

意识状态调节节律性时间注意：来自行为、 分层漂移扩散模型与脑电指标的证据*

梁星杰 陈慧芳 王璐瑶 孙彦良

(山东师范大学心理学部, 济南 250358)

摘要 时间注意是指个体根据刺激发生的时间优先处理信息的能力, 对日常生活中的行为反应至关重要。然而, 节律性时间注意是否受意识状态调控尚不明确。本研究通过高频闪烁技术操纵视觉节律刺激被感知的意识状态水平, 将行为测量、分层漂移扩散模型(hierarchical drift-diffusion model, HDDM)分析与事件相关电位和时频分析技术相结合, 系统考察了意识状态对节律性时间注意的调节作用以及节律线索在亚秒与超秒时间尺度上的加工机制差异。实验 1 结果表明, 节律线索在有、无意识状态下均能引发时间注意效应, 但效应在无意识条件下显著减弱。HDDM 分析进一步揭示, 有意识状态下节律线索能降低个体的决策边界, 提示其激活了决策层面的内源性加工, 而无意识状态下该效应不显著。实验 2 在此基础上发现, CNV 成分与 α 震荡抑制均在有意识条件下更为显著, 进一步支持意识状态通过调节认知准备和注意维持机制增强时间注意效应。此外, 尽管节律线索时间间隔(ISI)不影响时间注意效应的强度, 但超秒间隔条件下整体反应更快, 支持时间认知分段综合模型的预测。综上, 节律性时间注意不仅依赖外在节奏驱动, 也可能涉及基于意识水平调节的内源性决策机制。

关键词 节律线索, 时间注意, 意识状态, 分层漂移扩散模型, CNV

分类号 B842

1 引言

时间注意是指个体基于刺激出现的时间信息, 对即将出现的目标刺激进行优先加工的能力(Denison et al., 2017; Nobre, 2010)。该机制在日常生活中发挥着重要作用, 例如驾驶员通过估计红绿灯的时长提前做出刹车或加速准备(Correa & Nobre, 2008; Lange, 2009; Rohenkohl & Nobre, 2011)。现有研究表明, 时间注意通常通过某种时间线索诱发, 其机制可分为内源性和外源性两类(Coull & Nobre, 2008)。前者依赖于个体对时间信息的自上而下加工, 后者则基于刺激自身特征所驱动的自下而上加工机制。时间关联线索被普遍视为内源性注意线索(Breska & Deouell, 2014), 而节律线索由于其节奏本身可传递时间预期, 通常被归为外源性注意线索

的范畴。然而, 目前尚不清楚节律线索诱发的时间注意是纯粹由外源机制驱动, 还是隐含内源性成分并受到意识状态的调节。为此, 本研究旨在系统探讨节律性时间注意在不同意识状态下的行为表现和神经机制差异, 并进一步厘清其是否涉及内源性加工。

时间注意效应的研究多依赖时间线索范式。Kingstone (1992)率先采用该范式, 发现有效时间线索能显著提升反应速度。经典的时间关联线索, 如字母、色块或几何图形等, 通常与目标刺激的前期时间长度建立对应关系(Coull & Nobre, 1998; Miniussi et al., 1999)。与之不同的是, 节律线索通过以固定间隔重复呈现的方式, 直接传递时间信息, 其广泛存在于现实生活中, 如脚步声、钟表嘀嗒声等。大量研究表明, 相较于无规则节律, 当目标刺

收稿日期: 2025-02-18

* 山东省自然科学基金面上项目(ZR2023MC204)和国家自然科学基金青年项目(31800911)资助。

通信作者: 孙彦良, E-mail: yanliangsun@126.com

激出现在节律点上时,个体的反应更快、感知更敏锐(Correa & Nobre, 2008; Lange, 2009; Rohenkohl & Nobre, 2011),且该效应在视觉、听觉等多种感官通道中均有体现(Miller et al., 2013)。此外,已有研究证实,内源性时间注意(如时间关联线索)受意识状态调节,例如通过掩蔽技术将时间关联线索置于无意识状态下,其诱发的行为和神经响应均受影响(Rozier et al., 2020; Sun et al., 2024)。因此,节律性时间注意是否也受意识状态调节,成为一个有待验证的问题。本研究拟通过高频闪烁技术来操纵节律刺激的可觉察程度(有意识与无意识),来系统考察意识状态对节律线索诱发的时间注意效应的影响。

高频闪烁技术被广泛应用于视觉阈下知觉研究(Shady et al., 2004)。当视觉刺激闪烁频率超过闪光融合临界频率时(critical flicker fusion frequency, CFF; 约为 50 Hz),个体通常无法察觉其闪烁,但个体的认知加工过程仍可受其影响(Bauer et al., 2009; Jiang et al., 2007)。因此,50 Hz 高频闪烁有望被用作操纵节律刺激意识水平的有效手段。在此基础上,我们拟关注不同意识水平下节律线索是否仍可诱发时间注意效应及其神经指标,特别是伴随性负波(contingent negative variation, CNV),该成分反映个体对事件的预期与准备状态(Walter et al., 1964),在有意识时间关联线索、无意识时间关联线索和有意识节律线索诱发下均有观察到(Lange, 2009; Praamstra et al., 2006; Rozier et al., 2020; Sun et al., 2024)。

在考察意识状态对节律性时间注意的调节作用基础上,进一步的问题在于:节律线索诱发的行为促进是否涉及除知觉加工以外的认知过程,特别是更具内源性特征的决策过程。为此,本研究引入分层漂移扩散模型(hierarchical drift-diffusion model, HDDM),通过联合建模反应时与正确率,提取漂移率(drift rate)、决策边界(boundary separation)、起始偏倚(starting point)和非决策时间(non-decision time)等关键参数(Myers et al., 2022)。在 HDDM 中,个体在进行二择一的迫选任务时,会不断积累支持各选项的证据,直至达到决策边界作出选择。在节律线索范式中,被试需对出现在节律点上的目标刺激进行反应,行为表现受节律的时间信息引导,因此该范式也适用于揭示节律时间注意中是否包含非知觉的决策成分。

此外,节律性时间注意的加工机制是否受时间跨度(亚秒与超秒)影响仍存争议。一种观点主张“差

异机制”,认为亚秒加工主要依赖自动的低层加工系统,而超秒加工则涉及高阶认知控制(Lewis & Miall, 2003; Rammsayer & Ulrich, 2011)。在此基础上,黄希庭等人(2003)提出“时间认知分段综合模型”,认为时间认知在不同时间范围内呈现出离散的加工机制。例如,亚秒加工涉及运动相关脑区,而超秒加工则激活注意与记忆相关脑区(Gooch et al., 2011; Lewis & Miall, 2003)。但也有研究发现,无论时间尺度如何,前辅助运动区、前扣带回、前额叶、顶叶皮层及基底神经节等区域表现出一致激活(Pouthas et al., 2005),提示时间加工可能存在跨时域的共享机制。

综上所述,为检验意识状态及时间尺度对节律性时间注意的影响,我们设计了两个实验。实验 1 采用节律线索范式,操纵刺激间隔(inter-stimulus interval, ISI; 亚秒与超秒)和感知节律刺激的意识状态(有与无),考察其对行为反应的调节作用。实验 2 在实验 1 的基础上结合事件相关电位(event-related potential, ERP)和时频分析(time-frequency analysis, TFA)技术,进一步分析不同条件下 CNV 成分和 α 振荡抑制的变化,以揭示不同意识状态和时间尺度影响节律性时间注意的神经基础。此外,在两个实验中,我们均采用 HDDM 对反应时和正确率进行了联合建模,提取潜在的知觉决策参数,以探讨意识状态和时间尺度如何影响节律信息在知觉决策过程中的作用,从而揭示节律时间注意效应是否隐含内源性成分。

