行为振荡: 揭示心理过程动态变化的新现象

杨阳, 齐正阳, 张珂烨, 罗文波*

辽宁师范大学脑与认知神经科学研究中心, 大连 116029

* 联系人, E-mail: luowb@lnnu.edu.cn

2018-07-24 收稿, 2018-09-11 修回, 2018-09-12 接受, 2018-12-26 网络版发表

国家自然科学基金(31871106)资助

摘要 行为振荡是心理加工过程中行为反应表现出的周期性动态变化现象, 其研究方法主要包含以下3个构成因素: 重置相位事件、重置事件和目标刺激时间间隔的周期性变化、目标刺激. 在注意与知觉领域, 研究发现其加工过程出现 α 节律和 θ 节律的行为振荡现象, 为注意和知觉过程的动态变化理论提供了有效的证据补充与支持. 同时, 注意过程中的行为振荡与神经振荡同源源于神经元抑制作用以及知觉过程中后者相位信息对行为反应结果的预测作用, 揭示了心理加工过程中内在机制与外在表现相互影响、同步变化的现象. 本文首先介绍了行为振荡现象研究方法的构成因素, 随后梳理了近年来注意与知觉领域中的相关研究, 讨论了其与神经振荡的关系. 最后基于行为振荡能够揭示心理加工过程的动态变化这一特性, 提出未来一些可能的研究方向.

关键词 行为振荡, 动态变化, 注意, 知觉, 神经振荡

振荡现象是单位时间内表现出的规律且重复性的活动^[1]. 一些生理振荡现象, 如个体的心率范围为60~100次/分, 呼吸频率范围大小为16~20次/分等^[2], 常作为检验个体身体健康状态的指标. 近年来, 心理学家发现个体心理过程的行为反应中会表现出规律且重复性的活动, 并将其称为行为振荡(behavioral oscillation)^[3~7]. 行为振荡与一般的行为波动不同, 前者是心理加工过程本身存在的振荡现象在行为层面上的表现, 而行为波动则是对节律性出现的刺激做出的简单的无实际含义的节律性反应, 是一种与运动机制相关的机械性抖动^[8,9]. 新旧行为主义认为, 行为反应是在心理过程的作用下对外界环境做出的应对方式, 其客观记录数据可以用来解释心理过程^[10]. 基于此, 对行为振荡现象的研究, 利于研究者通过行为表现的动态变化直接探索心理加工过程中个体反应的动态变化. 例如, 注意过程中的行为振荡现象揭示了注意的序列加工模式、节律成分与注意过

程的关系及其周期性变化特性^[8,11]. 知觉过程中的行为振荡现象则直接反映了知觉加工过程中的节律性信息, 帮助研究者探索知觉加工过程中频率信息和相位信息在行为反应中的表现^[12]. 此外, 研究者还通过节律成分进一步探究行为振荡与神经振荡的关系, 借此揭示心理加工过程的内在神经机制与外在表现规律, 并通过两者的相位关系将外部活动与大脑活动联系起来, 进而探索行为活动和神经活动的关系以便更好地理解心理过程.

本文首先揭示行为振荡现象研究方法的构成因素, 其次梳理近年来注意和知觉过程中行为振荡现象的相关研究, 随后探讨了行为振荡与神经振荡的关系, 最后总结并展望了未来行为振荡研究领域中的潜在的研究方向.

1 研究方法的构成因素

行为振荡作为一种可反映心理过程动态变化的

引用格式: 杨阳, 齐正阳, 张珂烨, 等. 行为振荡: 揭示心理过程动态变化的新现象. 科学通报, 2019, 64: 546–554

Yang Y, Qi Z Y, Zhang K Y, et al. Behavioral oscillations and their performance in attention and perception (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 546–554, doi: 10.1360/N972018-00566

精细行为现象, 传统的行为测量方法无法进行揭示, 因此研究时需要使用巧妙的实验设计. 本文总结发现以往行为振荡现象的研究方法含有以下3点: (1) 重置相位的突显事件; (2) 突显事件和目标刺激时间间隔的周期性变化; (3) 目标刺激. 他们分别从重置相位、时间分辨率及探测行为振荡状态等方面保证行为振荡相关实验的精确度及其与心理过程乃至神经振荡的时间同步化, 从而揭示行为振荡现象.

1.1 重置相位事件

在行为振荡的相关实验中, 研究者会呈现一个重置相位事件(phase-resetting event)来重置心理加工过程的动态变化相位, 其一般具有“突显性”且不被反应^[13]. 突显刺激作为一个时间参考点, 将自然状态下不同步的心理动态变化过程重置后实现同步化, 方便行为反应体现心理过程的动态变化^[12,13]. 具体流程如图1所示, 重置相位事件出现之前, 心理加工过程变化不同步, 在 t_1 时刻遇到一个“突显”刺激后相关心理过程开始同步化并处于“准备”状态. 此后随机时刻(如 t_2)出现的刺激引起的心理反应, 可以映射到心理动态过程中的相应位置. 当 t_1 和 t_2 的时间间隔发生变化时, t_2' , t_2'' , t_2''' 等一系列时刻的刺激行为反应一一映射到心理过程, 此时行为反应的动态变化可以较好地吻合心理过程的动态变化.

