

综述

时距知觉适应后效的研究进展

李宝林¹, 黄希庭^{2,*}

¹北京大学心理与认知科学学院, 北京 100871; ²西南大学心理学部, 重庆 400715

摘要: 个体的感知经验是影响时距知觉的重要因素。例如, 反复呈现某一特定的时距信息会改变个体对后续一定范围内时距信息的知觉, 这种现象被称为时距知觉适应。时距知觉适应会导致时距知觉适应后效: 适应较长的时距导致个体低估后续时距, 适应较短的时距导致个体高估后续时距。这一现象反映了时距知觉的可塑性, 为揭示时距知觉的认知神经机制提供了重要线索。近年来, 时距知觉适应后效受到了越来越多的研究关注。本文主要从表现、性质和认知神经机制三个方面总结了时距知觉适应后效的研究进展, 并在此基础上提出了今后研究的可能方向。对这一现象的研究有助于更好地理解时距知觉, 未来仍需更多的关注。

关键词: 时距知觉; 适应后效; 锚定效应; 通道模型; 神经基础

中图分类号: B842

Research advances on the duration aftereffect

LI Bao-Lin¹, HUANG Xi-Ting^{2,*}

¹*School of Psychological and Cognitive Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;* ²*Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China*

Abstract: Recent sensory history plays a critical role in the perception of event duration. For example, repetitive exposure to a particular duration leads to the distortion of subsequent duration perception. This phenomenon, termed duration adaptation, induces a robust repulsive duration aftereffect. In particular, adaptation to relatively long sensory events shortens the perceived duration of a subsequent event, while adaptation to relatively short sensory events lengthens the perception of subsequent event durations. This phenomenon implies the plasticity of duration perception and offers important clues for revealing the cognitive neural mechanism of duration perception. Duration aftereffect has received more and more attention in recent years. In this review, we introduce recent research advances in our understanding of duration aftereffect, especially with regards to its manifestations, origin, and cognitive neural mechanisms. We also propose possible directions for future research. In sum, we posit that studies on the duration aftereffect phenomenon are helpful in understanding general duration perception, and as such, should receive more attention in future.

Key words: duration perception; aftereffect; anchor effect; channel-based model; neural basis

时距知觉指对客观现象持续性的知觉, 既包括对两个连续事件间时间间隔(空时距)的知觉, 也包括对某一事件持续时间段(实时距)的知觉^[1]。时距的范围非常广泛, 大到年月日, 小到时分秒, 甚至微秒。值得注意的是, 时距知觉的研究对象具

有限度。一般来说, 时距知觉的研究对象不超过 5 s, 平均 2~3 s^[2]。因此, 时距知觉不涉及长时记忆, 不同于时间估计, 是对当前刺激的直接反应^[3]。时距知觉, 尤其是秒下的时距知觉, 是个体与环境交互的基础。从对外界信息的理解到对运动技能的控

Received 2018-05-02 Accepted 2018-08-05

Research from the corresponding author's laboratory was supported by China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M630011), the National Natural Science Foundation of China (No. 31600879, 31671125) and the Research Team's Construction Project from the Faculty of Psychology in Southwest University, China (No. TR201201-1).

*Corresponding author. Tel: +86-23-68253630; E-mail: xthuang@swu.edu.cn

制都离不开时距知觉。因此,精确地感知时距信息对个体的生存和发展具有重要意义。

然而,个体感知的主观时距不仅取决于事件客观的时距信息,而且还会受到多种因素的影响而发生扭曲。例如,个体自身状态^[4,5]和刺激特征^[6,7]都是影响时距知觉的重要因素。除此之外,已有研究发现个体先前的感知经验也是影响时距知觉的重要因素^[8,9]。其中一个典型的例子即感知适应对时距知觉的影响。感知适应是感知系统具有的普遍特征,其反映了感知系统可被调节的重要事实与特征。在实验研究中,向个体的感受器反复或持久呈现某一特定的刺激就可能导致感知适应。感知适应的一个重要结果是个体对后续相应刺激特征的知觉产生一定的偏差,即产生适应后效。例如,倾斜后效(*tilt aftereffect*):注视一个偏离垂直或水平方向的斜线一段时间后,个体会将随后呈现的客观上垂直或水平的线段知觉为反向斜线^[10,11];运动后效(*motion aftereffect*):注视向同一方向运动的某个物体一段时间后,个体会将随后呈现的静止物体知觉为向相反的方向运动^[12,13]。同样,时距知觉适应会产生时距知觉适应后效(*duration aftereffect*)。例如,反复向被试呈现一个呈现时间较长(如,640 ms)的适应刺激,再给被试呈现一个呈现时间中等(如,320 ms)的测试刺激,那么相比无适应条件,被试会低估测试刺激的呈现时间;反之,反复向被试呈现一个呈现时间较短(如,160 ms)的适应刺激,再给被试呈现一个呈现时间中等(如,320 ms)的测试刺激,此时相比无适应条件,被试会高估测试刺激的呈现时间^[14]。

感知适应与神经适应密切相关,作为探讨认知神经活动的重要“工具”,其被称为“心理物理学家的微电极”(psychophysicist's microelectrode)^[15]。因此,时距知觉适应后效为探讨时距知觉的认知神经机制提供了重要的线索,近年来受到越来越多研究者的关注,对这一现象的研究有助于更好地理解时距知觉。因此,本文从时距知觉适应后效的表现入手,同时结合现有研究,系统地介绍了时距知觉适应后效的性质和认知神经机制,并在此基础上提出了今后研究的可能方向。

1 时距知觉适应后效的表现

在实验研究中,研究者们一般采用感知适应技术,即“适应-测试”范式来探讨时距知觉适应对

后续时距知觉的影响。实验流程一般分为适应和测试两个阶段。在适应阶段,需反复向被试呈现某一特定的时距信息;在测试阶段,时距知觉适应后效主要通过跨通道的时距辨别(*temporal discrimination*)任务和时距复制(*temporal reproduction*)任务来测量:在时距辨别任务中被试需要判断来自不同感觉通道(如,视听)相继呈现的两个刺激哪一个呈现的时间更长;在时距复制任务中被试需要通过按键的方式复制出先前呈现的目标刺激的呈现时间。通过比较无适应条件和适应条件下或者比较适应长时距和适应短时距条件下被试在这些任务上的表现(如,时距辨别主观相等点和时距复制长度的变化)可以揭示时距知觉适应对后续时距知觉的影响。

