

复制任务促进时距知觉序列依赖跨通道效应*

寇聪超 李宝林 翟小斐

(陕西师范大学心理学院, 西安 710062)

摘要 序列依赖反映了短时程的先前经验对后续感知加工的影响。本研究通过 3 个实验系统探究了时距复制任务中的序列依赖效应以及任务范式对时距知觉序列依赖跨通道效应的影响。结果发现: 时距复制任务中先前刺激和复制时距能够分别导致排斥性的刺激序列依赖效应和吸引性的反应序列依赖效应; 刺激和反应序列依赖效应在复制任务中表现出一定程度的跨通道性, 在时距二分任务中则具有通道特异性。这些发现揭示了任务范式是影响时距知觉刺激和反应序列依赖跨通道效应的重要因素。这说明时距知觉的刺激序列依赖效应并非完全源于低水平的感知适应, 其涉及高水平的认知加工; 反应序列依赖效应并不是一种简单机械的决策惯性, 其涉及对反应策略的整合利用。

关键词 序列依赖, 任务, 刺激, 反应, 跨通道

分类号 B842

1 引言

时距知觉(duration perception)是个体对客观现象持续性的一种感知, 包括对某一事件持续时间或两个相继事件之间时间间隔的感知(黄希庭, 郭秀艳, 聂晶, 2003)。时距知觉在人类与外界环境交互中发挥着重要作用。例如, 舞蹈动作的协调、烹饪时长的把控、运动节奏的调整甚至是游戏时机的把握, 这些都依赖于时距知觉。然而, 个体感知到的时距长度不仅受客观物理时距长度的影响, 而且也会因多种其他因素的影响而发生扭曲(Matthews & Meck, 2016)。例如, 个体的感知历史(先前经验)是影响时距知觉的重要因素, 这种影响可表现为序列依赖效应(serial dependence effect) (Li et al., 2023)。

序列依赖反映了短时程的先前经验对个体后续感知加工的影响, 实验室研究中常表现为先前试次对当前感知的影响。早期的众多研究发现序列依赖主要表现为一种总体的吸引效应, 即个体当前的感知倾向于偏向先前试次信息(Fischer & Whitney, 2014; Manassi et al., 2018; Wehrman et al., 2020)。例

如, 在朝向知觉中, 个体当前知觉的朝向更倾向于偏向先前试次的朝向(Fischer & Whitney, 2014)。然而, 最近越来越多的研究发现, 不同类型的先前信息(如刺激和反应信息)对后续感知加工的影响并不相同: 先前的刺激信息会导致排斥性的刺激序列依赖效应, 使当前感知偏离先前的刺激信息; 而先前的反应信息则会导致吸引性的反应序列依赖效应, 使当前感知偏向先前反应信息(王碧瑶 等, 2024; Feigin et al., 2021; Fritsche et al., 2017; Li et al., 2023; Moon & Kwon, 2022; Pascucci et al., 2019; Zhang & Luo, 2023; Zhou et al., 2024)。序列依赖的双加工模型(Dual-process model)认为, 排斥性的刺激序列依赖效应源于先前刺激信息导致的感知适应对后续知觉编码的影响(即发生于感知水平, 类似低水平的感知适应后效); 吸引性的反应序列依赖效应则源于先前反应信息对后续知觉解码的影响(即发生于感知后水平, 类似高水平的决策惯性, 即个体重复先前决策反应的倾向) (Pascucci et al., 2019)。然而, 有研究发现先前反应也能够直接或间接通过反馈机制影响低水平的感知过程(Cicchini et

收稿日期: 2025-07-03

* 教育部人文社会科学研究青年基金西部和边疆项目(24XJC190002); 国家自然科学基金青年科学基金项目(32000744)。

通信作者: 李宝林, E-mail: lblpsy@snnu.edu.cn

al., 2021; Moon & Kwon, 2022)。最近, Luo 等人(2025)也发现, 先前的反应在编码阶段和决策阶段会以不同的方式与当前信息加工产生交互作用。这些研究说明了反应在刺激和反应序列依赖效应产生中的重要作用。因此, 刺激和反应序列依赖效应的产生机制目前仍存在争论。

近年来, 时距知觉序列依赖效应受到越来越多研究关注(Bausenhardt et al., 2014; Chen et al., 2023; Cheng, Chen, Glasauer, et al., 2024; Dyjas et al., 2012; Wehrman et al., 2018, 2020; Wiener et al., 2014)。有研究者最近结合时距二分任务(duration bisection task; 即一种迫选任务, forced-choice task)和广义线性模型(generalized linear model, GLM)探讨了先前刺激时距和决策反应对后续时距知觉的独立影响(李宝林 等, 2025; 王碧瑶 等, 2024; Li et al., 2023)。结果表明, 在视觉和听觉通道的时距知觉中都存在排斥性的刺激序列依赖效应和吸引性的反应序列依赖效应, 即个体当前的时距决策判断倾向于偏离先前的刺激时距, 而偏向于先前决策反应。然而, 前人采用时距复制任务(reproduction task)的研究发现, 先前试次对后续时距知觉的影响主要表现为吸引性的序列依赖效应, 且该效应在一定程度上取决于先前复制反应(Chen et al., 2023; Cheng, Chen, Glasauer, et al., 2024; Cheng, Chen, & Shi, 2024)。值得注意的是, 这些采用复制任务的研究并未系统分离先前刺激和先前反应的独立影响。因此, 目前尚不清楚在时距复制任务是否同时存在排斥性的刺激序列依赖效应与吸引性的反应序列依赖效应。

任务范式是调节序列依赖效应的重要因素(Pascucci et al., 2023)。在序列依赖效应的研究中常见的范式为复制任务和迫选任务。这两种任务中刺激呈现相同, 其区别在于反应方式。如在二项迫选任务中, 参与者仅需做出二分判断; 在复制任务中, 参与者则需再现刺激特征。任务范式已被证实能够影响先前总体试次信息导致的吸引性序列依赖效应的表现。例如, 朝向知觉中的吸引性序列依赖效应的朝向调谐特性在复制任务和迫选任务中存在明显差异(Cicchini et al., 2017; Fischer & Whitney, 2014; Murai & Whitney, 2021)。此外, Cheng, Chen, Yang 和 Shi (2024)发现, 在时距复制任务中, 吸引性的序列依赖效应会受到前一任务相关性的调节; 但在迫选任务中则不会。这说明在不同任务中, 个体对先前信息的依赖程度不同。这种任务依赖的特

点说明吸引性的序列依赖效应与高水平的认知加工密切相关。

序列依赖跨通道效应研究是目前该领域研究中的一个重点。对该问题的探讨是揭示序列依赖效应产生机制的重要途径。然而, 目前在不同任务中观察到的跨通道效应并不一致。有研究发现, 在二项迫选任务中吸引性的数量感知序列依赖效应具有感觉通道特异性, 这说明该效应产生于通道内感知加工阶段(Fornaciai & Park, 2019); 而在评分任务(一种类似情绪复制的任务)中吸引性的情绪感知序列依赖效应则能够跨感觉通道产生, 这说明该序列依赖效应的产生是基于跨通道抽象信息表征(Van der Burg et al., 2021)。虽然这些研究关注了不同的感知特征, 但仍在一定程度上暗示了任务范式可能是影响序列依赖跨通道效应的重要因素。在时距知觉领域, 时距知觉的中心趋势效应(central tendency effect; 即个体倾向于高估较短时距, 低估较长时距的现象, 其反映了较长时程的先验信息对当前时距知觉的影响)在时距复制任务中具有跨通道性(Roach et al., 2017), 而在时距迫选任务中则具有通道特异性(Zimmermann & Cicchini, 2020)。这在一定程度上说明任务范式可能是影响先验信息跨通道效应的重要因素。因此, Li 等人(2023)在时距二分任务中观察到的刺激和反应序列依赖效应的通道特异性是否能够推广到时距复制任务中尚不清楚。

综上, 有必要在分离先前刺激和反应信息的基础上进一步探讨时距复制任务中的序列依赖效应, 并在此基础上揭示任务范式(复制任务 vs. 二分任务)对时距知觉序列依赖效应跨通道特性的影响。这对揭示时距知觉刺激和反应序列依赖效应的产生机制具有重要意义。首先, 目前对刺激序列依赖效应的产生机制仍存在争论。有观点认为刺激序列依赖效应源于低水平的感知适应(Moon & Kwon, 2022; Pascucci et al., 2019; Sadil et al., 2024)。时距知觉的刺激序列依赖效应在二分任务中表现为排斥效应且具有通道特异性(Li et al., 2023), 其与低水平的时距知觉适应后效表现相同(Heron et al., 2012; Li, Yuan, Chen, et al., 2015), 这似乎在一定程度上支持了这一观点。然而, 已有研究也发现时距二分任务中的刺激序列依赖效应不受感觉通道内刺激特征和空间位置的制约, 这并不符合低水平感知适应的特点(李宝林 等, 2025; 王碧瑶 等, 2024; Li et al., 2023)。探讨任务范式对刺激序列依赖跨通

道效应的影响,有利于进一步明晰该效应是否源于低水平的感知适应机制。由于在复制和二分任务中刺激呈现完全相同(即对刺激时距的低水平感知编码相同),因此可以预测如果刺激序列依赖效应完全源于低水平的感知适应机制,那么在复制任务中将观察到与二分任务相似的通道特异性;反之,如果该效应涉及较高水平的认知加工,那么其跨通道特性则可能会受到任务范式的调节。

其次,不同于刺激序列依赖效应,吸引性的反应序列依赖效应主要反映了决策偏差(如决策惯性)(Akaishi et al., 2014; Pascucci et al., 2019; Sheehan & Serences, 2022)。在时距二分任务中,反应序列依赖效应同样具有通道特异性,且受到感觉通道内刺激类别的调节,因此研究者认为与该效应相关的决策机制对刺激的类别敏感(李宝林 等, 2025; 王碧瑶 等, 2024; Li et al., 2023)。然而,目前尚不清楚这种决策机制是否依赖反应方式和策略。反应方式决定了个体如何利用低水平的刺激输入信息形成反应策略。在二分任务中参与者的最优反应策略是根据决策标准将感觉空间划分为两个决策空间(如“较长”vs.“较短”),这是一种基于类别的简单刺激-反应映射策略;在复制任务中,参与者要再现出刺激的具体特征(如时距长度),必须将感知系统获得的刺激特征转换成抽象的估计值,并将其转换为运动输出的函数。因此,复制任务中的最优反应策略是通过连续回归的方式将刺激信息映射到运动反应——这一过程涉及对抽象规则的学习,是一种基于高水平预测的复杂映射策略(Fulvio et al., 2014; Green et al., 2015; Kattner et al., 2016)。已有研究发现,基于不同反应策略的任务范式是影响学习效应迁移的重要因素(Green et al., 2015; Kattner et al., 2016)。例如,Green 等人(2015)发现,在朝向知觉学习中,如果训练任务为经典的朝向二分任务,学习效果则特异于训练朝向;如果训练任务为朝向复制任务,学习效果则能够迁移到非训练朝向。这说明基于高水平预测的复杂映射策略能够促进学习效果的迁移。基于此,可以预测如果反应序列依赖效应不仅仅是一种简单机械的决策惯性,其涉及对反应策略的整合利用,那么在复制(vs.二分)任务中将观察到更大程度的跨通道效应。

为了验证上述假设,本研究结合时距知觉序列依赖效应研究中常用的任务范式(时距复制和二分任务),共设计了 3 个实验。具体而言,实验 1 采用时距复制任务考察了单一视觉和听觉通道内先前

刺激时距和复制时距对后续时距知觉的独立影响。在此基础上,实验 2 通过将视觉和听觉刺激伪随机呈现的方式,进一步探讨了时距复制任务中刺激和反应序列依赖跨通道效应。最后,实验 3 在控制不同任务刺激时距长度和被试差异的条件下,直接比较了复制和二分任务中时距知觉刺激和反应序列依赖跨通道效应的表现,进而探讨了任务范式对相应效应的影响。

2 实验 1: 时距复制任务中的序列依赖效应

研究已发现在时距二分任务中先前刺激时距和先前决策反应分别导致了排斥性的刺激序列依赖效应和吸引性的反应序列依赖效应(李宝林 等, 2025; 王碧瑶 等, 2024; Li et al., 2023)。考虑到时距二分任务和复制任务的差异,目前尚不清楚这一结果是否能够推广到时距复制任务中。因此,实验 1 拟采用时距复制任务分别探究视觉和听觉通道中是否存在与时距二分任务中相似的刺激和反应序列依赖效应。

2.1 方法

2.1.1 被试

采用 G*power 3.1 软件对实验所需样本量进行事前估计(Faul et al., 2007)。以 Li 等人(2023)实验 1 中视听通道的平均效应量($d > 0.8$)为参考,根据本研究实验设计,在显著性水平 $\alpha = 0.05$, 且 Cohen's $d = 0.8$ 的条件下,达到 80 % 的统计检验力所需的样本量为 15 人。共 24 名被试参与了本实验。其中,由于两名被试在听觉时距复制任务中有效试次(即复制时距在 200~2000 ms 范围内)过少(分别为 44.8%和 48.8%),因此在正式数据分析中将其数据剔除。最终实验 1 的样本包括 22 名被试(10 名女性,平均年龄 $M = 18.2$ 岁, $SD = 0.50$ 岁)。该样本量与 Li 等人(2023)实验 1 的样本量相当($n = 24$)。所有被试均为右利手,视力或矫正视力正常,听力正常,在实验结束前对实验目的不知情。本实验经过陕西师范大学心理学院人体实验伦理委员会审查(批准号: HR2024-10-07),所有被试在实验前均签署知情同意书,并在实验结束后获得一定报酬。

2.1.2 刺激和仪器

本实验包括视觉和听觉刺激。视觉刺激是一个白色光斑(Gaussian blob, $SD = 0.5$),呈现在 20 英寸的 CRT 显示器(刷新率为 85 Hz, 屏幕分辨率为 1280×960 pixels)的中心。听觉刺激为由耳机呈现

的白噪声(约 55 dB 声压级, SPL), 包含 10 ms 的余弦渐变以平滑刺激的开始和结束(总时长包含渐变)。在整个实验过程中, 被试端坐在椅子上, 头部由头托固定, 距离显示器中心 58 cm。刺激呈现与数据收集是由 MATLAB 平台的 Psychophysics Toolbox 编制的实验程序实现的(Brainard, 1997; Pelli, 1997)。

