

综述

视觉注意的时间结构和动态神经机制

贾建荣^{1,2,3,4,*}, 方方^{1,2,3,4}, 罗欢^{1,2,3,*}

北京大学¹心理与认知科学学院和行为与心理健康北京市重点实验室; ²IDG/麦戈文脑研究所; ³机器感知与智能教育部重点实验室; ⁴北京大学-清华大学生命科学联合中心, 北京 100871

摘要: 把有限的心理和神经资源选择性地根据当前环境或任务来分配给某些而不是所有过程, 是通过注意来完成的。以往的大部分有关视觉注意的研究都集中在注意是如何在空间维度和特征维度进行分配的问题上, 而近来的一系列研究则从时间动态这个角度揭示了视觉注意中的一些新现象和新机制。本文将从以下四个方面综述时间这个基本维度在视觉注意中的表现、作用及其神经机制: (1) 注意对外部刺激动态结构的追踪(注意动态理论), (2) 注意的内秉动态特性, (3) 基于时间组织的多物体加工, (4) 视觉动态和经典注意现象的相互关系。我们认为, 注意的时间组织和动态结构是注意中非常重要和基本的方面, 对其的研究将为注意理论的一些长久以来的争论和难点提供新的角度和解决方案。本文进一步提出了视觉注意研究领域亟待探索和研究的新方向和问题。

关键词: 视觉注意; 时间结构; 时间组织; 神经振荡; 行为振荡; 多物体注意
中图分类号: Q427

Temporal structure and dynamic neural mechanism in visual attention

JIA Jian-Rong^{1,2,3,4,*}, FANG Fang^{1,2,3,4}, LUO Huan^{1,2,3,*}

¹School of Psychological and Cognitive Sciences and Beijing Key Laboratory of Behavior and Mental Health; ²PKU-IDG/McGovern Institute for Brain Research; ³Key Laboratory of Machine Perception (Ministry of Education); ⁴Peking-Tsinghua Center for Life Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: Attention shapes what we see and what we act upon by allocating limited resources to certain parts of visual display in a selective and adaptive manner. While most previous studies in visual attention mainly focused on the attentional distribution over space or features, recent studies have revealed that temporal dynamics also plays a crucial function in visual attention. This paper reviews the representation, function and neural mechanism of temporal dynamics in visual attention from the following four aspects: (1) Tracking dynamic structure of external stimulus by attention; (2) Intrinsic dynamic characteristics of attention; (3) Time-based multiple object representation; (4) Relationship between visual dynamics and classical attentional phenomena. We propose that the dynamic structure and temporal organization are fundamental to visual attention, and the research on it might provide new solutions to many unresolved issues in visual attention research.

Key words: visual attention; temporal structure; temporal organization; neuronal oscillation; behavioral oscillation; multiple object attention

视觉世界是丰富多彩的, 往往同时包含多个物体的位置以进行配合, 也需要同时注意对手的位置和动作以躲开防守。同时, 所有队友和对手的位置都

Received 2018-05-08 Accepted 2018-07-12

Research from the corresponding authors' laboratory was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31522027, 31571115).

*Co-corresponding authors. JIA Jian-Rong: Tel: +86-10-62766975; E-mail: jiajr@pku.edu.cn. LUO Huan: Tel: +86-10-62766975; E-mail: huan.luo@pku.edu.cn

随着时间不断变化的, 运动员需要不断将这些位置信息在注意中更新来进行准确判断。然而, 大脑的处理容量又是有限的^[1,2], 大脑如何在海量信息中选择需要关注的物体并对其变化进行追踪, 这是认知神经科学中最为基本和重要的问题之一。

在早期注意研究中, 研究者将注意比作聚光灯, 处于聚光灯之下的刺激得到更快、更好的认知加工^[3]。Posner 等^[4]通过线索提示的范式发现注意只能增强最大权重线索提示的位置, 因此提出注意只有一个焦点。当面对多个物体时, 注意只能用一种串行的方式在多个物体间进行转移^[5]。Eriksen 等^[6]对单焦点理论进行了改进, 他们使用不同有效性的线索对任务进行提示, 发现被试可以根据有效性来分配注意的比例, 进而提出了注意的变焦透镜模型。另一些研究者则提出注意可以同时包含多个焦点, 即并行加工多个物体。Müller 等^[7]使用稳态视觉诱发脑电 (steady state visual evoked potential, SSVEP) 研究了多个离散位置上的注意效应, 发现注意可以离散地分配在不同的并且不连续的空间位置上。McMains 等^[8]在一项功能磁共振成像研究中使用了类似的实验范式, 发现空间上不连续的刺激能够激活大脑纹状皮层和纹外皮层上不连续的区域, 他们认为这个结果反映了注意能够不连续地分布在视野中的多个位置上。

单焦点模型和多焦点模型都主要关注了注意在空间上的分布, 即注意如何在空间维度上选择物体, 对要注意位置的选择性增强和对非注意位置的选择性抑制, 争论多年仍然没有统一的结论^[9]。描述注意空间选择性的神经模型主要有偏向竞争模型 (biased competition model) 和标准化注意模型 (normalization model)^[10,11]。另外一些学者则从时间这个基本角度开展注意研究, 发现空间注意除了显然依赖于空间这个基本维度外, 实际上还包含着重要的时间上的动态特性^[12-14]。具体来说, 注意过程并不是一个时间上的静态稳定过程, 而是在时间维度上不断地重新分配资源来对多个空间位置进行加工, 并表现出一种节律性、离散型的时间特性。这些研究表明, 除了空间的分配外, 时间动态结构也是注意的内秉特性和一种大脑分配加工资源的重要方式。视觉注意的时间结构、动态特性, 及其神经机制的研究近年来取得一系列重要进展, 也为注意这个古老的课题加入了时间这个基本的信息承载维度。本综述将系统梳理近年来在视觉注意的时间动

态特性上的发现, 并试图把这些发现和经典的注意理论进行融合。

1 注意的时间动态特性

1.1 动态注意理论(dynamic attending theory, DAT)