2 实验 1: 跨秒时间尺度下意识状态对节律性时间注意的影响

实验 1 将时间线索范式与高频闪烁技术相结合,通过操控节律线索的闪烁频率来控制刺激被感知的意识状态,并设置亚秒和超秒两种 ISI,采用分层漂移-扩散模型对比考察有无意识状态下的节律性时间注意。实验 1 分为三个部分(1a、1b 和 1c),其中 1a 部分为有意识状态条件;1b 部分为无意识状态条件;1c 部分为控制实验,以检验高频闪烁技术的掩蔽效果。

2.1 方法

2.1.1 被试

参考前人的研究(Breska & Deouell, 2016; Breska & Ivry, 2020),以中等程度的效应量($f = 0.25$),使用软件 G*power3.1 (Faul et al., 2009)计算被试量,设置 $\alpha = 0.05$,统计检验力 $1 - \beta = 0.80$,得出被试

量为 24。26 名视力正常或矫正视力正常的在校大学生参加了本实验, 所有人均参加了实验 1 的三个部分, 实验顺序采用拉丁方平衡。因反应正确率太低, 删除 2 名被试, 最终 24 名(10 名男生, 18~26 岁) 被试的数据纳入分析。被试均报告没有神经或精神疾病史且没有接受过专业的音乐训练, 在实验前的 3 年内也没有使用过乐器。所有被试签署知情同意书, 并在实验结束后根据表现获得金钱报酬。

2.1.2 设备和刺激

使用 Psychopy3(Peirce, 2007)编写实验程序来呈现视觉刺激, 将其呈现在亮度经过 gamma 线性矫正后的 CRT 显示器(21 英寸索尼 G520)上。其中, 在实验 1a 中, 显示器的刷新频率为 120 Hz, 分辨率为 800×600; 在实验 1b、1c 中, 为构建高频闪烁条件, CRT 显示器的刷新频率为 100 Hz, 分辨率为 1024×768。该实验的所有视觉刺激均在视野中央区域呈现, 屏幕背景为统一的灰色(平均亮度 17.5 cd/m²)。被试头部与屏幕保持 70 cm, 在一间安静无光照的实验室内完成所有测验。

实验刺激为空间频率为 6.6 cpd (cycles per degree)的光栅, 所有光栅均位于视野中央。光栅的闪烁通过快速改变对比度来实现, 当光栅闪烁时, 光栅被称为线索光栅, 对比度会在 0 和 0.3 之间快

速切换; 当光栅不闪烁时, 光栅被称为间隔光栅, 对比度恒为 0.15。实验中, 光栅的闪烁频率有 30 Hz 和 50 Hz 两种水平。当光栅以 50 Hz 的频率闪烁时, 人眼会将快速变化的对比度融合为一个相对稳定的视觉效果, 从而难以察觉到闪烁。目标刺激为顺时针旋转 45°或逆时针旋转 45°的光栅, 对比度为 0.15。

2.1.3 实验程序

实验程序如图 1 所示, 在正式实验 1a 中, 首先呈现 100 ms 的线索光栅(闪烁频率为 30 Hz), 随后出现间隔光栅。在节律条件下, 间隔光栅的持续时间有两种水平(亚秒: 800 ms; 超秒: 1300 ms), 持续时间在当前试次下保持固定; 在随机条件下, 间隔光栅持续时间在围绕亚秒或超秒上下 120 ms 的时间范围内随机取值(亚秒: 680~920 ms, 步长 60 ms; 超秒: 1180~1420 ms, 步长 60 ms), 但试次的总时长与节律条件一致。在每个试次中, 线索光栅与间隔光栅交替出现 4 次, 由此便形成“闪烁-不闪烁-闪烁-不闪烁-闪烁-不闪烁”的刺激流, 最后在视野中央随机呈现不同朝向的目标刺激 3 s, 要求被试又快又准地按键反应。若目标刺激为逆时针旋转 45°的光栅, 则按“←”键; 若目标刺激为顺时针旋转 45°的光栅, 则按“→”键。实验过程

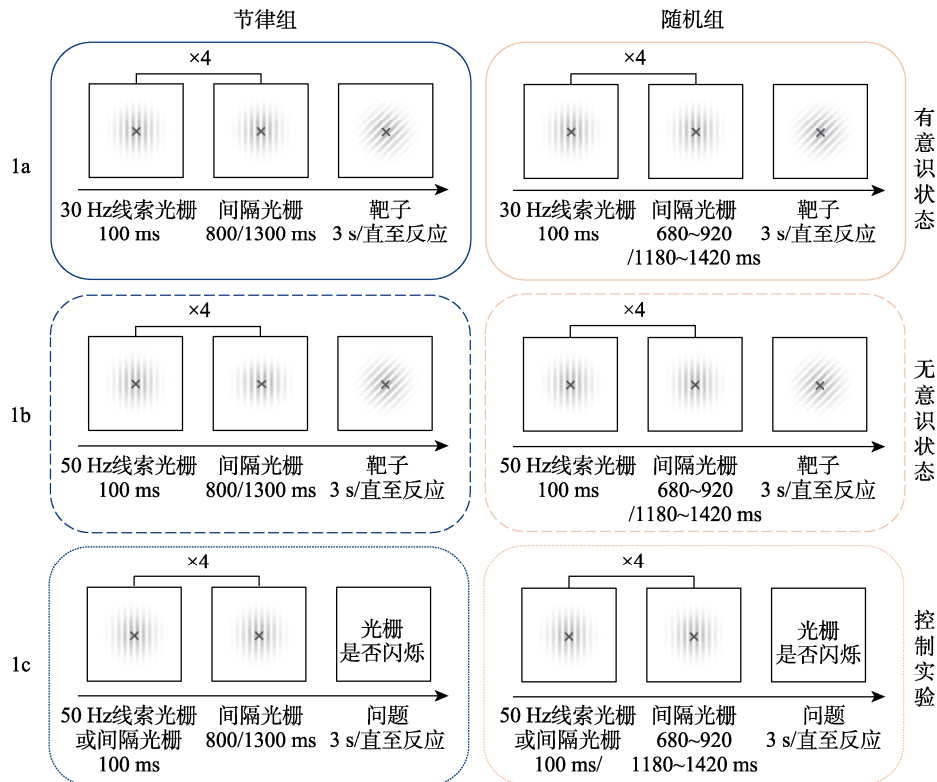


图 1 实验 1 流程图

注: 该流程图为示意图, 正式实验中屏幕背景为灰色, 光栅、注视点等刺激的参数以文字描述为准。

中,“x”注视点始终置于光栅之上。需要注意的是,部分试次作为捕捉试次(catch trials)不会出现目标刺激,以迫使被试始终将注意维持在预测时间窗,而无法依靠“目标必现”策略,从而纯净地探测节律性时间注意的真实效应,该试次占总试次的25%。试次间间隔从800 ms到1200 ms不等,随机变化。节律条件与随机条件分block进行拉丁方平衡,ISI在block内随机化,共有6个block,每个block中有64个试次,整个实验共384个试次。

实验1b的线索光栅以50 Hz的频率闪烁,使被试以无意识状态感知节律刺激,其余设置与实验1a一致。实验1c与实验1b相似,但有以下不同:1)实验1c的每个block中只有32个试次,整个实验共有256个试次,随机选取其中50%试次不呈现线索光栅,而是用间隔光栅代替。2)所有试次均不呈现靶子,改为呈现“光栅是否闪烁”的问题,被试需要按键做出反应,记录反应正确率。若感觉到闪烁,则按“↑”键;若感觉不到闪烁,则按“↓”键。正式实验中并没有对30 Hz的线索光栅的可见性进行检验,原因是在我们的预实验中发现,所有被试(10名)二选一迫选任务的正确率都在90%以上(94.92~97.66%),且口头报告都能明显察觉闪烁。该结果验证了大多研究的观点,即人类可以感知闪烁频率为30 Hz的闪烁(Mankowska et al., 2021; Shady et al., 2004)。

