

# 视觉搜索中空间注意范围等级调节的早期 ERP 效应\*

牛亚南<sup>1,3</sup> 魏景汉<sup>1,2</sup> 罗跃嘉<sup>1,2\*\*</sup>

1. 中国科学院心理研究所, 北京 100101; 2. 北京师范大学认知神经科学与学习国家重点实验室, 北京 100875;  
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 对 18 名被试青年进行事件相关电位(ERP)实验以研究视觉空间注意范围等级效应的脑机制。采用“提示-靶”实验范式, 刺激材料使用等密度排列的字母组成的 3 个同心圆, 以去除字母排列密度不均匀对注意范围等级效应的影响。记录反应时和 ERP 数据。结果表明: 随着提示范围的增大, 识别靶刺激的反应时延长, 靶刺激引起的 P1, N1 波幅减小。行为数据和 ERP 波幅的等级式变化提示视觉注意范围的等级效应, 并发现该等级效应受到了来自任务难度、刺激物数量及分布等多种因素的影响。

**关键词** 视觉搜索 空间注意 范围等级 事件相关电位

20 世纪 80 年代, Posner 等创建了经典的“提示-靶”实验范式来研究注意资源在视觉空间的分配特点, 不仅通过行为学数据证实了注意位置上的靶刺激识别要快于非注意位置上的靶刺激识别, 还提供了重要的 ERP 证据——有效提示下靶刺激引起的早期注意成分(P1 和 N1)波幅高于无效提示<sup>[1,2]</sup>。随后的研究也证实了上述结果<sup>[3,4]</sup>, 这种视觉空间注意效应被形象地比喻为“聚光灯”(spotlight)效应<sup>[5]</sup>, 从而使落在注意范围内的刺激加工得到了加强<sup>[3]</sup>。如果说“聚光灯”效应描述了注意状态下与非注意状态下刺激加工的不同, Erikson 与 St. James 提出的“变焦镜”(zoom-lens)模型则描述了注意状态下不同范围的空间等级效应, 认为视觉注意范围可以依据刺激物而进行动态的调整——缩小或扩大<sup>[6]</sup>。Greenwood 等<sup>[7,8]</sup>通过设定不同大小的注意范围等级, 比较被试在各注意等级范围内完成视觉搜索任务的情况, 得出视觉注意可以依据任务的不同要求来调节其大小及密度, 并把这种能力称

之为“等级调节”(scaling)能力。

自 2001 年以来, 本课题组进行了系列注意范围空间等级调节的 ERP 研究。首先是 Luo 等<sup>[9]</sup>将提示和注意空间范围分为大、中、小 3 个等级, 要求被试依据提示在相应的空间范围内寻找目标刺激, 结果显示当提示范围增大时, P1 波幅增大而 N1 波幅减小, 认为 P1 波幅反映了在注意范围内识别目标所需要的运算资源, 而 N1 波幅反映了注意分配的“倾斜”。由于该实验中提示物出现的位置是随机的, 其结果中可能会混入空间方位因素的影响。为纯化注意范围因素, 改进了实验范式, 固定提示位置, 结果表明注意范围的效应反映在 P2 和 N2 波幅上, 而非 P1 和 N1<sup>[10]</sup>。但在该实验模式中, 目标识别的注意范围等级线索不够明显, 被试很可能忽视提示条件而自行进行搜索, 因此缺失早期的注意效应。为增强注意范围等级的区分度, Song 等<sup>[11,12]</sup>进一步改进了实验模式, 以刺激物本身排列成大、中、小 3 个同心圆, 被试在其中寻找

2006-09-25 收稿, 2007-01-22 收修改稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 30325026, 30670698)和教育部重点项目(批准号: 106025)资助

\*\* 通信作者, E-mail: luoyj@bnu.edu.cn

目标. 这样就提高了被试对搜索范围的提示性. 实验结果显示, P1 和 N1 波幅反映了视觉注意的范围等级效应, 随提示范围等级的减小, P1 与 N1 波幅增大. 该效应被认为是由于提示的有效程度不同造成的, 即提示的有效性越高, 对视觉信息输入的易化程度也越高, 从而引起更大的 P1 波幅. 这一结果与 Luo 等<sup>[9]</sup>的实验结果不同. 最近, 在 Fu 等<sup>[13]</sup>的实验中使用大、小两种等级范围作为提示, 也与 Song<sup>[11,12]</sup>的结果一致. 为进一步了解提示范围对注意的调节机制, 有必要进行更深入的实验研究.