DAT 指的是注意对于在时间上变化的事件的动态预期和加工^[12]。DAT 最为基本的发现就是注意会对外部事件流的时间结构进行检测和表征进而形成注意在时间上的分配, 通过这种注意资源在时间维度上的重调整来优化对外部事件的加工和预测。例如, 对于一个具有节律信息的外部事件刺激流, 研究者发现注意会被该刺激的时间结构所调制和影响, 进而使得出现在预测时间点的刺激 (相比于其他时间点) 有更好的检测成绩^[12,15]。Hickok 等^[16]则发现注意不仅只是对单个预测时间点的加工增强, 甚至会在之后一段时间内产生一个和刺激节律一致的节奏挟卷, 即检测能力会随着时间出现一个波动, 其波动节律等同于之前刺激流的节律。音乐节拍也起到了注意动态分配的作用, 节拍的时间结构调制和影响了听觉成绩、听觉工作记忆等^[17]。动态注意在听觉中非常普遍, 因为听觉输入 (例如语音、音乐等) 的信息都是在时间上不断展开来传递的, 因而需要注意在时间上进行有效动态的分配来对不断变化的听觉信息进行追踪和处理。除听觉外, 这种动态注意也被发现发生在其他感觉模态^[18], 表明 DAT 是注意中一种普遍的机制和现象。此外, 不同的时间尺度也被发现参与了不同视觉特征的加工^[13]。注意不仅有效灵活地在空间、特征、物体上分布, 也会在时间上根据背景、刺激历史和任务要求重新进行动态分配。

1.2 注意的节奏性加工模式

经典的选择性注意加工要求被试检测一个可能在一段不确定时间出现的目标。神经电生理记录结果显示在这种条件下注意能够增强大脑区域内部 γ 振荡的同步性, 降低低频振荡 (< 17 Hz) 的同步性^[19,20], 调节相关的高级脑区和低级脑区之间的神经振荡同步性, 增强 γ 振荡的同步性^[21]。近年来, 学者通过节奏性刺激模式研究, 提出了一种新的注意加工模式——节奏性加工模式。这种注意加工模式和注意的动态特性相关, 被认为由 δ 频段神经振荡 (< 4 Hz) 活动来产生。例如, Lakatos 等^[22]给猴子同时呈现和播放具有节奏性的视觉-听觉刺激流, 视觉和听觉刺激的节奏性呈现出反相的关系 (视觉和听

觉刺激交替呈现), 在不同的试次中让猴子分别选择性地注意视觉或者听觉刺激, 结果显示视觉和听觉的感觉皮层局部场电位的神经振荡都能够和注意的刺激节奏保持一致, 即呈现出一种跨模态的时间动态注意调制。他们进而发现这种时间上的节奏性增强了注意刺激的神经响应, 降低了非注意刺激的神经响应, 并且与猴子的按键反应时密切相关。Lakatos 等^[22]由此提出, 大脑存在两种加工模式, 一种是节奏性加工模式, 另一种是持续加工模式。当大脑觉察到环境中的刺激存在节奏性时间规律时, 它会切换到节奏性加工模式, 在这种模式下, δ 频段的神经振荡会增强, 同时 γ 频段的振荡幅度会受到 δ 频段振荡相位的调制。大脑通过这种把脑内神经振荡和外界要注意的节律信息对准的方式, 使得和注意节奏吻合的刺激流恰好落入神经振荡活动的兴奋相位范围, 因而增强对它们的响应; 同时, 和注意节奏不吻合的刺激由于会落入抑制相位, 因而反应减弱^[14]。节奏性加工模式是大脑加工灵活性的体现, 当大脑检测到环境中的刺激具有一定的时间规律的时候, 就会进行相应的调整优化, 通过挟卷大脑的振荡节律到刺激的节律使得神经元激活性最高的时间用来加工注意选择的刺激, 同时将不被注意的刺激排列到神经元激活性较低的时间进行抑制^[23]。这种节奏性的加工模式既是一种有效的注意控制机制, 同时也能够节省加工所消耗的认知资源。另一方面, 当环境中的刺激流没有明确的时间结构和预测性时(例如被试不能预测刺激在什么时间出现时), 大脑就会切换到持续加工模式, 持续选择性加工即将到来的外界刺激。在这种模式下, δ 频段的神经振荡就会被抑制, 同时伴随着持续性的 γ 频段振荡幅度的增强。

1.3 注意的内秉动态特性

在前述的注意动态理论和节奏性加工模式理论中, 注意在时间上的分配都依赖于外部节律性的刺激对于内生神经振荡的节奏挟卷, 即大脑活动通过去探测外部世界的时间结构和规律来相应改变注意在时间上的动态分布。因而, 当外部刺激没有明显的节律时, 注意的节奏性采样效应也就相应消失了, 变成了持续性的加工模式。可以说, 这些理论并没有支持注意可能具有内秉的时间动态特性, 即并不依赖于外界环境或刺激的动态结构。

另一方面, VanRullen 等^[24]早在十几年前就提出视知觉可能本身就是离散过程的观点。他们列举

了诸多知觉过程离散化的证据以及神经振荡尤其是 α 振荡在知觉离散化中的作用。在此之后, 越来越多的研究为知觉的离散加工提供了证据, 并提示某些节律的脑神经振荡活动可能是这种离散知觉的神经基础^[13]。Busch 等^[25]使用感觉阈限附近的视觉刺激, 通过分析相应的 EEG 信号发现对这些视觉刺激的探测和刺激出现之前的大脑 α 频段神经活动的相位密切相关, 即在反应正确和反应错误的试次中, 神经振荡活动处于 θ 和 α 频段的不同的相位上。Busch 等^[26]的研究进一步显示, 即使当要求被试将注意持续集中在一个物体上, 被试的注意成绩仍然随着刺激呈现前的 7 Hz 神经振荡的相位发生变化。同时, 刺激呈现前的 7 Hz 神经振荡相位也影响了刺激引起的神经响应大小。