2.1.3 设计与程序

本实验采用单因素被试内设计。自变量为感觉通道, 包括视觉和听觉通道。因变量为被试的复制时距。

在本实验中每名被试均需分别完成视觉时距复制任务和听觉时距复制任务, 任务顺序在被试间进行了平衡(图 1)。以视觉时距复制任务为例, 每个试次开始时, 首先呈现 500~1500 ms 的红色注视点, 接着在屏幕中央呈现一个白色光斑刺激, 其呈现时间为在 500~1200 ms 范围内以等对数步长变化的 5 个时距之一(测试时距, 即视觉或听觉刺激呈现的时长; 由于刷新频率的限制, 本实验中测试时距实际为 494 ms, 623 ms, 776 ms, 964 ms, 1200 ms)。在实验过程中, 被试需要注意并感知刺激的呈现时间, 并在刺激结束后, 用右手食指按下右方向键, 使该键按下的时间等于刺激的呈现时间。本实验将注视点设置在屏幕中央, 要求被试在实验过程中全程注视注视点。实验中刺激的呈现顺序由伪随机的 5^4 de Bruijn 序列决定(Brimijoin & O'Neill, 2010), 共 625 个试次, 每个刺激时距呈现 125 次, 每种可能的刺激对(5 种先前时距 $\times$ 5 种当前时距 = 25 种刺激对)呈现约 25 次。每完成 125 个试次之后可休息 20 s。在正式实验前, 为了更好

地使被试熟悉实验任务, 被试需要先进行练习任务, 共 25 个试次。在练习任务中, 被试每次按键复制后会出现反馈信息, 提示该试次中被试的复制时距与刺激的实际呈现时间间的具体差值(以毫秒为单位)。听觉时距复制任务与视觉时距复制任务实验流程一致, 不同之处仅为视觉时距复制任务中的白色光斑由听觉白噪音代替。

2.1.4 数据分析与统计

首先删除每名被试复制时距小于 200 ms 和大于 2000 ms 的试次; 接着删除每名被试在每种感觉通道下反应时超过其中位数(median) 3 个绝对中位差(median absolute deviations, MADs)的试次(Leys et al., 2013)。通过以上标准共删除了总试次的 8.6%。

为了量化先前刺激时距和先前复制时距与当前复制时距之间的关系, 本研究借鉴前人研究采用 GLM 进行数据分析(王碧瑶 等, 2024; Li et al., 2023)。该模型将先前刺激时距和先前复制时距同时纳入同一统计框架, 从而能够在统计层面估计二者对当前复制时距的相对和独立贡献。本实验中, 模型表达式为:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_{currS} \times s_t + \beta_{prevS} \times s_{t-1} + \beta_{prevR} \times r_{t-1} \quad (1)$$

其中, Y_t 为在当前试次(t)中, 被试的复制时距; β_0 为被试复制时距的基线偏差; s_t 为当前试次的刺激时距, β_{currS} 为其权重; s_{t-1} 为先前试次的刺激时距, β_{prevS} 为其权重; r_{t-1} 为先前试次的复制时距, β_{prevR} 为其权重。由费希纳定律可知, 个体对物理刺激的心理表征呈对数形式变化, 因此, 在数据分析时将刺激时距和复制时距转化为对数形式, 并通过均方根(root-mean-square, RMS)对其进行标准化(使 RMS = 1), 进而增加不同系数的可比性。

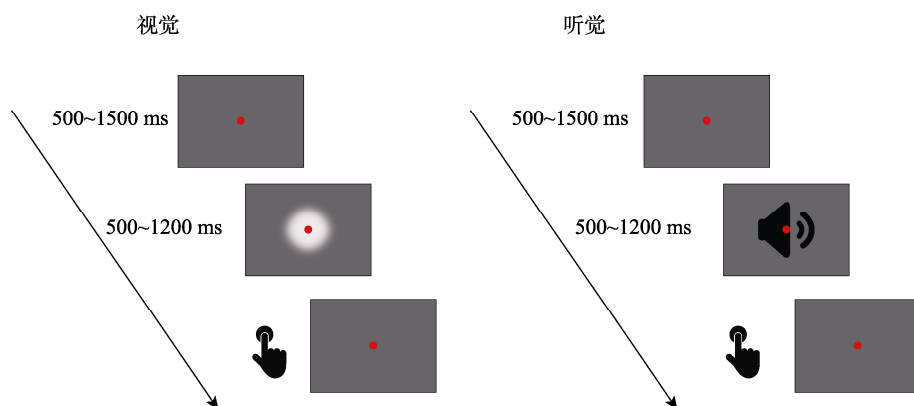


图1 实验1流程图。实验1分为视觉和听觉时距复制任务。每个试次中, 首先呈现 500~1500 ms 的红色注视点, 要求被试在实验过程中全程注视该点。接着呈现一个 500~1200 ms 的白色光斑(视觉任务)或白噪音(听觉任务)刺激, 刺激消失后被试需要通过按键的方式复制刺激的呈现时间(使右方向键按下的时间等于刺激的呈现时间)。彩图见电子版, 下同。

为了进一步在统计层面区分并比较当前刺激时距、先前刺激时距和先前复制时距与当前试次复制时距之间的关系,我们构建了 4 种比较模型。这些模型都为 GLM, 不同之处仅在于它们的参数类型。具体而言, M_0 假设当前的复制时距仅由基线偏差和当前试次的刺激时距预测(即公式 1 中 β_{prevS} 和 β_{prevR} 设置为 0); M_1 假设当前的复制时距由基线偏差、当前试次刺激时距和先前试次刺激时距预测(即公式 1 中 β_{prevR} 设置为 0); M_2 假设当前的复制时距由基线偏差、当前试次刺激时距和先前试次复制时距预测(即公式 1 中 β_{prevS} 设置为 0); M_3 假设当前的复制时距由基线偏差、当前试次刺激时距、先前试次刺激时距和先前试次复制时距共同预测(即公式 1 中所有参数均不为 0)。所有模型都采用 MATLAB 统计与机器学习工具箱中的 *fitglm* 函数进行拟合(分布: Normal, 链接函数: identity)。

本研究采用贝叶斯信息准则 (Bayesian information criterion, BIC) 进行模型比较:

$$BIC = -2\log(L) + k\log(n) \quad (2)$$

其中, L 是基于某一 GLM 模型(M_0 、 M_1 、 M_2 或 M_3) 的最大似然估计(Likelihood), 由 *fitglm* 函数计算获得; k 是相应模型中参数的个数, n 为样本的数量。BIC 不仅考虑模型的拟合优度, 而且对模型复杂度有较强的惩罚, 能有效防止过拟合。在样本量较大时, BIC 通常能更好地选择正确的模型 (Burnham & Anderson, 2004)。为进行模型比较, 我们首先计算出每名被试每个模型的 BIC, 然后分别计算出 3 种涉及先前试次信息的模型(M_1 、 M_2 、 M_3) 与基线模型(M_0) 的 BIC 的差值(ΔBIC):

$$\Delta BIC = BIC_{Mi} - BIC_{M0} \quad (3)$$

由于 BIC 的值越小表明模型越好, 因此 ΔBIC 的绝对值越大, 表明证据越支持模型比较中 BIC 值较小的模型。换言之, ΔBIC 越小, 说明涉及先前试次信息的模型越好。

本研究主要关注视觉和听觉通道下 M_3 中的 β_{prevS} 和 β_{prevR} 系数, 即先前试次信息(刺激时距和复制时距)在预测当前试次复制时距中的统计效应。另外两个模型系数(β_0 和 β_{currS}) 分别反映了个体在时距复制任务中的基线偏差以及当前刺激时距与当前复制时距之间的统计关系。由于它们并非本研究关注的重点, 因此仅在附录中呈现这两个模型系数的结果(见附录 1)。首先, 为评估实验中与刺激和反应序列依赖相关的统计效应, 我们采用单样本 t 检验分别检验视觉和听觉通道中 β_{prevS} 和 β_{prevR} 与 0 的

差异; 然后, 分别采用配对样本 t 检验考察 β_{prevS} 和 β_{prevR} 在视觉和听觉通道间的差异。由于每个通道(视觉与听觉)的数据均被用于 4 项预先设定的模型层级比较(两个单样本 t 检验和两个配对样本 t 检验), 因此这 4 项检验被视为同一多重比较族(family)。因此, 后续我们采用了 Bonferroni 多重比较校正, 即将 p 值乘以 4 (Li et al., 2023)。

最后, 为了更直观地反映当前复制时距随先前刺激时距或复制时距的变化趋势, 我们分别在视觉和听觉通道中构建了二维(先前刺激时距和先前复制时距)的联合时距复制图(Moon & Kwon, 2022; Zhou et al., 2024)。该图作为模型分析的补充, 从非统计模型的角度展示序列依赖效应的表现, 具体分析程序和结果见网络版附录 2。为了避免对 GLM 结果的过度依赖, 本研究对模型结果的解读需同时结合联合时距复制图进行。

2.2 结果

模型比较的结果表明, 当考虑先前复制时距(M_2) 或同时考虑先前刺激时距和复制时距(M_3) 时, 视觉和听觉任务的 ΔBIC 均显著为负(视觉: $\Delta BIC_{M2} = -85.95$, $\Delta BIC_{M3} = -113.30$; 听觉: $\Delta BIC_{M2} = -53.58$, $\Delta BIC_{M3} = -108.88$), 表现出更好的拟合效果; 而当仅考虑先前刺激(M_1) 时, 拟合效果不如 M_0 (视觉: $\Delta BIC_{M1} = 2.96$, 听觉: $\Delta BIC_{M1} = 3.67$) (图 2A)。由于模型比较的结果显示 M_3 为最优模型(M_3 的 ΔBIC 值最小), 且同时考虑了先前刺激和先前复制时距的影响, 因此后续对 M_3 的相关参数进行进一步分析。由于 M_3 中先前的刺激时距和先前的复制时距可能存在一定的相关性, 为了验证 M_3 中是否存在模型的共线性问题, 我们计算了 M_3 模型中 3 个预测变量(当前刺激时距、先前刺激时距、先前复制时距)在视觉和听觉通道中的方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)。结果发现, 在视觉通道中, 3 个变量的 VIF 值分别为 1.00, 1.89 和 1.01; 而在听觉通道中, 3 个变量的 VIF 值分别是 1.01, 2.05 和 1.01。VIF 在不同条件下都小于 3, 这说明 M_3 不同自变量间的多重共线性处于可接受水平。

单样本 t 检验表明, 在视觉和听觉任务中, β_{prevS} 系数都显著小于 0 (视觉: $t(21) = -9.80$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -2.09$, 95% CI $[-0.27, -0.17]$; 听觉: $t(21) = -9.18$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.96$, 95% CI $[-0.41, -0.26]$) (图 2B), 而 β_{prevR} 系数都显著大于 0 (视觉: $t(21) = 13.85$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 2.95$,

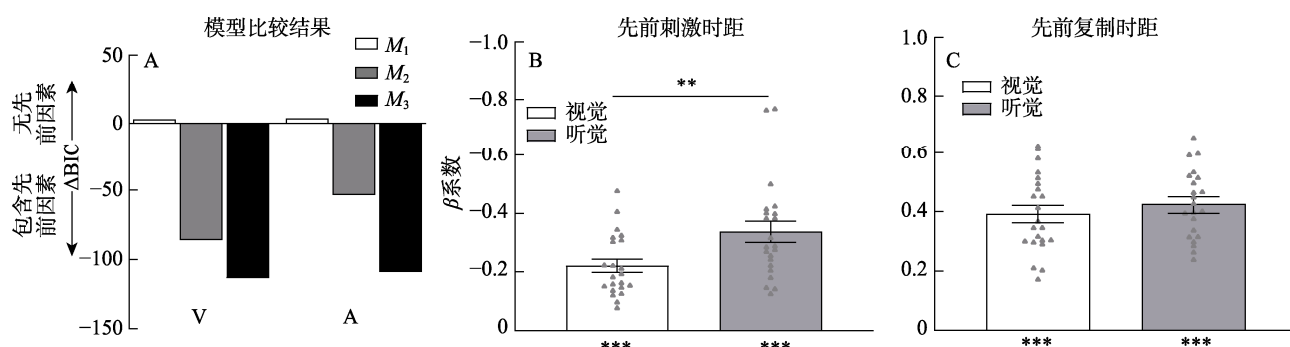


图2 实验1模型分析结果。(A)不同实验条件下模型比较结果。横坐标为不同实验条件,纵坐标为包含先前因素模型(白色条形代表 M_1 ,深灰色条形代表 M_2 ,黑色条形代表 M_3)与基线模型(M_0)的BIC差值(ΔBIC)。(B)基于先前刺激时距的 β 系数在不同条件下的大小。(C)基于先前复制时距的 β 系数在不同条件下的大小。白色空心条形图为视觉刺激,灰色实心条形图为听觉刺激。灰色三角代表每种条件下每名被试的数据点,误差线代表标准误差。
** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ 。

95% CI [0.33, 0.45]; 听觉: $t(21) = 17.20, p < 0.001$, Cohen's $d = 3.67$, 95% CI [0.37, 0.48]) (图2C)。同时,联合时距复制图显示:无论是视觉还是听觉通道,在不同先前复制时距条件下,随着先前刺激时距的增大,被试当前复制时距逐渐减小;相似地,在不同先前刺激时距条件下,随着先前复制时距的增大,被试当前复制时距逐渐增大(图S2)。这些结果表明,在视觉和听觉时距复制任务中都出现了排斥性的刺激序列依赖效应(即当前的复制时距倾向于偏离先前的刺激时距)和吸引性的反应序列依赖效应(即当前的复制时距倾向于偏向先前的复制时距)。此外,进一步的配对样本 t 检验结果显示,视觉任务中的 β_{prevS} 系数显著大于听觉任务, $t(21) = 3.56, p = 0.008$, Cohen's $d = 0.76$, 95% CI [0.05, 0.18]; 但 β_{prevR} 系数在视觉和听觉任务间大小没有显著差异, $t(21) = -0.91, p = 1.00$ 。这表明听觉通道的刺激序列依赖效应要显著大于视觉通道,而反应序列依赖效应在视听通道间则没有显著差异。

3 实验2: 时距复制任务中序列依赖的跨通道效应

Li 等人(2023)在时距二分任务中发现时距知觉的刺激和反应序列依赖效应都具有通道特异性。那么时距复制任务中的序列依赖效应是否也存在类似的通道特异性呢?为回答这一问题,实验2拟进一步探究时距复制任务中序列依赖的跨通道效应。

3.1 方法

3.1.1 被试

根据 G*power 3.1 的计算,对于本实验适用的 2×2 重复测量方差分析,在显著性水平 $\alpha = 0.05$,且

中等效应 $f = 0.25$ 的条件下,达到 80 % 的统计检验力所需的样本量为 24 人(Faul et al., 2007)。25 名未参与过实验1的被试参与了本次实验。所有人均为右利手,视力或矫正视力正常,听力正常,实验结束前对本实验研究目的不知情。其中,由于 5 名被试表现过差(复制时距随着刺激时距上升出现了下降趋势),因此在正式数据分析中将其数据剔除。最终实验2的样本包括 20 名被试(17 名女性;平均年龄 $M = 20$ 岁, $SD = 3.13$ 岁)。该样本量与 Li 等人(2023)实验2跨通道研究中的样本量($n = 21$)相当。所有被试在实验前均签署知情同意书,并在实验结束后获得一定报酬。

