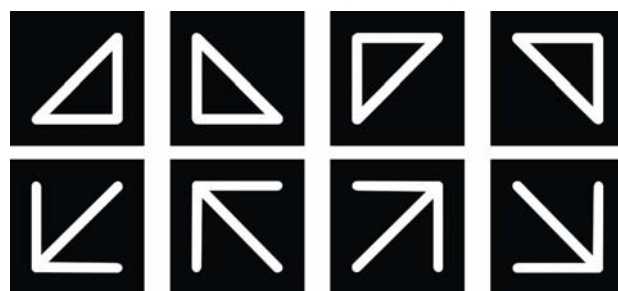


图 1 刺激图形

由三角形(“洞”, 上排)和箭头(“非洞”, 下排)构成

知加工相关的神经机制。在以前的研究中, 一个被称为 N170 的 ERP 成分被用来研究视觉中对面孔认知的整体加工^[4]。虽然 N170 是对面孔敏感的, 但是也被用来研究对非面孔物体(例如印刷字词和其他物体)的整体加工特性^[5]。有研究^[6]报道, 印刷字词的视觉刺激也会引起颞枕叶的 N170。所以本实验认为, N170 不仅能用于研究面孔的整体加工, 同时也能用于研究对“洞”和“非洞”视觉刺激的整体加工。

通过面孔的反转效应, 能更好地研究面孔认知中的整体和特征加工^[7]。同样, 也可通过对“洞”和“非洞”反转来进行相同的研究。先前的研究^[5,8-11]表明, 面孔的反转能使 N170 的潜伏期变长, 非面孔物体(如房子、椅子、汽车或鞋子)的反转则不会影响 N170 的潜伏期^[9,2,13]。但是, 对非面孔物体的专家化效应, 同样可以使 N170 的潜伏期受到反转效应的影响^[14]。提示反转效应引起的 N170 变化, 不仅局限于人脸, 同样也适用于对非常熟悉的非人脸物体的研究。文中使用不同朝向的三角形和箭头图片作为视觉刺激(图 1), 通过对它们的反转来研究不同朝向的刺激会不会引起颞枕区 N170 的变化。

实验中给被试呈现不同朝向的三角形和箭头图形, 同时记录被试的多道脑电数据。

实验目的是: (1) 检验“洞”和“非洞”是否能引起不同的颞枕叶 N170 成分; (2) “洞”和“非洞”的反转效应, 是否会引起不同的 N170 的变化。

1 材料与方法

1.1 被试

10 名右利手的被试参加了此项实验, 男女各半。被试的年龄在 20~25 岁之间, 平均年龄为 22.8 岁。所有被试来自中国并正在厦门大学接受教育。据被试报告没有精神疾病史, 并且视力正常(或矫正视力正常)。被试自愿参加实验, 实验结束给予适当报酬。

1.2 材料和过程

戴上电极帽后, 被试坐在黑暗的声屏蔽房间里, 眼睛距显示器距离为 57 cm。刺激呈现在黑色的背景上, 刺激视角约为 8.796°。实验分为 5 个组, 每组包含 80 个刺激, 每个刺激之间的间隔时间(inter-stimulus interval)为 700~1200 ms。刺激包括 4 个朝向的三角形

和箭头图片(图 1), 每个图片按照随机顺序总共显示 50 次。在每个 trial 中, 刺激呈现在屏幕的中心, 呈现时间为 500 ms。被试在实验过程中被要求将注视点保持在刺激图片上, 不用做任何反应任务。

1.3 时间相关电位的记录

实验采用 Neuroscan 公司的 Quik-Cap 脑电极帽记录脑电。导联方法采用国际 10-20 系统, 同步记录 64 道的脑电数据。所记录的电极包括 8 个中线位置(FPZ, FZ, FCZ, CZ, CPZ, PZ, POZ, OZ), 27 个左半球电极(FP1, AF3, F1, F3, F5, F7, FC1, FC3, FC5, FT7, C1, C3, C5, T7, CP1, CP3, CP5, TP7, P1, P3, P5, P7, PO3, PO5, PO7, O1, CB1)以及 27 个右半球电极(FP2, AF4, F1, F4, F6, F8, FC2, FC4, FC6, FT8, C2, C4, C6, T8, CP2, CP4, CP6, TP8, P2, P4, P6, P8, PO4, PO6, PO8, O2, CB2)。左右乳突作为记录电极, 参考电极位于鼻尖。眼动通过眼角的水平眼电和眼睛上下的垂直眼电监控。电极间的电阻小于 5 kΩ。