这种刺激前神经振荡活动的相位对于知觉反应成绩的影响被大量的研究所验证, 这些研究所采用的认知任务包括工作记忆^[27]、经颅磁刺激 (transcranial magnetic stimulation, TMS) 光幻视^[28]、眼跳^[29]等。这些研究表明相位调制集中在 5~15 Hz 的频段, 主要是 7 Hz 的 θ 频段^[25]和 11 Hz 的 α 频段^[30]。 θ 频段的相位调制主要集中在额叶的电极上, 与视觉注意密切相关, α 频段的相位调制主要发生在枕叶的电极上, 与视知觉中的感觉成分相关^[13]。这种相位调制说明, 对于某些视知觉来说, 神经振荡存在“好”的相位, 在这种相位上, 刺激能够引起较大的神经响应, 产生较好的反应成绩; 也存在“差”的相位, 在这种相位上, 刺激引起的神经响应受到抑制, 反应成绩也比较差。

除了神经振荡相位, 神经振荡频率的变化也会 对知觉和注意行为产生影响。神经振荡相位反映的是和离散节律有关的时间信息, 而神经振荡频率的改变意味着注意的加工节奏发生了变化。例如频率增高代表加工速度变快, 时间窗口变窄, 而频率降低则代表加工速度变慢, 时间窗口变长, 这些变化将会相应导致知觉系统的时间分辨率升高或者降低。有研究显示, α 频段神经振荡的峰值频率会影响两个序列呈现的闪光刺激同时性的判断^[31], 低的峰值频率对应于低的时间分辨率, 两个序列闪光刺激因此有更高的可能被判断为同时呈现(因为在一个时间窗内); 高的峰值频率对应于高的时间分辨率, 因此两个序列呈现的闪光刺激便有更高的可能分别出现在不同的时间窗内因而被判断为两个离散事件。最后, 每个人的相应频率, 即使在同一频段,

也并不是完全相同和固定不变的, 大脑可以根据不同的任务要求来改变这个频率峰值进而调节时间窗口的分辨率^[32]。Wutz 等^[32]发现当任务要求在时间上对信息整合时, α 振荡的频率峰值下降, 使得有更长的加工窗口来整合信息。当任务要求在时间上对信息进行分割时, α 振荡的频率峰值升高, 使得加工窗口收窄, 从而提高时间分辨率。

这些研究结果都进一步支持了注意的动态内秉特性, 即支持注意的动态特性并不完全依赖于外界刺激的时间结构。即使在一个没有包含动态特性的视知觉和注意过程中, 知觉和注意加工依然是一个工作在 θ 和 α 频段的离散过程。大脑内生的神经振荡的相位和频率都对视知觉和注意产生影响。

2 基于时间动态的多物体加工

在注意具有内秉动态特性的基础上, 近来一些研究进一步提出注意通过时间组织的方式对多物体进行资源分配和加工。既然注意能够在时间上进行灵活分配并具有节律性, 那么一个可能的假设是注意可通过在时间上有节奏地和灵活地分配资源来达到对多个物体的加工和表征。此外, 神经振荡在以往很多的研究中都被发现和注意行为有关, 皮层-皮层和丘脑-皮层的动态性功能连接是注意选择的神经基础^[14, 33]。这些神经科学的发现提示了基于时间动态的多物体加工的可能神经基础。

2.1 基于时间的多物体加工的行为证据(“行为振荡”)

近来有研究者通过采用高时间分辨率行为采样的方式对经典的认知行为成绩(例如正确率、反应时等)进行新的测量和探索, 在空间注意、物体注意行为中发现了节律性波动(“行为振荡”)。例如, 在 Landau 等^[34]的研究中, 被试需要同时注意两个呈现在注视点左侧和右侧的光栅刺激, 探测一个可能出现在左侧或者右侧光栅上的目标刺激。在目标刺激出现之前, 使用一个闪光线索将被试的注意吸引到左侧或者右侧的光栅上, 并且该闪光线索和之后目标刺激的出现位置没有任何关系。接着, 目标刺激呈现在闪光线索出现前的 750 ms 到出现后的 1 000 ms 这段时间的随机间隔上, 以 16.7 ms 为步长, 即共有目标刺激与闪光线索之间的 105 个时间间隔(stimulus onset asynchrony, SOA), 对应于 60 Hz 的行为采样率。设置该闪光线索的主要目的是对可能存在的行为动态进行时间上的复位和重置。通过这

种方式, 他们发现了目标探测正确率在线索出现后的时间上的变化模式, 并进一步比较两个位置之间的时间模式的关系。比较结果显示, 当刺激呈现在右侧视野时注意成绩呈现出一个 4 Hz 的行为振荡, 而当刺激呈现在左侧视野时, 注意成绩则呈现出一个 6~10 Hz 的振荡模式。此外, 最为重要的是, 他们发现两个空间位置的行为振荡呈现出一个此消彼长的交替模式, 反映在两个位置行为振荡之间存在近 180° 的相位差。Landau 等采用上述的新方法开创性地发现了视觉注意行为中的节律现象, 并且进一步发现了注意对两个空间位置(也可以认为是两个固定空间位置的物体)的节律性交替加工过程, 揭示了基于时间组织的多空间位置加工机制。

Fiebelkorn 等^[35]使用高时间分辨行为采样的方法研究了空间注意和客体注意的时间结构。他们使用经典的研究客体注意的双矩形范式^[36], 给被试呈现横或者竖的两个矩形, 然后使用一个空间线索提示其中一个矩形的一侧, 在随后的 300~1 100 ms 的随机时间在线索提示的位置, 或者与线索同一个矩形的另一侧(同客体位置), 又或者另一个矩形但是与同客体位置相等距离的位置上呈现目标刺激, 以 10 ms 的步长计算被试在每个时间间隔上的目标探测率。结果显示, 在同一个客体内, 注意以 8 Hz 的频率在两个空间位置之间切换, 而在不同的客体之间, 注意以 4 Hz 的频率在采样。他们的研究把以往空间注意研究拓展到物体注意上, 提示注意可能用不同的节奏采样物体和物体内部的不同空间位置, 揭示了一种基于不同节奏的层级式注意加工模式。