3.1.2 刺激和仪器

实验仪器和刺激同实验1。

3.1.3 设计与程序

本实验采用 2 (先前刺激通道: 视觉, 听觉) $\times 2$ (通道一致性: 一致, 不一致) 的被试内设计, 因变量为被试的复制时距。先前刺激通道是指实验中先前试次刺激的通道类型, 包括视觉刺激和听觉刺激。通道一致性是指当前刺激通道与先前刺激通道是否一致, 当前试次和先前试次均为视觉或听觉刺激为通道一致条件, 当前试次为视觉刺激(或听觉刺激), 先前试次为听觉刺激(或视觉刺激)为通道不一致条件。

实验2与实验1程序类似, 但仅包含视听混合的时距复制任务, 即每个试次伪随机呈现视觉或听觉的刺激。刺激的呈现顺序由一个包含 10 种刺激(2通道 $\times 5$ 时距)的伪随机 10^3 de Bruijn 序列决定, 共 1000 个试次, 以确保每种可能的刺激对(10 种先前刺激 $\times 10$ 种当前刺激 = 100 种刺激对)都能得到充

分采样 (Brimijoin & O'Neill, 2010)。

3.1.4 数据分析与统计

为探讨时距知觉序列依赖跨通道效应, 实验试次共被划分为 4 种条件: 先前和当前试次都为视觉刺激(VV); 先前和当前试次都为听觉刺激(AA); 先前和当前试次分别为听觉和视觉刺激(AV); 先前和当前试次分别为视觉和听觉刺激(VA)。每种条件的试次删除标准同实验 1, 共删除了总试次的 6.4%。随后对每种条件分别进行模型分析并绘制联合时距复制图, 并采用单样本 t 检验分别考察 β_{prevS} 和 β_{prevR} 与 0 的差异(方法同实验 1)。此外, 采用 2 (先前刺激通道: 视觉, 听觉) $\times$ 2 (通道一致性: 一致, 不一致) 的重复测量方差分析, 分别考察 β_{prevS} 和 β_{prevR} 在 4 种条件之间的差异。由于每种条件的数据均被用于 4 项预先设定的模型层级比较(两个单样本 t 检验和两个方差分析), 因此这 4 项检验被视为同一多重比较族(family)。因此, 后续我们采用了 Bonferroni 多重比较校正, 即将 p 值乘以 4 (Li et al., 2023)。

3.2 结果

模型比较的结果发现, 同时考虑先前刺激时距和复制时距(M_3)时, 模型表现出更好的拟合效果(VV: $\Delta BIC_{M_3} = -35.60$, $\Delta BIC_{M_2} = -31.07$, $\Delta BIC_{M_1} = 3.53$; AA: $\Delta BIC_{M_3} = -37.47$, $\Delta BIC_{M_2} = -16.09$, $\Delta BIC_{M_1} = 3.03$; AV: $\Delta BIC_{M_3} = -18.13$, $\Delta BIC_{M_2} = -12.87$, $\Delta BIC_{M_1} = 4.20$; VA: $\Delta BIC_{M_3} = -21.86$, $\Delta BIC_{M_2} = -22.41$, $\Delta BIC_{M_1} = 2.05$) (图 3A)。据此, 实验 2 也主要对 M_3 的模型系数进行后续分析。共线

性分析结果发现, 3 个变量的 VIF 值在不同条件下都小于 3, 这说明在 4 种条件下 M_3 不同自变量间的多重共线性处于可接受水平。

单样本 t 检验发现, β_{prevS} 系数在 4 种条件中均显著小于 0 (VV: $t(19) = -10.18$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -2.28$, 95% CI $[-0.21, -0.14]$; AA: $t(19) = -12.76$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -2.85$, 95% CI $[-0.33, -0.24]$; AV: $t(19) = -9.17$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -2.05$, 95% CI $[-0.26, -0.16]$; VA: $t(19) = -5.29$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.18$, 95% CI $[-0.13, -0.06]$) (图 3B)。联合时距复制图也显示, 4 种条件下的变化趋势相同, 即在不同先前复制时距条件下, 随着先前刺激时距的增大, 被试当前复制时距逐渐减小(图 S3)。这表明 4 种条件下(无论先后试次刺激通道是否一致)均出现了排斥性的刺激序列依赖效应。这说明时距复制任务中的刺激序列依赖效应具有跨通道性。另外, 两因素重复测量方差分析发现, 先前刺激通道的主效应显著, $F(1, 19) = 35.03$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.648$, 表明先前刺激为听觉时, 刺激序列依赖效应显著大于先前刺激为视觉时, 即表现出听觉优势效应(auditory dominance effect); 通道一致性的主效应显著, $F(1, 19) = 25.25$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.57$, 表明通道一致条件下的刺激序列依赖效应显著大于通道不一致条件, 即表现出部分而非完全跨通道效应; 二者的交互效应不显著, $F(1, 19) = 0.11$, $p = 1.0$ 。

对 β_{prevR} 系数的单样本 t 检验结果发现, β_{prevR} 系数在 4 种条件中均显著大于 0 (VV: $t(19) = 12.24$,

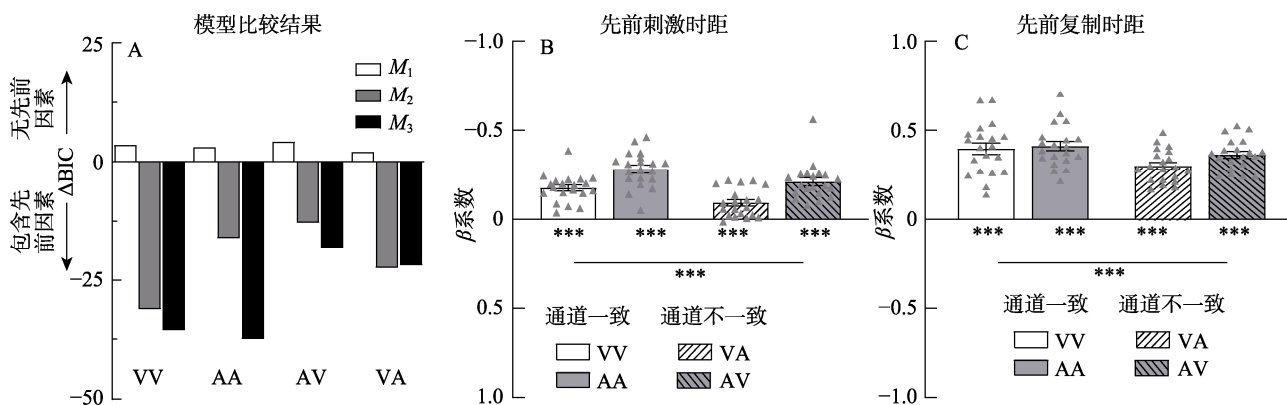


图 3 实验 2 模型分析结果。(A)不同实验条件下模型比较结果。横坐标为不同实验条件, 纵坐标为包含先前因素模型(白色条形代表 M_1 , 深灰色条形代表 M_2 , 黑色条形代表 M_3)与基线模型(M_0)的 BIC 差值(ΔBIC)。(B)基于先前刺激时距的 β 系数在不同条件下的大小。(C)基于先前复制时距的 β 系数在不同条件下的大小。白色空心条形图 VV 表示先前与当前刺激均为视觉刺激; 灰色实心条形图 AA 表示先前与当前刺激均为听觉刺激; 右斜浅灰色条纹图 VA 表示先前刺激为视觉刺激, 当前刺激为听觉刺激; 左斜深灰色条纹图 AV 表示先前刺激为听觉刺激, 当前刺激为视觉刺激。图中灰色三角代表每种条件下每名被试的数据点, 误差线代表标准误差, *** $p < 0.001$ 。

$p < 0.001$, Cohen's $d = 2.75$, 95% CI [0.33, 0.47]; AA: $t(19) = 15.44$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 3.45$, 95% CI [0.36, 0.47]; AV: $t(19) = 18.51$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 4.14$, 95% CI [0.32, 0.41]; VA: $t(19) = 14.81$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 3.31$, 95% CI [0.26, 0.34]) (图 3C)。联合时距复制图也显示, 4 种条件下的变化趋势相同, 即在不同先前刺激时距条件下, 随着先前复制时距的增大, 被试当前复制时距逐渐增大 (图 S3)。这表明 4 种条件下 (无论先后试次刺激通道是否一致) 均出现了吸引性的反应序列依赖效应。这说明时距复制任务中的反应序列依赖效应也具有跨通道性。此外, 重复测量方差分析发现, 先前刺激通道的主效应不显著, $F(1, 19) = 3.51$, $p = 0.30$ (未经 Bonferroni 校正的 $p = 0.076$, 达到了边缘显著), $\eta_p^2 = 0.16$; 通道一致性的主效应显著, $F(1, 19) = 11.18$, $p = 0.012$, $\eta_p^2 = 0.37$, 在通道一致条件下, 反应序列依赖效应要显著大于通道不一致条件, 即表现出部分而非完全跨通道效应; 二者交互效应不显著, $F(1, 19) = 1.66$, $p = 0.84$ 。

4 实验 3: 任务范式对时距知觉序列依赖跨通道效应的影响

实验 2 发现时距复制任务中刺激和反应序列依赖都具有部分跨通道效应。这一结果与时距二分任务中刺激和反应序列依赖效应的通道特异性不同 (Li et al., 2023)。这暗示任务范式可能是调节时距知觉序列依赖跨通道效应的重要因素。然而, 实验 2 中采用的测试时距长度要长于 Li 等人 (2023) 研究中的时距长度。已有研究表明, 时距知觉具有分段性, 不同范围的时距信息具有不同的表征: 对秒下时距的加工涉及自动计时机制, 而对秒上时距的加工则更多涉及认知控制加工, 涉及到更高级脑区 (黄希庭, 李伯约, 张志杰, 2003; Lewis & Miall, 2003)。因此, 实验 2 中观察到的跨通道效应可能并非源于任务范式的影响, 而是测试时距长度的影响。为了验证这种可能性, 同时排除不同任务中被试差异导致的变异, 实验 3 在控制测试时距长度的条件下直接比较了同一批被试在时距复制和二分任务中刺激和反应序列依赖跨通道效应。

4.1 方法

4.1.1 被试

根据 G*power 3.1 的计算, 对于本实验适用的 $2 \times 2 \times 2$ 重复测量方差分析, 在显著性水平 $\alpha = 0.05$, 且中等效应 $f = 0.25$ 的条件下, 达到 80% 的统计检

验力所需的样本量为 16 人 (Faul et al., 2007)。32 名未参与过实验 1 和 2 的被试参与了本实验。所有人均为右利手, 视力或矫正视力正常, 听力正常, 实验结束前对本实验研究目的不知情。其中由于 5 名被试表现过差 (3 名被试在时距复制任务中复制时距随着刺激时距的上升而下降, 2 名被试在时距二分任务中主观相等点超出测试时距范围), 因此在正式数据分析中将其数据剔除。最终实验 3 包括 27 名被试 (女生 22 名; 平均年龄 $M = 19.26$ 岁, $SD = 1.81$ 岁)。所有被试在实验前均签署知情同意书, 并在实验结束后获得一定报酬。

4.1.2 刺激和仪器

实验 3 的视觉刺激通过 VIEWPixx/3D 显示器 (刷新频率为 120 Hz, 屏幕分辨率为 1920×1080 pixels) 呈现。听觉刺激仍通过耳机呈现。实验 3 的刺激同实验 2。

4.1.3 设计与程序

采用 2 (任务: 复制任务, 二分任务) $\times 2$ (先前刺激通道: 视觉, 听觉) $\times 2$ (通道一致性: 一致, 不一致) 的被试内设计。自变量任务是指时距知觉任务范式, 其中时距复制任务的因变量为被试的复制时距, 时距二分任务的因变量为被试判断当前测试刺激的呈现时间较先前参照时距长的比例。其他自变量同实验 2。

每名被试分两天分别完成视听混合的时距复制任务 (同实验 2) 和时距二分任务, 任务顺序在被试间进行平衡。二分任务程序类似 Li 等人 (2023) 研究中的实验 2, 即要求被试在视觉或听觉刺激消失之后需立即判断测试刺激的呈现时间相比于记忆中的参照刺激是“较长”还是“较短”。不同之处在于本实验中刺激的呈现时间更长。因此, 复制任务和二分任务的主要差异在于反应阶段的反应方式和策略。由于本实验视觉刺激由 120 Hz 刷新率的显示器呈现, 因此其实际呈现时间为: 500 ms, 625 ms, 775 ms, 966 ms, 1200 ms。此外, 二分任务中被试的按键反应在被试间进行平衡: 一半被试在认为测试刺激的呈现时间“较长”时, 用左手食指按下“F”键; 认为测试刺激呈现时间“较短”时, 用右手食指按下“J”键; 另一半被试的按键反应与之相反。

4.1.4 数据分析与统计

同实验 2, 实验 3 中两种任务的试次均被划分为 VV、AA、AV 和 VA 四种条件。因此, 实验 3 共包含 8 种条件 (即每名被试的数据被划分成了 8 组子数据)。时距复制任务中每种条件的试次删除

标准同实验 2, 共删除了总试次的 7.2%。时距二分任务中删除每名被试在每种条件下反应时超过其中位数 3 个绝对中位差的试次, 共删除了总试次的 11.2%。

时距复制任务的模型分析和联合时距复制分析同实验 2。时距二分任务的模型分析与 Li 等人 (2023) 的研究保持一致, 即通过二项逻辑回归 (binomial logistic regression) 预测在当前试次 (t) 中被试将测试刺激判断为“较长”的比例:

$$p_t(L) = \frac{1}{1 + e^{-z_t}} \quad (4)$$

其中 z_t 是可能影响当前知觉决策的 4 个预测变量的线性组合:

$$z_t = \beta_0 + \beta_{currS} \times s_t + \beta_{prevS} \times s_{t-1} + \beta_{prevC} \times c_{t-1} \quad (5)$$

其中, β_0 为被试做出“较长”或者“较短”判断的基线偏差, s_t 是当前试次的刺激时距, β_{currS} 为其权重, s_{t-1} 是先前试次的刺激时距, β_{prevS} 为其权重, c_{t-1} 是先前试次的决策反应, β_{prevC} 为其权重。同时距复制任务, 对于每种条件, 二分任务中同样构建 4 个比较模型 (由 *fitglm* 函数拟合; 分布: Binomial, 链接函数: logit), 采用 BIC 进行模型比较, 并构建二维 (先前刺激时距和先前决策反应) 联合时距决策图。在后续统计分析中, 考虑到复制任务与二分任务因变量性质的差异 (连续时距复制 vs. 二分判断), 其在测量水平与信噪比 (如时距复制反应更易受到动作以及按键延迟或灵敏度的影响) 等方面均存在系统性差异, 相关系数在不同任务间不具可比性。因此, 本研究未进行跨任务的直接比较, 而是分别对两个任务进行了独立的统计分析。具体统计分析流程同