正式实验开始前,被试有30个练习试次。正式实验中每完成128个试次休息3分钟。

2.1.4 数据分析

首先,使用Jamovi 2.3.28软件对实验1a和实验1b收集到的反应时和正确率进行2(意识状态:有、无)×2(线索呈现方式:节律、随机)×2(ISI:800 ms、1300 ms)重复测量方差分析。其次,由于本研究的主要目的是对比考察有无意识状态下节律线索诱发的时间注意效应,因此我们又将时间注意效应($RT_{\text{随机}} - RT_{\text{节律}}$)作为因变量指标,进行了2(意识状态:有、无)×2(ISI:800 ms、1300 ms)重复测量方差分析。

最后,采用HDDM 0.6.1工具箱(Wiecki et al., 2013)对被试的反应时以及正确率进行分层漂移-扩散建模,该模型主要用于对知觉决策反应进行分析以估计知觉决策过程的关键参数,包括 z 、 v 、 a 和 t ,以及评估这些参数在条件之间的差异显著性。其中, z 为起始偏倚,表示决策过程的起始位置,影响对某一反应的偏见; v 为漂移率,表示证据积累的

速度,较高的漂移率意味着证据积累得更快; a 为决策边界,是一个固定阈值,当证据达到或超过这个阈值时才会做出决策; t 为非决策时间,它表示不参与证据积累过程的感觉编码和反应执行的时间。

我们假设条件之间的 z 没有差异,因此使 z 在任何模型下都不随条件变化(Sun et al., 2024; Tian et al., 2025)。对于 a 、 v 和 t ,我们对对应构造了三个模型(Model_a, Model_v, Model_t),使它们能够独自随条件变化(Laquitaine et al., 2024)。例如在Model_a中, a 可以随条件发生变化,同时 v 、 t 和 z 不依赖于条件。之后采用偏差信息准则(Deviance Information Criterion, DIC)对模型进行比较,我们将使用拟合最优的模型进行后续的参数分析。剔除反应时小于100 ms和大于3 s的试次,之后再剔除反应时超出3个标准差之外的试次,剩下的试次将用来拟合各模型。在每个模型中,通过生成20000个马尔可夫链蒙特卡洛(MCMC)样本对模型参数进行估计,其中前4000个样本作为烧入期被丢弃。模型收敛性通过检查每个参数的后验分布图来验证。在参数的假设检验中,模型通过计算一个条件下的后验样本均值小于另一个条件下的后验样本均值的百分比,从而得到了一个类似但不等同于频率统计方法估计的 p 值。

2.2 结果

2.2.1 正确率

对实验1a和实验1b收集到的正确率进行2(意识状态:有、无)×2(线索呈现方式:节律、随机)×2(ISI:800 ms、1300 ms)三因素重复测量方差分析,结果表明所有效应均不显著($ps \geq 0.13$)。

2.2.2 反应时

对反应时进行2(意识状态:有、无)×2(线索呈现方式:节律、随机)×2(ISI:1300 ms、800 ms)三因素重复测量方差分析,结果如图2所示:意识状态主效应不显著, $F(1, 23) = 0.33, p = 0.57, BF_{10} = 0.30$;线索呈现方式主效应显著, $F(1, 23) = 27.90, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.55, BF_{10} = 1.03 \times 10^5$,节律条件下的反应时(597.23 ± 119.91)显著短于随机条件下的反应时(628.62 ± 120.68);ISI主效应显著, $F(1, 23) = 24.17, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.51, BF_{10} = 537.16$,800 ms时间间隔的反应时(626.23 ± 126.68)显著长于1300 ms时间间隔的反应时(599.62 ± 110.98)。意识状态与呈现方式的交互作用显著, $F(1, 23) = 8.23, p = 0.009, \eta_p^2 = 0.26, BF_{10} = 1.01$;意识状态和ISI的交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.21, p = 0.66, BF_{10} = 0.22$;呈现

方式和 ISI 的交互作用不显著, $F(1, 23) = 2.20, p = 0.15, BF_{10} = 0.27$; 意识状态、呈现方式和 ISI 的三因素交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.18, p = 0.67, BF_{10} = 0.27$ 。

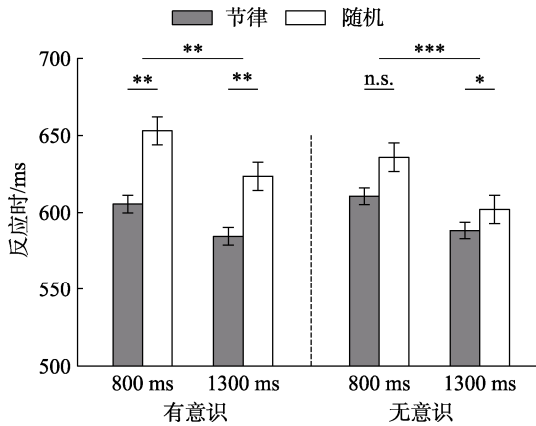


图 2 实验 1a 和 1b 的反应时结果

注: *表示 $p < 0.05$, **表示 $p < 0.01$, ***表示 $p < 0.001$, n.s.表示无显著差异。误差线代表被试内 95%的置信区间。

对意识状态与呈现方式的交互作用进行简单效应分析, 结果表明: 有意识状态下, 节律条件的反应时(595.00 ± 124.43)显著短于随机条件(638.25 ± 128.22), $t(23) = -4.75, p < 0.001, Cohen's d = 0.97, BF_{10} = 309$; 无意识状态下, 节律条件的反应时(599.46 ± 126.93)也显著短于随机条件(618.98 ± 129.62), $t(23) = -4.16, p < 0.001, Cohen's d = 0.85, BF_{10} = 83.0$, 但反应时的差值小于有意识状态。

2.2.3 时间注意效应

以时间注意效应($RT_{随机} - RT_{节律}$)为因变量, 进行 2 (意识状态: 有、无) \times 2 (ISI: 800 ms、1300 ms) 的两因素重复测量方差分析, 结果表明: 意识状态主效应显著, $F(1, 23) = 8.23, p = 0.009, \eta_p^2 = 0.26, BF_{10} = 44.94$, 有意识状态下的时间注意效应(43.25 ± 43.65)显著大于无意识下的时间注意效应(19.52 ± 22.50); ISI 主效应不显著, $F(1, 23) = 2.20, p = 0.15, BF_{10} = 0.54$; 意识状态和 ISI 的交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.18, p = 0.67, BF_{10} = 0.42$ 。由于 ISI 主效应不显著, 因此合并 ISI 这一变量, 对有、无意识状态下的时间注意效应进行了配对样本 t 检验, 结果如图 3 所示, 有意识状态下的时间注意效应(43.25 ± 43.65)显著大于无意识状态下的时间注意效应(19.52 ± 22.50), $t(23) = 2.87, p = 0.009, Cohen's d = 0.59, BF_{10} = 5.46$ 。