Song 等^[37]进一步采用改造后的外源性注意提示的范式结合高时间分辨行为采样的方法研究了空间注意在时间上的动态属性。不同于以往研究, 他们主要考察了被试在每个 SOA 上的反应时(reaction time)而不是正确率。结果显示, 注意在时间上的动态过程包含两个成分。一个是经典的注意捕获-返回抑制过程, 表现为注意时间模式中的慢变化成分。具体来说, 在线索提示过的位置上, 反应时在线索后的 400 ms 之内是短于线索没有提示的位置的(“注意捕获”), 但是之后线索效应发生了反转, 线索提示位置的反应时比没有提示的位置要长(“返回抑制”), 这和经典的空间预提示实验结果一致。比较有趣的是, 当把这种慢变化的经典模式从行为结果中去掉后, 他们通过分析行为时间波形的时频成分发现了一个新的动态成分, 即注意在两个空间

位置的节律性切换过程。具体来说，首先，他们在反应时的结果中观察到 α 脉冲(8~10 Hz)成分，这是首次在人类行为中看到了以往只在脑神经活动中观察到的 α -band振荡。其次，他们的行为振荡中的 α -band成分并不是反映注意的加工，反而是注意的抑制作用，这也和以往脑电实验中所揭示的 α -band神经振荡主要体现在抑制作用的结果完全一致^[38]。最后，他们发现 α -band行为振荡以大约3~5 Hz的 θ -band节律在两个空间位置之间进行节奏性交替，这又和Landau等^[34]发现的行为振荡结果一致。这一结果提供了全新的证据，表明大脑可能是通过切换抑制性 α -band活动来对两个空间位置进行节律性的交替加工。

后续很多学者都进一步采用这种高时间分辨率行为采样方式，发现除了多物体同时注意，行为振荡也会发生在多预期编码^[39]、双眼竞争^[40]、视觉运动整合^[41]、双耳分听^[42]、物体识别^[43]等认知任务中。值得注意的是，即使在浏览静止的场景时，人的眼睛还是以每秒3~4次的眼跳在环境中选择信息，将选择的信息带到视网膜最敏感的部位进行精细加工^[44]。上述一系列行为振荡的研究则表明，这种周期性的对于不同空间位置的信息选择即使在没有眼跳时也依然存在。大脑通过内隐注意(covert attention)对空间中的不同位置进行序列和节奏性采样^[45]。事实上，注意不仅对于多个物体是以一种在时间上序列采样的方式在加工，即使只有一个物体注意也是以7 Hz的频率在进行采样加工的^[46]。

值得注意的是，这些行为振荡研究都建立在这样一个假设上，即认为脑内部的神经振荡活动会周期性地调制和影响知觉和注意加工，进而理论上应该可以表现在行为成绩上。但是如果没有很好的实验控制，实际上在平常的行为记录中是很难探测到这种现象的。因此，上述研究采用的一个共同方法是通过一个外源性线索来重置(phase resetting)背景神经振荡活动，把该时间点作为标准参考时间点进而测量之后每个时刻的行为成绩。理论上，如果神经振荡确实对多个物体进行一种节奏性加工的话，通过这种线索重置的方式将可以把每次测量的行为成绩在时间上对齐进而来验证这种假设。最后，需要指出的是，这种采用高时间分辨行为采样方法的研究不同于采用DAT和节奏性注意加工方法的研究，后者是通过用一种包含节律性外界刺激的方式来探测注意成绩的重新动态分配，即完全依赖于外

界刺激的动态结构。行为振荡研究方法并没有包含特定频率的外界刺激，而是采用经典实验范式结合高时间精度采样方法，因而观察到的注意行为的节律特性并不取决于外部刺激的时间特性，而是反映了大脑内秉的节律特性。这一系列行为振荡的结果为注意的动态特性，特别是节律性的存在，提供了非常有力的实验证据。

2.2 基于时间的多物体加工的神经机制

行为振荡的研究结果提供了证据支持注意对多个空间位置、特征和物体的节律性加工模式，然而这里面依然存在一些混淆因素。首先，行为振荡的研究依赖于特定的实验范式，即采用外源性线索将注意重置，从而将这个重置时刻作为时间参考，在随后的时间上进行密集行为采样来反映注意在时间上的动态变化。但一个可能的问题是，这些在多物体间的节奏性加工现象可能完全是由于这种外源性的线索所引起的。比如，注意也许是同时并行分配在两个空间位置上的，但是线索把注意强行地捕捉到一个位置，进而引起了之后注意在两个位置之间的节律性的切换波动。换句话说，是这个线索暂时地扰动了空间注意的分配，而不是基于时间分配资源的多物体加工。为了进一步研究这种可能性，Landau等^[47]采用脑磁图记录结合持续性注意范式记录同时注意两个空间位置的人脑活动，他们将 γ 振荡作为注意加工的神经指标，将目标刺激对侧大脑半球与同侧大脑半球的 γ 振荡能量之差在时间上的波动作为注意动态变化的指标，实验主要分析了目标出现前0.5 s的神经信号，结果显示在目标出现前对目标正确反应和错误反应试次的神经指标呈现反相的4 Hz振荡，即目标出现前的4 Hz神经振荡的相位决定了反应的正确与否。脑磁图溯源分析结果显示，这个4 Hz神经振荡主要来自于大脑的距状沟，舌回和楔前回。他们的研究表明，注意在时间上的周期性采样是一个持续性的内在过程，而并不是由于线索引起的，因为这里没有线索进行重置。此外，Dugué等^[48]在一个注意转移范式中使用TMS在刺激呈现后的不同时间间隔上刺激被试的低级视觉皮层(V1/V2)，发现当在无效线索条件下即需要进行视觉转移的条件下，被试的注意以5 Hz的节奏进行转移，并且低级视觉皮层在这种节奏性转移中发挥了作用。