实验 2。

4.2 结果

4.2.1 时距复制任务

同实验 2, 模型比较的结果表明, 同时考虑先前复制时距和先前刺激时距 (M_3) 时, 模型表现出更好的拟合效果 (VV: $\Delta BIC_{M_3} = -47.94$, $\Delta BIC_{M_2} = -29.74$, $\Delta BIC_{M_1} = 3.13$; AA: $\Delta BIC_{M_3} = -47.71$, $\Delta BIC_{M_2} = -15.07$, $\Delta BIC_{M_1} = 2.97$; AV: $\Delta BIC_{M_3} = -22.98$, $\Delta BIC_{M_2} = -11.76$, $\Delta BIC_{M_1} = 3.39$; VA: $\Delta BIC_{M_3} = -22.55$, $\Delta BIC_{M_2} = -19.14$, $\Delta BIC_{M_1} = 3.14$) (图 4A)。此外, 3 个变量的 VIF 值在不同条件下都小于 3, 这说明在不同条件下 M_3 不同自变量间的多重共线性处于可接受水平。

单样本 t 检验表明, β_{prevS} 系数在 4 种条件中均显著小于 0 (VV: $t(26) = -12.42$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -2.39$, 95% CI $[-0.32, -0.23]$; AA: $t(26) = -16.17$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -3.11$, 95% CI $[-0.42, -0.32]$; AV: $t(26) = -10.85$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -2.09$, 95% CI $[-0.31, -0.21]$; VA: $t(26) = -8.51$, $p < 0.001$, Cohen's $d = -1.64$, 95% CI $[-0.17, -0.11]$) (图 4B)。两因素重复测量方差分析结果发现, 先前刺激通道的主效应显著, $F(1, 26) = 107.15$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.81$; 通道一致性的主效应显著, $F(1, 26) = 55.97$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.68$; 二者的交互效应不显著, $F(1, 26) = 0.73$, $p = 1.0$ 。

对 β_{prevR} 系数的单样本 t 检验结果发现, β_{prevR} 系数在 4 种条件中均显著大于 0 (VV: $t(26) = 15.61$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 3.01$, 95% CI $[0.38, 0.49]$; AA: $t(26) = 19.09$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 3.67$, 95% CI

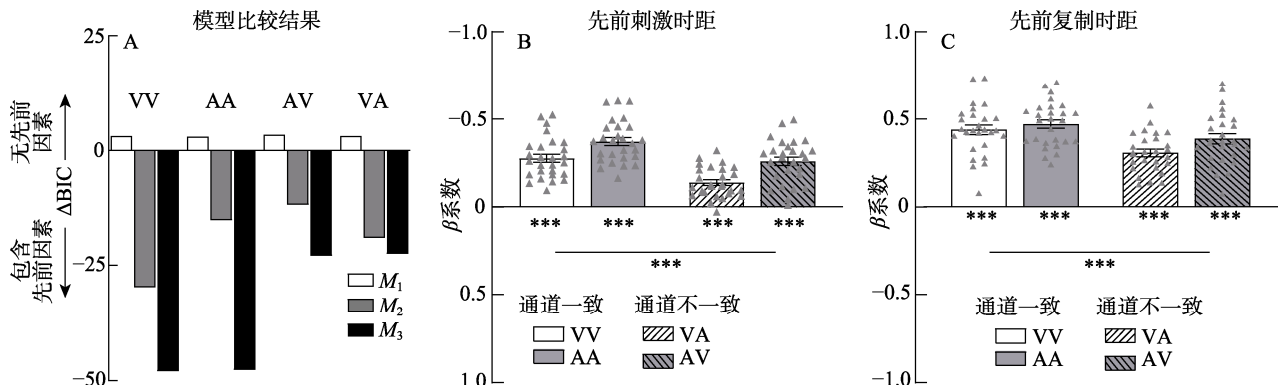


图 4 实验 3 时距复制任务模型分析结果。(A)不同实验条件下模型比较结果。横坐标为不同实验条件, 纵坐标为包含先前因素模型 (白色条形代表 M_1 , 深灰色条形代表 M_2 , 黑色条形代表 M_3) 与基线模型 (M_0) 的 BIC 差值 (ΔBIC)。 (B) 基于先前刺激时距的 β 系数在不同条件下的大小。 (C) 基于先前复制时距的 β 系数在不同条件下的大小。白色空心条形图 VV 表示先前与当前刺激均为视觉刺激; 灰色实心条形图 AA 表示先前与当前刺激均为听觉刺激; 右斜浅色条纹条形图 VA 表示先前刺激为视觉刺激, 当前刺激为听觉刺激; 左斜深色条纹条形图 AV 表示先前刺激为听觉刺激, 当前刺激为视觉刺激。图中灰色三角代表每种条件下每名被试的数据点, 误差线代表标准误差, *** $p < 0.001$ 。

[0.42, 0.52]; AV: $t(26) = 13.38, p < 0.001$, Cohen's $d = 2.57$, 95% CI [0.32, 0.44]; VA: $t(26) = 14.22, p < 0.001$, Cohen's $d = 2.74$, 95% CI [0.26, 0.35]) (图 4C)。两因素重复测量方差分析结果发现, 先前刺激通道的主效应显著, $F(1, 26) = 11.33, p = 0.008, \eta_p^2 = 0.30$; 通道一致性的主效应显著, $F(1, 26) = 55.89, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.68$; 二者的交互效应不显著 $F(1, 26) = 1.44, p = 0.96$ 。这些结果与实验 2 的结果基本一致, 说明时距复制任务中刺激和反应序列依赖效应及其跨通道特性具有稳定性。这也得到了联合时距复制图的证实(图 S4)。

值得注意的是, 实验 3 复制任务中反应序列依赖效应表现出显著的先前刺激通道主效应(实验 2 中这一效应仅在校正前表现为边缘显著)。鉴于这一结果的不一致, 我们将实验 2 和实验 3 时距复制任务中所有被试的 β_{prevR} 系数进行合并分析。2 (先前刺激通道: 视觉, 听觉) $\times$ 2 (通道一致性: 一致, 不一致)重复测量方差分析结果发现, 先前刺激通道的主效应显著, $F(1, 46) = 14.17, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.24$; 通道一致性的主效应显著, $F(1, 46) = 54.67, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.54$; 二者的交互效应不显著, $F(1, 46) = 3.04, p = 0.30$ 。这说明时距知觉的反应序列依赖效应同样存在听觉优势效应, 即先前刺激为听觉时反应序列依赖效应要显著高于先前刺激为视觉时。

4.2.2 时距二分任务

模型比较的结果表明, 二分任务中通道一致条件下同时考虑先前刺激时距和决策反应(M_3)的模型拟合效果更好(VV: $\Delta BIC_{M_3} = -4.15, \Delta BIC_{M_2} = -1.31, \Delta BIC_{M_1} = -0.23$; AA: $\Delta BIC_{M_3} = -5.85$,

$\Delta BIC_{M_2} = -3.75, \Delta BIC_{M_1} = -1.61$)。然而, 通道不一致条件下, M_1, M_2 和 M_3 的 ΔBIC 均为正(AV: $\Delta BIC_{M_3} = 4.89, \Delta BIC_{M_2} = 1.79, \Delta BIC_{M_1} = 1.36$; VA: $\Delta BIC_{M_3} = 6.86, \Delta BIC_{M_2} = 3.08, \Delta BIC_{M_1} = 2.86$), 表明跨通道条件下纳入先前试次的信息并不能提高模型的拟合效果(图 5A)。此外, 3 个变量的 VIF 值在不同条件下都小于 3, 这说明不同条件下 M_3 不同自变量间的多重共线性处于可接受水平。

单样本 t 检验表明, β_{prevS} 系数在条件 VV ($t(26) = -7.70, p < 0.001$, Cohen's $d = -1.48$, 95% CI [-1.52, -0.88])和 AA ($t(26) = -7.28, p < 0.001$, Cohen's $d = -1.40$, 95% CI [-1.69, -0.95])中均显著小于 0, 但在条件 AV ($t(26) = -1.54, p = 0.54$)和 VA ($t(26) = -0.92, p = 1.0$)中与 0 没有显著差异(图 5B)。与这一结果一致, 联合时距决策图显示通道一致条件(VV 和 AA), 在不同先前决策反应条件下, 先前刺激时距对当前时距知觉的影响表现为排斥性的序列依赖效应; 在通道不一致条件(AV 和 VA), 被试当前判断为“较长”的比例则没有随着先前刺激时距的变化出现明显的变化趋势(图 S5)。两因素重复测量方差分析结果发现, 先前刺激通道的主效应不显著, $F(1, 26) = 0.71, p = 1.0$; 通道一致性的主效应显著, $F(1, 26) = 54.09, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.68$, 在通道一致条件下, 刺激序列依赖效应要显著大于通道不一致的条件; 二者的交互效应不显著, $F(1, 26) = 0.06, p = 1.0$ 。这些结果表明, 通道一致条件下出现了显著的排斥性刺激序列依赖效应, 而在通道不一致条件则没有出现相应的效应, 即时距二分任务中刺激序列依赖效应具有通道特异性。

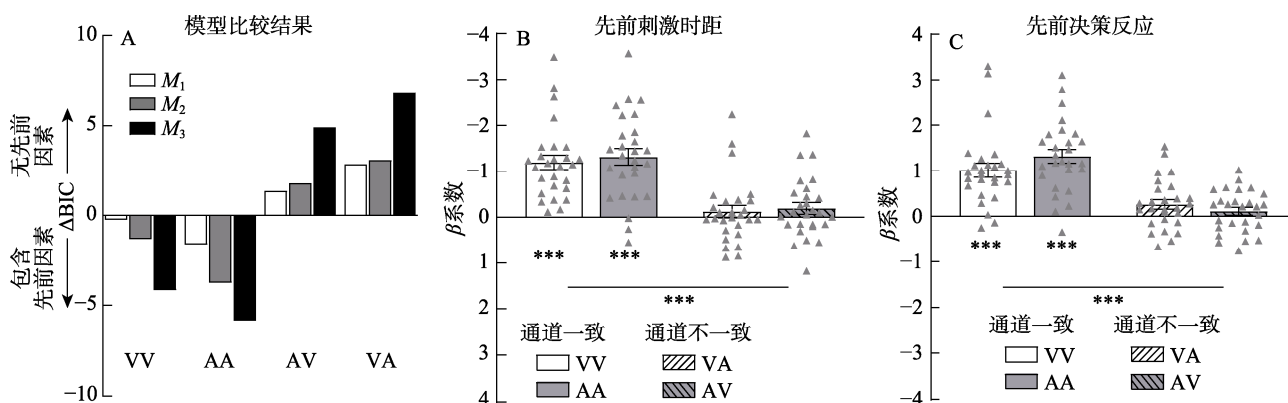


图 5 实验 3 时距二分任务模型分析结果。(A)不同实验条件下模型比较结果。横坐标为不同实验条件, 纵坐标为包含先前因素模型(白色条形代表 M_1 , 深灰色条形代表 M_2 , 黑色条形代表 M_3)与基线模型(M_0)的 BIC 差值(ΔBIC)。(B)基于先前刺激时距的 β 系数在不同条件下的大小。(C)基于先前决策反应的 β 系数在不同条件下的大小。白色空条条形图 VV 表示先前与当前刺激均为视觉刺激; 灰色实心条形图 AA 表示先前与当前刺激均为听觉刺激; 右斜浅色条纹条形图 VA 表示先前刺激为视觉刺激, 当前刺激为听觉刺激; 左斜深色条纹条形图 AV 表示先前刺激为听觉刺激, 当前刺激为视觉刺激。图中灰色三角代表每种条件下每名被试的数据点, 误差线代表标准误差, *** $p < 0.001$ 。

对 β_{prevC} 系数的单样本 t 检验结果发现, β_{prevC} 系数在条件 VV ($t(26) = 6.53, p < 0.001$, Cohen's $d = 1.26$, 95% CI [0.70, 1.34]) 和 AA ($t(26) = 8.67, p < 0.001$, Cohen's $d = 1.67$, 95% CI [1.01, 1.63]) 中均显著大于 0, 但在条件 AV ($t(26) = 1.26, p = 0.88$) 和 VA ($t(26) = 2.51, p = 0.08$) 中与 0 没有显著差异(图 5C)。同样, 联合时距决策图显示, 通道一致条件(VV 和 AA), 在不同的先前刺激时距条件下, 先前决策反应对当前时距知觉的影响表现为吸引性的序列依赖效应; 在通道不一致条件(AV 和 VA), 被试当前判断为“较长”的比例则没有随着先前决策反应的变化出现明显的变化趋势(图 S5)。两因素重复测量方差分析结果发现, 先前刺激通道的主效应不显著, $F(1, 26) = 0.69, p = 1.0$; 通道一致性的主效应显著, $F(1, 26) = 49.48, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.66$; 二者的交互效应显著, $F(1, 26) = 7.51, p = 0.044, \eta_p^2 = 0.22$ 。进一步简单效应分析结果发现, 无论先前刺激为视觉还是听觉, 通道一致条件的反应序列依赖效应均显著高于通道不一致条件($p < 0.001$)。这表明, 通道一致条件下出现了显著的吸引性反应序列依赖效应, 而通道不一致条件则没有出现相应的效应, 说明时距二分任务中的反应序列依赖效应也具有通道特异性。这些结果与 Li 等人(2023)采用较短时距(300~900 ms)的研究结果一致, 说明时距二分任务中的刺激和反应序列依赖效应都具有通道特异性。

5 讨论

本研究通过 3 个实验系统探究了时距复制任务中的序列依赖效应以及任务范式对时距知觉序列依赖跨通道效应的影响。结合 GLM 和联合时距复制图结果, 实验 1 发现在时距复制任务中, 视觉和听觉通道中均存在显著的排斥性刺激序列依赖效应和吸引性反应序列依赖效应。实验 2 发现, 时距复制任务中的刺激和反应序列依赖均具有部分跨通道效应。实验 3 在控制不同任务测试时距长度的情况下, 直接比较了时距复制任务和二分任务中刺激和反应序列依赖跨通道效应的表现。结果发现, 在时距复制任务中刺激和反应序列依赖效应具有一定程度的跨通道性, 而在二分任务中刺激和反应序列依赖效应则具有通道特异性。这些结果说明任务范式是影响序列依赖跨通道效应的重要因素: 复制任务(vs.二分任务)对刺激和反应序列依赖跨通道效应具有促进作用。