在 Song 的实验中, 没有考虑刺激物在 3 个同心圆上的排列密度. 本研究将注意范围分为大、中、小 3 个等级, 使用等密度排列的字母同心圆作为刺激材料, 采用相应大小的同心圆作为提示物, 分别记录提示物本身和靶刺激诱发的 ERP 波形及行为学数据, 期望能在与前人研究结果的比较中更深入地探讨视觉空间注意的脑机制.

## 1 实验方法

(1) 被试 18 名青年正常人作为有偿被试 (8 男) 参加实验. 其年龄范围 19—24 岁 (平均 21 岁). 所有被试身体健康, 均为右利手, 裸眼视力正常或校正视力正常, 首次参加电生理学实验.

(2) 刺激材料 刺激呈现于 14 英寸 (1 英寸 = 2.54 cm) 显示器上, 刺激序列为“注视点—提示—靶刺激” (图 1). 注视点为屏幕中央的一个白色小十字. 提示物分别为大、中、小 3 个不同直径的同心圆, 直径比为 1 : 2 : 3, 圆心在屏幕中央, 3 个同心圆的视角分别为  $8.6^\circ$ ,  $5.7^\circ$ ,  $2.9^\circ$ . 刺激材料为英文字母随机排列而成的 3 个同心圆圈, 各个圆圈上的字母排列密度相同, 即任意相邻的两个字母之间的距离相等 (图 1). 小、中、大圈上分别有 8, 16, 24 个字母. 设定字母“T”为靶刺激. 当提示为小圈时, 靶刺激“T”出现在小圈; 当提示为中圈时, “T”出现在中圈或小圈; 当提示为大圈时, 靶刺激“T”出现在大圈、中圈或小圈. 字母圈与提示圆圈的大小和视角严格对应. 整个实验背景均为黑色, 提示物及刺激材料均为白色.

(3) ERP 记录 实验仪器为 Neuro Scan 脑电记录系统, 采用 64 导电极帽记录脑电, 电极点分布依照国际 10—20 标准记录系统, 参考电极置于双

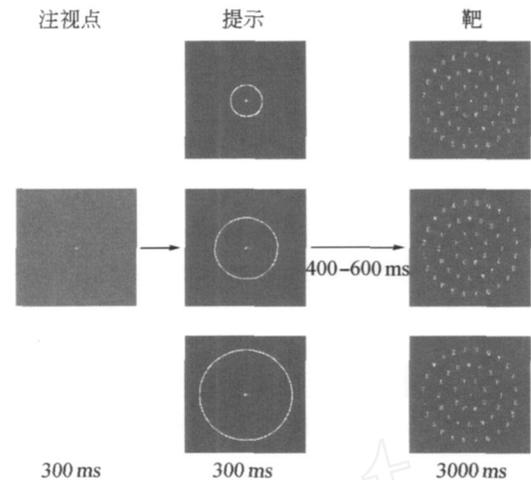


图 1 实验流程图

侧乳突连线, 前额接地, 同时记录水平眼电和垂直眼电. 滤波带通为 0.05—100 Hz, 连续采样, 采样频率为 500 Hz/导, 头皮电阻 5 k 以下. 分析时程 (epoch) 为 1100 ms, 其中刺激前 100 ms 作为基线, 以回归法自动矫正眨眼伪迹, 波幅大于  $\pm 80 \mu\text{V}$  者在叠加中被自动剔除.

(4) 程序与任务 如图 1, 首先呈现注视点 300 ms, 接着随机呈现一个提示圆圈作为注意范围的提示物, 分为大、中、小 3 个等级, 提示物呈现时间为 300 ms. 提示消失后, 呈现由字母组成的 3 个同心圆作为靶刺激, 呈现 3000 ms, 以保证被试有足够的搜索时间. 提示与靶刺激之间的间隔 (ISI) 为 400—600 ms. 被试的任务是根据提示在相应的注意范围内搜索字母“T”, 并判断字母“T”出现在屏幕的左半还是右半视野, 分别用左右手的食指按键反应. “T”在左右两个视野内等概率出现. 另有 10% 的刺激材料没有“T”, 作为控制条件监控被试完成任务的认真程度, 该条件下的行为学和 ERP 数据不在统计分析之内, 如果被试对无“T”的刺激材料有较多的反应, 该被试的数据会被剔除. 要求被试的反应既快又准确.