尽管Landau等^[47]的研究结果证明注意的节奏性振荡不是由于线索引起的，然而仍然存在其他几

个不清楚的关键点。首先，他们研究的是刺激出现前的神经活动，类似于 VanRullen 等^[25, 26]的一系列研究，仅能表明背景神经活动可能通过这样一个节律性状态的变化来影响之后的注意加工模式。但是，注意在多物体加工过程中的节奏性采样的最直接的神经证据仍然缺少。其次，以往的实验任务都是要求被试把注意同时分配在两个空间位置上，一个随之而来的问题是，这种基于时间节律的多物体加工机制是否只出现在这种注意情况下而不能泛化为一般性的注意机制呢？比如，在经典的选择性注意中，被试被要求注意其中一个而忽略另一个，在这种持续性选择注意过程中，这种节律性加工是不是就不存在呢？最后，如果注意是通过动态时间分配的方式加工多物体，是否可以通过改变注意的空间分配相应地改变时间分配的模式呢？这种基于时间组织的加工是否具有一定的灵活性呢？Jia 等^[49]通过结合脑电记录和经典的选择性注意范式来研究这一问题。首先，不同于以往的研究，他们采用了一种时间响应函数的方法从脑电活动中分离和抽取出特异于每个物体的相应神经活动。其次，他们通过改变线索有效性来改变注意的空间分布，分为三个水平，100% 有效性（目标 100% 可能性出现在一个物体上，因而需要完全注意一个物体而忽略另一个），75% 有效性（目标 75% 可能出现在一个物体上，25% 可能性出现在另一个上），50% 有效性（目标出现在两个物体上的几率相等）。他们进而比较在不同空间注意分布情况下注意的物体和非注意物体的响应的差别，结果显示 α -band 活动体现在注意调控中，并表现出一种抑制特性，这和以往的结果^[38]完全一致。在 100% 有效性的情况下，即经典的选择性注意范式中，他们发现注意并不像以往所发现的稳定地停留在被注意的物体上；相反，注意在被注意物体上停留了大约 200 ms 后就会出现一个转移到非注意物体的反转趋势，即表现出一种时间上的序列加工模式。当注意空间分配变化时，这种序列加工模式也相应发生变化，表现在 75% 线索有效时（非注意位置也需要分配一定的注意资源，虽然少于注意位置），这种物体间的序列转移变得更为明显和显著；而当线索有效性为 50%（两个位置需要同等注意资源）时，注意呈现出一种更加均衡和持续的在时间上节奏性的切换模式，类似于行为振荡中的模式^[37]（图 1）。此外，他们通过采用多物体跟踪范式进一步考察了这种序列加工模式是否只

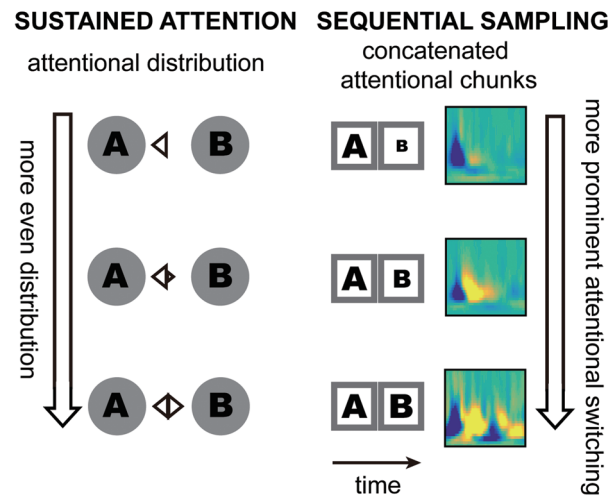


图 1. 持续性注意任务中灵活的序列注意采样

Fig. 1. Flexible sequential sampling during sustained attention task. The left column is the sustained attention task. In the first row, the subjects were asked to attend the cued object, while completely ignoring the other object; in the second row, 75% targets were presented in the cued object, another 25% were presented in the uncued object; in the last row, the subjects were asked to attend the two objects with equal effort. The middle column is an illustration of the attentional behavior. When a subject is asked to pay attention to an object with 100% cue validity, he/she will first sample the cued object and then rarely switch to the uncued object; when the attention is required to be more evenly distributed on the two objects, the two objects will be sequentially sampled with equal magnitude. The right column is the experimental data^[49], and sequential sampling under different conditions were shown in the α -band power of the temporal response function.

发生在空间注意上（固定空间位置的多物体），结果显示这种时间上的注意序列加工模式在物体空间位置随机移动时依然存在，表明这种机制可以拓展到基于物体的注意上。Jia 等的研究首次提供了直接的多物体序列注意采样的神经证据，表明注意采用一种基于时间的动态序列采样方式进行多物体的表征和加工。该时间动态加工模式会受任务调制，当注意被要求更为均匀地分配在两个空间位置上时，该序列模式更为明显和持久。即使在完全注意一个位置而忽略其他位置的任务条件下，注意仍然呈现出一个动态的序列加工模式，为非注意的空间位置留下了一定时间窗口内的注意资源，表明了这种基于时间组织的多物体加工在注意机制中的一般性。一个可能的解释是，这种对于多物体的加工是

大脑内秉的特性，大脑需要不断地分配资源给和任务无直接关系的物体，来保持对外界信息的一种表征更新。最后，Jia 等的研究结果证明了注意具有动态性和离散性，不同于以往认为注意会持续和连续地停留在任务所要求的被注意物体上，他们的结果表明注意可能是由大约 200~300 ms 的注意时间组块联结而成，多个物体被灵活地分配在这些组块上被加工。

3 基于时间的多物体加工和经典注意现象的关系

经典的注意范式也有一些和时间有关的现象，我们在下面进行梳理和讨论。

3.1 视觉搜索

视觉搜索是研究视觉注意的常见范式，也和多物体注意密切相关。研究表明，注意的周期性振荡会直接反映在视觉搜索中。Buschman 等^[50]在自下而上和自上而下的视觉搜索任务中，同时记录猴子的额眼区和背外侧前额叶的神经活动，结果显示在自上而下的任务中猴子自动采取了序列搜索的策略，在空间位置上逐个进行搜索查找目标。而在自下而上的任务中，猴子并没有采取这种序列搜索的策略。同时，额眼区的神经元活动能够反映这种序列搜索，对不同空间位置偏好调谐的神经元在时间上序列激活。这种结果也为经典的视觉并行搜索和串行搜索提供了直接的神经证据^[51]。