Mathewson等人^[14]发现, 心理过程与大脑中的神经元活动之间存在变化同步性, 信息输入状态可调节该过程. 刺激呈现的时间结构与行为表现及神经活动之间存在相互作用, 单个刺激^[13]或重复且周期性变化的刺激都可以通过重置神经振荡相位来影响

心理过程的动态变化^[14-16], 具体表现为用于重置相位的刺激出现在感受野中引起相关脑区的局部振荡重排列, 产生的抑制作用(相关的神经活动减少)使得注意过程重新开始^[17]. 这种重置作用避免了大脑网络加工单个刺激出现滞留现象(刺激作用后神经活动的惰性^[18]), 使得选择机制会随着时间而进行动态变化. 因此研究者可利用重置相位事件实现这两个周期性变化系统地同步变化, 以方便对心理过程动态变化的测量.

1.2 时间间隔的周期性变化

行为振荡的出现还需要提高行为数据的采样率, 研究者通过改变重置相位事件和目标刺激间的时间间隔, 增加对同一个目标刺激行为反应的采样点, 从而提高行为数据采样率以便探讨个体加工目标刺激的动态变化过程^[19-21]. 如图1所示, 当 t_1 与 t_2 的时间间隔发生变化时, 不同 t_2 上刺激的行为反应映射相位也不同. 采样点(t_2' , t_2'' , t_2''' , ...)足够多时, 行为反应与心理加工过程最终趋于同步化, 此时行为振荡现象揭示了心理加工的动态变化. 如果重置相位事件和目标刺激之间的时间间隔保持不变, 那么目标刺激只是简单地重复出现, 此时其对应的不变相位导致相关的行为反应不能反映出心理过程的动态变化. 因此周期性变化的时间间隔决定了行为振荡能否揭示心理过程的动态变化. 并且在真实情境中, 重要的刺激呈现时常伴随着节律性, 当大脑中的振荡与输入的节律同步变化, 重要事件引起的高兴奋性相位会有效地放大神经元输入响应^[22]. 故而重置相位事件与目标刺激时间间隔的周期性变化使目标

图 1 (网络版彩色)重置相位事件作用示意图, 重置相位事件出现之前的心理过程动态变化不同步. 当重置相位事件在 t_1 时刻出现后, 相位作用使得这些变化过程在时间维度上同步变化. 之后周期性出现的刺激与相关的振荡节律相互作用, 实现行为振荡直接体现心理过程动态变化现象的目的. t_1 : 重置相位事件出现时刻; t_2 , t_2' , t_2'' , t_2''' : 随机采样时刻

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of reset phase event action: the dynamic changes of the mental process are not synchronized until the reset phase event occurred. When the reset phase occurs at time t_1 , phase action of rhythms leads to the fact that dynamic changes in mental process are time-synchronized. Then, the stimuli serial occurred periodically interact with oscillation rhythm of mental process. This induces that the dynamic phenomenon of the psychological process. t_1 : reset phase event occurrence time; t_2 , t_2' , t_2'' , t_2''' : random sampling time point

刺激呈现模式更接近于真实情境中的刺激呈现状态,帮助研究者获得更真实的行为反应结果^[23,24]。另外,Simoncelli和Olshausen^[25]发现在简单的无监督学习规则的帮助下,被试对一般感觉信号的输入存在一个“经验字典”,这个字典对信号进行自上而下的选择性表征。因此行为振荡相关研究中输入节律性刺激可以引起行为反应的标准化,使得行为反应更好地拟合标准化的注意加工模式,从而激活大脑中的“选择性字典”后控制注意选择过程中的表征^[17]。因此可以这么认为,行为振荡是外界节律刺激引起的一种以拟合心理过程动态变化为目的的行为抖动,是心理过程动态变化的行为表现而非简单的行为抖动。

1.3 目标刺激

目标刺激(target stimulus)指研究相应心理加工过程的刺激^[12]。在行为振荡的相关研究中,结合重置相位事件和时间间隔的周期性变化,研究者能够探究个体对该类刺激的行为反应所表现出的行为振荡现象,从而揭示心理加工过程中的动态变化^[12]。目标刺激落在心理加工动态过程的某个相位时更容易被加工^[26-28],反映到行为上表现为行为反应更好,因此其与心理过程相位的关系可以影响行为反应的好坏,从而使行为振荡现象反映了心理过程的动态变化。行为振荡现象的出现对目标刺激本身特性并无特别要求,无论是正常知觉水平还是近阈限知觉水平的刺激,研究者都能观察到行为振荡现象的出现,并揭示心理加工过程中的周期性变化^[8,13,29,30]。