2.2.4 高频闪烁掩蔽效果

在实验 1c 高频闪烁掩蔽效果的客观测验中,

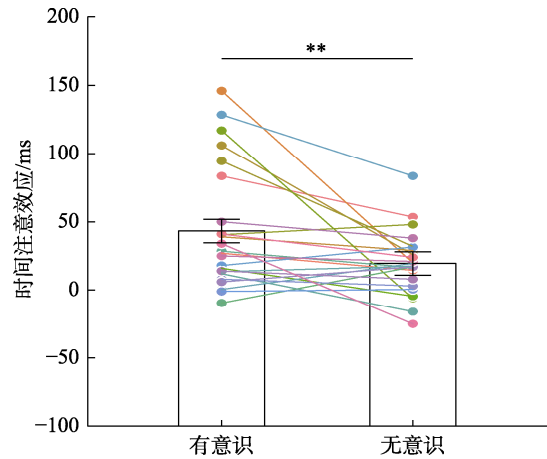


图 3 实验 1 时间注意效应结果

注: **表示 $p < 0.01$ 。误差线代表被试内 95%的置信区间。彩图见电子版, 下同

二项分布测验结果表明, 所有被试二择一的迫选任务正确率均与随机水平无显著差异($ps > 0.15$ [范围: 0.15~0.85]), 即高频闪烁技术可以有效使节律线索处于不可见状态。所有被试的正确率与随机水平也没有显著差异, $t(23) = 0.831, p = 0.42$ 。这些统计结果表明高频闪烁技术可以有效使节律线索处于不可见状态, 意味着被试对 50 Hz 的线索光栅感知是无意识的。

2.2.5 HDDM 结果

针对反应时中意识状态与线索呈现方式存在交互作用的结果, 以及节律组和随机组作差后得到的时间注意效应存在意识状态的主效应, 我们使参数 a 、 v 和 t 单独随意识状态和线索呈现方式变化, 从而构造出三个模型, 其 DIC 差值如表 1 所示。结果显示, Model_a 为最优模型, 其模型拟合结果如图 4 所示。在有意识状态下, 节律线索条件的决策边界显著小于随机线索条件($p = 0.026$); 而在无意识状态下, 节律线索条件的决策边界与随机线索条件无显著差异($p = 0.181$)。

表 1 实验 1 中随意意识状态和线索呈现方式变化的模型参数和 ΔDIC

模型	随条件变化的参数	ΔDIC
Model_a	a	0
Model_v	v	138.6
Model_t	t	325.8

随后, 对于反应时中 ISI 的主效应, 我们同样构造出三个模型使 a 、 v 和 t 能够单独随 ISI 变化, 其 DIC 差值如表 2 所示。结果显示, Model_v 为最优

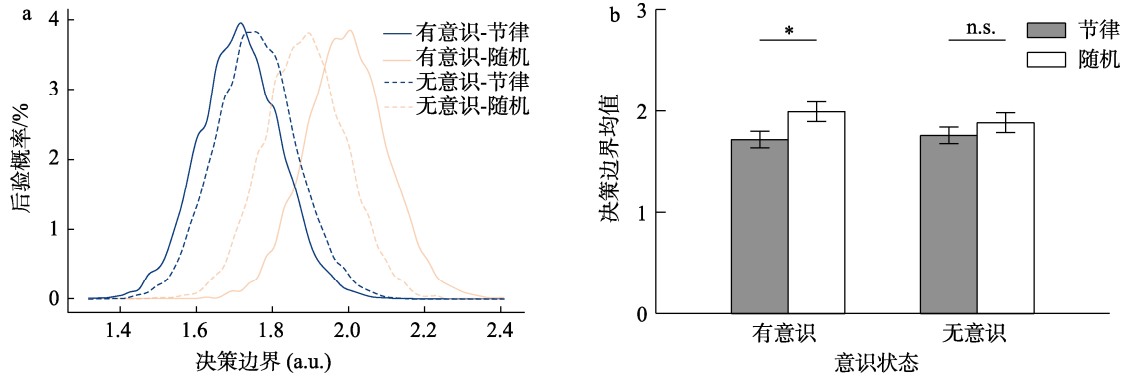


图 4 实验 1 对意识状态和线索呈现方式的 hddm 拟合结果
注: 左图为参数的后验分布图, 右图为群体水平参数均值柱状图。*表示 $p < 0.05$, n.s.表示无显著差异。

表 2 实验 1 中随 ISI 变化的模型参数和 ΔDIC

模型	随条件变化的参数	ΔDIC
Model_a	a	7.7
Model_v	v	0
Model_t	t	34.4

模型, 但并未发现漂移率在 800 ms 和 1300 ms 时间间隔条件间有显著差异($p = 0.111$), 如图 5 所示。

2.3 讨论

本实验旨在探讨有意识与无意识状态下, 节律线索以亚秒与超秒间隔呈现时所诱发的时间注意效应是否存在差异。结果表明, 无论在有意识还是无意识状态下, 节律线索均能够诱发时间注意效应, 但在无意识条件下, 该效应的幅度显著减弱。这一结果与采用有意识和无意识时间关联线索的研究发现相一致(Sun et al., 2024), 同时也支持了尽管被试难以察觉节律线索, 其仍可加速目标的检测与辨别(Bauer et al., 2009)。换言之, 即便在意识层面无法清晰感知节律, 个体对目标的感知加工仍能受到线索引导。

为进一步揭示意识状态如何调节节律线索的

加工过程, 我们使用 HDDM 对行为数据进行了拟合分析, 以探查感知-决策链条中哪些环节受意识水平影响。结果显示, 在有意识状态下, 节律线索条件的决策边界显著小于随机线索条件, 表明被试在感知到明确节律时, 做出决策所需的证据量减少, 决策速度加快。较低的决策边界通常意味着个体更愿意快速作答, 反映出对即将发生的事件具有更强的信心和更高的预测性。而在无意识条件下, 该差异并不显著, 提示不可察觉的节律线索虽可引发一定程度的时间预期, 但对个体决策策略的调节作用有限。因此, 该结果表明, 有意识状态下更清晰的节律信息能够提升个体对事件时机的把握与信心, 进而通过降低决策阈值来加快反应。

值得注意的是, 在行为数据中, 即便在无意识条件下, 节律线索仍显著缩短了被试的反应时, 表现出时间注意效应。然而, HDDM 分析未能在决策参数上发现与此对应的显著差异。换言之, 无意识状态下的时间注意效应可能并非源于决策层面的调节, 而更可能反映了早期低层次的感知加工, 例如神经振荡的相位重置或刺激的节律性夹带(entrainment)。这与节律加工可在无意识层面启动

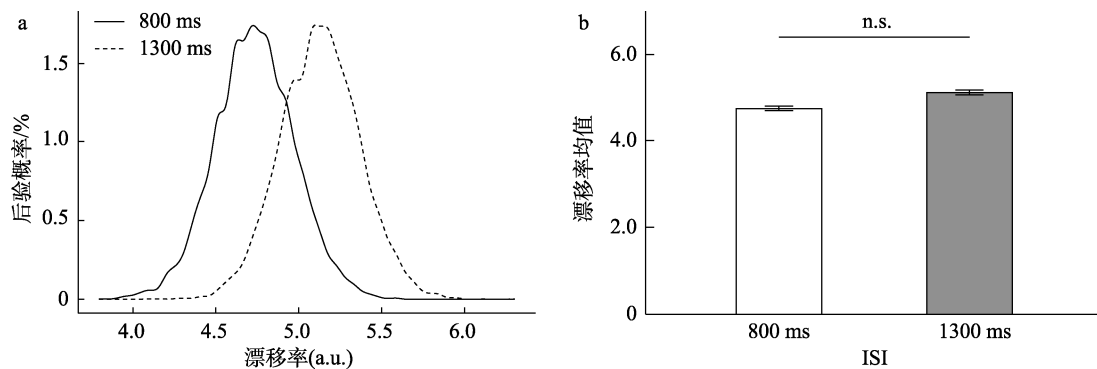


图 5 实验 1 对 ISI 的 hddm 拟合结果
注: 左图为参数的后验分布图, 右图为群体水平参数均值柱状图。n.s.表示无显著差异。

的观点相吻合(Jones & Boltz, 1989)。

此外,我们还发现超秒节律间隔条件下被试的反应时显著短于亚秒条件。这一结果与“时间认知分段综合模型”相一致,该模型认为亚秒与超秒时间加工依赖不同的认知机制(黄希庭等, 2003)。已有研究指出,超秒时间加工更依赖前额叶皮层等高阶区域的参与,涉及更多的注意、工作记忆及认知控制资源(Gooch et al., 2011; Koch et al., 2009; Xu et al., 2021),这些机制可能协同作用于目标的时间定位,从而提升反应效率。然而,HDDM分析未显示亚秒与超秒条件在漂移率(drift rate)上的显著差异,表明两种时间跨度下个体在证据积累速度上的差异有限。这可能意味着,反应时的差异并非源于知觉决策时信息处理效率的提升,而可能与注意准备或其它非决策因素有关。