1.1 时距知觉适应后效的特点

采用行为学实验,对时距知觉适应后效的研究目前已取得一些较为稳定的结果。这些结果显示了时距知觉适应后效具有的一些特点,其主要体现在以下几个方面。

(1) 时距知觉适应后效具有双向性。研究显示,当适应时距较长时,被试会低估后续中等时长测试刺激的呈现时间;反之,当适应时距较短时,被试会高估后续中等时长测试刺激的呈现时间^[14,16]。这说明时距知觉适应后效既可以表现为时间压缩效应也可以表现为时间膨胀效应,这主要取决于适应时距与后续测试时距之间的关系,即时距知觉适应后效是一种双向负后效。

(2) 时距知觉适应后效具有时距调谐性。这表现为时距知觉适应后效的大小受到适应时距与测试时距间差异量的调节,即当适应时距与测试时距相差太大或太小时时距知觉适应后效的量值会减弱甚至消失。例如,Heron等^[14]发现随着适应时距由160 ms逐渐减小到40 ms时,被试对后续测试时距(320 ms)的高估逐渐减小,即后续时距知觉逐渐接近于无适应条件。

(3) 时距知觉适应后效不仅发生在视觉通道而且也发生在听觉通道,并且具有通道特异性。这不但表现在时距知觉适应后效不能够在视听感觉通道间相互迁移^[14],而且也表现在反向时距知觉适应后效能够在视听通道中同时产生^[17]。

(4) 时距知觉适应后效还依赖于刺激所处的背景信息。例如,研究显示当一个长时的低频纯音和一个短时的高频纯音交替反复呈现一段时间后,被试会将后续中等时长的高频纯音的呈现时间知觉为

比中等时长的低频纯音的呈现时间更长^[17, 18]; 同样, 当一个短时的纯音刺激(第一个刺激)和一个长时的纯音刺激(第二个刺激)依次成对反复呈现一段时间后, 被试会将后续成对出现的中等时长的刺激对中的第一个刺激的呈现时间知觉为比第二个刺激的呈现时间长^[16, 18]。这说明时距知觉适应后效取决于听觉刺激的频率和刺激呈现的顺序。

(5) 时距知觉适应后效还具有时距广范性。时距知觉具有分段性, 不同范围的时距信息往往具有不同的表征^[19]。例如, 研究显示对秒下时距(sub-second duration)的加工主要涉及自动加工, 较少受到注意和唤醒的影响, 而对秒上时距(supra-second duration)的加工主要是受控加工, 需要一定的注意和记忆资源; 秒下与秒上时距加工涉及的脑区也不相同^[20, 21]。虽然目前对时距知觉适应后效的研究主要集中在对秒下时距的加工中, 然而最近的研究也显示时距知觉适应后效也可以发生在对秒上时距的加工中^[22, 23]。这表明时距知觉的适应机制同时产生于秒下和秒上的时距知觉系统中。

1.2 与其他时间感知适应后效的联系和区别

在时间知觉领域, 感知适应不仅表现在对单一实时距的知觉中而且也表现在对时间节律的知觉中。已有研究显示, 在适应快速节律后, 被试会低估后续的中速节律; 相反, 在适应慢速节律后, 被试会高估后续的中速节律^[24-26], 这种现象被称为节律知觉适应后效(rhythm aftereffect)。类似于时距知觉适应后效, 节律知觉适应后效不仅具有双向性, 而且同样具有节律调谐性和感觉通道特异性^[26], 这表明节律知觉适应后效与时距知觉适应后效是两种相关的现象, 其产生的内部机制可能具有相似性。

然而, 从表现形式来看, 时距知觉适应后效有别于由适应导致的其他时距错觉现象。研究显示, 在持续呈现一个 20 Hz 的视觉运动或闪烁刺激 20 s 之后, 被试对后续 10 Hz 的视觉运动或闪烁刺激的呈现时间产生了低估, 即表现出一种由适应导致的时间收缩效应^[27, 28]。另外, 研究也显示, 在持续呈现一个以 5 Hz 闪烁的视觉刺激 5 s 之后, 被试对后续静止的视觉刺激的呈现时间产生了高估, 即表现出一种由适应导致的时间膨胀效应^[29, 30]。这些由运动或节律适应导致的时距知觉扭曲现象表现为一种单向后效, 且其表现出低水平适应的特征。例如, 它们具有空间特异性^[31], 不能够在双眼之间迁移^[32], 受制于刺激的朝向^[29]。然而, 本文所关注的时距知

觉适应后效不但表现为双向的负后效, 而且能够在不同的视觉空间位置和刺激朝向间迁移^[17, 33, 34]。这说明它们涉及不同的认知神经机制, 本质上是不同的现象。因此, 研究中应将这些现象与本文关注的时距知觉适应后效区别对待。

2 时距知觉适应后效的性质: 感知适应还是锚定?