Dugué 等^[52]比较了在复杂（序列）视觉搜索中正确搜索和错误搜索试次的脑电反应，结果显示，正确搜索和错误搜索试次的差别反映在刺激呈现后的 6 Hz 神经振荡的振幅和相位锁定上，也反映在刺激呈现之前的 6 Hz 神经振荡的相位上（正确和错误的试次表现出相反的相位）。刺激呈现后的不同时间间隔上对枕叶皮层施加 TMS 干扰，发现干扰效应也呈现出 6 Hz 振荡。这些结果说明，视觉搜索本身是周期性的，受刺激之前神经振荡 6 Hz 相位的调节，也表现为刺激呈现之后 6 Hz 神经振荡的振幅和相位锁定。进一步，Dugué 等^[53]将心理物理学数据拟合数学模型的方法，结果显示在视觉搜索任务中，注意在空间上并不是均匀分布的，而是离散分布的，在特定的时刻只能注意一个或者一组物体。在时间上，注意分布也不是持续的，而是以 7 Hz 在发生周期性变化。这充分说明了在视觉搜索中，注意振荡同样是一种普遍存在。

3.2 “自上而下”和“自下而上”注意

在“自下而上”注意中，低级视觉特征会整合成一个显著性地图，在这个显著性地图中采用 Winner-Take-All 的机制选出了最凸显的位置或物体进行中央执行加工，同时中央执行系统进而会返回一个抑制信号来抑制当前最显著的信息表征，使得下一个最显著的位置或物体能够有机会凸显，并被 Winner-Take-All 机制选出来送到中央执行系统进行下一步加工^[54]。通过这种机制才能实现有效的注意转移，从而避免注意锁定在最显著的刺激位置上。以往的研究表明这种周期性的注意转移^[54]也表现在眼跳模式上^[55,56]。Jia 等^[49]采用了一种“自上而下”的注意范式，仍然发现这种注意在不同空间位置间的序列转移。这些结果表明时间上的序列加工可能是注意加工的内在机制，而并不是只在自下而上的注意过程中起作用。无论是持续性的“自上而下”注意，还是“自下而上”注意，都可能存在这一基于时间组织的序列注意加工。

3.3 注意节奏与返回抑制

注意振荡反映了注意在多个物体之间的序列性切换，特别是基于抑制性 α 活动的轮流抑制现象^[37,49]和在以往空间提示范式中发现的返回抑制效应（inhibition of return）^[57]非常相关。返回抑制反映的是在外源性线索提示过的位置在线索与目标的时间间隔较短（200 ms 以内）时呈现出正性的线索效应，在时间间隔较长时呈现出负性的线索效应。这种线索效应的反转揭示了注意在线索提示位置短暂停留然后撤回，类似于行为振荡实验中发现的序列性注意切换跳转。Song 等^[37]使用外源性线索的研究范式则揭示了经典的返回抑制和注意振荡是同时存在的两个成分。我们认为注意节奏性振荡和返回抑制是两个不同的成分，首先，返回抑制主要体现在慢变化行为过程，而行为振荡则是一个快过程；其次，进一步的相关分析显示两者之间不存在显著相关，表明是两个独立过程；最后，返回抑制是一个一次性的过程，而注意振荡则呈现了来回两次以上的节奏性加工模式。总之，返回抑制的效应主要可能是由外源性线索引起的，而基于节奏性产生抑制性 α 注意振荡过程则可能反映大脑加工多个物体的一种内生的动态表征机制，因而独立于外源性线索。近期的脑成像结果也进一步支持了这种观点^[49]。

3.4 注意节律在神经活动中的体现

注意的节奏性不仅体现在经典的注意任务中，

也体现在经典的动物电生理记录中。颞下皮层的神经元对特定物体有一定选择性, 当有物体刺激呈现在神经元的感受野时, 神经元开始发放, 当呈现在感受野之外时, 神经元不发放。然而, 当两个刺激同时呈现在神经元的感受野之内和之外时, 神经元的发放呈现出序列的一个个分离的脉冲, 大约 5 Hz 的节奏性^[58]。神经元首先对感受野内的刺激开始反应, 但是很快会受到来自其他对于刺激不反应的神经元的抑制信号, 使得神经元的发放受到抑制, 然后反应从抑制中恢复, 接着再被抑制。这种神经元之间的内生的相互抑制是受到 GABA 能中间神经元的调节的。这种周期性的发放依赖于猴子对于感受野之外刺激的注意水平, 说明这种表征两个图片刺激的神经元之间的竞争与注意在两个刺激之间的选择有关。此外, Kienitz 等^[59]直接在猴子 V4 神经元感受野的激活性中心和抑制性周围同时呈现刺激, 引起 3~6 Hz 的神经振荡, 同时猴子在分布式注意任务中的反应时也呈现出同样的周期性振荡, 并且反应时的振荡是与神经振荡锁定的。这说明周期性的神经振荡和注意采样是由于皮层神经元的感受野交互引起的。

4 结语

本文综述了视觉注意的动态时间结构, 在不同的注意过程特别是多物体加工中的基本作用及其神经机制。注意的时间动态结构是近来研究的新方向, 一系列实验证据都支持了注意的动态内秉特性: 注意在时间上进行动态分配来对外界刺激流进行预测和优化加工; 注意能够抽取出外界环境的时间动态结构来调整注意的时间展开; 注意本身具有动态性和离散性, 由一系列离散的注意时间组块构成; 多物体加工通过注意时间组块的动态灵活分配来实现; 基于时间组织的注意发生在不同的注意过程中, 包括空间注意、特征注意和物体注意, 也反映在不同的注意调控上, 包括自下而上和自上而下注意。