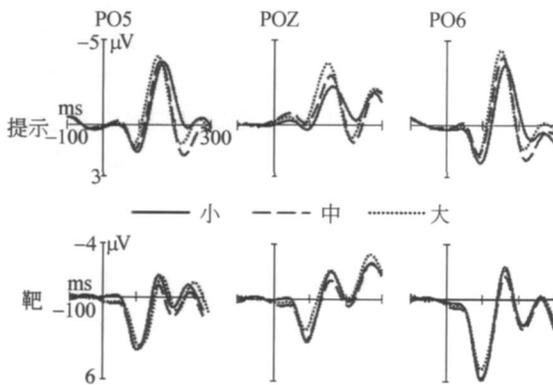
(5) 数据统计和分析 行为学数据通过 E-Prime 记录, 并按照 3 种等级的提示范围计算出每个被试的正确率以及在正确反应下的平均反应时. 使用 SPSS 进行 3 因素重复测量方差分析 (MANOVA), 因素为提示范围等级 (3 水平: 大、中、小) 和刺激

呈现视野(2水平:左、右),采用 Greenhouse-Geisser 法对自由度和  $P$  值进行校正,两两比较采用最小显著差异法(LSD)。

ERP 数据按照提示范围等级,对正确反应的 EEG 进行分类叠加,分别以提示物和靶刺激为分析点进行叠加。结合前人工作与本实验目的,选取头皮后部 Pz, P3/P4, P5/P6, POz, PO5/PO6, PO7/PO8, Oz, O1/O2 和前部 Fz, F1/F2, F3/F4, FCz, FC1/FC2, FC3/FC4 电极点位置作为分析对象。ERP 在头皮后部的测量窗口分别为:50—120 ms (P1), 120—190 ms (N1), 190—250 ms (P2), 250—350 ms (N2); 前部为:50—150 ms (N1), 150—260 ms (P2)。测量上述各段成分的波幅(峰-峰值)和潜伏期,用 SPSS 进行分析。对于成对电极分析 3 个因素:提示范围(3水平:大、中、小),电极对位置(头皮前部 4 个水平、后部 5 个水平),半球优势(2水平:左、右);对于分布在中线位置的电极只分析前两个因素,另外单独进行二因素的重复测量方差分析。

## 2 实验结果

### (1) 行为数据 在大、中、小 3 种不同等级的



提示下,被试对靶刺激反应的正确率分别为 86%, 98%, 100%。为排除正确率对反应时的影响,对反应时进行协方差分析(反应正确率作为协变量)。分析结果显示提示的主效应差异显著,  $F(2, 44) = 46.8, p < 0.001$ , 大、中、小 3 种提示条件下反应时的修正均数分别为:  $(1066.2 \pm 37.87), (854.9 \pm 23.51), (604.3 \pm 26.34)$  ms。按照靶刺激所出现的视野将反应时数据分左、右两视野来比较,左、右视野之间的主效应及与提示范围之间的交互作用均不显著。

(2) ERP 成分 各实验条件下的有效叠加次数均大于 80 次。提示物和靶刺激诱发的 ERP 总平均图和脑地形图如图 2。3 种提示范围等级之间的差异主要表现在头皮后部的 P1 和 N1 成分上,其后的 P2, N2 成分以及头皮前部的 ERP 早期成分在潜伏期和波幅上均无显著性差异。因此只描述 P1 和 N1 成分。

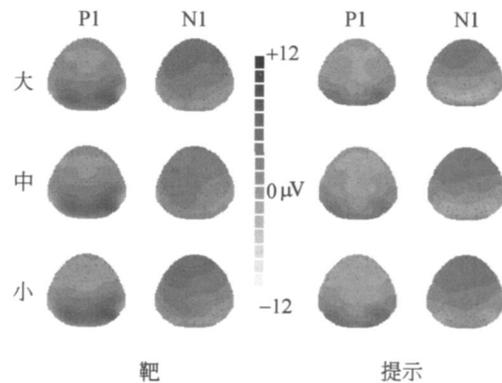


图 2 靶刺激和提示物产生的 ERP 总平均图(左)和 ERP 脑地形图(右)

(i) 提示物诱发的 ERP 成分 3 种等级范围提示下,提示物诱发的 P1 成分在波幅和潜伏期上均无显著性差别提示范围的主效应在 N1 成分的潜伏期上具有显著性。大、中、小 3 种提示范围下 N1 潜伏期分别为  $(151.0 \pm 3.27), (155.3 \pm 3.40), (164.6 \pm 4.16)$  ms,  $F(2, 30) = 24.87, p < 0.01$ ,