本研究在单一感觉通道(视觉和听觉)的时距复

制任务中同时观察到了排斥性的刺激序列依赖效应和吸引性的反应序列依赖效应, 这与前人采用时距二分任务中观察到的现象一致(李宝林 等, 2025; 王碧瑶 等, 2024; Li et al., 2023)。由于在时距复制和二分任务中测试刺激本身并没有发生改变, 因此不难理解这两种任务中都会出现排斥性的刺激序列依赖效应。然而, 有趣的是, 尽管两种任务中反应方式完全不同(持续按键复制 vs. 二分判断), 却都产生了吸引性的反应序列依赖效应。这说明反应序列依赖效应并不依赖特定的反应方式。这一观点也符合前人在其他知觉领域关于序列依赖效应的研究结果: 采用迫选任务或复制任务, 前人已分别在声音频率知觉和朝向知觉中分离出了基于刺激和反应的两种方向相反的序列依赖效应(Bosch et al., 2020; Fritsche et al., 2017; Moon & Kwon, 2022; Zhou et al., 2024)。这说明不同方向的刺激和反应序列依赖效应是跨任务和跨知觉特征的普遍现象。

有趣的是, 本研究发现在时距复制和二分任务中刺激和反应序列依赖跨通道效应并不相同。具体而言, 在时距复制任务中, 时距知觉的刺激和反应序列依赖效应具有一定程度的跨通道性, 而在二分任务中则具有通道特异性。值得注意的是, 复制任务中的反应为复制时长(连续变量), 而二分任务中则为二分判断(离散变量), 这种差异可能是影响实验结果的潜在因素。然而, 补充分析发现, 即使将复制时长转换为二分变量(“较长”和“较短”), 时距复制任务中的刺激和反应序列依赖效应仍具有一定程度的跨通道性(见附录图 S6)。这说明复制任务的确能够促进刺激和反应序列依赖跨通道效应。

已有研究认为排斥性的刺激序列依赖效应源于低水平的感知适应机制, 其实质为感知适应后效(Moon & Kwon, 2022; Pascucci et al., 2019; Sadil et al., 2024)。相应地, 时距知觉的刺激序列依赖效应也被认为类似于长时程的时距知觉适应后效(即反复多次呈现某一特定时距信息导致的时距知觉负后效现象)(Li et al., 2023)。时距知觉的通道模型(channel-based model)认为, 个体认知神经网络中存在对时距信息进行选择性加工的神经通道(即神经元); 之所以会产生时距知觉适应后效是由于某一特定时距重复出现有选择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, 最终导致排斥性的适应后效(Heron et al., 2012)。研究已表明, 时距知觉的适应后效具有通道特异性(Heron

et al., 2012; Li, Yuan, Chen, et al., 2015), 主要发生在时距编码阶段(Li et al., 2017)。在时距二分任务中, 刺激序列依赖效应具有通道特异性(Li et al., 2023), 这似乎在一定程度上支持了其源于低水平感知适应的观点。然而, 本研究发现基于不同反应方式和策略的任务范式这种高水平的因素是调节刺激序列依赖跨通道效应的重要因素。这并不符合低水平感知适应的特点。事实上, 前人发现在复制任务和迫选任务中长时程的时距知觉适应后效都具有通道特异性(Li et al., 2019; Li, Yuan, & Huang, 2015)。这进一步说明在时距知觉中, 短时程的刺激序列依赖效应不同于长时程的时距知觉适应后效, 其并非完全源于低水平的感知适应机制。

任务范式对刺激序列依赖跨通道效应的调节作用说明, 该效应的产生涉及高水平的加工过程。一种可能的解释是反应策略(或任务目标)可以通过自上而下的方式调节时距编码方式。具体而言, 在二分任务中, 被试需要分别将测试时距与记忆中对应通道的参照时距进行比较(即将视觉测试时距与视觉参照时距进行比较, 将听觉测试时距与听觉参照时距进行比较)。在这种情况下(如图 6 黑色实线箭头所示), 视觉和听觉通道时距编码保持相对独立。因此, 在时距二分任务中刺激序列依赖效应表现为通道特异性。然而, 在时距复制任务中, 被试

则需通过特定的动作(持续按压)将视听时距信息转换成统一的复制时距, 这可能促使运动皮层参与时距编码, 使视觉和听觉时距信息映射到统一的运动计时系统中。在运动计时系统中, 不同通道的时距信息会被整合(形成统一的跨通道编码系统), 削弱视听时距的特异性编码, 进而使时距知觉刺激序列依赖效应在一定程度上表现出跨通道性(如图 6 黑色虚线箭头所示机制)。

大量研究已经证实个体的感知系统与运动系统是紧密相关的(O'Regan & Noë, 2001; Prinz, 1990; Schubotz et al., 2000; Wilson, 2002)。已有研究表明, 时间感知与运动计时共享神经基础(Schubotz et al., 2000); 时距复制反应能够激活辅助运动区(SMA)(Bueti et al., 2008; Wiener et al., 2010), 且 SMA 中神经元表现出跨感觉通道的时距调谐特性(Merchant, Pérez, et al., 2013; Protopapa et al., 2019)。据此, 一个可能的假设是, SMA 接收并整合视听感觉通道的时距信息, 将其映射到统一的运动计时系统中, 这一系统中的感知适应机制导致排斥性刺激序列依赖效应的跨通道性。因此, 该假设并不排斥适应机制在刺激序列依赖效应中的作用, 而是认为这种适应机制并非完全位于低水平的早期感知皮层(如初级视觉和听觉皮层), 其依赖感觉-运动回路。需要注意的是, 本研究发现在复制任务中刺

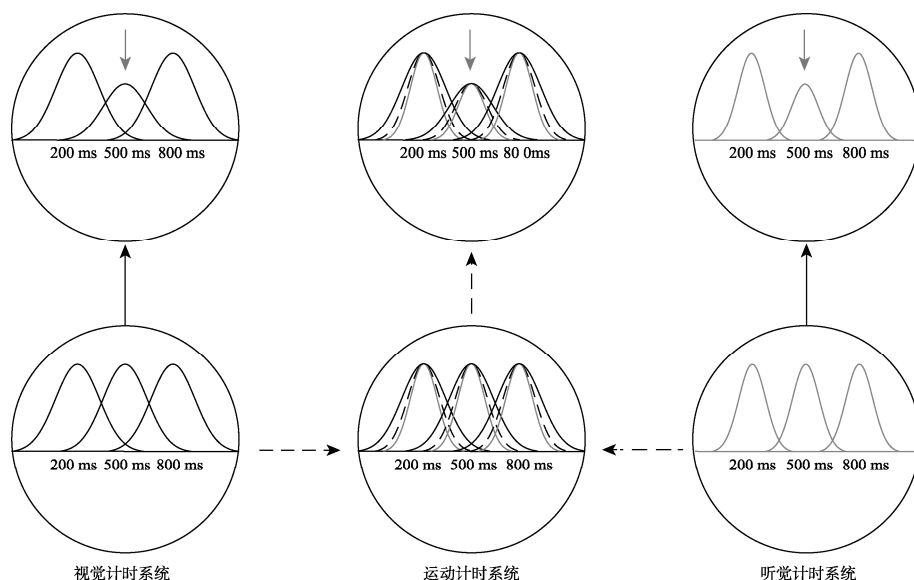


图6 复制任务促进刺激序列依赖跨通道效应的内在机制假设。下图表示时距通道的正常响应, 上图表示通道在适应某一特定时距(如 500 ms)后的响应。黑色(高斯)实线表示视觉通道中的调谐曲线, 灰色(高斯)实线表示听觉通道中的调谐曲线, 黑色(高斯)虚线表示视听时距整合到运动计时系统中统一的调谐曲线。黑色实线箭头表示时距二分任务的时距加工通路, 黑色虚线箭头表示时距复制任务的时距加工通路。在时距二分任务中, 视觉和听觉计时系统分别对视觉和听觉刺激时距进行独立表征, 表现为刺激序列依赖效应的通道特异性; 而在时距复制任务中, 运动计时系统能够同时表征视觉和听觉时距信息, 进而促进了刺激序列依赖跨通道效应。

激序列依赖仅表现为部分跨通道效应,这说明该任务中视听时距编码仍部分保留感觉通道特异通路,暗示视听时距编码的双通路特征。

前人研究表明反应序列依赖效应反映了高水平的决策惯性(Akaishi et al., 2014; Pascucci et al., 2019; Urai et al., 2019)。本研究发现在时距复制任务中反应序列依赖效应表现出一定程度的跨通道性,而在二分任务中则表现出通道特异性。这说明任务范式是影响反应序列依赖跨通道效应的重要因素。已有研究表明,在二分任务中个体的最优反应策略是根据已有的决策标准进行基于类别的简单刺激-反应映射,这种策略简单高效,但迁移性较差;在复制任务中个体的最优策略则是基于高水平预测的复杂映射策略,其能够促进学习效果的迁移(Green et al., 2015; Kattner et al., 2016)。在本研究中虽然个体对视觉和听觉刺激的感知特征都为时距信息,但是由于个体对视觉和听觉时距信息的感知并不相同(通常高估听觉时距),因此如果在二分任务中采用同一种决策标准判断会导致更多的判断错误。此时,最优的反应策略是对视觉和听觉时距的判断分别形成两种不同的决策标准,分别进行类别映射,进而导致反应序列依赖效应的通道特异性。相反,在时距复制任务中,个体的最优反应策略是通过连续回归的方式将刺激时距信息映射到运动反应,这一过程需要将具体的视觉和听觉时距信息转换为抽象时距信息,进而映射到统一的运动反应。在这种反应策略下,先前的反应信息对后续时距加工的影响将不再局限于特定的感觉通道。本研究发现反应序列依赖效应也表现为部分而非完全的跨通道性,这说明即使在复制反应策略下先前反应信息导致的这种决策偏差仍然会对刺激的通道类别信息敏感。综上,本研究发现时距知觉的反应序列依赖跨通道效应受到反应策略的调节,说明该效应并不仅仅是一种简单机械的决策惯性,其涉及对反应策略的整合利用。

本研究发现在时距复制任务中刺激和反应序列依赖效应都具有听觉优势效应。这种听觉优势效应主要表现为当先前刺激时距为听觉时距(vs.视觉时距)时,无论先后试次的感觉通道是否一致,刺激和反应序列依赖效应都更大。这可能反映了时距加工中视听信息在感知整合中的权重不同。已有研究表明,时距知觉中存在听觉优势效应,即听觉通道相较于其他感觉通道在时距知觉中更具优势,如表现出更高的精确性和敏感性的现象(Burr et al.,

2009; Goldstone & Lhamon, 1974; Penney et al., 2000; Walker & Scott, 1981; Wearden et al., 1998)。本研究的补充分析发现,在实验 2 和 3 中,听觉通道复制时距的平均变异系数(coefficient of variation = 标准差/均值)均显著小于视觉通道($p_s < 0.001$, Cohen's $d_s > 0.70$; 图 S7)。这证实了这一现象。根据贝叶斯理论,在多感觉通道整合时,感官信号的权重与其信号可靠性成正比,即跨感官的信息是根据各感官信号的统计可靠性进行加权的(Ernst & Banks, 2002; Fetsch et al., 2012)。在视听时距知觉整合时视觉时距知觉能够被同时呈现的听觉时距所影响,反之则不然,这证实了时距知觉整合时听觉的优势效应(Chen & Yeh, 2009; Klink et al., 2011)。据此,当视听时距信息被整合到统一的运动计时系统时,听觉时距信息的权重也会更大,进而先前的听觉时距信息对后续时距编码的影响更大,导致更大的刺激序列依赖效应。同样,由于个体对听觉(vs.视觉)时距信息更加敏感,因此听觉时距信息在转换成复制时距时噪声更小,确定性更大。先前信息的噪声增加和确定性降低是削弱吸引力序列依赖效应大小的重要因素(Burr & Cicchini, 2014; Cicchini et al., 2018)。这在一定程度上解释了本研究观察到的反应序列依赖效应的听觉优势效应。

本研究仍存在一定的局限性。首先,本研究仅仅关注了时距复制和时距二分这两种任务范式,这在一定程度上限制了本研究相关结论的推广性。在时距知觉研究中还存在其他任务范式,例如口头报告任务(要求被试以时钟时间为单位估计刺激的呈现时间)和时距泛化任务(要求被试判断测试时距是否和记忆中的参考时距相等)等。这些任务涉及的反应方式和策略不同。例如,已有研究表明相比相等性判断(equality judgements, 如时距泛化任务),比较性判断(comparative judgements, 如时距二分任务)更易受到决策偏差的影响(Schneider & Komlos, 2008)。因此,尽管时距二分任务和时距泛化任务同为二项迫选任务,这些任务中序列依赖效应及其跨通道特性的表现是否一致仍需要后续研究的探讨。其次,与空间特征信息不同,时距信息具有高度的抽象性,且个体没有专门加工时距信息的感受器,个体对时距信息的加工存在独特的认知神经机制(Merchant, Harrington, & Meck, 2013)。因此,本研究对时距知觉序列依赖效应研究得到的结论是否能够推广到其他知觉领域,仍需后续研究的验证。最后,本研究对序列依赖效应产生机制的探

讨仍停留在行为推论层面, 缺乏直接的神经证据。例如, 本研究提出运动皮层(如 SMA)跨通道时距编码功能在刺激序列依赖跨通道效应产生中具有重要作用; 不同任务中的反应策略是影响反应序列依赖跨通道效应的关键因素, 这些观点仍需神经生理学证据。未来研究可结合功能磁共振成像(fMRI)技术分别在刺激编码和反应阶段比较不同任务跨通道条件下被试相应脑区(如 SMA 和前额叶)激活水平和模式的差异。在此基础上, 进一步采用经颅磁刺激(TMS)等技术调控相应脑区的活动, 考察刺激和反应序列依赖跨通道效应的变化, 可为本研究的假设提供有力的因果性证据。

6 结论

本研究探讨了时距复制任务中的序列依赖效应以及任务范式(复制任务 vs. 二分任务)对时距知觉序列依赖跨通道效应的影响。结果发现: (1)时距复制任务中存在排斥性的刺激序列依赖效应和吸引性的反应序列依赖效应; (2)在时距复制任务中, 刺激和反应序列依赖效应具有一定程度的跨通道性; 而在时距二分任务中, 刺激和反应序列依赖效应则具有通道特异性。这些结果证实了复制任务对序列依赖跨通道效应的促进作用。这一方面说明时距知觉的刺激序列依赖效应并非完全源于低水平感知适应, 其涉及高水平的认知加工; 另一方面, 这也反映了反应序列依赖效应并不是一种简单机械的决策惯性, 其涉及对反应策略的整合利用。本研究为人们理解时距知觉序列依赖效应及其跨通道特性提供了新的证据。