个体的感知体验不仅取决于当前输入的客观感知信息, 而且同样取决于个体在判断时所依据的内部参照标准^[35-37]。对此, 一个典型的例子就是由锚定刺激导致的对比效应(anchor-induced contrast effect): 先前的高锚定值使个体低估后续量值; 先前的低锚定值使个体高估后续量值^[38, 39]。的确, 时距知觉也遵循着锚定规则。例如, 研究显示较长的锚定时距导致被试低估后续的时距信息, 而较短的锚定时距导致被试高估后续的时距信息^[40-42]。根据内隐记忆模型(implicit memory model), 这是因为时距知觉依赖于自适应的先前记忆, 即先前的记忆可以不断被在一定记忆窗口内的先前时距信息刷新, 进而为后续的时距判断提供一种内部参照标准^[43, 44]。因此, 如果记忆中的参照标准时距较长, 那么个体会更倾向于认为当前的时距较短; 反之, 如果记忆中的参照标准时距较短, 那么个体会更倾向于认为当前的时距较长。时距知觉适应后效与时距知觉锚定效应在行为上的表现非常类似, 因此一个值得思考的问题是时距知觉适应后效的产生是否仅仅是由于适应时距改变了被试后续时距判断时采用的内部参照标准。如果这一假设成立, 那么时距知觉适应后效可能仅仅是一种锚定效应的特例, 而非一种独特的感知适应现象。

为了探讨这一问题, 我们在最近的一项研究中采用了一种新的适应方法, 试图将适应时距导致的锚定效应分离, 进而区分时距知觉适应后效的性质^[23]。在早期研究中, 判断时距知觉适应后效的产生与否, 往往是通过比较不同适应时距条件下被试在后续时距知觉中的表现^[14, 16]。与这些早期研究不同, 在我们的研究中适应时距仅为一个中等长度的时距信息(500 ms), 而测试时距以适应时距为中心呈对称分布(200~800 ms), 最后将适应条件下复制的测试时距与无适应条件下复制的测试时距相比, 以此来确定时距知觉适应后效的产生与否。由于内部参照标准的大小与刺激的分布密切相关, 且往往

对应着刺激分布的平均数^[36, 45, 46], 而当刺激分布是一种对称分布时其平均数又等于中数, 因此采用适应中等时距的方法在一定程度上会减小内部参照标准的改变对后续时距判断的影响。我们的研究^[23]显示, 在反复呈现一个中等的时距信息后, 被试既高估了后续较长的测试时距又低估了后续较短的测试时距, 表现出显著的时距知觉适应后效; 然而, 在仅呈现一次中等时距信息后, 被试对后续时距的复制与无适应条件没有显著差异。这一方面说明适应中等的时距信息的确能够排除锚定效应的影响, 另一方面也说明时距知觉适应后效受到适应时间的影响, 仅发生在长时适应之后。由于时距知觉适应后效在控制锚定效应之后依然存在, 并且受到适应时间的制约(不符合锚定效应的特点), 这说明时距知觉适应后效并非仅仅是一种锚定效应的特例。

我们的一项脑电图(electroencephalography, EEG)研究进一步证明了这一结论^[47]。传统的计时模型, 如标量计时理论(scalar timing theory)以信息加工的视角将个体对时距信息的加工分为三个阶段: 时钟、记忆和决策阶段^[48]。在时钟阶段, 起搏器不断发放脉冲, 经开关被累加器整合以形成时距表征, 这一阶段也可以认为是时距加工的编码阶段; 在记忆阶段, 工作记忆和参照记忆分别存储着当前的时距信息和过去的时距信息; 在决策阶段, 个体基于一定的规则将工作记忆和参照记忆中的时距信息进行比较, 最终做出相应的反应。由此可见, 个体在行为上的时距知觉表现是这三个阶段共同作用的总效果。那么时距知觉适应对后续时距知觉的影响究竟

发生在时距加工的哪个阶段呢? 对这一问题的解答的实质仍是在探讨时距知觉适应后效性质的问题: 如果时距知觉适应后效仅仅是一种锚定效应的特例, 那么可以预测时距知觉适应对后续时距知觉的影响会发生在较高水平的记忆或决策阶段; 反之, 如果时距知觉适应后效是一种感知适应现象, 那么可以预测时距知觉适应对后续时距知觉的影响则会发生在较早的编码阶段。我们的研究显示, 虽然时距知觉适应和时距知觉锚定对后续时距复制的影响在行为上表现出了相似的效应, 然而只有时距知觉适应能够影响后续测试时距诱发的关联负变化(contingent negative variation, CNV)的幅值^[47]。由于测试时距诱发的 CNV 幅值往往反映了时距编码的过程^[49–51], 因此这说明不同于时距知觉锚定, 时距知觉适应对后续时距知觉的影响在时距加工的编码阶段已经开始, 进一步说明了时距知觉适应后效是一种感知适应现象。

3 时距知觉适应后效的认知神经机制

3.1 通道模型(channel-based model)

时距知觉适应后效作为一种感知适应现象, 目前通道模型对其产生机制提供了很好的解释^[14]。该模型认为在个体的认知神经网络中存在一群对时距信息进行选择性加工的通道; 每个通道具有自身的偏好加工时距, 其激活程度取决于外部输入的时距信息与相应通道偏好时距的匹配程度, 匹配越高激活程度越大。因此, 这些时距选择性通道对时距信息的加工具有调谐性(图1)。需要强调的是, 这一

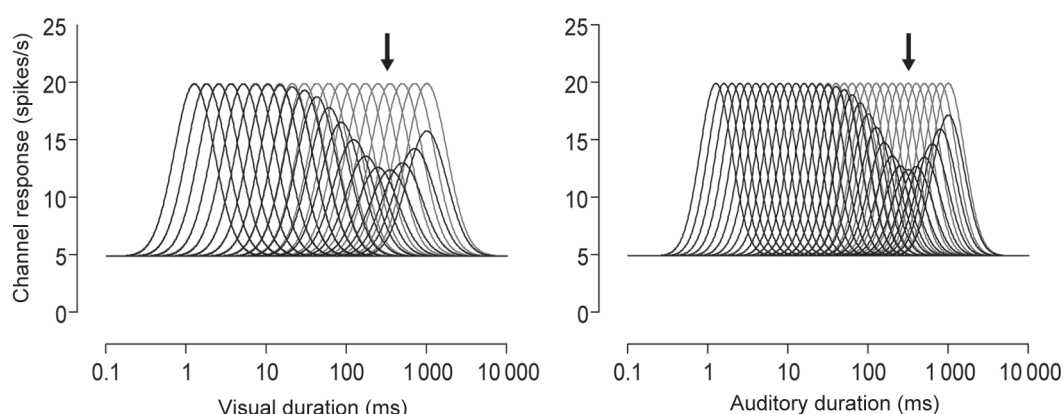


图 1. 时距知觉的通道模型

Fig. 1. The channel-based model of temporal duration, adapted from Heron *et al.*^[14] with permission. Each Gaussian distribution describes the tuning curve of each duration channel. The gray lines show normal responses of the duration channels, while the black lines show channel responses after adaptation to a specific duration (arrow).