2 注意和知觉过程中的行为振荡现象

以下探讨这一新现象对研究认知过程的贡献,以注意和知觉为例。注意指的是心理接受信息的过程,具体来讲是个体以一种清晰和生动的形式从同时呈现的几个物体或思维序列中选择一个对象的过程^[31]。知觉则是个体为进入大脑的感觉信息赋予具体含义的过程^[32]。其中知觉和注意存在一个加工顺序的过程,当目标刺激出现时会先引起注意过程的进行,注意到目标刺激后再对目标刺激进行知觉加工^[32]。对注意和知觉加工过程的研究可以更好地理解人类认知过程中的信息加工机制,而相关的行为研究则是通过心理过程的外部行为表现来直接体现心理过程的动态加工过程。在注意与知觉相关的行为振荡研究中,研究者利用重置相位事件量化之后

的注意采样、注意转换以及知觉过程,即对随后连续变化的心理过程的瞬时反应值随机抽样,并将注意和知觉的外部行为反应当作一个关于时间动态变化的函数^[8]。而后通过提高行为实验中的时间分辨率,采集不同时间点下的行为数据从而使行为数据能够更好地反映注意和知觉加工过程的动态变化特性^[12,33]。通过对行为反应中所表现出的行为振荡现象进行研究,研究者在行为层面上观察到注意与知觉的动态变化过程,补充与支持传统注意与知觉理论的同时使研究者对相关理论有了新理解。

2.1 注意过程中的行为振荡现象

注意的经典研究表明注意加工过程中存在转移和序列加工特性^[20,34]。Moore和Wolfe^[35]发现,对刺激的完整注意过程存在每秒20次的周期性变化,这表明刺激的完整加工过程存在注意转移,表现为动态且序列地先加工刺激的一部分信息再加工另一部分。因此,注意加工过程存在一定频率,有研究表明当注意多个刺激时被试可每秒加工7个左右的刺激,这种加工形式也出现在对单个刺激连续呈现的注意加工过程中^[36]。因此注意采样率反映了注意转移过程,其大小表明了注意转移过程的快慢,当采样率越高,表明转移速度更快。

行为振荡研究结果发现,注意采样过程中存在alpha(8~12 Hz)和theta(4~8 Hz)的周期性变化。研究发现,在空间线索范式中,有效线索或无效线索条件下的反应时动态变化中都存在每秒8~12次的周期性变化(alpha)^[8,13],这证明了注意采样过程的节律性。非线索条件下alpha节律能量的增加,在行为上支持了alpha节律在注意目标刺激过程中的抑制作用。行为振荡结果不仅揭示了注意采样过程的节律性以及采样率的大小,还表明了空间注意和客体注意存在不同注意采样率。Fiebelkorn等人^[37]在研究客体中线索位置上刺激的注意过程时发现,相同客体上位置转移的采样率为8 Hz,不同客体间位置转移的采样率为4 Hz。其中对一个客体的空间选择注意和客体选择注意过程存在相同的8 Hz采样率,不同客体间的注意转移过程则出现4 Hz采样率。该结果从行为层面发现了空间注意和客体注意选择过程有着共同的加工机制,注意转移过程存在频率为4 Hz的周期性变化。注意空间转移过程的周期性变化频率也得到其他证据证明,研究发现其周期性变化频率落在

theta频带上^[8,38,39]。另外, Song等人^[8]发现注意加工的反应时在线索有效和无效两种条件之间的采样过程, 存在变化频率为theta节律的整个周期性加工过程延迟现象, 即无效条件下的反应时振荡相位与有效条件下的相位延迟(phase lag)出现theta节律。行为振荡结果表明, 对刺激的注意加工过程存在alpha节律, 而且这整个过程之间还存在theta节律的周期性变化, 不仅验证了注意过程的周期性变化和序列加工模式, 对经典注意理论提供了新的支持证据, 还证明了注意加工过程的节律性特点。但是关于alpha节律和theta节律在注意采样以及注意转移过程中的作用以及注意空间转移后采样率变为theta节律的原因还需要进一步的探讨。

2.2 知觉过程中的行为振荡现象

在知觉研究领域, 研究者发现知觉加工过程同样存在周期性动态变化。有研究认为, 个体进行知觉加工时会把刺激序列的时间结构划分为不同的时间窗来加工^[12], 而且由于刺激节律与心理过程动态变化之间的同步化作用, 使得特殊的频率引起的知觉加工过程更有效。行为振荡现象直接反映出知觉过程存在alpha节律和theta节律, 表现了知觉过程的动态变化情况。基于呈现节律性刺激的前提, 研究者发现闪光刺激的知觉数量是关于呈现刺激数量和闪现率的函数^[40], 刺激在10~30个/s的呈现速度变化引起闪光刺激知觉数量(一个还是两个)的动态变化^[19], 并最终发现知觉过程的动态变化的周期为alpha节律。这个结论很快得到其他研究的支持, 一些错觉研究发现车轮错觉的加工过程存在10~20 Hz的变化频率^[41,42], 被试的刺激搜索^[43]以及对图片辨别过程存在alpha节律^[44]。但alpha节律并不是唯一的节律, 研究发现在视觉运动整合过程中视觉辨别阈限的动态变化呈现theta节律形式^[45]。因此知觉过程中存在周期性变化过程, 而且变化的周期落在alpha或者theta频带上。