参 考 文 献

- Akaishi, R., Umeda, K., Nagase, A., & Sakai, K. (2014). Autonomous mechanism of internal choice estimate underlies decision inertia. *Neuron*, 81(1), 195–206.
- Bausenhardt, K. M., Dyjas, O., & Ulrich, R. (2014). Temporal reproductions are influenced by an internal reference: Explaining the Vierordt effect. *Acta Psychologica*, 147, 60–67.
- Bosch, E., Fritsche, M., Ehinger, B. V., & de Lange, F. P. (2020). Opposite effects of choice history and evidence history resolve a paradox of sequential choice bias. *Journal of Vision*, 20(12), 9.
- Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10(4), 433–436.
- Brimijoin, W. O., & O'Neill, W. E. (2010). Patterned tone sequences reveal non-linear interactions in auditory spectrotemporal receptive fields in the inferior colliculus. *Hearing Research*, 267(1–2), 96–110.
- Bueti, D., Walsh, V., Frith, C., & Rees, G. (2008). Different brain circuits underlie motor and perceptual representations of temporal intervals. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20(2), 204–214.
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2004). Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research*, 33(2), 261–304.
- Burr, D., Banks, M. S., & Morrone, M. C. (2009). Auditory dominance over vision in the perception of interval duration. *Experimental Brain Research*, 198(1), 49–57.
- Burr, D., & Cicchini, G. M. (2014). Vision: Efficient adaptive coding. *Current Biology*, 24(22), R1096–R1098.
- Chen, K.-M., & Yeh, S.-L. (2009). Asymmetric cross-modal effects in time perception. *Acta Psychologica*, 130(3), 225–234.
- Chen, S., Wang, T., & Bao, Y. (2023). Serial dependence in timing at the perceptual level being modulated by working memory. *PsyCh Journal*, 12(6), 774–786.
- Cheng, S., Chen, S., Glasauer, S., Keeser, D., & Shi, Z. (2024). Neural mechanisms of sequential dependence in time perception: The impact of prior task and memory processing. *Cerebral Cortex*, 34(1), bhad453.
- Cheng, S., Chen, S., & Shi, Z. (2024). Opposing sequential biases in direction and time reproduction: Influences of task relevance and working memory. *British Journal of Psychology*, 115(4), 825–842.
- Cheng, S., Chen, S., Yang, X., & Shi, Z. (2024). The impact of task measurements on sequential dependence: A comparison between temporal reproduction and discrimination tasks. *Psychological Research*, 88(8), 2346–2359.
- Cicchini, G. M., Benedetto, A., & Burr, D. C. (2021). Perceptual history propagates down to early levels of sensory analysis. *Current Biology*, 31(6), 1245–1250.e2.
- Cicchini, G. M., Mikellidou, K., & Burr, D. (2017). Serial dependencies act directly on perception. *Journal of Vision*, 17(14), 6.
- Cicchini, G. M., Mikellidou, K., & Burr, D. C. (2018). The functional role of serial dependence. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1890), 20181722.
- Dyjas, O., Bausenhardt, K. M., & Ulrich, R. (2012). Trial-by-trial updating of an internal reference in discrimination tasks: Evidence from effects of stimulus order and trial sequence. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(8), 1819–1841.
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429–433.
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175–191.
- Feigin, H., Shalom-Sperber, S., Zachor, D. A., & Zaidel, A. (2021). Increased influence of prior choices on perceptual decisions in autism. *eLife*, 10, e61595.
- Fetsch, C. R., Pouget, A., DeAngelis, G. C., & Angelaki, D. E. (2012). Neural correlates of reliability-based cue weighting during multisensory integration. *Nature Neuroscience*, 15(1), 146–154.
- Fischer, J., & Whitney, D. (2014). Serial dependence in visual perception. *Nature Neuroscience*, 17(5), 738–743.
- Fornaciai, M., & Park, J. (2019). Serial dependence generalizes across different stimulus formats, but not different sensory modalities. *Vision Research*, 160, 108–115.
- Fritsche, M., Mostert, P., & de Lange, F. P. (2017). Opposite effects of recent history on perception and decision. *Current Biology*, 27(4), 590–595.
- Fulvio, J. M., Green, C. S., & Schrater, P. R. (2014).

- Task-specific response strategy selection on the basis of recent training experience. *PLOS Computational Biology*, 10(1), e1003425.
- Goldstone, S., & Lhamon, W. T. (1974). Studies of auditory-visual differences in human time judgment: 1. Sounds are judged longer than lights. *Perceptual and Motor Skills*, 39(1), 63–82.
- Green, C. S., Kattner, F., Siegel, M. H., Kersten, D., & Schrater, P. R. (2015). Differences in perceptual learning transfer as a function of training task. *Journal of Vision*, 15(10), 5.
- Heron, J., Aaen-Stockdale, C., Hotchkiss, J., Roach, N. W., McGraw, P. V., & Whitaker, D. (2012). Duration channels mediate human time perception. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1729), 690–698.
- Huang, X. T., Guo, X. Y., & Nie, J. (2003). The relationship between temporal and non-temporal information in cognitive processing. *Journal of Psychological Science*, 26(5), 770–774.
- [黄希庭, 郭秀艳, 聂晶. (2003). 认知加工中时间与非时间信息的相互关系. *心理科学*, 26(5), 770–774.]
- Huang, X. T., Li, B. Y., & Zhang, Z. J. (2003). The research of the range-synthetic model of temporal cognition. *Journal of Southwest China Normal University (Humanities and Social Sciences Edition)*, 29(2), 5–9.
- [黄希庭, 李伯约, 张志杰. (2003). 时间认知分段综合模型的探讨. *西南师范大学学报: 人文社会科学版*, 29(2), 5–9.]
- Kattner, F., Cox, C. R., & Green, C. S. (2016). Transfer in rule-based category learning depends on the training task. *PLOS ONE*, 11(10), e0165260.
- Klink, P. C., Montijn, J. S., & van Wezel, R. J. (2011). Crossmodal duration perception involves perceptual grouping, temporal ventriloquism, and variable internal clock rates. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(1), 219–236.
- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003). Distinct systems for automatic and cognitively controlled time measurement: Evidence from neuroimaging. *Current Opinion in Neurobiology*, 13(2), 250–255.
- Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., & Licata, L. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, 49(4), 764–766.
- Li, B., Chen, L., & Fang, F. (2019). Somatotopic representation of tactile duration: Evidence from tactile duration aftereffect. *Behavioural Brain Research*, 371, 111954.
- Li, B., Wang, B., & Zaidel, A. (2023). Modality-specific sensory and decisional carryover effects in duration perception. *BMC Biology*, 21(1), 48.
- Li, B., Xiao, L., Yin, H., Liu, P., & Huang, X. (2017). Duration aftereffect depends on the duration of adaptation. *Frontiers in Psychology*, 8, 491.
- Li, B., Yuan, X., Chen, Y., Liu, P., & Huang, X. (2015). Visual duration aftereffect is position invariant. *Frontiers in Psychology*, 6, 1536.
- Li, B., Yuan, X., & Huang, X. (2015). The aftereffect of perceived duration is contingent on auditory frequency but not visual orientation. *Scientific Reports*, 5, 10124.
- Li, B. L., Zhai, X. F., Wang, B. Y., & Wang, K. (2025). Spatial and ear generalizations of serial dependence in auditory duration perception. *Journal of Psychological Science*, 48(1), 11–20.
- [李宝林, 翟小斐, 王碧瑶, 王坤. (2025). 听觉时距知觉序列依赖效应跨空间和双耳位置的迁移特性. *心理科学*, 48(1), 11–20.]
- Luo, M., Zhang, H., Fang, F., & Luo, H. (2025). Reactivation of previous decisions repulsively biases sensory encoding but attractively biases decision-making. *PLOS Biology*, 23(4), e3003150.
- Manassi, M., Liberman, A., Kosovicheva, A., Zhang, K., & Whitney, D. (2018). Serial dependence in position occurs at the time of perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(6), 2245–2253.
- Matthews, W. J., & Meck, W. H. (2016). Temporal cognition: Connecting subjective time to perception, attention, and memory. *Psychological Bulletin*, 142(8), 865–907.
- Merchant, H., Harrington, D. L., & Meck, W. H. (2013). Neural basis of the perception and estimation of time. *Annual Review of Neuroscience*, 36, 313–336.
- Merchant, H., Pérez, O., Zarco, W., & Gámez, J. (2013). Interval tuning in the primate medial premotor cortex as a general timing mechanism. *Journal of Neuroscience*, 33(21), 9082–9096.
- Moon, J., & Kwon, O.-S. (2022). Attractive and repulsive effects of sensory history concurrently shape visual perception. *BMC Biology*, 20(1), 247.
- Murai, Y., & Whitney, D. (2021). Serial dependence revealed in history-dependent perceptual templates. *Current Biology*, 31(14), 3185–3191.e3.
- O'Regan, J. K., & Noë, A. (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behavioral and Brain Sciences*, 24(5), 939–973.
- Pascucci, D., Mancuso, G., Santandrea, E., Della Libera, C., Plomp, G., & Chelazzi, L. (2019). Laws of concatenated perception: Vision goes for novelty, decisions for perseverance. *PLOS Biology*, 17(3), e3000144.
- Pascucci, D., Tanrikulu, Ö. D., Ozkirlı, A., Houborg, C., Ceylan, G., Zerr, P., ... Kristjánsson, Á. (2023). Serial dependence in visual perception: A review. *Journal of Vision*, 23(1), 9.
- Pelli, D. G. (1997). The VideoToolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10(4), 437–442.
- Penney, T. B., Gibbon, J., & Meck, W. H. (2000). Differential effects of auditory and visual signals on clock speed and temporal memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(6), 1770–1787.
- Prinz, W. (1990). A common coding approach to perception and action. In O. Neumann & W. Prinz (Eds.), *Relationships between perception and action: Current approaches* (pp. 167–201). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Protopapa, F., Hayashi, M. J., Kulashkhar, S., Van Der Zwaag, W., Battistella, G., Murray, M. M., ... Bueti, D. (2019). Chronotopic maps in human supplementary motor area. *PLOS Biology*, 17(3), e3000026.
- Roach, N. W., McGraw, P. V., Whitaker, D. J., & Heron, J. (2017). Generalization of prior information for rapid Bayesian time estimation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(2), 412–417.
- Sadil, P., Cowell, R. A., & Huber, D. E. (2024). The push-pull of serial dependence effects: Attraction to the prior response and repulsion from the prior stimulus. *Psychonomic Bulletin & Review*, 31(1), 259–273.
- Schneider, K. A., & Komlos, M. (2008). Attention biases decisions but does not alter appearance. *Journal of Vision*, 8(15), 3.
- Schubotz, R. I., Friederici, A. D., & von Cramon, D. Y. (2000). Time perception and motor timing: A common cortical and

- subcortical basis revealed by fMRI. *NeuroImage*, 11(1), 1–12.
- Sheehan, T. C., & Serences, J. T. (2022). Attractive serial dependence overcomes repulsive neuronal adaptation. *PLOS Biology*, 20(9), e3001711.
- Urai, A. E., de Gee, J. W., Tsetsos, K., & Donner, T. H. (2019). Choice history biases subsequent evidence accumulation. *eLife*, 8, e46331.
- Van der Burg, E., Toet, A., Brouwer, A.-M., & Van Erp, J. B. F. (2021). Serial dependence of emotion within and between stimulus sensory modalities. *Multisensory Research*, 1–12.
- Walker, J. T., & Scott, K. J. (1981). Auditory-visual conflicts in the perceived duration of lights, tones, and gaps. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 7(6), 1327–1339.
- Wang, B. Y., Chen, C., Hu, X. F., Wang, D., & Li, B. L. (2024). Spatial generalization of serial dependence in visual duration perception. *Acta Psychologica Sinica*, 56(4), 394–411.
- [王碧瑶, 陈晨, 胡晓斐, 王迪, 李宝林. (2024). 视觉时距知觉序列依赖效应的空间迁移性. *心理学报*, 56(4), 394–411.]
- Wearden, J. H., Edwards, H., Fakhri, M., & Percival, A. (1998). Why "sounds are judged longer than lights": Application of a model of the internal clock in humans. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology B: Comparative and Physiological Psychology*, 51(2), 97–120.
- Wehrman, J. J., Wearden, J. H., & Sowman, P. (2018). Short-term effects on temporal judgement: Sequential drivers of interval bisection and reproduction. *Acta Psychologica*, 185, 87–95.
- Wehrman, J. J., Wearden, J., & Sowman, P. (2020). Decisional carryover effects in interval timing: Evidence of a generalized response bias. *Attention, Perception & Psychophysics*, 82(4), 2147–2164.
- Wiener, M., Thompson, J. C., & Coslett, H. B. (2014). Continuous carryover of temporal context dissociates response bias from perceptual influence for duration. *PLOS ONE*, 9(6), e100803.
- Wiener, M., Turkeltaub, P., & Coslett, H. B. (2010). The image of time: A voxel-wise meta-analysis. *NeuroImage*, 49(2), 1728–1740.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636.
- Zhang, H., & Luo, H. (2023). Feature-specific reactivations of past information shift current neural encoding thereby mediating serial bias behaviors. *PLOS Biology*, 21(3), e3002056.
- Zhou, L., Liu, Y., Jiang, Y., Wang, W., Xu, P., & Zhou, K. (2024). The distinct development of stimulus and response serial dependence. *Psychonomic Bulletin & Review*, 31(5), 2137–2147.
- Zimmermann, E., & Cicchini, G. M. (2020). Temporal context affects interval timing at the perceptual level. *Scientific Reports*, 10(1), 8767.

The duration reproduction task facilitates cross-modal serial dependence in duration perception

KOU Congchao, LI Baolin, ZHAI Xiaofei

(School of Psychology, Shaanxi Normal University, 199 Chang'an South Road, Yanta District, Xi'an 710062, China)

Abstract

The serial dependence effect refers to the influence of immediately preceding experiences on subsequent perceptual processing. Previous research has identified two types of serial dependence in the duration bisection task: a repulsive stimulus serial dependence effect and an attractive response serial dependence effect. Notably, both effects have been shown to exhibit modality specificity, meaning they do not generalize across sensory modalities such as vision and audition. Considering the distinctions between duration bisection and duration reproduction tasks, it remains unclear whether similar stimulus and response serial dependence effects also occur in duration reproduction, and whether they generalize across sensory modalities. In the present study, we investigated serial dependence and its cross-modal effects in the duration reproduction task, and further assessed how task paradigm shapes cross-modal stimulus and response serial dependence in duration perception.

The duration reproduction task and generalized linear models were used across three experiments. In Experiment 1, 24 participants with no prior exposure to the task completed visual and auditory duration reproduction tasks in separate blocks. Participants reproduced the duration of a test stimulus—one of five durations ranging from 500 to 1200 ms in equal logarithmic steps—by pressing and holding a button for the matching duration. Experiment 2 involved a new group of 25 participants and followed a similar procedure, except that visual and auditory stimuli were pseudorandomly presented within a single block. In Experiment 3, 32 different participants completed both duration reproduction and duration bisection tasks. The reproduction task was identical to that in Experiment 2, while in the bisection task, participants judged whether the test stimulus was longer or shorter than an intermediate reference stimulus once it disappeared.