模型认为对时距信息的表征是由这些通道的群体激活模式，而非单个活动决定。根据通道模型，之所以会产生时距知觉适应后效是因为某一特定时距的重复出现选择性地减弱了相应通道的反应，进而改变了这类通道的群体激活模式，最终导致个体对后续时距知觉的偏差。

通道模型不仅可以解释时距知觉适应后效，而且也得到了其他研究的支持。例如，时距知觉学习的研究显示，时距知觉学习的效果具有时距特异性，即对某一特定时距分辨能力的训练效果不能迁移到其他时距^[52-55]。这进一步说明认知神经系统对时距信息的加工具有选择性，符合通道模型的假设。此外，通道模型也得到了神经生物学方面证据的支持。例如，电生理学的研究显示，在动物的脑中的确存在一些对特定时距信息敏感的神经元^[56-61]。另外，最近的一项功能性磁共振成像 (functional magnetic resonance imaging, fMRI) 研究也表明人类大脑的顶下小叶 (inferior parietal lobule) 存在对特定时距信息敏感的神经元^[62]。这些证据都支持时距通道的存在。

然而，并不是所有的证据都支持这一模型假设。例如，Curran 等采用感知适应范式探讨了时距知觉适应对后续时距知觉的影响，结果发现无论对于动态刺激还是静态刺激，时距知觉适应仅导致了单向的时距收缩效应而非典型的双向负后效^[63]。因此，他们认为通道模型并不能解释时距知觉。然而，分析表明，导致 Curran 等研究结果出现的原因很可能是研究方法的差异。例如，在 Curran 等^[63]的研究中，实验 1 和实验 2 的测试刺激和比较刺激都为视觉刺激，它们呈现在注视点的不同方向。由于研究已表明视时距知觉适应后效能够在不同的空间位置迁移^[33, 34]，因此很可能在这些实验中无论测试刺激还是比较刺激都受到时距知觉适应的影响，进而这两种刺激比较会将适应对后续时距知觉的影响抵消。的确，在实验 3 中采用听觉刺激作为比较刺激后，结果显示被试对后续测试刺激呈现时间的判断在适应长时距和适应短时距条件下出现了边缘显著差异，即表现出了时距知觉适应后效。因此，这一研究结果似乎并不能否定时距知觉适应后效的存在，同时也不能否定时距知觉的通道模型。

对于认知神经系统是如何加工时距信息的问题目前仍存在很大的争论^[64-66]。是否承认脑中存在专门加工时距信息的“内部时钟”，是这些争论的核

心问题之一。Ivry 和 Schlerf 将现有对这一问题的解释模型归为两类：专享模型 (dedicated model) 和内在模型 (intrinsic model)^[65]。专享模型认为时距知觉与颜色或运动知觉类似，在脑中存在特异化的专门加工机制；内在模型则认为个体对时距信息的表征是通过神经网络激活的时空模式或数量来完成的，即脑中不存在专门加工时距信息的系统，对时距的感知仅仅是神经活动的“副产品”。根据这一标准，通道模型支持了专享模型的观点。然而，不同于传统的内部时钟模型 (认为脑中存在一个统一的“时钟”，其负责表征不同形式的时距信息)，通道模型认为脑中负责表征时距信息的“时钟”是分布式的，即不同感觉通道存在相互独立的时距通道。这为我们理解时距知觉提供了新的视角。那么个体的时距知觉是否仅仅依赖于这种分布式的时距通道呢？根据纹状体振荡频率模型 (striatal beat-frequency model)，皮质 - 纹状体回路是时距表征的基础^[67, 68]。具体来说，时距知觉不仅依赖于皮质神经元的振荡，而且依赖于纹状体神经元对皮质神经元活动的同步检测。结合这一模型，一种可能的情况是个体的时距知觉不仅依赖于分布式的时距通道，而且同样取决于一种中枢性的计时机制，这种中枢性的计时机制能够检测到这些对时距信息具有选择性加工的通道激活模式，进而形成时距知觉。

3.2 神经基础

虽然，通道模型为时距知觉适应后效的产生提供了一种可能的解释。然而，目前这种导致时距知觉适应后效的“通道”究竟位于神经系统的哪一位置仍不清楚。

Heron 等^[14]发现不同于发生在较高级脑区的快速适应现象，时距知觉适应后效仅发生在长时适应之后，且在适应阶段同时出现的听觉时距不会影响视觉时距知觉适应对后续视觉时距知觉的影响，但听觉时距知觉适应能够影响与后续听觉刺激同时出现的视觉刺激的时距知觉，这表明时距知觉适应产生于视听时距信息整合之前^[69]。据此，他们认为时距信息是一种类似于空间频率的低水平刺激特征，时距知觉适应发生在早期的感觉加工阶段。这一观点得到了一些电生理学研究的支持。例如，研究表明在猫的初级视觉皮层 (primary visual cortex, V1) 以及大鼠、小鼠和蝙蝠等动物的听觉中脑 (auditory midbrain) 确实存在对时距信息具有选择性加工的神经元^[56, 59, 60, 70, 71]。

然而, 有研究却表明在听觉通道和视觉通道内时距知觉适应后效的表现并非完全相似: 听时距知觉适应后效取决于听觉刺激的低水平特征(如, 频率), 而视时距知觉适应后效却不取决于视觉刺激的低水平特征(如, 朝向)^[17]; 且视时距知觉适应后效并不受空间位置的制约, 其不但能在同侧视野的不同位置间迁移, 而且也可以在不同的视野间迁移^[33, 34]。由于已有研究表明早期感觉皮层(如, V1)对朝向和空间位置信息的编码具有选择性^[72, 73], 说明相比听觉通道, 视觉通道中时距知觉适应可能发生在较高级的感知加工阶段。这一观点同样得到了电生理学研究的支持。例如, 有研究显示在灵长类动物的内侧前运动区(medial premotor cortex)和额叶(prefrontal cortex)也存在对时距信息具有选择性加工的神经元^[61, 74]。目前以人类为研究对象的fMRI研究也支持了视时距知觉适应产生于较晚神经位置的观点。采用短时fMRI适应技术, Hayashi等发现当一个视觉刺激以某一特定的呈现时间重复出现一次后, 人类大脑顶下小叶区域的神经活动减弱, 这表明顶下小叶存在对特定时距信息进行选择性加工的神经元^[62]。