$= 0.596$ 。N1 波幅在 3 种提示下无显著性差异。P1, N1 成分的波幅和潜伏期在左、右半球之间无显著性差异。

(ii) 靶刺激诱发的 ERP 成分 P1 波幅的提示范围主效应显著,  $F(2, 30) = 5.19, p < 0.05$ , 波幅随提示范围的减小而增大,依次为  $(4.42 \pm$

0.52), (5.07 ± 0.58), (5.00 ± 0.58) μV; 提示范围主效应在 P1 潜伏期上无显著性. 电极对的分析结果显示, P1 波幅在左、右半球之间差异显著,  $F(1, 15) = 9.01, p < 0.01$ , 左、右半球的平均波幅分别为 (4.43 ± 0.56), (5.90 ± 0.61) μV, 半球与提示范围的交互作用不显著. N1 波幅的提示主效应显著,  $F(2, 30) = 3.42, p < 0.05$ , 波幅随提示范围的减小而增大 (见图 2), 依次为 (7.46 ± 0.72), (7.41 ± 0.81), (8.24 ± 0.81) μV; 提示范围主效应在 N1 潜伏期上无显著性. 电极对的分析结果显示, N1 波幅在左、右半球之间差异显著,  $F(1, 15) = 15.66, p < 0.01$ , 左、右半球平均波幅分别为 (6.09 ± 0.82), (9.32 ± 0.89) μV, 半球与提示范围的交互作用不显著.

### 3 讨论

有关视觉注意范围等级效应的研究, 在行为学数据上已经得出了较为一致的结果<sup>[7-9, 11, 12, 14-16]</sup>, 即同一任务中, 在确保提示有效性的前提下, 被试搜索目标刺激的时间随着注意范围的增大而延长, 本实验结果也与之一致.

本实验的 ERP 结果中, 早期成分 (P1 和 N1) 的波幅随注意范围的增大而减小, 这与 Song<sup>[11, 12]</sup> 的实验结果是一致的. 在 Luo<sup>[9]</sup> 和 Fu<sup>[13]</sup> 的实验中也得出早期 ERP 成分 (P1 和 N1) 的波幅随注意范围的等级变化而变化. 这些结果均表明注意范围等级效应反映在 ERP 早期成分 (P1 和 N1) 的波幅变化上.

在以往经典的视觉选择性注意实验范式中, 常把提示物分为有效提示和无效提示 (或加上中性提示) 来进行研究, 结果显示, 有效提示下的靶刺激由于总是会出现在预先已受到注意的范围内, 相对于无效提示来说, 有效提示下的行为反应得到了改善, 早期 ERP 成分也较无效提示下的波幅增大, 并且这种波幅上的变化往往不伴有潜伏期的改变. 该效应被认为是反映了视觉注意的一种自上而下的、对于感知觉加工的“增益调节”机制——在该机制中, 注意充当了一个感觉控制器, 控制着从纹状皮质向外纹状皮质传送的视觉信息, 放大来自注意位置上的刺激感觉信号<sup>[2]</sup>.

本实验的提示均为有效, 所不同的是有效提示下的注意范围被分成了大、中、小 3 个等级, 因此

也可以认为, 随提示范围的减小, 提示的有效性逐步增高了. 事实上, 经典的视觉选择性注意实验中的有效提示也可看作是将所要注意的范围缩小了一半, 也是一种提示有效性的增高. 本实验中, P1 和 N1 成分的波幅随注意范围的缩小而增大, 可以认为, 随着提示范围的缩小, 提示对于目标刺激所在位置指向更为精确, 提示的有效性增高, 导致了 P1、N1 成分波幅的增大. 此处可以将这种效应看作是一个“级别放大器”, 即对感知觉加工的“增益调节”是具有等级性的——注意的范围越小, 对来自注意范围内感觉信号输入的放大作用也越强, 使得该处的神经兴奋性增强或神经元放电的同步性增高<sup>[17]</sup>, 表现为 ERP 早期成分波幅增大; 而在大提示范围下, 该放大器已相对失去了放大作用, 因为在本实验中大提示范围的出现就意味着注意的范围是整个视觉搜索范围, 表现为 ERP 早期成分波幅减小. 并且这种等级效应只表现在由靶刺激产生的 ERP 波幅上, 在由提示物产生的 ERP 波幅上无此效应, 进一步说明了这种早期 ERP 成分的等级式变化所反映的是视觉搜索过程中不同注意范围所引起的等级效应, 而非提示物本身不同所引起的.