The results of Experiment 1 showed that the previous stimulus and previous reproduction exerted opposite effects on serial dependence: current duration estimates were repelled by the prior stimulus duration (repulsive stimulus serial dependence) but attracted toward the prior reproduction (attractive response serial dependence). Experiment 2 further indicated that both stimulus and response serial dependence effects could partially generalize across visual and auditory modalities, contrasting with the modality-specific effects observed in earlier studies employing the duration bisection task. However, the test durations in Experiment 2 were longer than those typically employed in previous duration bisection tasks. To rule out any influence of test duration and to further investigate the impact of task paradigm on cross-modal serial dependence, we conducted Experiment 3. Consistent with Experiment 2, both stimulus and response serial dependence effects partially generalized across modalities in the duration reproduction task. In contrast, in the duration bisection task, both effects remained modality-specific, aligning with earlier studies. These findings suggest that task paradigm plays a crucial role in modulating cross-modal serial dependence in duration perception.

These results provide evidence that both previous stimulus and previous responses affect subsequent duration perception, eliciting a repulsive stimulus serial dependence effect and an attractive response serial dependence effect, respectively. This indicates that distinct mechanisms underlie the use of prior stimulus and response information in duration processing. Moreover, task paradigm modulates the cross-modal effects of serial dependence in duration perception. One possible explanation is that reproduction response facilitates integration of visual and auditory temporal encoding, diminishing categorical distinctions between modalities and thereby promoting cross-modal stimulus and response serial dependence effects. These results indicate that stimulus serial dependence is not solely explained by low-level perceptual adaptation but also involves higher-level cognitive processing, whereas response serial dependence reflects more than mechanical decision inertia, involving the integration of response strategies across trials.

Keywords serial dependence, task paradigm, stimulus, response, cross-modal

附录

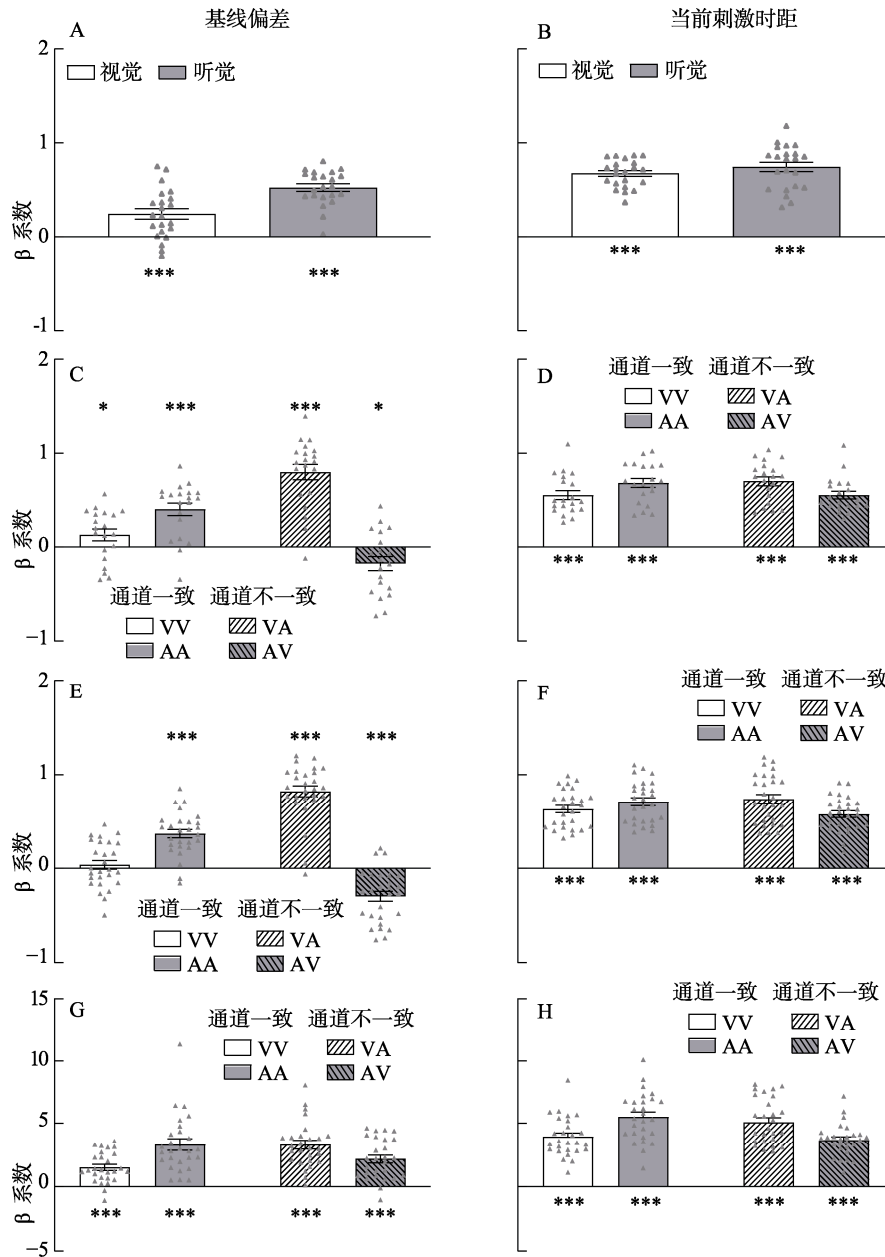
附录 1 基于基线偏差与当前刺激时距的 β 系数(β_0 和 β_{currS})分析结果

图 S1 基于基线偏差与当前刺激时距的 β 系数(β_0 和 β_{currS})在不同刺激条件下的大小(A、B 为实验 1 结果, C、D 为实验 2 结果, E、F 为实验 3 复制法结果, G、H 为实验 3 二分法结果)。实验 1 中白色空心条形图为视觉条件, 灰色实心条形图为听觉条件; 实验 2 和 3 中白色空心条形图 VV 表示先前与当前刺激均为视觉刺激; 灰色实心条形图 AA 表示先前与当前刺激均为听觉刺激; 右斜浅色条纹条形图 VA 表示先前刺激为视觉刺激, 当前刺激为听觉刺激; 左斜深色条纹条形图 AV 表示先前刺激为听觉刺激, 当前刺激为视觉刺激。图中灰色三角代表每种条件下每名被试的数据点, 误差线代表标准误差, * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ 。

附录 2 联合时距分析程序及结果

在时距复制任务中, 由于先前的刺激时距和复制时距具有一定的相关性(即在较长刺激时距条件下被试复制的时距也较长, 反之亦然), 因此为了展示先前刺激时

距和先前复制时距对当前时距复制时长的独立影响, 我们分别在视觉和听觉通道(实验 1)以及 4 种条件(实验 2 和 3)中构建了二维(先前刺激时距和先前复制时距)的联合时距复制图(Moon & Kwon, 2022; Zhou et al., 2024)。

该联合时距复制图反映了不同先前刺激时距和不同先前复制时距条件下被试当前时距复制的长度。为了便于分析,我们将复制时距(200~2000 ms)取对数后,以 0.3 为步长划分为 7 个区间(既能区分不同时距的效应,又能避免过细划分导致数据分布稀疏)。因此,在二维联合时距复制图中,先前的刺激时距维度分为 5 个水平(对应 5 种测试时距),先前的复制时距维度分为 7 个水平。同时,为了更加清晰地反映在固定某一维度下,另一维度对当前试次复制时距的影响,我们分别取图中包含试次最多的 3 个先前复制时距区间和 5 个先前刺激时距条件,画出不同先前复制时距条件下,当前复制时距随不同先前刺激时距变化的趋势图,以及不同先前刺激时距条件下,当前复制时距随不同先前复制时距变化的趋势图。该图

仅用于从视觉上反映当前复制时距随先前刺激时距或复制时距的变化趋势。

同样,在时距二分任务中,我们也分别在 4 种条件下构建了二维(先前刺激时距和先前决策反应)的联合时距决策图。该联合决策图反映了不同先前刺激时距和不同先前决策反应条件下被试当前试次判断为“较长”的反应比例。在二维联合决策图中,先前的刺激时距维度分为 5 个水平(对应 5 种测试时距),先前决策反应维度分为两个水平(“较长”和“较短”)。同时,为了更加清晰地反映在固定某一维度下,另一维度对当前反应的影响,我们分别画出了不同先前决策反应下,判断为“较长”的比例随不同先前刺激时距变化的趋势图,以及不同先前刺激时距条件下,判断为“较长”的比例随先前决策反应变化的趋势图。

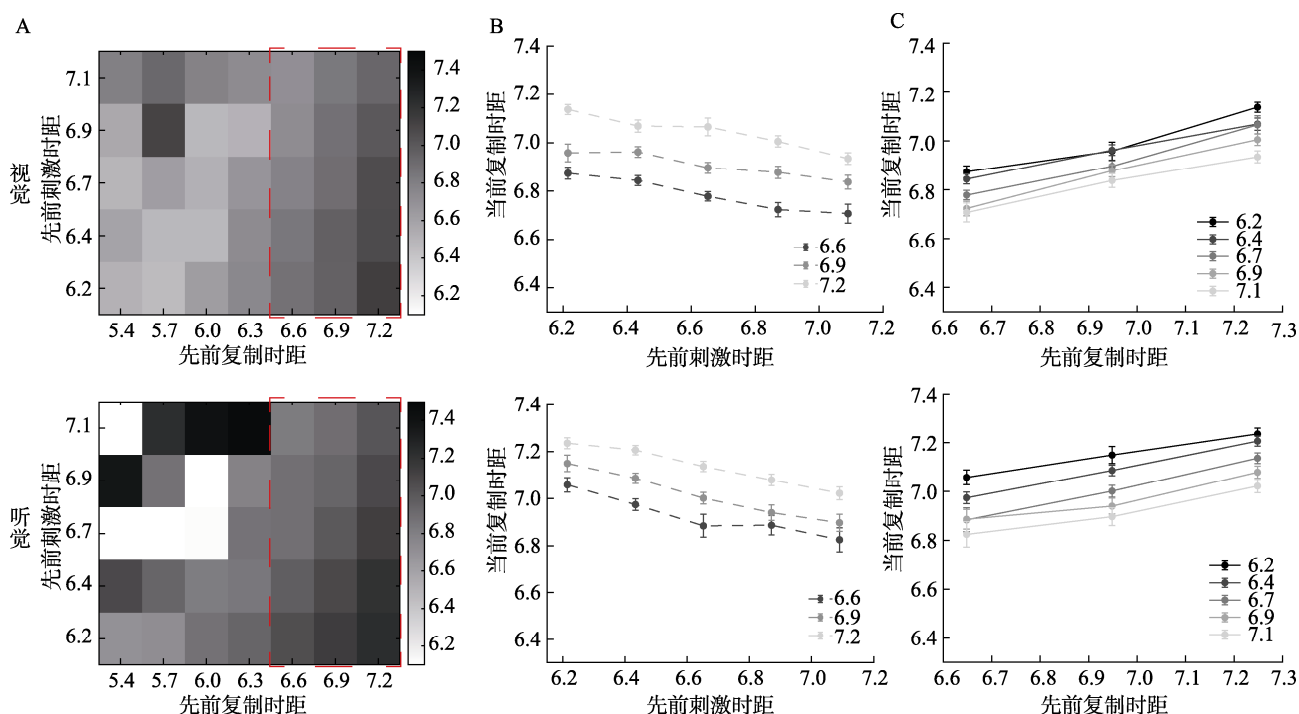


图 S2 实验 1 不同感觉通道下的联合时距复制图。(A)视觉(上图)和听觉(下图)通道的二维复制时距图。横坐标为 7 个先前复制时距区间,纵坐标为先前刺激时距,因变量为被试在该种条件下的当前复制时距,白色表示较短,黑色表示较长。(B)固定先前复制时距条件下,被试当前复制时距随先前刺激时距变化的趋势。(C)固定先前刺激时距条件下,被试当前复制时距随先前复制时距变化的趋势。B 和 C 图中的数据源于 A 图中包含试次最多的 3 个先前复制时距区间(由红色框标注)。图中的刺激和复制时距为对数转换后的值,误差线表示标准误差。

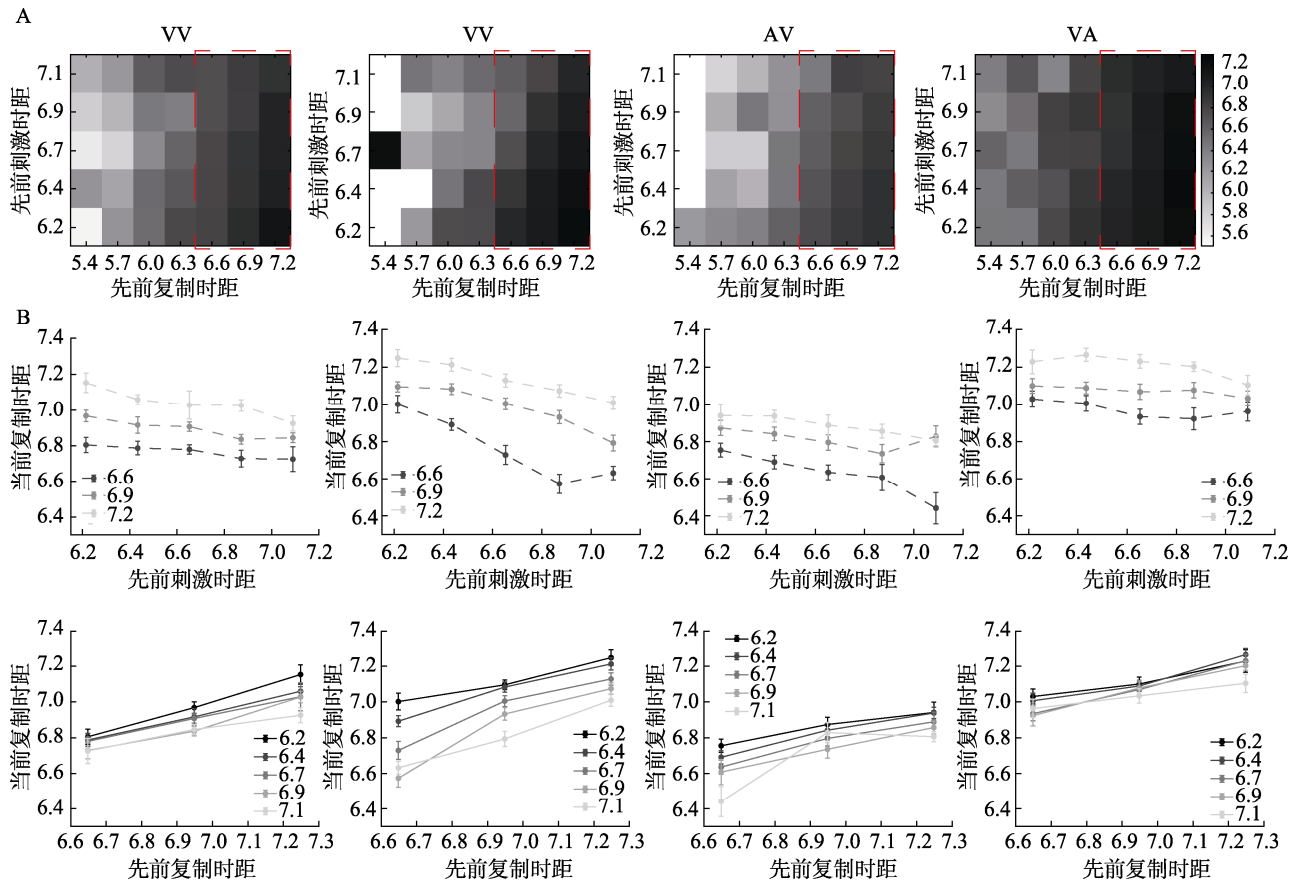


图 S3 实验 2 不同条件下的联合时距复制图。(A) 4 种条件(VV: 先前刺激是视觉刺激, 当前刺激也是视觉刺激; AA: 先前刺激是听觉刺激, 当前刺激也是听觉刺激; AV: 先前刺激是听觉刺激, 当前刺激是视觉刺激; VA: 先前刺激是视觉刺激, 当前刺激是听觉刺激)下的二维复制时距图。横坐标为 7 个先前复制时距区间, 纵坐标为先前刺激时距。因变量为被试在该种条件下当前试次的复制时距, 白色表示较短, 黑色表示较长。B: 固定先前复制时距(上图)和先前刺激时距(下图)条件下, 被试当前复制时距随先前刺激时距(上图)和先前复制时距(下图)变化的趋势。数据源于图 A 中包含试次最多的 3 个先前复制时距区间(由红色框标注)。图中的刺激和复制时距为对数转换后的值, 误差线表示标准误差。