4 问题与展望

不同于对颜色或声音等刺激特征的知觉, 个体对时距的知觉并没有特定的感受器, 这在一定程度上阻碍了我们对时距知觉的理解。虽然研究者已对时距知觉进行了大量的研究, 但是对于认知神经系统是如何加工时距信息的问题仍存在很大的争论^[65]。作为“心理物理学家的微电极”, 感知适应现象多年来都是认知神经科学研究领域的前沿和热点之一。因此, 对时距知觉适应后效的研究有助于我们更好地理解时距知觉的认知神经机制。然而, 相比其他感知适应现象, 时距知觉适应后效近年来才受到人们更多的关注, 目前仍存在大量问题, 有待今后研究继续探讨。

4.1 时距知觉适应后效的普遍性

时距知觉是一种普遍的现象, 这不但表现在其存在于各种感觉通道中, 同时也表现在其具有多种形式(如, 实时距和空时距)和范围(如, 秒下和秒上时距)。然而, 目前关于时距知觉适应后效的研究主要集中于对视听通道秒下时距知觉的探讨。因此, 今后应更加全面地探讨时距知觉适应后效。

首先, 对多种感觉通道的时距知觉适应后效进

行全面探讨。目前对时距知觉适应后效的研究仅集中在视听通道, 尚未见其他感觉通道(如, 触觉)中是否也存在时距知觉适应后效的报道。鉴于时距知觉适应后效具有通道特异性, 在不同感觉通道中其产生的认知神经机制并不相同, 因此有必要继续探讨其他感觉通道中的时距知觉适应现象。

其次, 进一步探讨不同时距范围的时距知觉适应后效。时间认知的分段综合模型(range-synthetic model)认为, 个体对时间的认知具有分段性, 不同范围的时距信息具有不同的表征^[19]。虽然已有研究表明在秒下和秒上的时距知觉中都存在视时距知觉适应后效^[22], 然而这并不代表这两种范围的时距知觉适应后效具有相同的认知神经机制。因此, 今后的研究仍需继续探讨秒上时距知觉适应后效的认知神经机制。例如, 秒上时距知觉适应后效是否具有感觉通道特异性, 是否取决于刺激的低水平特征, 以及是否与秒下时距知觉适应后效具有相同的神经基础等。

最后, 有必要综合探讨不同类型的时间感知适应后效。时间感知适应后效既可表现为时距知觉适应后效, 也可表现为节律知觉适应后效。虽然它们具有一些相似的特点, 然而目前仍没有直接的证据表明它们是否具有相同的认知神经机制。对这一问题的探讨可以从不同类型时间感知适应后效间的迁移性方面考察。例如, 对时距知觉的适应是否可以影响后续的节律知觉? 反之, 对节律知觉的适应是否可以影响后续的时距知觉? 如果它们之间可以相互影响, 则可以推测它们可能涉及共同的机制。

4.2 时距知觉适应后效的神经基础

人类大脑中是否存在对时距信息具有选择性加工的神经元, 这些神经元位于大脑的哪一位置, 以及这些神经元的神经适应是否是导致时距知觉适应后效的神经基础? 这些问题是目前时距知觉适应研究中的核心问题。对时距知觉适应后效的探讨, 以往研究更多采用行为实验进行。然而, 行为实验无法直接回答这一现象产生的神经基础, 存在一定的局限性。虽然目前已有研究者采用短时fMRI适应技术发现人类大脑的顶下小叶存在对时距信息具有选择性加工的神经元, 但并没有直接的证据表明这些脑区的神经适应与行为上观察到的时距知觉适应后效有直接关系。相反, 行为实验的结果已表明时距知觉适应后效取决于适应的时长, 其仅发生在长时适应之后^[14, 23]; fMRI研究也显示, 无论对低水

平的视觉朝向的加工还是对高水平的面孔角度的加工, 神经活动的适应依赖于适应的时间长短, 即随着适应时间的改变神经适应发生的脑区也在改变^[75, 76]。因此, 顶下小叶的神经适应很可能并不是导致时距知觉适应后效的神经基础。鉴于此, 未来应有更多以人类为研究对象, 采用长时 fMRI 适应技术探讨不同感觉通道时距知觉适应后效神经基础的研究。此外, 对时距知觉适应后效神经基础的研究不仅要依赖传统的 fMRI 适应技术, 还要应用更多的其他方法。例如, 利用 fMRI 多体素模式分析 (multi-voxel pattern analysis, MVPA) 方法考察相应脑区对不同时距信息的神经表征, 以及采用经颅磁刺激 (transcranial magnetic stimulation, TMS) 技术考察在特定脑区施加刺激对时距知觉适应后效的影响等。

4.3 注意对时距知觉适应后效的影响

注意与时距知觉具有密切联系^[4]。早期的注意模型强调注意分配对时距加工的影响: 在一定条件下, 分配到时距信息加工的注意资源越多, 个体感知的时距越长^[77]。后来的注意闸门模型 (attentional-gate model) 也认为只有当个体注意时距信息时, 注意闸门才打开, 脉冲才能进入下一阶段, 形成时距表征^[78]。此外, 注意不仅能够直接调节感知信息的加工, 而且也能够调节感知适应对后续感知信息加工的影响。例如, 研究表明倾斜后效和运动后效的大小受到个体注意状态的影响^[11, 79-83]。那么注意是否也能够影响时距知觉适应后效的大小呢? 最近的一项研究显示, 当注视点两侧同时呈现不同的适应时距, 但仅要求被试注意一侧的适应时距时, 时距知觉适应后效仅取决于受到注意的适应时距, 这说明视觉注意的确能够调节时距知觉适应后效^[84]。然而, 这项研究涉及的视觉注意既包含空间注意, 也包含基于客体特征 (时距) 的注意。鉴于这两种注意具有不同的神经机制^[85], 因此, 将来的研究有必要分别考察不同的注意类型对时距知觉适应后效的影响。此外, 研究也表明注意对神经活动的调节作用具有层次性: 相比低级脑区 (如, V1), 较高级脑区 (如, V4) 的神经活动更易受到注意的影响^[86, 87]。考虑到不同感觉通道时距知觉适应发生的神经位置可能位于不同层级的脑区, 因此注意对时距知觉适应后效的影响可能受到感觉通道的制约。具体来说, 一种可能的假设是相比视时距知觉适应后效, 听时距知觉适应后效会较小地受到个体注意状态的影响。这一假设仍需将来研究的证实。