注意的容量有限已基本得到公认<sup>[18]</sup>. 总结众多实验结果, 当目标刺激和非目标刺激区别于某一简单且重要的特征维度时, 很多成分可以被平行的加工而不受到明显的注意容量限制; 当任务要求被试对靶刺激做出复杂而精细的辨别时, 就会出现明显的注意容量限制. 因此, 注意容量限制出现与否 (即任务完成过程中是否达到了注意的最大容量) 是依具体的实验任务而定的.

在一些实验中, 使用的刺激物数量较少, 被试所执行的视觉任务也相对较简单, 这种情况下需要分配的注意资源是不必达到注意容量的最大限度的. 在 Luo<sup>[9]</sup> 的实验中, 小提示下可供搜索的刺激物只有 1 个, 大提示下的刺激物在最多的时候也只能达到 9 个, 实验中使用的是简单的辨别任务 (辨别月芽形刺激物的朝向). 因此在完成这样的实验任务时很可能达不到注意容量的限制, 注意资源的分配随着注意范围的增大而增加, P1 波幅的增大很可能反映的是注意资源的增加<sup>[13, 19-21]</sup>. 尽管在 Fu<sup>[13]</sup> 的实验中, 靶刺激引起的 P1 波幅在小范围提示下比大提示范围下的波幅增大, 他认为这是由于

该实验任务完成小范围提示的任务需要更多的注意资源造成的。

而在本实验中,小提示下的刺激物数目就达到了8个,大提示下为48个,且被试所执行的任务也较难——辨别互不关联的外文字母,完成实验任务所需的注意资源很可能达到并超出了注意容量的限制,随着注意范围的增大,注意资源无法随之进一步增加,从而导致单位面积内“注意密度”的下降,本实验和 Song 实验中 P1 波幅随注意范围的增大而减小很可能反映的是“注意密度”的下降。此处所指的“注意密度”仅适用于注意容量限制出现之后,前文所提到的“级别放大器”也应该是在这个阶段发挥明显作用的。

注意范围的这种等级效应可以借用“变焦镜”的比喻来更好的理解——当任务简单、刺激物数量较少时,需要投入的注意资源也较少;随着注意范围的增大(刺激物数量也随之增加,任务变得相对较难),投入更多的注意资源以确保任务的完成。然而注意资源的投入量或者可利用量是有限的,一旦达到了这个限量,如果注意范围继续增大,则只能以降低注意范围内的“注意密度”为代价,导致了反应时的延长和反应正确率的下降。当然,以上描述的情况并非适用于所有的实验。当刺激物数量以及任务难度随注意范围的增大而增大时(如本课题组的系列实验),该等级效应成立,相关的脑机制有待于日后更为深入的研究。

另外一个有趣的现象是,本实验中靶刺激引起的 P1, N1 波幅在大的注意范围下显著低于中范围和小范围下的波幅。而在 Song<sup>[11,12]</sup> 的实验中,中范围和大范围下波幅之间的差异并不显著,差异出现在小范围与中范围之间。本实验与宋为群实验的不同之处在于,本实验所使用的刺激材料中字母排列的密度在各个注意范围内是相同的,这样做是为了避免了由于字母排列密度的不均匀而可能产生的对注意等级效应的削弱作用,结果 P1, N1 波幅在大、中注意范围下出现了差异,验证了之前关于字母分布密度可能会对注意范围等级效应产生影响的推论。至于为何 P1, N1 波幅在中、小范围下没有产生差异,这很可能是由于实验过程中大、中、小3种范围提示随机呈现而导致被试无法系统地分配相应的注意资源造成的<sup>[19]</sup>。刺激物分布密度以及注

意范围呈现次序对注意范围等级效应的影响还有待更多的实验来验证。

本实验中,注意范围的等级效应在 ERP 成分上表现为 P1, N1 波幅的一致性变化。虽然 P1, N1 效应均反映了视觉注意的早期加工机制,然而 P1 和 N1 成分反映的却并非就是同一个加工过程,在很多实验中观察到了 N1 与 P1 效应不同程度的分离<sup>[2,22,23]</sup>。至今比较一致的看法认为, P1 注意效应反映了对呈现于注意位置上刺激的早期感觉加工的偏向或易化<sup>[22,24]</sup>或是注意资源的分配<sup>[13,19-21]</sup>,而 N1 注意效应则反映了对注意范围内刺激的识别过程<sup>[23]</sup>。在本实验由提示物诱发的 ERP 中, N1 潜伏期随着提示物的增大而缩短,这种差别可能就来自于对提示物本身特征的识别过程。此外,它们分布的脑区也有所不同,最大的 P1 波分布于外侧枕叶, N1 最大波则分布于外侧枕叶和枕-顶区域。而两种成分的波幅均在右半球占优势,这支持视觉空间注意“右半球优势”的观点。