实验过程中, 脑电数据的采样频率为 1000 Hz, 滤波范围为 0.05~100 Hz。数据处理中, 脑电数据按 1200 ms 一段来分割, 从刺激前 200 ms 到刺激呈现后 1000 ms。每段脑电自动去伪迹后, 分别按照三角形和箭头的不同朝向进行叠加平均(总共 8 个)。对平均波形进行 30 Hz 的低通数字滤波。

2 结果

分析了和图形呈现相锁时的 3 个视觉 ERP 成分, 即 C1, P1 和 N170(图 2(A))。根据平均的 ERP 波形, 这 3 个成分的峰值和潜伏期在下列时间窗口中自动检测: C1(50~100 ms), P1(100~140 ms), N170(120~190 ms)(图 2(B))。3 个成分的幅度和潜伏期都是用重复测量的方差分析统计朝向、拓扑结构以及偏侧性。对结果做了 Greenhouse-Geisser 矫正。

在枕区的电极(Oz)上, 分析了 C1 的幅度和潜伏期。对朝向和拓扑结构的主效应分析均不具有显著性, 同时也没有发现这两者之间的交互效应。

在枕叶的 3 个电极(O1, O2 和 Oz)上, 分析了 P1 的幅度和潜伏期(图 2(B))。同样, 对朝向、拓扑结构和偏侧性的分析上不具有主效应的显著性, 这些因素之间也不具有交互效应。拓扑结构具有边缘显著

的主效应($F=3.964, P=0.078$), 三角形引起的 P1 幅度略大于箭头。

对 P1 在颞枕叶区域也进行了分析、左侧颞枕叶(P7, PO7, P5, PO5, CB1)以及右侧颞枕叶(P8, PO8, P6, PO6, CB2)。对主效应或者交互效应的检测没有发现 P1 幅度的差别。对 P1 潜伏期的统计发现, 对于三角形, 图形朝向会引起 P1 潜伏期的变化($F=5.793, P=0.007$); 但是对于箭头, 图形的朝向并不会引起 P1 潜伏期的变化($F=0.475, P=0.603$)。表 1 列出了各个朝向所引起的 P1 的潜伏期的值。

在枕叶的 3 个电极(O1, O2 和 Oz)上, 分析了 N1 的幅度和潜伏期。对拓扑结构和偏侧行的分析上不具有主效应或者交互效应的显著性。朝向在 N1 的幅度上表现出了显著性($F=4.24, P=0.02$), 并且在 N1 的潜伏期上表现出了边缘显著($F=3.433, P=0.058$)。

对 N170 在颞枕叶区域也进行了分析, 左侧颞枕叶(P7, PO7, P5, PO5, CB1)以及右侧颞枕叶(P8, PO8, P6, PO6, CB2)(图 2(B))。对 N170 幅度的分析: 朝向具有显著的主效应(4 个朝向分别为 $-5.784, -7.086, -7.445$ 和 $-5.834 \mu V, F=6.411, P=0.003$)。在拓扑结构和偏侧性之间具有交互效应($F=5.127, P=0.047$)。右侧颞枕叶记录到三角形和箭头之间的 N170 存在显著

差异(三角形: $-6.418 \mu V$, 箭头: $-7.345 \mu V; F=5.301, P=0.047$), 但在左侧不具有显著差异(三角形: $-6.081 \mu V$, 箭头: $-6.315 \mu V; F=0.262, P=0.621$)。不同朝向的三角形之间不具有显著性(4 个朝向分别为 $-5.259, -6.437, -7.179$ 和 $-6.123 \mu V, F=1.869, P=0.169$), 但是不同朝向的箭头之间具有显著性差异(4 个朝向分别为 $-6.309, -7.735, -7.731$ 和 $-5.545 \mu V, F=6.897, P=0.002$)。对 N170 潜伏期的分析: 朝向也具有显著的主效应(4 个朝向分别为 $158.2, 157.9, 160.7$ 和 $160.6 ms, F=3.805, P=0.33$)。在拓扑结构和偏侧性之间具有交互效应($F=3.51, P=0.036$)。左侧颞枕叶记录到的不同朝向之间的差异具有显著性($F=4.17, P=0.025$), 右侧的差异具有边缘显著性($F=3.321, P=0.051$)。不同朝向的箭头之间不具有显著性差异($F=0.720, P=0.514$), 但是不同朝向的三角形之间具有显著性差异($F=2.76, P=0.09$)(图 3)。表 1 列出了各个朝向所引起的 N170 的潜伏期的值。