除了反映出知觉过程中的节律信息, 行为振荡结果还发现节律的相位信息对知觉反应结果的影响。研究发现不同的重置相位会引起不同的知觉反应, 具体表现为同时知觉到两个闪光刺激的概率变化受alpha节律形式的重置相位事件所影响, alpha频带上的不同频率引起的夹带反应差异直接体现在行为振荡差异上^[30]。不仅如此, 研究者发现在知觉整合与

分离过程中存在相位相反的theta节律^[46], 在连续呈现刺激的加工状态中不同的知觉状态具有不同的相位信息。知觉过程中的行为振荡现象直接表明了知觉过程的动态变化情况以及一些周期性变化的频率对知觉过程动态变化的体现, 支持了知觉过程的周期性变化观点。

3 行为振荡与神经振荡关系

提到行为振荡的神经机制, 人们可能很容易联想到神经振荡(neural oscillation)。但事实是, 并无证据直接表明神经振荡是行为振荡的神经机制, 但两者确实存在联系。近年来研究者发现, 在感知觉、记忆、运动等心理过程中, 人类的中枢神经系统会出现规律且重复的神经活动现象, 他们将与心理加工过程相关的神经节律性信息称作神经振荡^[47]。神经振荡是心理加工过程中大脑神经元集群周期性反应的结果, 行为振荡是心理加工过程中个体行为反应呈现出的动态变化现象, 二者在不同层面反映了心理过程的加工机制。如注意和知觉的行为振荡和神经振荡研究都表明, alpha节律可抑制注意选择过程以及和知觉加工有关, theta节律与注意转移过程以及知觉周期性采样过程相关^[8,38,39,48,49]。行为振荡和神经振荡结果表现出相同的节律成分, 而且这些成分与心理过程的关系表明两者之间存在联系。另外重置相位事件与节律性(周期性变化的时间间隔)刺激的应用也表明, 行为振荡与神经振荡可能存在某种相位关系。因此对两者关系的探讨可以帮助研究者建立起行为反应与大脑功能性的联系以及探讨行为振荡的神经机制, 从而利用节律信息更好地理解心理加工过程。

3.1 来自注意过程的证据

Feng等人^[50]发现非自发注意过程中, 枕叶alpha节律的同步化与非同步化情况可以预测目标刺激行为反应的准确率, 表明枕叶区域的alpha节律与一般的启动机制存在联系。非自发注意过程中的启动反应与枕叶alpha节律的联系, 为探索行为振荡与神经振荡的关系提供了可能性。注意相关研究发现选择性注意过程主要是自上而下的过程, 对外界输入信息的注意存在相应的神经表征, 选择过程导致神经元表征的减少会引起大脑功能性网络之间的标准化反应, 即在某个脑区内的整体反应水平保持不变, 这

种神经元之间的相互抑制可能是产生神经振荡的主要原因^[17]。注意转移发生过程伴随着神经元的周期性振荡,如内隐注意转移与低频振荡之间存在锁相关系^[13,22,37,51]。在行为层面,Klein^[52]发现注意相关的振荡现象来源于经典的注意返回抑制效应,即减少再次被选择的刺激的神经表征,刺激在被抑制一段持续的周期性时间之前只被注意很短一段时间。此时行为表现上的抑制作用发生在225 ms左右,接近于Fiebelkorn等人^[37]发现的4 Hz注意行为振荡现象。因此行为振荡现象的出现源于注意返回抑制中神经元表征的减少,相关的行为振荡和神经振荡都来源于心理过程引起的神经元之间的抑制作用,而行为振荡是这种抑制作用的直接外部表现,神经振荡是抑制的内在表现。

3.2 来自知觉研究的证据

知觉相关研究发现知觉过程中的行为振荡与神经振荡之间存在相位相干性(phase coherence),即相位被重置后行为振荡与神经振荡出现相同相位差恒定的同步变化^[46]。例如,知觉的整合分离转换过程中周期性变化频率为3~5 Hz(theta节律),与脑磁结果展现的3 Hz任务加工转换率之间存在相位相干性^[46]。另外,基于相位关系进一步研究发现,神经振荡中的相位变化能够预测行为反应结果^[53,54]。Busch等人^[55]发现,探测过程中的视觉探测阈限随着持续EEG(electroencephalogram)振荡活动的相位变化发生动态变化,行为反应中出现频率为7 Hz左右的动态变化现象,因此神经振荡的相位变化可以影响知觉反应过程。其中刺激落在相位变化引起的阈限变化之上时,行为反应结果就更好。类似结果也出现在其他研究中,如刺激出现前枕叶中的alpha节律相位可以预测视觉探测行为的反应时变化情况^[26],大脑中0.01~0.1 Hz的节律信息的相位变化可以预测知觉行为反应中的动态变化^[56]以及神经振荡的两个相反相位引起光幻视概率15%的变化^[57]等。这些研究支持了神经振荡和行为振荡通过相位信息相互联系的结论,并揭示了知觉过程中行为振荡与神经振荡的时间同步性与相关性。其中VanRullen认为行为振荡现象揭示了内在大脑振荡中的知觉周期性现象^[58],表明行为反应的节律可能源于神经振荡节律的作用或者行为振荡与神经振荡来自于相同的神经元集群活动,这一想法还需进一步验证。