综上所述,本研究结果表明,节律线索诱发的时间注意并非单一的外源性过程,而是包含知觉加工与决策加工的双重成分,尤其在有意识条件下表现更为显著。意识状态通过调节个体的决策边界,间接影响了行为响应的效率,突出表现在 HDDM 模型中的参数 a 上。

3 实验 2: 跨秒时间尺度下意识状态对节律性时间注意的影响: 来自脑电指标的证据

在实验 1 中,我们发现无意识状态的时间注意效应小于有意识状态。在实验 2 中,除了测量行为数据并进行 HDDM 分析之外,我们还测量了事件相关电位的 CNV 成分和 α 频段的振荡,以进一步探讨不同意识状态下节律线索诱发的时间注意效应的神经机制。前人研究表明,时间关联线索被掩蔽后依然能够诱发 CNV 成分(Sun et al., 2024),因此我们假设节律线索在无意识状态下同样能够诱发 CNV 成分,并且相较于有意识状态,CNV 成分上的时间注意效应(节律与随机的差值绝对值)也较小。

3.1 方法

3.1.1 被试

新招募的 26 名在校学生参加了实验 2 的三个部分(2a、2b 和 2c),实验顺序采用拉丁方平衡。因疲劳退出 2 人,最终剩余 24 人(男生 10 名,19~25 岁)。所有被试报告没有神经或精神疾病史,无头颅外伤史,近期末使用精神活性药物,而且视力正常或矫正至正常。此外,被试均表示没有接受过专业

的音乐训练,在实验前的 3 年内也没有使用过乐器。所有被试签署知情同意书,并在实验结束后根据表现获得金钱报酬。

3.1.2 设备和刺激

实验材料与仪器与实验 1 相似,不同之处在于:实验 2a 和 2b 在行为实验的基础上,使用德国 Brain Products 公司的 64 导脑电记录系统(Brain Products GmbH, Munich, Germany)进行脑电数据采集,该系统的电极帽基于 10-20 系统。在实验中记录眼电信号,位于右眼眼眶下 1.5 cm 处的电极点记录垂直眼电(VEOG),位于左眼外侧 1.5 cm 处的电极点记录水平眼电(HEOG),同时还记录双侧乳突 M1、M2 数据。滤波带通为 0.05~100 Hz,采样频率为 500 Hz。所有电极以 FCz 点为在线参考,以 AFz 点接地,电极与头皮间的电阻小于 10 k Ω 。

3.1.3 实验程序

实验 2 流程与实验 1 相似,不同之处在于:在实验 2a 和 2b 中,被试需要在做任务的同时佩戴电极帽以获取脑电数据。

3.1.4 数据分析

除了进行与实验 1 相同的行为数据分析之外,使用 MNE-Python 软件包(Gramfort et al., 2013)对 EEG 数据进行离线处理,并进一步做 ERP 和时频分析。双侧乳突的平均值作为重参考,采用 0.1~20 Hz 零相位 Butterworth 滤波器滤波(48 dB/oct slope),剔除所有电极中波幅在 $\pm 100 \mu\text{V}$ 以外的试次,剔除垂直眼电超 $100 \mu\text{V}$ 和水平眼电超过 $32 \mu\text{V}$ 的试次(如果数据中有超过 10%的试次因眼动或者运动伪迹而剔除,那么删除该被试)。

对于 ERP 分析,将保留的试次按实验条件叠加平均,从 Fz, FC1, FCz, FC2, Cz 五个电极点取值,以第 4 个线索光栅为零点,取其出现前 200 ms 为基线,以目标出现为终点分段。考虑到 ISI 的不同,当 ISI 为 800 ms 时,分析 600~800 ms 时间窗的平均波幅;当 ISI 为 1300 ms 时,分析 1100 ms ~ 1300 ms 时间窗的平均波幅(Breska & Ivry, 2020)。对 CNV 进行 2 (意识状态: 有、无) \times 2 (线索呈现方式: 节律、随机) \times 2 (ISI: 800 ms、1300 ms) 三因素重复测量方差分析。随后,为了进一步比较意识状态对时间注意效应的影响,基于“节律-随机”的公式计算了 CNV 成分上的时间注意效应,对其进行 2 (意识状态: 有、无) \times 2 (ISI: 800 ms、1300 ms) 两因素重复测量方差分析。

在时频分析中,我们采用 Morlet 小波变换对信

号进行时间-频率分解, 频率范围设置为 0.1~30 Hz, 共取 100 个对数间隔的频率点。针对不同频段的小波循环数进行了差异化设置: 对于频率 ≥ 2 Hz 的部分, 将小波循环数设定为该频率一半的向上取整值, 且不超过 7; 对于频率 < 2 Hz 的部分, 统一设置为 1, 以保证低频段的时间分辨率。时间窗口的划分以第 1 个线索光栅刺激呈现为零点(0 ms), 并以第 4 个线索光栅结束后延迟 100 ms 为终点, 界定该段为节律编码阶段。设定基线区间为 0 点前 500 ms, 为减少边缘伪影对分析结果的影响, 在分段时于每段前后各扩展 500 ms, 后续分析中予以裁剪剔除。在功率提取阶段, 选取感兴趣电极(详见图 13)进行平均处理, 针对 α 频段(8~12 Hz)应用 Hilbert 变换方法提取瞬时功率。具体而言, 首先对带通滤波后的信号进行 Hilbert 变换, 获得复数解析信号, 取其模长并平方以计算瞬时功率, 再基于各自的基线区间进行校正, 并转化为分贝(dB)。为探讨在节律编码阶段, 有意识状态是否相比于无意识状态引发更显著的 α 震荡抑制, 我们提取感兴趣时间窗(1500~2500 ms)内的平均 α 功率, 并采用单尾配对样本 t 检验进行统计检验。

3.2 结果

3.2.1 行为结果

(1) 正确率

对实验 2a 和实验 2b 收集到的正确率进行 2 (意识状态: 有、无) \times 2 (线索呈现方式: 节律、随机) \times 2 (ISI: 800 ms、1300 ms) 三因素重复测量方差分析, 结果表明: ISI 主效应显著, $F(1, 23) = 6.51, p = 0.02, \eta_p^2 = 0.22$, 1300 ms 时间间隔的正确率(0.98 ± 0.01)显著大于 800 ms 时间间隔的正确率(0.97 ± 0.01); 其他效应均不显著($ps \geq 0.07$)。结合反应时结果, 我们发现 1300 ms 时间间隔的反应时显著短于 800 ms 时间间隔的反应时, 即被试在 1300 ms 时间间隔条件下并没有牺牲反应时而保证正确率, 因此不存在速度与准确性平衡的情况。