通过对 ERPs 信噪比(signal noise ratio, SNR)的分析, 认为不同朝向的三角形所引起的 N170 潜伏期的变化并不是由于 ERP 的低信噪比造成的。首先, 任一刺激所诱发的 ERP 在去除伪迹后, 仍具有 40 个以上的 trial。其次, 用重复测量的方差分析分析了两个因

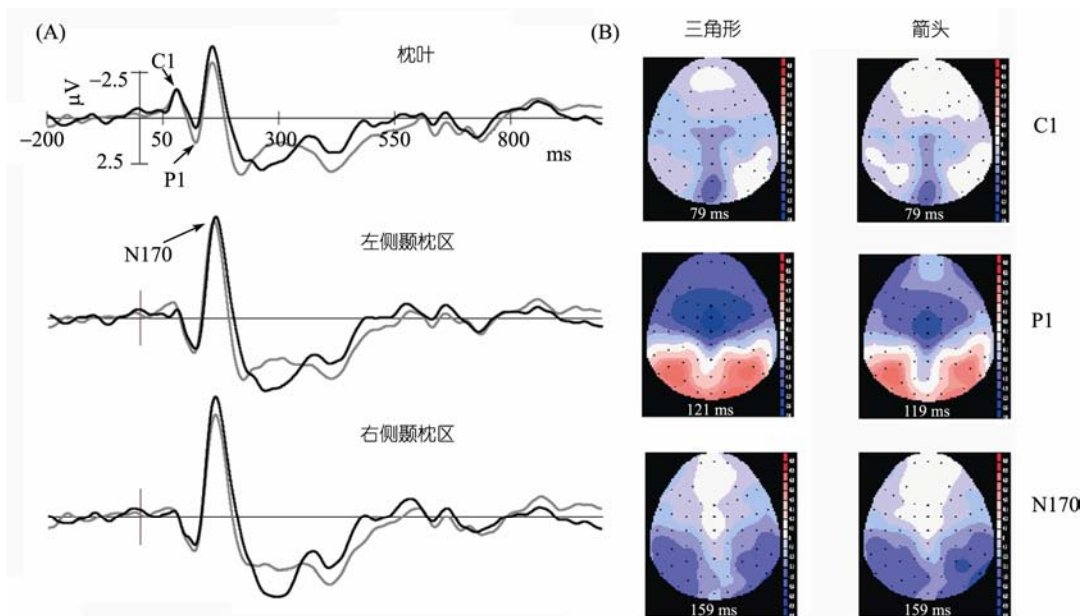


图 2

(A) 三角形(灰线)和箭头(黑线)在枕叶以及两侧颞枕叶所诱发的 ERP; (B) C1, P1 和 N170 这 3 个成分的脑区分布图

素(朝向和拓扑结构)的 ERP 的信噪比的值, 结果表明并不具有任何主效应或者交互效应. 表 1 列出了各种情况下的 SNR 的均值.

对另一个 ERP 成分 P250 在枕叶(O1, OZ, O2)以及颞枕叶(左侧: P7, PO7, P5, PO5, CB1; 右侧: P8, PO8, P6, PO6, CB2)进行了统计分析. 结果表明, P250 的幅度, 在拓扑结构上表现出了显著差异, 表现在枕叶(三角形: $3.790 \mu\text{V}$, 箭头: $4.650 \mu\text{V}$, $F=5.913$, $P=0.038$)以及颞枕叶(三角形: $4.151 \mu\text{V}$, 箭头: $5.358 \mu\text{V}$, $F=11.360$, $P=0.008$).

对颞枕叶区域的 P1, N170 和 P250 的幅度和潜伏期之间的相关性做了分析(图 4). 对 P1 来说, 这种相关性在三角形($r=0.666$, $P<0.001$)和箭头($r=0.568$, $P<0.001$)上都存在. 但是 N170 在三角形($r=-0.55$, $P=0.734$)和箭头($r=0.098$, $P=0.548$)上都不具有幅度和潜伏期之间的相关性, 同样 P250 在三角形($r=0.157$, $P=0.333$)和箭头($r=-0.148$, $P=0.361$)上也都具有幅度和潜伏期之间的相关性.