4 结论与展望

综上所述,将重置相位事件作为时间参考点在时间上“校准”行为振荡与心理动态变化过程,并周期性地改变时间间隔保证行为数据的高采样率,以及利用目标刺激对振荡状态进行探测,行为反应中的动态变化现象就可以直接揭示注意和知觉过程的动态变化情况。此外,行为振荡与神经振荡之间的关系为行为反应与大脑的功能联系研究提供了新的研究思路。行为振荡现象出现的节律成分不仅从行为上支持了一些节律成分的功能性,还为发现心理过程与节律成分的关系提供了依据。在未来研究中应该继续对行为振荡现象进行探索,为一些心理加工过程提供新的行为证据,并且基于行为振荡和神经振荡的节律成分进一步探索行为反应和神经活动之间的功能联系。行为振荡作为揭示注意和知觉过程动态变化的新指标,使研究者更好地理解注意和知觉加工机制。未来研究中,研究者可以利用行为振荡进一步探索相关心理过程的外部行为反应与内在加工机制的关系,使研究者能够更好地从行为、脑的不同模态的数据中理解个体心理加工过程的机制。

目前研究虽然发现了行为振荡和神经振荡之间的相位关系,但是依然存在不足:无法确定行为振荡是否是神经振荡的行为表现。即使一些研究通过非侵入性技术直接将一定频率的节律性信息作用于大脑皮层,发现行为振荡和神经振荡都出现相应的节律成分,但依然不能判断行为振荡的节律成分是否来自于神经振荡节律^[59]。有研究表明,振荡节律之间存在复杂的反应过程,行为振荡和神经振荡在刺激作用后得到的相同节律成分可能来自于节律刺激^[60]。即使节律性刺激是为了更好地将行为振荡与心理过程拟合,但仍不能排除节律性刺激引起简单的行为抖动的可能性。因此并不能根据他们存在相同的节律成分以及相位关系而认为神经振荡是行为振荡的神经机制。另外,综述相关的数据分析方法发现,行为振荡中的数据分析方法也包含标准化、滤波分析、时频分析、快速傅里叶变换等一系列常用于处理神经振荡的数据分析方法^[6,7,12],降低了不同数据处理方法引起的偶然误差。因此未来的研究可以基于更加精巧的实验设计以及精细的数据分析方法,如结合fMRI(functional magnetic resonance imaging)和EEG技术分别即时记录行为振荡现象出现时的大

脑活动,再通过合适的分析方法从两者空间上的可能性一致去探索两者之间可能的更紧密关系。行为振荡与神经振荡探讨的都是心理过程中的节律信息,两者之间分析方法的共享与借鉴可以帮助研究者更好地探索心理过程与神经元集群活动之间的关系,进而探索心理过程的动态加工机制。

近年来,关于注意和知觉的行为振荡研究关注于探索注意和知觉加工机制中存在的行为振荡现象,但对于不同群体之间的行为振荡节律是否存在差异等问题并未深入探究。例如,儿童与成人、精神疾病群体与正常人群体。未来研究可以从发展心理学角度出发,探究是否行为振荡现象随着年龄变化而发生变化,从而探索是否可以将行为振荡现象作为心理发展中的一个指标。而且随着大脑发育过程中突出可塑性的变化以及神经元同步化的变化,神经振荡在早期儿童时期和早期成人时期会存在差异^[61],因此相关的行为振荡现象是否表现出随着年龄而发生的变化,也可以作为揭露行为振荡和神经振荡关系的证据。

在情绪知觉障碍方面的研究中,研究人员可以利用情绪知觉障碍者与正常个体之间的行为振荡节律差异进一步探索情绪知觉障碍的原因,探索情绪知觉障碍是否会引起外部反应动态变化的差异,并将此作为判断是否存在情绪知觉障碍的新指标。有研究就发现,正常个体和精神分裂者个体之间知觉的反应时分布存在峰值差异,其中反应时比例的折线图中精神分裂被试的反应时比例峰值出现在0.01 s,

正常组的出现在0.02 s^[3],表明对于正常个体和特殊群体之间的知觉外部表现可能存在差异,从而为行为振荡作为情绪知觉障碍的指标提供了可能性,并且基于得到的频率信息以及行为振荡与神经振荡的关系进一步探讨探讨是否可以通过改变频率信息对情绪知觉障碍进行干预。