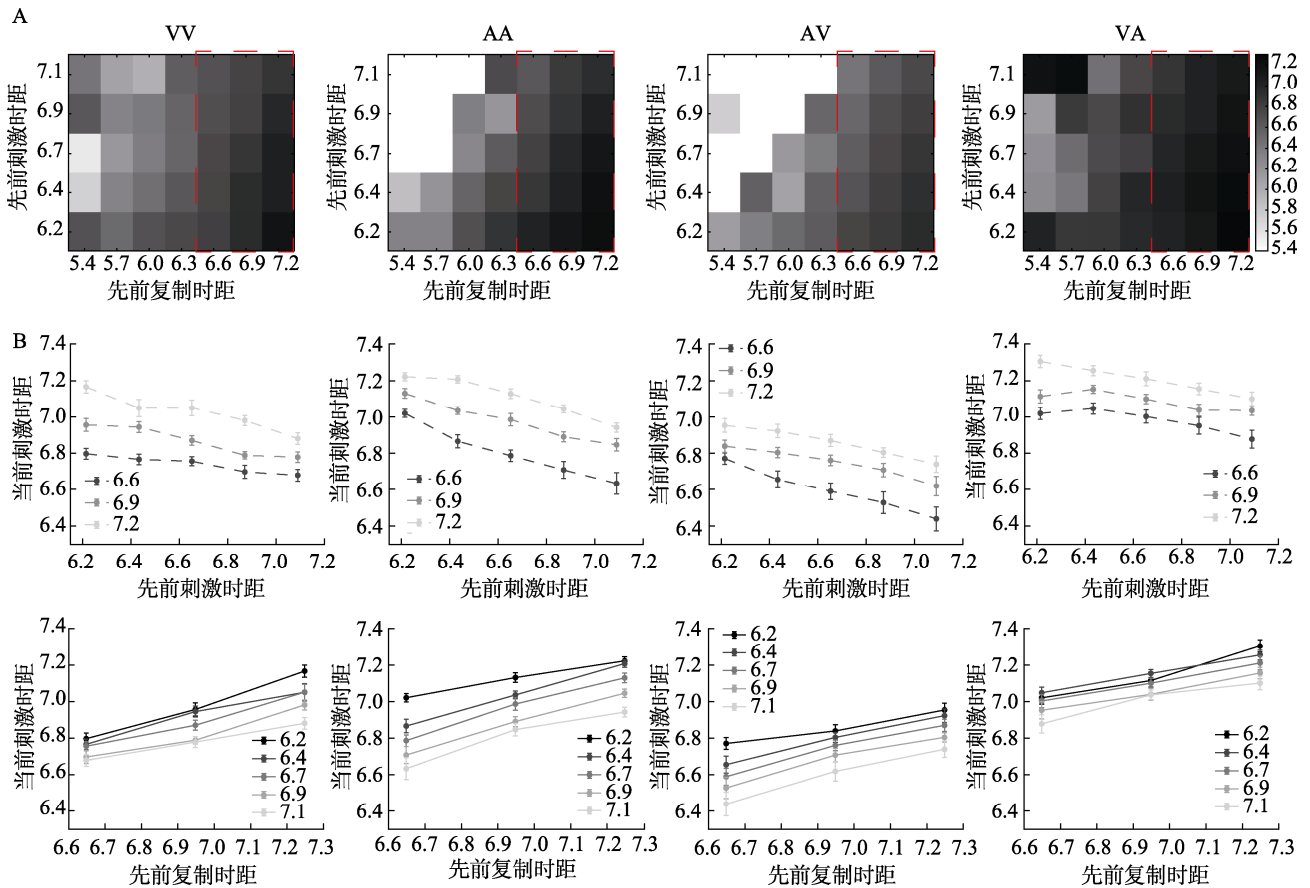


图 S4 实验 3 复制任务中不同条件下的联合时距复制图。A: 4 种条件(VV: 先前刺激是视觉刺激, 当前刺激也是视觉刺激; AA: 先前刺激是听觉刺激, 当前刺激也是听觉刺激; AV: 先前刺激是听觉刺激, 当前刺激是视觉刺激; VA: 先前刺激是视觉刺激, 当前刺激是听觉刺激)下的二维复制时距图。横坐标为 7 个先前复制时距区间, 纵坐标为先前刺激时距, 因变量为被试在该种条件下当前试次的复制时距, 白色表示较短, 黑色表示较长。B: 固定先前复制时距(上图)和先前刺激时距(下图)条件下, 被试当前复制时距随先前刺激时距(上图)和先前复制时距(下图)变化的曲线。数据源于图 A 中包含试次最多的 3 个先前复制时距区间(由红色框标注)。图中的刺激和复制时距为对数转换后的值, 误差线表示标准误差。

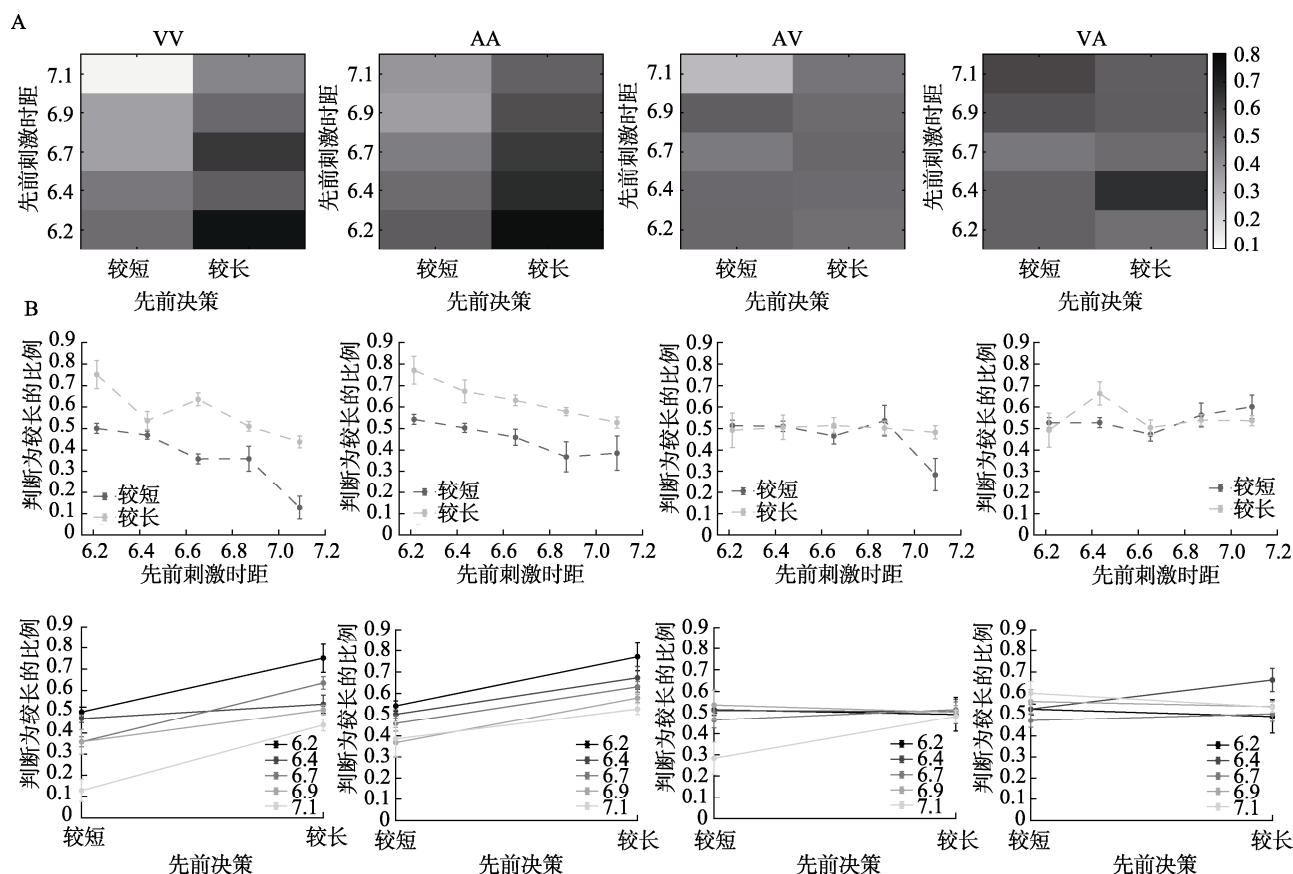


图 S5 实验 3 二分任务中不同条件下的联合时距决策图。A: 4 种条件(VV: 先前刺激是视觉刺激, 当前刺激也是视觉刺激; AA: 先前刺激是听觉刺激, 当前刺激也是听觉刺激; AV: 先前刺激是听觉刺激, 当前刺激是视觉刺激; VA: 先前刺激是视觉刺激, 当前刺激是听觉刺激)下的二维联合决策图。横坐标为先前试次的决策反应, 包括“较长”和“较短”, 纵坐标为先前刺激时距, 因变量为被试在该种条件下当前试次判断为“较长”的比例。白色表示较低, 黑色表示较高。B: 固定先前决策反应(上图)和刺激时距(下图)条件下, 被试当前试次判断为“较长”的比例随着先前刺激时距(上图)和先前决策反应(下图)变化的曲线。数据源于图 A 中没有空值的所有列。图中的刺激时距为对数转换后的值, 误差线表示标准误差。

附录 3 复制变量转二分变量分析

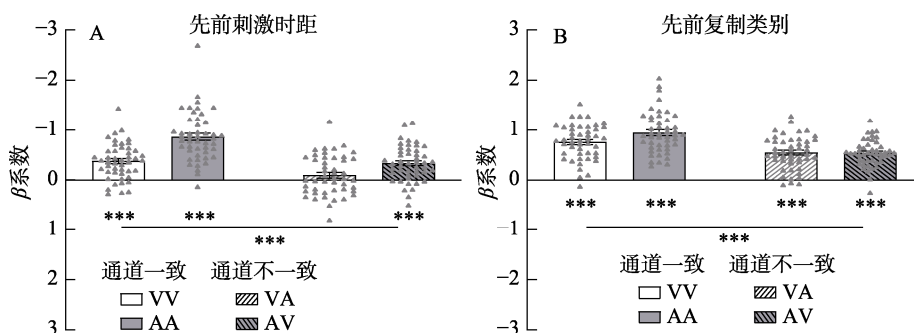


图 S6 复制变量转二分变量分析结果。我们采用每个被试总体复制时距中位数作为参考时距, 将复制时距低于该值的试次划分为“较短”, 高于该值的试次划分为“较长”。对实验 2 和实验 3 复制任务的数据进行合并, 并将转换后的数据进行与二分任务相同的模型分析。(A)基于先前刺激时距的 β 系数在不同条件下的大小。(B)基于先前复制类别的 β 系数在不同条件下的大小。白色空心条形图 VV 表示先前与当前刺激均为视觉刺激; 灰色实心条形图 AA 表示先前与当前刺激均为听觉刺激; 右斜浅色条纹条形图 VA 表示先前刺激为视觉刺激, 当前刺激为听觉刺激; 左斜深色条纹条形图 AV 表示先前刺激为听觉刺激, 当前刺激为视觉刺激。图中灰色三角代表每种条件下每名被试的数据点, 误差线代表标准误差, *** $p < 0.001$ 。

附录 4 复制时距变异性分析

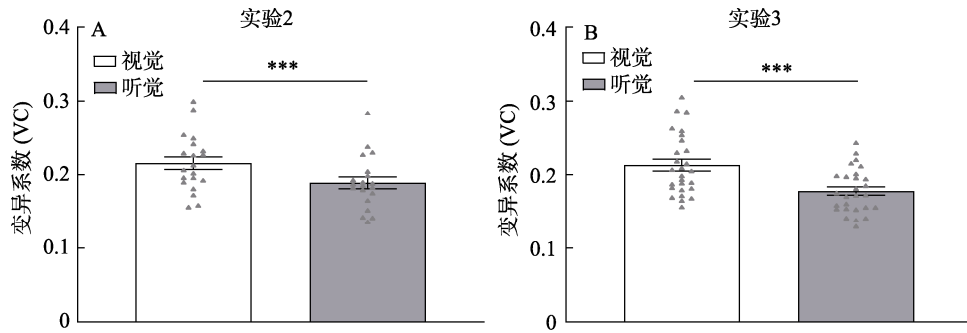


图 S7 复制时距变异性分析结果。(A)实验 2 视觉和听觉通道复制时距变异系数的大小。(B)实验 3 视觉和听觉通道复制时距变异系数的大小。对于每个实验,我们首先计算了视觉和听觉条件下每个刺激时距(500 ms, 622 ms, 775 ms, 964 ms, 1200 ms)的变异系数,随后分别对视觉和听觉通道的 5 个 CV 进行平均。之后采用配对样本 t 检验考察视觉与听觉通道中变异系数之间的差异。结果发现,个体对视觉时距的感知不确定性与内部噪声更高。因此,在感知整合中,视觉时距信息的可靠性要低于听觉时距信息的可靠性,表现为 AV 条件的反应序列依赖效应要显著高于 VA 条件的反应序列依赖效应。图中白色空心条形图为视觉条件,灰色实心条形图为听觉条件。灰色三角代表每种条件下每名被试的数据点,误差线代表标准误差,*** $p < 0.001$ 。