4.4 从个体差异的角度探讨时距知觉适应后效

采用感知错觉现象探讨感知系统的认知神经机制已有很长的历史。前人的研究已表明感知错觉现象同样存在个体差异^[88, 89]。因此, 虽然时距知觉适应后效是一种稳定的心理现象, 但是这并不代表其不存在个体差异。因此, 今后的研究也应从个体差异的视角来看待时距知觉适应后效。例如, 探讨受过特殊训练的音乐家和一般群体间的时距知觉适应后效是否存在差异。此外, 各种疾病, 如帕金森病、精神分裂症和多动症等对时距知觉都有重要影响^[90]。因此, 考察相应的患者在时距知觉适应后效上的表现与正常人的差异, 不但有利于更好地理解这一现象而且具有重要的临床意义。这些问题都有待于今后研究的探讨。

参考文献

- 1 Huang XT (黄希庭), Guo XY, Nie J. The relationship between temporal and non-temporal information in cognitive processing. *Psychol Sci (心理科学)* 2003; 26(5): 770-774 (in Chinese with English abstract).
- 2 Fraisse P. Perception and estimation of time. *Annu Rev Psychol* 1984; 35: 1-36.
- 3 Feng SH (凤四海), Huang XT. A review on the theories and experimental paradigms of time perception. *Psychol Sci (心理科学)* 2004; 27(5): 1157-1160 (in Chinese with English abstract).
- 4 Block RA, Hancock PA, Zakay D. How cognitive load affects duration judgments: a meta-analytic review. *Acta Psychol (Amst)* 2010; 134(3): 330-343.
- 5 Droit-Volet S, Fayolle SL, Gil S. Emotion and time perception: effects of film-induced mood. *Front Integr Neurosci* 2011; 5: 33.
- 6 Xuan B, Chen XC, He S, Zhang DR. Numerical magnitude modulates temporal comparison: an ERP study. *Brain Res* 2009; 1269: 135-142.
- 7 Xuan B, Zhang DR, He S, Chen XC. Larger stimuli are judged to last longer. *J Vis* 2007; 7(10): 2. 1-5.
- 8 Tse PU, Intriligator J, Rivest J, Cavanagh P. Attention and the subjective expansion of time. *Percept Psychophys* 2004; 66(7): 1171-1189.
- 9 Penton-Voak I, Edwards H, Percival A, Wearden J. Speeding up an internal clock in humans? Effects of click trains on subjective duration. *J Exp Psychol Anim Behav Process* 1996; 22(3): 307-320.
- 10 Magnussen S, Kurtenbach W. Adapting to two orientations: disinhibition in a visual aftereffect. *Science* 1980; 207(4433): 908-909.