此外,行为振荡现象旨在直接揭示心理加工过程的动态变化过程,可以将其作为心理研究在行为层面的补充证据继续探索,如情绪知觉过程中的行为振荡现象。情绪知觉作为一种复杂的高级知觉过程,其加工过程的时间进程一直是研究者探讨的方向。行为振荡现象的出现,可以让研究者从节律的角度来研究情绪知觉加工的动态时间进程,从而发现情绪知觉过程是否也存在相应的周期性变化以及与该变化相关的节律成分,在行为层面上直接揭示情绪直接过程中个体反应的动态变化规律。已有的电生理研究发现情绪知觉过程中也存在相应的神经振荡节律成分,如alpha节律、theta节律等^[49,62,63]。有研究发现条件刺激伴随厌恶刺激在theta节律出现能量增加现象,而alpha节律出现能量减少情况,表明刺激加工过程中相关节律确实存在能量变化。此外,恐惧的条件反射期间的alpha节律的能量变化活动可以反映出条件刺激的效价和唤醒度情况,对刺激本身效价和唤醒度的加工会引起节律范围内能量的变化^[64]。因此研究者可以通过探讨面孔加工过程中的振荡节律或能量的差异以发现对不同面孔表情的知觉过程是否是离散的或类别的。

参考文献

- 1 Li J L. Mobile Communication Dictionary (in Chinese). Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 1996 [李进良. 移动通信词典. 成都: 电子科技大学出版社, 1996]
- 2 Wan X H, Lu X F. Diagnostics (in Chinese). Beijing: People's Medical Publishing House, 2013 [万学红, 卢雪峰. 诊断学. 北京: 人民卫生出版社, 2013]
- 3 Venables P H. Periodicity in reaction time. *Br J Psychol*, 1960, 51: 37-43
- 4 Latour P L. Evidence of internal clocks in the human operator. *Acta Psychol*, 1967, 27: 341-348
- 5 Womelsdorf T, Fries P, Mitra P P, et al. Gamma-band synchronization in visual cortex predicts speed of change detection. *Nature*, 2006, 439: 733-736
- 6 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
- 7 Huang Y, Chen L, Luo H. Behavioral oscillation in priming: Competing perceptual predictions conveyed in alternating theta-band rhythms. *J Neurosci*, 2015, 35: 2830-2837
- 8 Song K, Meng M, Chen L, et al. Behavioral oscillations in attention: Rhythmic α pulses mediated through θ band. *J Neurosci*, 2014, 34: 4837-4844

- 9 Ren D D, Luo W, Wang B, et al. A case of dopamine dysfunction syndrome with serotonin syndrome (in Chinese). *Chin J Neurol*, 2012, 45: 286–287 [任冬冬, 罗巍, 王波, 等. 多巴胺失调综合征伴 5-羟色胺综合征一例. *中华神经科杂志*, 2012, 45: 286–287]
- 10 Peng Y L. *General Psychology* (in Chinese). Beijing: Beijing Normal University Press, 2012 [彭聃龄. *普通心理学*. 北京: 北京师范大学出版社, 2012]
- 11 Dugué L, VanRullen R. The dynamics of attentional sampling during visual search revealed by fourier analysis of periodic noise interference. *J Vision*, 2014, 14: 109
- 12 VanRullen R. Perceptual cycles. *Trends Cogn Sci*, 2016, 20: 723–735
- 13 Landau A N, Fries P. Attention samples stimuli rhythmically. *Curr Biol*, 2012, 22: 1000–1004
- 14 Mathewson K E, Fabiani M, Gratton G, et al. Rescuing stimuli from invisibility: Inducing a momentary release from visual masking with pre-target entrainment. *Cognition*, 2010, 115: 186–191
- 15 Lakatos P, Karmos G, Mehta A D, et al. Entrainment of neuronal oscillations as a mechanism of attentional selection. *Science*, 2008, 320: 110–113
- 16 Zhang X, Yuan P J, Wang Y, et al. Neural entrainment and perception (in Chinese). *Prog Biochem Biophys*, 2016, 43: 308–315 [张雪, 袁佩君, 王莹, 等. 知觉相关的神经振荡-外界节律同步化现象. *生物化学与生物物理进展*, 2016, 43: 308–315]
- 17 Buschman T J, Kastner S. From behavior to neural dynamics: An integrated theory of attention. *Neuron*, 2015, 88: 127–144
- 18 Zhu X. *Experimental Psychology* (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2014 [朱滢. *实验心理学*. 北京: 北京大学出版社, 2014]
- 19 White C T. Temporal numerosity and the psychological unit of duration. *Psychol Monogr*, 1963, 77: 1–37
- 20 Posner M I. Orienting of attention. *Quart J Exp Psychol*, 1980, 32: 3–25
- 21 Remington R, Pierce L. Moving attention: Evidence for time-invariant shifts of visual selective attention. *Percept Psychol*, 1984, 35: 393–399
- 22 Schroeder C E, Lakatos P. Low-frequency neuronal oscillations as instruments of sensory selection. *Trends Cogn Sci*, 2009, 32: 9–18
- 23 Mirzaei A, Kumar A, Leventhal D, et al. Sensorimotor processing in the basal ganglia leads to transient beta oscillations during behavior. *J Neurosci*, 2017, 37: 11220–11232
- 24 Rohenkohl G, Coull J T, Nobre A C. Behavioural dissociation between exogenous and endogenous temporal orienting of attention. *PLoS One*, 2011, 6: e14620
- 25 Simoncelli E P, Olshausen B A. Natural image statistics and neural representation. *Ann Rev Neurosci*, 2001, 24: 1193–1216
- 26 Mathewson K E, Gratton G, Fabiani M, et al. To see or not to see: Prestimulus alpha phase predicts visual awareness. *J Neurosci*, 2009, 29: 2725–2732
- 27 Han B, VanRullen R. The rhythms of predictive coding? Pre-stimulus phase modulates the influence of shape perception on luminance judgments. *Sci Rep*, 2017, 7: 43573
- 28 Neuling T, Rach S, Wagner S, et al. Good vibrations: Oscillatory phase shapes perception. *NeuroImage*, 2012, 63: 771–778
- 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: 4698–4708
- 30 Ronconi L, Melcher D. The role of oscillatory phase in determining the temporal organization of perception: Evidence from sensory entrainment. *J Neurosci*, 2017, 37: 10636–10644
- 31 James W C. *Principles of Psychology*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 1984
- 32 Zimbardo P G, Johnson R L, McCann V, et al. *Psychology: Core Concepts*. New York: Pearson Education US, 2006
- 33 Sauseng P. Brain oscillations: Phase-locked EEG alpha controls perception. *Curr Biol*, 2012, 22: R306–R308
- 34 Treisman A M, Treisman A. A feature-integration theory of attention. *Cogn Psychol*, 1980, 12: 97–146
- 35 Moore C M, Wolfe J M. Getting beyond the serial/parallel debate in visual search: A hybrid approach. In: *The limits of attention: Temporal constraints on human information processing*. New York: Oxford University Press, 2001. 178–198
- 36 VanRullen R, Carlson T, Cavanagh P. The blinking spotlight of attention. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 19204–19209
- 37 Fiebelkorn I C, Saalmann Y B, Kastner S. Rhythmic sampling within and between objects despite sustained attention at a cued location. *Curr Biol*, 2013, 23: 2553–2558
- 38 Landau A N, Schreyer H M, van Pelt S, et al. Distributed attention is implemented through theta-rhythmic gamma modulation. *Curr Biol*, 2015, 25: 2332–2337
- 39 Dugué L, McLelland D, Lajous M, et al. Attention searches nonuniformly in space and in time. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 15214–15219
- 40 White C T, Cheatham P G, Armington J C. Temporal numerosity. II. Evidence for central factors influencing perceived number. *J Exp Psychol*, 1953, 46: 283–287