(2) 反应时

对反应时进行重复测量方差分析结果如图 6 所示: 与实验 1 相同的是, 意识状态主效应不显著, $F(1, 23) = 2.20, p = 0.15, BF_{10} = 13.61$; 呈现方式主效应显著, $F(1, 23) = 27.20, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.54, BF_{10} = 8.57 \times 10^4$, 节律条件下的反应时(656.48 ± 108.22)显著短于随机条件下的反应时(683.39 ± 108.82); ISI 主效应显著, $F(1, 23) = 32.13, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.58, BF_{10} = 1.93 \times 10^7$, 800 ms 时间间隔的反应

时(687.36 ± 117.94)显著长于 1300 ms 时间间隔的反应时(652.50 ± 98.85)。意识状态与呈现方式的交互作用显著, $F(1, 23) = 7.38, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.24, BF_{10} = 1.25$; 呈现方式和 ISI 的交互作用不显著, $F(1, 23) = 2.20, p = 0.15, BF_{10} = 0.64$; 意识状态、呈现方式和 ISI 的三因素交互作用不显著, $F(1, 23) = 1.04, p = 0.32, BF_{10} = 0.25$ 。与实验 1 不同的是, 意识状态和 ISI 的交互作用显著, $F(1, 23) = 8.96, p = 0.006, \eta_p^2 = 0.28, BF_{10} = 7.68$ 。

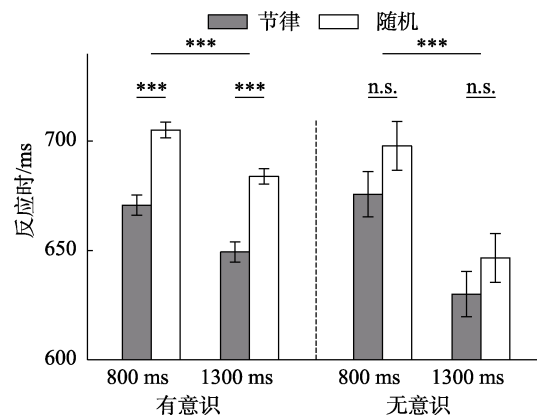


图 6 实验 2a 和 2b 的反应时结果

注: ***表示 $p < 0.001$, n.s. 表示无显著差异。误差线代表被试内 95% 的置信区间。

对意识状态与呈现方式的交互作用进行简单效应分析, 结果表明: 有意识状态下, 节律条件的反应时(660.04 ± 109.09)显著小于随机条件(694.54 ± 113.53), $t(23) = -6.44, p < 0.001, Cohen's d = 1.32, BF_{10} = 1.30 \times 10^5$; 无意识状态下, 节律条件的反应时(652.92 ± 112.06)也显著小于随机条件(672.23 ± 110.46), $t(23) = -3.05, p = 0.006, Cohen's d = 0.62, BF_{10} = 7.75$, 但反应时的差值小于有意识状态。

对意识状态与 ISI 的交互作用进行简单效应分析, 结果表明: 有意识状态下, 1300 ms 时间间隔的反应时(666.65 ± 108.26)显著短于 800 ms 时间间隔的反应时(687.94 ± 113.49), $t(23) = -6.09, p < 0.001, Cohen's d = 1.24, BF_{10} = 6019$; 无意识状态下, 1300 ms 时间间隔的反应时(638.35 ± 97.35)也显著短于 800 ms 时间间隔的反应时(686.79 ± 126.57), $t(23) = -4.47, p < 0.001, Cohen's d = 0.97, BF_{10} = 299$, 但反应时差值大于有意识状态。

(3) 时间注意效应

对时间注意效应进行重复测量方差分析结果表明: 意识状态主效应显著, $F(1, 23) = 7.38, p = 0.012, \eta_p^2 = 0.24, BF_{10} = 78.02$, 有意识状态下的时间注意效

应(34.50 ± 25.68)显著大于无意识状态下的时间注意效应(19.31 ± 30.41); ISI 主效应不显著, $F(1, 23) = 1.04, p = 0.32, BF_{10} = 0.23$; 意识状态和 ISI 的交互作用不显著, $F(1, 23) = 1.04, p = 0.32, BF_{10} = 0.28$ 。由于 ISI 主效应不显著, 因此合并 ISI 这一变量, 对有、无意识状态下的时间注意效应进行配对样本 t 检验, 结果如图 7 所示, 有意识状态下的时间注意效应(34.50 ± 25.68)显著大于无意识状态下的时间注意效应(19.31 ± 30.41), $t(23) = 2.72, p = 0.012$, Cohen's $d = 0.55, BF_{10} = 4.06$ 。

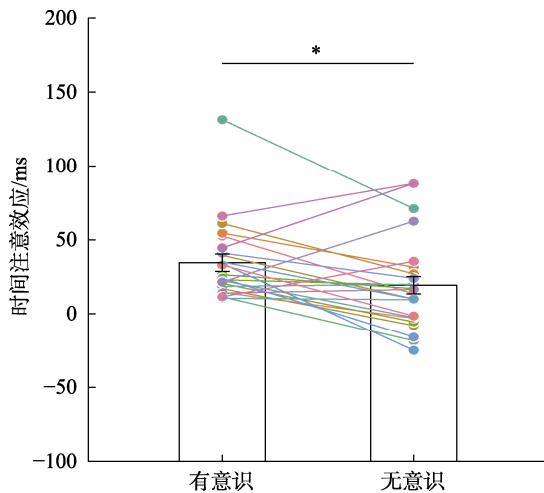


图 7 实验 2 时间注意效应结果

注: *表示 $p < 0.05$ 。误差线代表被试内 95% 的置信区间。

(4) 高频闪烁掩蔽效果

在实验 2c 高频闪烁掩蔽效果的客观测验中, 二项分布测验结果表明, 所有被试二择一的迫选任务正确率均与随机水平无显著差异($ps > 0.19$ [范围: 0.19~1.00])。所有被试的整体正确率与随机水平也没有显著差异($t(23) = 0.730, p = 0.473$), 即 50 Hz 高频闪烁条件可以有效使节律线索处于不可见状态。

3.2.2 HDDM 结果

与实验 1 相同, 我们构造出三个模型使参数 a 、 v 和 t 单独随意识状态和线索呈现方式变化, 其 DIC 差值如表 3 所示。结果显示, Model_v 为最优模型, 其模型拟合结果如图 8a、8b 所示, 无论是在有意识状态($p = 0.092$)还是无意识状态($p = 0.216$)下, 节律线索条件漂移率与随机线索条件均无显著差异。考虑到 Model_a 与 Model_v 的 DIC 差值仅为 0.4, 我们认为 Model_a 的拟合效果也较佳, 其模型拟合结果如图 8c、8d 所示。在有意识状态下, 节律线索条件的决策边界显著小于随机线索条件($p = 0.018$); 而在无意识状态下, 节律线索条件的决策边界与随

机线索条件无显著差异($p = 0.137$), 该结果与实验 1 吻合。

表 3 实验 2 中随意识状态和线索呈现方式变化的模型参数和 ΔDIC

模型	随条件变化的参数	ΔDIC
Model_a	a	0.4
Model_v	v	0
Model_t	t	80.9

与实验 1 结果一致, 参数随 ISI 变化的模型中, Model_v 为最优模型, 如表 4 所示。且未发现漂移率在 800 ms 和 1300 ms 时间间隔条件间有显著差异($p = 0.085$), 如图 9 所示。