- 11 Spivey MJ, Spirn MJ. Selective visual attention modulates the direct tilt aftereffect. *Percept Psychophys* 2000; 62(8): 1525–1533.
- 12 Anstis S, Verstraten FA, Mather G. The motion aftereffect. *Trends Cogn Sci* 1998; 2(3): 111–117.
- 13 Tootell RB, Reppas JB, Dale AM, Look RB, Sereno MI, Malach R, Brady TJ, Rosen BR. Visual motion aftereffect in human cortical area MT revealed by functional magnetic resonance imaging. *Nature* 1995; 375(6527): 139–141.
- 14 Heron J, Aaen-Stockdale C, Hotchkiss J, Roach NW, McGraw PV, Whitaker D. Duration channels mediate human time perception. *Proc R Soc Lond B Biol Sci* 2012; 279(1729): 690–698.
- 15 Frisby JP. *Seeing: Illusion, Brain and Mind*. Oxford: Oxford University Press, 1979.
- 16 Walker JT, Irion AL, Gordon DG. Simple and contingent aftereffects of perceived duration in vision and audition. *Percept Psychophys* 1981; 29(5): 475–486.
- 17 Li BL, Yuan XY, Huang XT. The aftereffect of perceived duration is contingent on auditory frequency but not visual orientation. *Sci Rep* 2015; 5: 10124.
- 18 Walker JT, Irion AL. Two new contingent aftereffects: perceived auditory duration contingent on pitch and on temporal order. *Percept Psychophys* 1979; 26(3): 241–244.
- 19 Huang XT (黄希庭), Li BY, Zhang ZJ. The research of the range-synthetic model of temporal cognition. *J Southwest China Normal Univ Humanit Soc Sci Ed (西南师范大学学报人文社会科学版)* 2003; 29(002): 5–9 (in Chinese with English abstract).
- 20 Lewis PA, Miall RC. Brain activation patterns during measurement of sub- and supra-second intervals. *Neuropsychologia* 2003; 41(12): 1583–1592.
- 21 Lewis PA, Miall RC. Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: evidence from neuroimaging. *Curr Opin Neurobiol* 2003; 13(2): 250–255.
- 22 Shima S, Murai Y, Hashimoto Y, Yotsumoto Y. Duration adaptation occurs across the sub- and supra-second systems. *Front Psychol* 2016; 7: 114.
- 23 Li BL, Xiao LJ, Yin HZ, Liu PD, Huang XT. Duration aftereffect depends on the duration of adaptation. *Front Psychol* 2017; 8: 491.
- 24 Becker MW, Rasmussen IP. The rhythm aftereffect: support for time sensitive neurons with broad overlapping tuning curves. *Brain Cogn* 2007; 64(3): 274–281.
- 25 Levitan CA, Ban YH, Stiles NR, Shimojo S. Rate perception adapts across the senses: evidence for a unified timing mechanism. *Sci Rep* 2015; 5: 8857.
- 26 Motala A, Heron J, McGraw PV, Roach NW, Whitaker D. Rate after-effects fail to transfer cross-modally: evidence for distributed sensory timing mechanisms. *Sci Rep* 2018; 8: 924.
- 27 Johnston A, Arnold DH, Nishida S. Spatially localized distortions of event time. *Curr Biol* 2006; 16(5): 472–479.
- 28 Watanabe J, Amemiya T, Nishida S, Johnston A. Tactile duration compression by vibrotactile adaptation. *Neuroreport* 2010; 21(13): 856–860.
- 29 Ortega L, Guzman-Martinez E, Grabowecky M, Suzuki S. Flicker adaptation of low-level cortical visual neurons contributes to temporal dilation. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2012; 38(6): 1380–1389.
- 30 Droit-Volet S, Wearden J. Speeding up an internal clock in children? Effects of visual flicker on subjective duration. *Q J Exp Psychol B* 2002; 55(3): 193–211.
- 31 Ayhan I, Bruno A, Nishida S, Johnston A. The spatial tuning of adaptation-based time compression. *J Vis* 2009; 9(11): 2, 1–12.
- 32 Bruno A, Ayhan I, Johnston A. Retinotopic adaptation-based visual duration compression. *J Vis* 2010; 10(10): 30.
- 33 Li BL, Yuan XY, Chen YG, Liu PD, Huang XT. Visual duration aftereffect is position invariant. *Front Psychol* 2015; 6: 1536.
- 34 Maarseveen J, Hogendoorn H, Verstraten FA, Paffen CL. An investigation of the spatial selectivity of the duration aftereffect. *Vision Res* 2016; 130: 67–75.
- 35 Grondin S. Overloading temporal memory. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2005; 31(5): 869–879.
- 36 Dyjas O, Bausenhardt KM, Ulrich R. Trial-by-trial updating of an internal reference in discrimination tasks: evidence from effects of stimulus order and trial sequence. *Atten Percept Psychophys* 2012; 74(8): 1819–1841.
- 37 Bausenhardt KM, Dyjas O, Ulrich R. Temporal reproductions are influenced by an internal reference: explaining the Vierordt effect. *Acta Psychol (Amst)* 2014; 147: 60–67.
- 38 Helson H. Current trends and issues in adaptation-level theory. *Am Psychol* 1964; 19(1): 26–38.
- 39 LeBoeuf RA, Shafir E. The long and short of it: physical anchoring effects. *J Behav Decis Mak* 2006; 19(4): 393–406.
- 40 Behar I, Bevan W. The perceived duration of auditory and visual intervals: cross-modal comparison and interaction. *Am J Psychol* 1961; 74(1): 17–26.
- 41 Goldstone S, Lhamon WT, Boardman WK. The time sense: anchor effects and apparent duration. *J Psychol* 1957; 44(1): 145–153.
- 42 Postman L, Miller G. Anchoring of temporal judgments. *Am J Psychol* 1945; 58(1): 43–53.
- 43 Wiener M, Thompson JC, Coslett HB. Continuous carryover of temporal context dissociates response bias from perceptual influence for duration. *PLoS One* 2014; 9(6): e100803.