- 41 Macdonald J S, Cavanagh P, VanRullen R. Attentional sampling of multiple wagon wheels. *Atten Percept Psychophys*, 2014, 76: 64–72
- 42 VanRullen R, Reddy L, Koch C. Attention-driven discrete sampling of motion perception. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2005, 102: 5291–5296
- 43 de Graaf T A, Gross J, Paterson G, et al. Alpha-band rhythms in visual task performance: Phase-locking by rhythmic sensory stimulation. *PLoS One*, 2013, 8: e60035
- 44 Blais C, Arguin M, Gosselin F. Human visual processing oscillates: Evidence from a classification image technique. *Cognition*, 2013, 128: 353–362
- 45 Benedetto A, Spinelli D, Morrone M C. Rhythmic modulation of visual contrast discrimination triggered by action. *Proc R Soc B*, 2016, 283, pii: 20160692
- 46 Andreas W, Evelyn M, van Koningsbruggen M G, et al. Temporal integration windows in neural processing and perception aligned to saccadic eye movements. *Curr Biol*, 2016, 26: 1659–1668
- 47 Buzsaki G. *Rhythms of the Brain*. New York: Oxford University Press, 2006
- 48 Jia J, Liu L, Fang F, et al. Sequential sampling of visual objects during sustained attention. *PLoS Biol*, 2017, 15: e2001903
- 49 Korotkova T, Ponomarenko A, Monaghan C K, et al. Reconciling the different faces of hippocampal theta: The role of theta oscillations in cognitive, emotional and innate behaviors. *Neurosci Biobehav Rev*, 2017, 37: 11220–11232
- 50 Feng W, Störmer V S, Martinez A, et al. Involuntary orienting of attention to a sound desynchronizes the occipital alpha rhythm and improves visual perception. *NeuroImage*, 2017, 150: 318–328
- 51 Busch N A, VanRullen R. Spontaneous EEG oscillations reveal periodic sampling of visual attention. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 16048–16053
- 52 Klein R M. Inhibition of return. *Trends Cogn Sci*, 2000, 4: 138–147
- 53 Haegens S, Händel B F, Jensen O. Top-down controlled alpha band activity in somatosensory areas determines behavioral performance in a discrimination task. *J Neurosci*, 2011, 31: 5197–5207
- 54 Sherman M T, Kanai R, Seth A K, et al. Rhythmic influence of top-down perceptual priors in the phase of prestimulus occipital alpha oscillations. *J Cogn Neurosci*, 2016, 28: 1318–1330
- 55 Busch N A, Dubois J, VanRullen R. The phase of ongoing EEG oscillations predicts visual perception. *J Neurosci*, 2014, 29: 7869–7876
- 56 Monto S, Palva S, Voipio J, et al. Very slow EEG fluctuations predict the dynamics of stimulus detection and oscillation amplitudes in humans. *J Neurosci*, 2008, 28: 8268–8272
- 57 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: 11889–11893
- 58 VanRullen R, Dubois J. The psychophysics of brain rhythms. *Front Psychol*, 2011, 2: 203
- 59 Dugué L, Roberts M, Carrasco M. Attention reorients periodically. *Curr Biol*, 2016, 26: 1595–1601
- 60 Sankaraleengam A, Schmidt S L, Jérémie L, et al. Modulation of cortical oscillations by low-frequency direct cortical stimulation is state-dependent. *PLoS Biol*, 2016, 14: e1002424
- 61 Uhlhaas P J, Roux F, Rodriguez E, et al. Neural synchrony and the development of cortical networks. *Trends Cogn Sci*, 2010, 14: 72–80
- 62 Weinreich A, Stephani T, Schubert T. Emotion effects within frontal alpha oscillation in a picture oddball paradigm. *Int J Psychophys*, 2016, 110: 200–206
- 63 Balconi M. Frontal brain oscillation modulation in facial emotion comprehension: The role of reward and inhibitory systems in subliminal and supraliminal processing. *J Cogn Psychol*, 2011, 23: 723–735
- 64 Chien J H, Colloca L, Korzeniewska A, et al. Oscillatory eeg activity induced by conditioning stimuli during fear conditioning reflects salience and valence of these stimuli more than expectancy. *Neuroscience*, 2017, 346: 81–93