由于在实验 2 的反应时结果中发现意识状态与 ISI 存在交互作用, 因此构造三个模型使参数 a 、 v 和 t 能够单独随意识状态与 ISI 变化, 三个模型的 DIC 差值如表 5 所示。Model_v 为最优模型, 其模型拟合结果如图 10 所示。在有意识状态下, 800 ms 时间间隔条件的漂移率与 1300 ms 时间间隔条件无显著差异($p = 0.187$); 而在无意识状态下, 800 ms 时间间隔条件的漂移率显著小于 1300 ms 时间间隔条件($p = 0.037$)。

3.2.3 ERP 分析结果

对时间窗内的 CNV 平均波幅的重复测量方差分析结果显示意识状态的主效应不显著, $F(1, 23) = 1.98, p = 0.17$; ISI 主效应不显著, $F(1, 23) = 1.52, p = 0.23$; 呈现方式的主效应显著, $F(1, 23) = 56.59, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.71$, 节律条件(-0.66 ± 1.57)比随机条件下的波幅(0.27 ± 1.50)显著更负; 意识状态和呈现方式的交互作用显著, $F(1, 23) = 6.20, p = 0.02, \eta_p^2 = 0.21$; 意识状态和 ISI 的交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.32, p = 0.58$; 线索呈现方式和 ISI 的交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.03, p = 0.86$; 意识状态、呈现方式和 ISI 的三重交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.05, p = 0.82$ 。

对意识状态和呈现方式的交互作用进行简单效应分析, 结果表明: 有意识状态下, 节律条件的波幅(-0.60 ± 2.07)比随机条件的波幅(0.71 ± 2.15)显著更负, $t(23) = -7.67, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.57$; 无意识状态下, 节律条件的波幅(-0.71 ± 1.52)也比随机条件的波幅(-0.17 ± 1.30)显著更负, $t(23) = -2.48, p = 0.02, \text{Cohen's } d = 0.51$, 但波幅差值绝对值小于有意识状态。

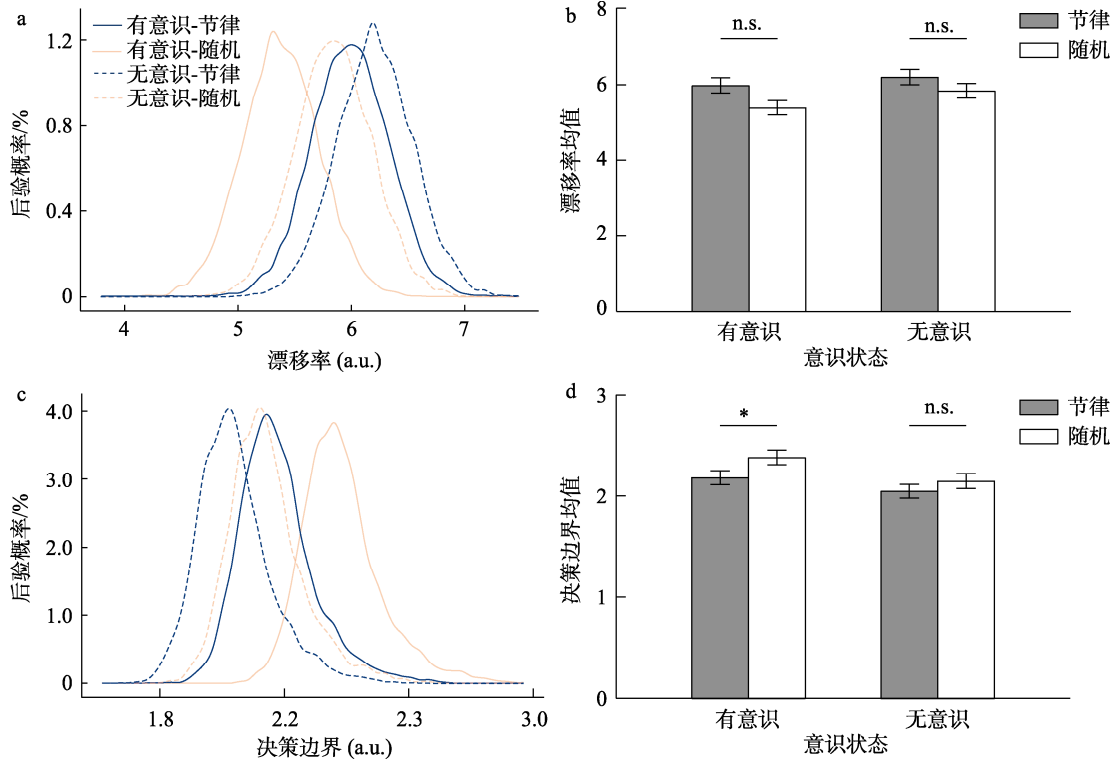


图 8 实验 2 对意识状态和线索呈现方式的 HDDM 拟合结果
注: 左图为参数的后验分布图, 右图为群体水平参数均值柱状图。*表示 $p < 0.05$, n.s.表示无显著差异。

表 4 实验 2 中随 ISI 变化的模型参数和 ΔDIC

模型	随条件变化的参数	ΔDIC
Model_a	a	40.5
Model_v	v	74
Model_t	t	0

表 5 实验 2 中随意识状态和 ISI 变化的模型参数和 ΔDIC

模型	随条件变化的参数	ΔDIC
Model_a	a	62.2
Model_v	v	0
Model_t	t	135.3

基于“节律-随机”的公式计算 CNV 成分上的时间注意效应, 其差值波形如图 11 所示, 对其进行 2 (意识状态: 意识上、意识下) \times 2 (ISI: 800 ms、1300 ms) 重复测量方差分析(如图 12), 结果表明, 意识状态的主效应显著, $F(1, 23) = 6.20, p = 0.02, \eta_p^2 = 0.21$, 有意识状态下的波幅差值(-1.31 ± 0.82)显著负于无意识状态下的波幅差值(-0.54 ± 1.05); ISI 主效应不显著, $F(1, 23) = 0.03, p = 0.86$; 意识状态和 ISI 的交互作用不显著, $F(1, 23) = 0.05, p = 0.82$ 。