## 参 考 文 献

- 1 Handy TC, Green V, Klein RM, et al. Combined Expectancies: Event-related potentials reveal the early benefits of spatial attention that are obscured by reaction time measures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 2001, 27(2): 303-317
- 2 Mangun GR, Hillyard SA. Modulation of sensory-evoked brain potentials provide evidence for changes in perceptual processing during visual-spatial priming. *Journal of Experimental Psychology*, 1991, 17: 1057-1074
- 3 Handy TC, Mangun GR. Attention and spatial selection: Electrophysiological evidence for modulation by perceptual load. *Perception & Psychophysics*, 2000, 62: 175-186
- 4 Luck SJ, Hillyard SA, Mouloua M, et al. Effects of spatial cuing on luminance detectability: Psychophysical and electrophysiological evidence for early selection. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1994, 20: 887-904
- 5 Posner MI. Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1980, 32: 3-25
- 6 Eriksen CW, St. James JD. Visual attention within an around the field of focal attention: A zoom lens model. *Perception & Psychophysics*, 1986, 40: 225-240
- 7 Greenwood PM, Parasuraman R. Scale of attentional focus in visual search. *Perception & Psychophysics*, 1999, 61: 837-859

- 8 Greenwood PM, Parasuraman R. The scaling of spatial attention in visual search and its modification in healthy aging. *Perception & Psychophysics*, 2004, 66(1): 3—22
- 9 Luo YJ, Greenwood PM, Parasuraman R. Dynamics of the spatial scale of visual attention revealed by brain event-related potentials. *Cognitive Brain Research*, 2001, 12(3): 371—381
- 10 Gao W, Wei J, Peng X, et al. Brain Dynamic mechanisms on the visual attention scale with Chinese characters cues. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(19): 1644—1649
- 11 Song W, Gao Y, Luo YJ. Early scale effect and hemisphere superiority on the visual spatial attention: From the electrophysiological evidence of ERP. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(10): 875—879
- 12 Song W, Li XY, Luo YJ, et al. Brain dynamic mechanisms of scale effect: In visual spatial attention. *Neuroreport*, 2006, 15(17): 1643—1649
- 13 Fu Shimin, Caggiano DM, Greenwood PM, et al. Event-related potentials reveal dissociable mechanisms for orienting and focusing visuospatial attention. *Cognitive Brain Research*, 2005, 23: 341—353
- 14 Muller NG, Bartelt OA, Donner TH, et al. A physiological correlate of the "Zoom Lens" of visual attention. *The Journal of Neuroscience*, 2003, 23: 3561—3565
- 15 Castiello U, Umiltà C. Size of the attentional focus and efficiency of processing. *Acta Psychologica (Amsterdam)*, 1990, 73: 195—205
- 16 Turatto M, Benso F, Facoetti A, et al. Automatic and voluntary focusing of attention. *Perception & Psychophysics*. 2000, 62: 935—952
- 17 Steinmetz PN, Roy A, Fitzgerald PJ, et al. Attention modulates synchronized neuronal firing in primate somatosensory cortex. *Nature*, 2000, 404: 187—190
- 18 Pashler HE. *The Psychology of Attention*. Cambridge, MA: MIT Press. 1998, 218
- 19 Handy TC, Soltani M, Mangun GR. Perceptual load and visuo-cortical processing: Event-Related potentials reveal sensory-level selection. *Psychological Science*, 2001, 12(3): 213—218
- 20 Handy TC. Capacity theory as a model of cortical behavior. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2000, 12: 1066—1069
- 21 Han S, He X, Woods DL. Hierarchical processing and level-repetition effect ad indexed by early brain potentials. *Psychophysiology*, 2001, 37: 817—830
- 22 Luck SJ, Heinze HJ, Mangun GR, et al. Visual event-related potentials index focused attention within bilateral stimulus arrays. II. Functional dissociation of P1 and N1 components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1990, 75: 528—542
- 23 Vogel EK, Luck SJ. The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology*, 2000, 37: 190—203
- 24 Luck SJ, Hillyard SA, Mouloua M, et al. Mechanisms of visual-spatial attention: Resource allocation or uncertainty reduction. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1996, 22: 725—737