- 44 Wiener M, Thompson JC. Repetition enhancement and memory effects for duration. *Neuroimage* 2015; 113: 268–278.
- 45 Mamassian P, Landy MS. It's that time again. *Nat Neurosci* 2010; 13(8): 914–916.
- 46 Shi Z, Church RM, Meck WH. Bayesian optimization of time perception. *Trends Cogn Sci* 2013; 17(11): 556–564.
- 47 Li BL, Chen YG, Xiao LJ, Liu PD, Huang XT. Duration adaptation modulates EEG correlates of subsequent temporal encoding. *Neuroimage* 2016; 147: 143–151.
- 48 Gibbon J, Church RM, Meck WH. Scalar timing in memory. *Ann N Y Acad Sci* 1984; 423(1): 52–77.
- 49 Macar F, Vidal F, Casini L. The supplementary motor area in motor and sensory timing: evidence from slow brain potential changes. *Exp Brain Res* 1999; 125(3): 271–280.
- 50 Macar F, Vidal F. Event-related potentials as indices of time processing: a review. *J Psychophysiol* 2004; 18(2/3): 89–104.
- 51 Ng KK, Penney TB. Probing interval timing with scalp-recorded electroencephalography (EEG). *Adv Exp Med Biol* 2014: 187–207.
- 52 Karmarkar UR, Buonomano DV. Temporal specificity of perceptual learning in an auditory discrimination task. *Learn Mem* 2003; 10(2): 141–147.
- 53 Nagarajan SS, Blake DT, Wright BA, Byl N, Merzenich MM. Practice-related improvements in somatosensory interval discrimination are temporally specific but generalize across skin location, hemisphere, and modality. *J Neurosci* 1998; 18(4): 1559–1570.
- 54 Wright BA, Buonomano DV, Mahncke HW, Merzenich MM. Learning and generalization of auditory temporal-interval discrimination in humans. *J Neurosci* 1997; 17(10): 3956–3963.
- 55 Bueti D, Lasaponara S, Cercignani M, Macaluso E. Learning about time: plastic changes and interindividual brain differences. *Neuron* 2012; 75(4): 725–737.
- 56 Casseday J, Ehrlich D, Covey E. Neural tuning for sound duration: role of inhibitory mechanisms in the inferior colliculus. *Science* 1994; 264(5160): 847–850.
- 57 Ehrlich D, Casseday JH, Covey E. Neural tuning to sound duration in the inferior colliculus of the big brown bat, *Eptesicus fuscus*. *J Neurophysiol* 1997; 77(5): 2360–2372.
- 58 Wu C, Jen PS. Echo frequency selectivity of duration-tuned inferior collicular neurons of the big brown bat, *Eptesicus fuscus*, determined with pulse-echo pairs. *Neuroscience* 2008; 156(4): 1028–1038.
- 59 Brand A, Urban R, Grothe B. Duration tuning in the mouse auditory midbrain. *J Neurophysiol* 2000; 84(4): 1790–1799.
- 60 Duysens J, Schaafsma S, Orban G. Cortical off response tuning for stimulus duration. *Vision Res* 1996; 36(20): 3243–3251.
- 61 Yumoto N, Lu X, Henry TR, Miyachi S, Nambu A, Fukai T, Takada M. A neural correlate of the processing of multi-second time intervals in primate prefrontal cortex. *PLoS One* 2011; 6(4): e19168.
- 62 Hayashi MJ, Ditye T, Harada T, Hashiguchi M, Sadato N, Carlson S, Walsh V, Kanai R. Time adaptation shows duration selectivity in the human parietal cortex. *PLoS Biol* 2015; 13(9): e1002262.
- 63 Curran W, Benton CP, Harris JM, Hibbard PB, Beattie L. Adapting to time: duration channels do not mediate human time perception. *J Vis* 2016; 16(5): 4.
- 64 Allman MJ, Teki S, Griffiths TD, Meck WH. Properties of the internal clock: first- and second-order principles of subjective time. *Annu Rev Psychol* 2014; 65: 743–771.
- 65 Ivry RB, Schlerf JE. Dedicated and intrinsic models of time perception. *Trends Cogn Sci* 2008; 12(7): 273–280.
- 66 Merchant H, Harrington DL, Meck WH. Neural basis of the perception and estimation of time. *Annu Rev Neurosci* 2013; 36: 313–336.
- 67 Matell MS, Meck WH. Cortico-striatal circuits and interval timing: coincidence detection of oscillatory processes. *Cogn Brain Res* 2004; 21(2): 139–170.
- 68 Meck WH, Penney TB, Pouthas V. Cortico-striatal representation of time in animals and humans. *Curr Opin Neurobiol* 2008; 18(2): 145–152.
- 69 Heron J, Hotchkiss J, Aaen-Stockdale C, Roach NW, Whitaker D. A neural hierarchy for illusions of time: duration adaptation precedes multisensory integration. *J Vis* 2013; 13(14): 4.
- 70 Faure PA, Fremouw T, Casseday JH, Covey E. Temporal masking reveals properties of sound-evoked inhibition in duration-tuned neurons of the inferior colliculus. *J Neurosci* 2003; 23(7): 3052–3065.
- 71 Pérez-González D, Malmierca MS, Moore JM, Hernández O, Covey E. Duration selective neurons in the inferior colliculus of the rat: topographic distribution and relation of duration sensitivity to other response properties. *J Neurophysiol* 2006; 95(2): 823–836.
- 72 Ringach DL, Hawken MJ, Shapley R. Dynamics of orientation tuning in macaque primary visual cortex. *Nature* 1997; 387(6630): 281–284.
- 73 Schoups A, Vogels R, Qian N, Orban G. Practising orientation identification improves orientation coding in V1 neurons. *Nature* 2001; 412(6846): 549–553.
- 74 Merchant H, Perez O, Zarco W, Gamez J. Interval tuning in the primate medial premotor cortex as a general timing mechanism. *J Neurosci* 2013; 33(21): 9082–9096.
- 75 Fang F, Murray SO, Kersten D, He S. Orientation-tuned

- fMRI adaptation in human visual cortex. *J Neurophysiol* 2005; 94(6): 4188–4195.
- 76 Fang F, Murray SO, He S. Duration-dependent fMRI adaptation and distributed viewer-centered face representation in human visual cortex. *Cereb Cortex* 2007; 17(6): 1402–1411.
- 77 Thomas EA, Weaver WB. Cognitive processing and time perception. *Atten Percept Psychophys* 1975; 17(4): 363–367.
- 78 Zakay D, Block RA. Temporal cognition. *Curr Dir Psychol Sci* 1997; 6(1): 12–16.
- 79 Takeuchi T, Kita S. Attentional modulation in motion aftereffect. *Jpn Psychol Res* 1994; 36(2): 94–107.
- 80 Raymond JE. Attentional modulation of visual motion perception. *Trends Cogn Sci* 2000; 4(2): 42–50.
- 81 Rezac A, Krekelberg B, Dobkins KR. Attention enhances adaptability: evidence from motion adaptation experiments. *Vision Res* 2004; 44(26): 3035–3044.
- 82 Rhodes G, Jeffery L, Evangelista E, Ewing L, Peters M, Taylor L. Enhanced attention amplifies face adaptation. *Vision Res* 2011; 51(16): 1811–1819.
- 83 Suzuki S. Attention-dependent brief adaptation to contour orientation: a high-level aftereffect for convexity? *Vision Res* 2001; 41(28): 3883–3902.
- 84 Maarseveen J, Hogendoorn H, Verstraten FAJ, Paffen CLE. Attention gates the selective encoding of duration. *Sci Rep* 2018; 8: 2522.
- 85 Hayden BY, Gallant JL. Time course of attention reveals different mechanisms for spatial and feature-based attention in area V4. *Neuron* 2005; 47(5): 637–643.
- 86 Mcadams CJ, Maunsell JH. Effects of attention on orientation-tuning functions of single neurons in macaque cortical area V4. *J Neurosci* 1999; 19(1): 431–441.
- 87 Kastner S, Weerd PD, Desimone R, Ungerleider LG. Mechanisms of directed attention in the human extrastriate cortex as revealed by functional MRI. *Science* 1998; 282(5386): 108–111.
- 88 Coren S, Porac C. Individual differences in visual-geometric illusions: predictions from measures of spatial cognitive abilities. *Percept Psychophys* 1987; 41(3): 211–219.
- 89 Grzeczowski L, Clarke AM, Francis G, Mast FW, Herzog MH. About individual differences in vision. *Vision Res* 2017; 141: 282–292.
- 90 Allman MJ, Meck WH. Pathophysiological distortions in time perception and timed performance. *Brain* 2012; 135(3): 656–677.