3 讨论

作为最早的视觉诱发电位成分, C1 的起始潜伏期一般在 $40\sim 70 \text{ ms}$ 之间, 峰值潜伏期在 $60\sim 100 \text{ ms}$ 之间^[15]. C1 反映了视觉信息在初级视觉皮层的加工. Russo 等人^[16]发现 C1 产生于矩状裂. 在本实验结果

中, “洞”和“非洞”引起的 C1 并没有区别, 同时不同的朝向也不会引起 C1 的变化. 这表明, 在视觉信息从外侧膝状体传递到初级视皮层时, 拓扑差异以及朝向差异都未能体现出来.

第二个视觉诱发成分是 P1, 起始潜伏期在 $65\sim 80 \text{ ms}$ 之间, 峰值潜伏期在 $100\sim 130 \text{ ms}$ 之间. P1 的发生源位于外侧纹状皮层^[15,17]. 在枕叶, “洞”所诱发的 P1 幅度边缘显著大于“非洞”. 在颞枕区, 三角形的朝向变化会影响 P1 的潜伏期, 但是箭头的朝向变化不会. 相似的现象也出现在 N170 的潜伏期上.

先前的研究^[5,8-10]表明, 面孔的反转效应会体现在 P1 和 N170 的潜伏期上. 一般认为, 面孔的反转会影响对面孔的整体加工认知, 所以引起这两个成分的潜伏期变长. 面孔反转后, 整体加工被破坏, 从而影响了对面孔认知的速度^[4]. 本实验中, 三角形、箭头只是简单的几何图形, 与面孔不同. 不能规定三角形或箭头的某种朝向是正立的, 然后把它的反转作为倒立的. 然而, “洞”的不同朝向, 确实会引起 P1 和 N170 的潜伏期的变化, 所以可能意味着对“洞”的感知是整体加工的. 另一方面, 对于不具有整体加工优势的“非洞”, 对它的反转不会影响不到知觉的速度, 所以也不会引起 P1 和 N170 的潜伏期变化. 但是, 有文献^[4]报道, 局部特征的加工会影响到 N170 的幅度. 所以, 对“非洞”图形的感知更侧重于对局部特征的加

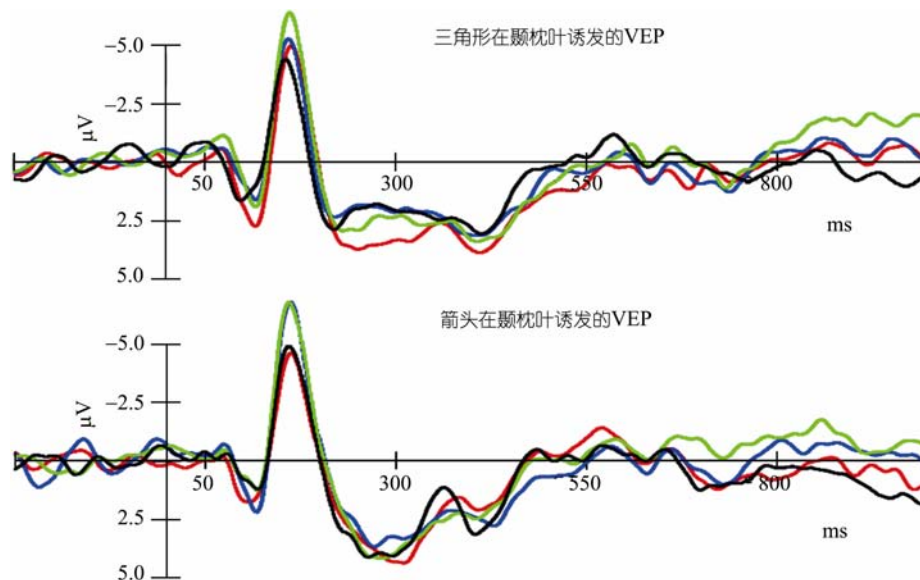


图 3 不同朝向的三角形和箭头在颞枕区所诱发的 ERP

表 1 不同朝向的三角形和箭头所诱发的 P1 和 N170 成分的潜伏期以及不同情况下的信噪比(SNR)均值

朝向		d1	d2	d3	d4
P1	三角形	106.1	109.3	113.7	114.6
	箭头	111.6	111.7	112.9	110.5
N1	三角形	155.7	157.4	160.1	161
	箭头	159	160.3	161.3	160.1
SNR	三角形	2.306	2.129	2.257	2.2
	箭头	2.198	2.246	2.868	2.243

工. 由此认为, 对“洞”的视觉感知相对于“非洞”更偏向于整体加工.