我们认为, 动态结构和时间组织是注意中非常重要但并没有被广泛研究的方面, 也将为注意空间分布的理论争论和难点提供新的角度和可行的解决方案。视觉注意动态结构的发现表明大脑采用了一种“时分复用”的方式来动态调配和协调注意资源。视觉场景刺激中的高维度(空间维度叠加时间维度)信息通过在大脑活动自身的时间框架(基于不同频率的神经振荡)下进行重组织, 分割成大约 200~

500 ms 的时间组块进行重新的分配和整合来达到对外部世界的具有独特“大脑视角”的动态表征。以往的研究多集中在大脑对于外部世界的选择性加工, 例如哪些脑区对哪种刺激有更强的表征和反应, 哪些神经元编码哪种特征, 而很少从动态和大脑内部时间架构的方式来研究这个问题, 而时间上的动态特性, 包括时间分割、时间节律、时间融合, 结合脑神经活动中广泛发现的神经振荡现象, 将为包括注意在内的各种认知过程的研究提供一个全新的视角。

现有的研究仍有很多不足之处, 亟待新的探索 and 发现。例如, 现在的大部分研究由于技术限制都主要是集中在两个物体上, 而没有真正的体现多物体; 大部分研究没有对任务难度进行精确控制, 因而不清楚近期观察到的动态注意现象是否由于难度的原因造成; 这种注意节奏与眼动和微眼动节奏间的可能关系; 节律性注意所关联的神经网络动态; 多物体节律性加工在其他认知过程中的表现, 例如音乐、语言、记忆、认知控制、决策和跨模态融合等等。通过设计巧妙的认知心理学范式结合新颖的脑成像手段和计算模型, 未来研究将有望解决这些问题, 开辟出新的方向。

参考文献

- 1 Ester EF, Fukuda K, May LM, Vogel EK, Awh E. Evidence for a fixed capacity limit in attending multiple locations. *Cogn Affect Behav Neurosci* 2014; 14(1): 62–77.
- 2 Pylyshyn ZW, Storm RW. Tracking multiple independent targets: Evidence for a parallel tracking mechanism. *Spat Vis* 1988; 3(3): 179–197.
- 3 Carrasco M. Visual attention: the past 25 years. *Vision Res* 2011; 51(13): 1484–1525.
- 4 Posner MI, Snyder CR, Davidson BJ. Attention and the detection of signals. *J Exp Psychol Gen* 1980; 109(2): 160–174.
- 5 Posner MI. Orienting of attention. *Q J Exp Psychol* 1980; 32(1): 3–25.
- 6 Eriksen CW, Yeh Y. Allocation of attention in the visual field. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1985; 11(5): 583–597.
- 7 Müller MM, Malinowski P, Gruber T, Hillyard SA. Sustained division of the attentional spotlight. *Nature* 2003; 424(6946): 309–312.
- 8 McMains SA, Somers DC. Multiple spotlights of attentional selection in human visual cortex. *Neuron* 2004; 42(4): 677–686.