Summary for “行为振荡: 揭示心理过程动态变化的新现象”

Behavioral oscillations and their performance in attention and perception

Yang Yang, Zhengyang Qi, Keye Zhang & Wenbo Luo*

Research Center of Brain and Cognitive Neuroscience, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

* Corresponding author, E-mail: luowb@lnnu.edu.cn

Recently, psychologists have found the regular and repetitive activities during individuals' behavioral responses, which is called behavioral oscillation. Behavioral oscillation is dynamic changes of mental processes and might become a new indicator for researchers to explore the time courses of human's mental processing.

Traditional behavioral approaches cannot describe behavioral oscillation well until a method with the following three factors was established: reset phase event, periodic changed time interval and target stimulus. These factors can amplify the oscillation of mental processes at behavioral level. Firstly, the reset phase event, as a time reference, restarts the mental process and the corresponding neuron activities before each target stimulus occurs. Secondly, the periodic changed time interval refers to the time variations between the reset phase event and the target stimuli. It provides high temporal resolution for the behavioral experiments and presents the rhythmic target stimuli to simulate real environment as much as possible. Finally, the target stimulus can be used for probing the oscillating state of the mental processes by analyzing individuals' responses. Researchers have already used the above methods to explore behavioral oscillation of mental processes.

Then, the current review discussed behavioral oscillation during the processes of attention and perception. Behavioral oscillation during attention processing did reveal the attention's rhythm. And space-based attentional selection and object-based attentional selection have the same rhythm (i.e., alpha rhythm). Besides, theta rhythm has been confirmed for the attention transfer processing. Behavioral oscillation during perception such as the simple visual searching, perceptual integration and separation could all be found along with the corresponding alpha and theta rhythms. And there is an inverse phase relationship between the rhythms of the integration and separation processes. Therefore, behavioral oscillation leads to further understanding for mental processing mechanism, which approved the dynamic of mental processing and provided new evidences to support relevant theories.

Behavioral oscillation and neural oscillation are both rhythmic patterns of mental processing. Although some studies have shown some connections between them, there is no direct evidences to support neural oscillation underlying the behavioral oscillation. To build a bridge between behavior and brain, researchers should explore the relationship between behavioral oscillation and neural oscillation. Evidences from the attention processing suggest that behavioral oscillation and neural oscillation might be the two manifestations for mental dynamic processes at the behavioral and neural level. The mutual inhibition between neurons caused by the attentional selection processes leads to the generation of neural oscillation. And inhibiting the return in attention processing leads to rhythmic attentional selection by reducing the neuron activities. Thus, the neuron suppression may lead to the oscillations of behavior responses as well as neuron responses, namely two sides of a coin. The conclusion is also supported by the perceptual researches. What researchers found is the significant correlation between the phases of behavioral oscillation and neural oscillation. And the neural oscillation's phase could also predict the behavioral responses, which suggested that neural oscillations and behavioral oscillations might have the same origins and organizational bases.

This paper specifically described the behavioral oscillation and discussed possible directions for future behavioral oscillation researches. First, it is necessary to explore the relationship between behavioral oscillations and neural oscillations. Second, behavioral oscillations might provide new indicators for cognitive impairment group's diagnosis. Totally, exploring behavioral oscillations in mental processes could help researchers to further understand humans' cognition.

behavioral oscillation, dynamic processing, attention, perception, neural oscillation

doi: 10.1360/N972018-00566