一些研究表明, 整体加工是面孔特异性的, 但是其他一些结果发现非面孔物体仍然可以具有这种特性^[18]. 例如, 对和面孔类似的‘greeble’图形的认知就具有整体加工特性, 相对于其他一些物体, ‘greeble’的反转就会干扰对它的识别^[19]. 此外, 对具有专家化效应的物体的感知也会有整体加工的特性^[20,21]. 对物体的整体加工, 有助于更容易、更快地对它们进行识别^[18]. 本实验 ERP 结果表明, 对“洞”的感知更偏向

于整体加工, 而对“非洞”的感知则更偏向于特征加工. 这个结果也得到了行为学上的印证: 对“洞”的检测速度快于“非洞”. 此外, “非洞”物体所诱发的增大的 P250 成分, 表明了对“洞”的感知需要较小的知觉负载^[22,23]. 这个结果和本研究组另一个对拓扑差异物体的知觉负载的研究结果一致(未发表资料). 此外, 另一项反向掩蔽的实验发现在相同的掩蔽条件下, 对“洞”的感知要易于对“非洞”的感知^[24]. 上述结果, 结合本实验 ERP 结果, 都一致说明, 对“洞”的感知更偏向于整体加工, 从而比“非洞”要更容易识别. 这个结果为拓扑知觉理论提供了一项新的证据, 并意味着拓扑知觉的首要性可能是由对“洞”的敏感性所造成的.

现在还缺少“洞”和“非洞”的反转效应上的行为学证据. 直觉上来说, “洞”反转后确实更难识别. 例如, 一张只有轮廓线的中国地图能很容易被识别, 但是它的倒立图片就会相对陌生. 下一步, 仍需要更多行为学的实验, 来验证对“洞”的感知确实更偏重于整体加工.