- 9 Jans B, Peters JC, De Weerd P. Visual spatial attention to multiple locations at once: The jury is still out. *Psychol Rev* 2010; 117(2): 637–682.
- 10 Desimone R, Duncan J. Neural mechanisms of selective visual attention. *Annu Rev Neurosci* 1995; 18: 193–222.
- 11 Reynolds JH, Heeger DJ. The normalization model of attention. *Neuron* 2009; 61: 168–185.
- 12 Large EW, Jones MR. The dynamics of attending: How people track time-varying events. *Psychol Rev* 1999; 106(1): 119–159.
- 13 VanRullen R. Perceptual cycles. *Trends Cogn Sci* 2016; 20(10): 723–735.
- 14 Schroeder CE, Lakatos P. Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection. *Trends Neurosci* 2009; 32(1): 9–18.
- 15 Jones MR, Boltz M. Dynamic attending and responses to time. *Psychol Rev* 1989; 96(3): 459–491.
- 16 Hickok G, Farahbod H, Saberi K. The rhythm of perception: entrainment to acoustic rhythms induces subsequent perceptual oscillation. *Psychol Sci* 2015; 26(7): 1006–1013.
- 17 Patel AD, Iversen JR. The evolutionary neuroscience of musical beat perception: the Action Simulation for Auditory Prediction (ASAP) hypothesis. *Front Syst Neurosci* 2014; 8: 57.
- 18 Spaak E, de Lange FP, Jensen O. Local entrainment of alpha oscillations by visual stimuli causes cyclic modulation of perception. *J Neurosci* 2014; 34(10): 3536–3544.
- 19 Fries P, Reynolds JH, Rorie AE, Desimone R. Modulation of oscillatory neuronal synchronization by selective visual attention. *Science* 2001; 291(5508): 1560–1563.
- 20 Womelsdorf T, Fries P, Mitra PP, Desimone R. Gamma-band synchronization in visual cortex predicts speed of change detection. *Nature* 2006; 439(7077): 733–736.
- 21 Gregoriou GG, Gotts SJ, Zhou H, Desimone R. High-frequency, long-range coupling between prefrontal and visual cortex during attention. *Science* 2009; 324(5931): 1207–1210.
- 22 Lakatos P, Karmos G, Mehta AD, Ulbert I, Schroeder CE. Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *Science* 2008; 320(5872): 110–113.
- 23 Lakatos P, Barczak A, Neymotin SA, McGinnis T, Ross D, Javitt DC, O’Connell MN. Global dynamics of selective attention and its lapses in primary auditory cortex. *Nat Neurosci* 2016; 19(12): 1707–1717.
- 24 VanRullen R, Koch C. Is perception discrete or continuous? *Trends Cogn Sci* 2003; 7(5): 207–213.
- 25 Busch NA, Dubois J, VanRullen R. The phase of ongoing EEG oscillations predicts visual perception. *J Neurosci* 2009; 29(24): 7869–7876.
- 26 Busch NA, VanRullen R. Spontaneous EEG oscillations reveal periodic sampling of visual attention. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2010; 107(37): 16048–16053.
- 27 Myers NE, Stokes MG, Walther L, Nobre AC. Oscillatory brain state predicts variability in working memory. *J Neurosci* 2014; 34(23): 7735–7743.
- 28 Dugué L, Marque P, VanRullen R. The phase of ongoing oscillations mediates the causal relation between brain excitation and visual perception. *J Neurosci* 2011; 31(33): 11889–11893.
- 29 Drewes J, VanRullen R. This is the rhythm of your eyes: The phase of ongoing electroencephalogram oscillations modulates saccadic reaction time. *J Neurosci* 2011; 31(12): 4698–4708.
- 30 Mathewson KE, Gratton G, Fabiani M, Beck DM, Ro T. To see or not to see: Prestimulus phase predicts visual awareness. *J Neurosci* 2009; 29(9): 2725–2732.
- 31 Samaha J, Postle BR. The speed of alpha-band oscillations predicts the temporal resolution of visual perception. *Curr Biol* 2015; 25(22): 2985–2990.
- 32 Wutz A, Melcher D, Samaha J. Frequency modulation of neural oscillations according to visual task demands. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2018; 115(6): 1346–1351.
- 33 Buschman TJ, Kastner S. From behavior to neural dynamics: An integrated theory of attention. *Neuron* 2015; 88(1): 127–144.
- 34 Landau AN, Fries P. Attention samples stimuli rhythmically. *Curr Biol* 2012; 22(11): 1000–1004.
- 35 Fiebelkorn IC, Saalman YB, Kastner S. Rhythmic sampling within and between objects despite sustained attention at a cued location. *Curr Biol* 2013; 23(24): 2553–2558.
- 36 Lamy D, Egeth H. Object-based selection: the role of attentional shifts. *Percept Psychophys* 2002; 64: 52–66.
- 37 Song K, Meng M, Chen L, Zhou K, Luo H. Behavioral oscillations in attention: Rhythmic α pulses mediated through θ band. *J Neurosci* 2014; 34(14): 4837–4844.
- 38 Klimesch W, Sauseng P, Hanslmayr S. EEG alpha oscillations: The inhibition-timing hypothesis. *Brain Res Rev* 2007; 53(1): 63–88.
- 39 Huang Y, Chen L, Luo H. Behavioral oscillation in priming: Competing perceptual predictions conveyed in alternating theta-band rhythms. *J Neurosci* 2015; 35(6): 2830–2837.
- 40 Davidson MJ, Alais D, van Boxtel JJA, Tsuchiya N. Attention periodically samples competing stimuli during binocular rivalry. *Elife* 2017. pii: e40868.
- 41 Tomassini A, Spinelli D, Jacono M, Sandini G, Morrone MC. Rhythmic oscillations of visual contrast sensitivity synchronized with action. *J Neurosci* 2015; 35(18): 7019–7029.
- 42 Ho HT, Leung J, Burr DC, Alais D, Morrone MC. Auditory

- sensitivity and decision criteria oscillate at different frequencies separately for the two ears. *Curr Biol* 2017; 27(23): 3643–3649.e3.
- 43 Wang Y, Luo H. Behavioral oscillation in face priming: Prediction about face identity is updated at a theta-band rhythm. *Prog Brain Res* 2017; 236: 211–224.
- 44 Irwin D, Gordon R. Eye movements, attention and trans-saccadic memory. *Vis Cogn* 1998; 5(1–2): 127–155.
- 45 VanRullen R. Visual attention: A rhythmic process? *Curr Biol* 2013; 23(24): R1110–R1112.
- 46 VanRullen R, Carlson T, Cavanagh P. The blinking spotlight of attention. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2007; 104(49): 19204–19209.
- 47 Landau AN, Schreyer HM, van Pelt S, Fries P. Distributed attention is implemented through theta-rhythmic gamma modulation. *Curr Biol* 2015; 25(17): 2332–2337.
- 48 Dugué L, Roberts M, Carrasco M. Attention reorients periodically. *Curr Biol* 2016; 26(12): 1595–1601.
- 49 Jia J, Liu L, Fang F, Luo H. Sequential sampling of visual objects during sustained attention. *PLoS Biol* 2017; 15(6): e2001903.
- 50 Buschman TJ, Miller EK. Serial, covert shifts of attention during visual search are reflected by the frontal eye fields and correlated with population oscillations. *Neuron* 2009; 63(3): 386–396.
- 51 Treisman AM, Gelade G. A feature-integration theory of attention. *Cognit Psychol* 1980; 12: 97–136.
- 52 Dugué L, Marque P, VanRullen R. Theta oscillations modulate late attentional search performance periodically. *J Cogn Neurosci* 2015; 27(5): 945–958.
- 53 Dugué L, McLelland D, Lajous M, VanRullen R. Attention searches nonuniformly in space and in time. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2015; 112(49): 15214–15219.
- 54 Koch C, Ullman S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry. *Hum Neurobiol* 1985; 4(4): 219–227.
- 55 Foulsham T, Underwood G. What can saliency models predict about eye movements? Spatial and sequential aspects of fixations during encoding and recognition. *J Vis* 2008; 8(2): 6.1–17.
- 56 Wang W, Chen C, Wang Y, Jiang T, Fang F, Yao Y. Simulating human saccadic scanpaths on natural images. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*; Colorado, USA, 2011.
- 57 Klein RM. Inhibition of return. *Trends Cogn Sci* 2000; 4(4): 138–147.
- 58 Rollenhagen JE, Olson CR. Low-frequency oscillations arising from competitive interactions between visual stimuli in macaque inferotemporal cortex. *J Neurophysiol* 2005; 94(5): 3368–3387.
- 59 Kienitz R, Schmiedt JT, Shapcott KA, Kouroumpi K, Saunders RC, Schmid MC. Theta rhythmic neuronal activity and reaction times arising from cortical receptive field interactions during distributed attention. *Curr Biol* 2018; 28(15): 2377–2387.