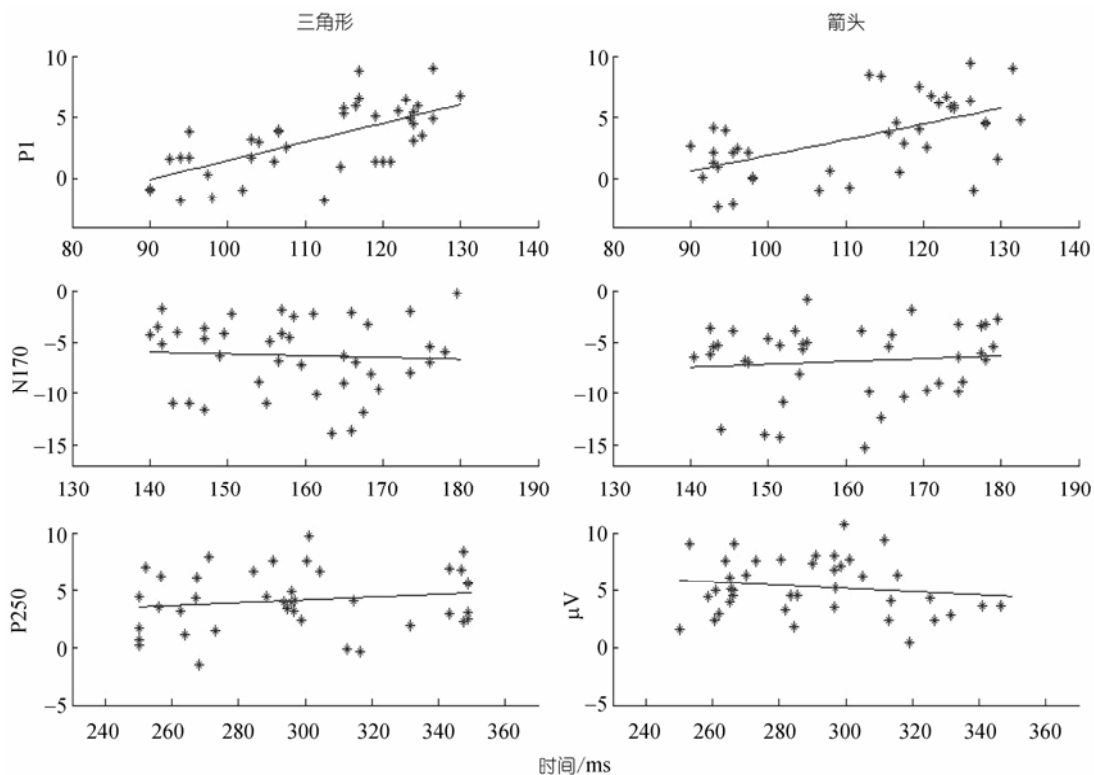


图 4 ERP 成分幅度和潜伏期之间的相关性

参考文献

- 1 Pomerantz J R, Sager L C, Stoever R J. Perception of wholes and of their component parts: some configural superiority effects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 1977, 3: 422—435
- 2 Navon D. Forest before trees: the precedence of global features in visual perception. *Cogn Psychol*, 1977, 9: 353—383
- 3 Chen L. Perceptual organization: to reverse back the inverted (upside-down) question of feature binding. *Visual Cogn*, 2001, 8: 287—303
- 4 Bentin S, Golland Y, Flevaris A, et al. Processing the trees and the forest during initial stages of face perception: electrophysiological evidence. *J Cogn Neurosci*, 2006, 18: 1406—1421
- 5 Rossion B, Joyce C A, Cottrell G W, et al. Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *Neuroimage*, 2003, 20: 1609—1624
- 6 Bentin S, Mouchetant-Rostaing Y, Giard M H, et al. ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: time course and scalp distribution. *J Cogn Neurosci*, 1999, 11: 235—260
- 7 Boutsen L, Humphreys G W, Praamstra P, et al. Comparing neural correlates of configural processing in faces and objects: an ERP study of the Thatcher illusion. *Neuroimage*, 2006, 32: 352—367
- 8 Rossion B, Delvenne J F, Debatiste D, et al. Spatio-temporal localization of the face inversion effect: an event-related potentials study. *Biol Psychol*, 1999, 50: 173—189
- 9 Rossion B, Gauthier I, Tarr M J, et al. The N170 occipito-temporal component is delayed and enhanced to inverted faces but not to inverted objects: an electrophysiological account of face-specific processes in the human brain. *Neuroreport*, 2000, 11: 69—74
- 10 Itier R J, Taylor M J. Inversion and contrast polarity reversal affect both encoding and recognition processes of unfamiliar faces: a repetition study using ERPs. *Neuroimage*, 2002, 15: 353—372
- 11 Sagiv N, Bentin S. Structural encoding of human and schematic faces: holistic and part-based processes. *J Cogn Neurosci*, 2001, 13: 937—951
- 12 Eimer M. Effects of face inversion on the structural encoding and recognition of faces. Evidence from event-related brain potentials. *Brain Res Cogn Brain Res*, 2000, 10: 145—158
- 13 Rebai M, Poiroux S, Bernard C, et al. Event-related potentials for category-specific information during passive viewing of faces and objects. *Int J Neurosci*, 2001, 106: 209—226
- 14 Rossion B, Curran T, Gauthier I. A defense of the subordinate-level expertise account for the N170 component. *Cognition*, 2002, 85: 189—196
- 15 Di Russo F, Martinez A, Sereno M I, et al. Cortical sources of the early components of the visual evoked potential. *Hum Brain Mapp*, 2002, 15: 95—111
- 16 Di Russo F, Martinez A, Hillyard S A. Source analysis of event-related cortical activity during visuo-spatial attention. *Cereb Cortex*, 2003, 13: 486—499
- 17 Mangun G R, Buonocore M H, Girelli M, et al. ERP and fMRI measures of visual spatial selective attention. *Hum Brain Mapp*, 1998, 6: 383—389
- 18 Maurer D, Grand R L, Mondloch C J. The many faces of configural processing. *Trends Cogn Sci*, 2002, 6: 255—260
- 19 Gauthier I, Williams P, Tarr M J, et al. Training 'greeble' experts: a framework for studying expert object recognition processes. *Vision Res*, 1998, 38: 2401—2428
- 20 Rossion B, Gauthier I, Goffaux V, et al. Expertise training with novel objects leads to left-lateralized facelike electrophysiological responses. *Psychol Sci*, 2002, 13: 250—257
- 21 Tanaka J W, Curran T. A neural basis for expert object recognition. *Psychol Sci*, 2001, 12: 43—47
- 22 Caharel S, Fiori N, Bernard C, et al. The effects of inversion and eye displacements of familiar and unknown faces on early and late-stage ERPs. *Int J Psychophysiol*, 2006, 62: 141—151
- 23 Caharel S, Poiroux S, Bernard C, et al. ERPs associated with familiarity and degree of familiarity during face recognition. *Int J Neurosci*, 2002, 112: 1499—1512
- 24 Zhang J, Zhu W, Zhou C, et al. Masking effect on different topological visual stimuli. *Progr Biochem Biophys*, 2007, 34: 153