3.2.4 时频分析结果

为了比较有无意识状态下节律编码阶段的大

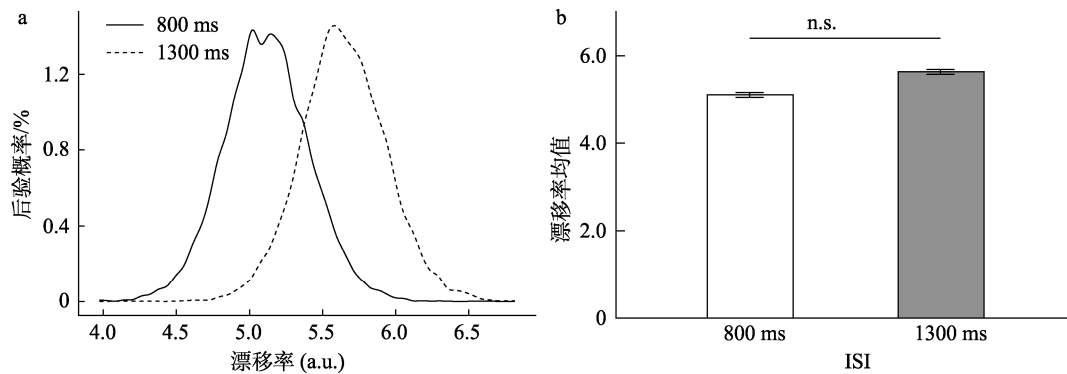


图 9 实验 2 对 ISI 的 HDDM 拟合结果
注: 左图为参数的后验分布图, 右图为群体水平参数均值柱状图。n.s.表示无显著差异。

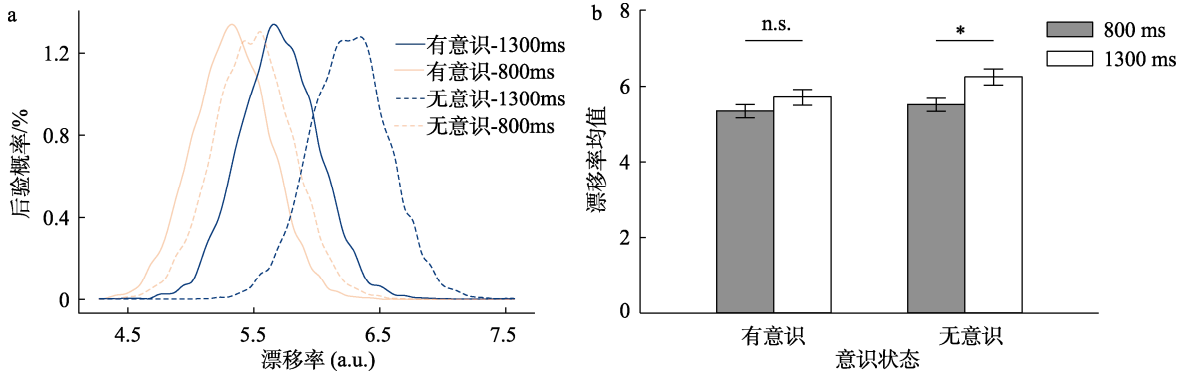


图 10 实验 2 对意识状态和 ISI 的 HDDM 拟合结果

注: 左图为参数的后验分布图, 右图为群体水平参数均值柱状图。*表示 $p < 0.05$, n.s.表示无显著差异。

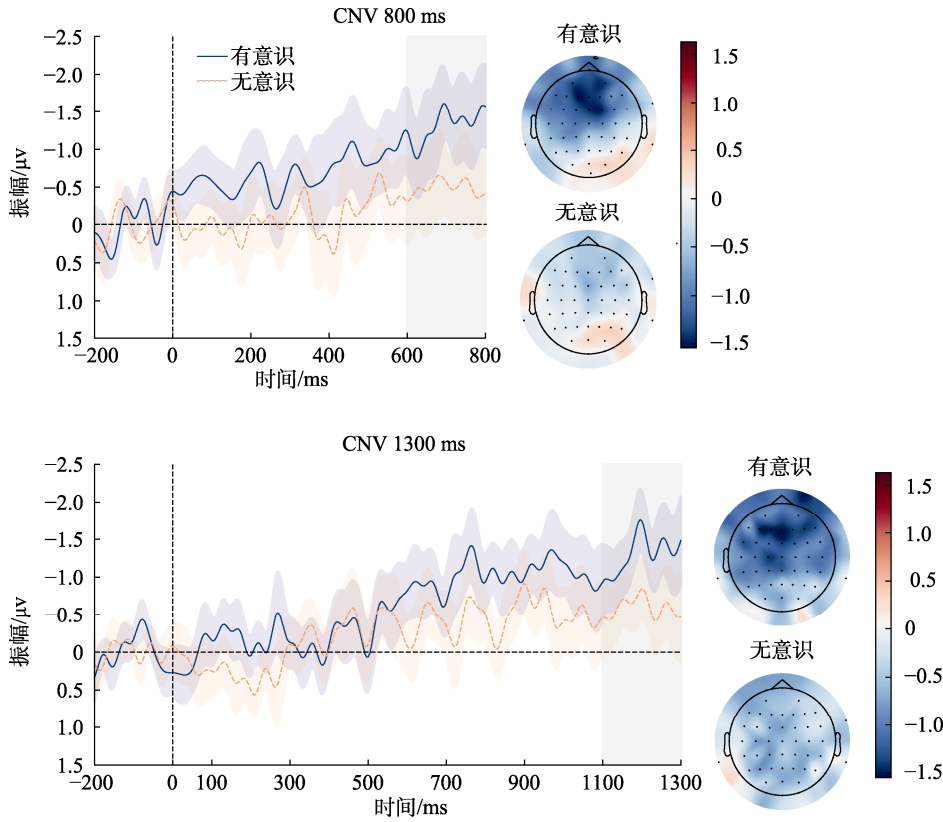


图 11 实验 2 不同条件下 CNV 差值波形图及地形图

注: 图中蓝色实线代表有意识状态下的 CNV 差值(节律-随机), 橙色虚线代表无意识状态下的 CNV 差值; 蓝色、橙色阴影是误差线, 代表被试内 95%的置信区间; 灰色阴影区域代表分析 CNV 的时间窗口; 右侧为不同意识状态和 ISI 条件下的 CNV 差值地形图(数据取自时间窗口内的差值均值)。

脑震荡(brain oscillation)活动差异, 我们针对能够反映注意集中的 α 震荡(alpha oscillations)进行分析 (Breska & Deouell, 2017; Rohenkohl & Nobre, 2011), 如图 13a 所示, 无论是 800 ms 还是 1300 ms 的时间间隔条件, 相较于无意识状态, 有意识状态在额叶和顶叶有更大范围的 α 震荡抑制。在图 13b 的时频图中可以看出, 从试次开始到节律编码阶段结束, 不同时间间隔条件和脑区下均有持续的 α 震荡抑制。

之后, 我们计算了编码阶段中有无意识状态在

不同 ISI 和脑区下的 α 频段功率, 如图 14 所示, 选取特定的时间窗口, 比较 α 频段功率在时间窗口下的均值差异。采用单尾配对样本 t 检验发现, 在 800 ms 时间间隔下, 有意识状态的 α 频段功率(-4.48 ± 2.41)在额叶上显著低于无意识状态(-3.51 ± 2.29) (图 14a), $t(23) = -1.92, p = 0.03$, Cohen's $d = -0.39$, $BF_{10} = 1.98$; 在枕叶上, 有意识状态的 α 频段功率(-3.90 ± 3.14)显著低于无意识状态(-2.14 ± 2.41) (图 14b), $t(23) = -3.82, p < 0.001$, Cohen's $d = -0.78$,

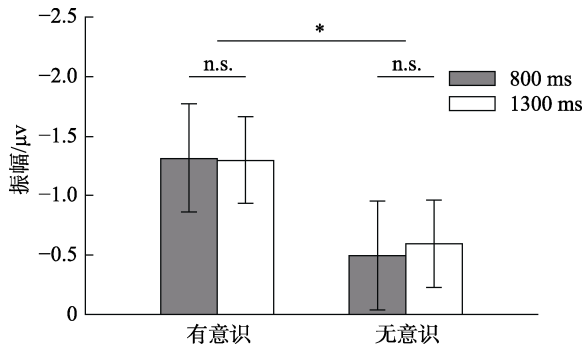


图 12 实验 2 中 CNV 成分上的时间注意效应

注: *表示 $p < 0.05$, n.s.表示无显著差异。误差线代表被试内 95% 的置信区间。

$BF_{10} = 79.00$ 。在 1300 ms 时间间隔下, 额叶上有意识状态的 α 频段功率(-4.09 ± 2.69)显著低于无意识状态(-3.32 ± 2.20) (图 14c), $t(23) = -1.79, p = 0.04$, Cohen's $d = -0.37, BF_{10} = 1.62$; 枕叶上有意识状态的 α 频段功率(-3.32 ± 2.80)也显著低于无意识状态(-1.65 ± 2.36) (图 14d), $t(23) = -4.98, p < 0.001$, Cohen's $d = -1.02, BF_{10} = 1.03 \times 10^3$ 。这些结果表明, 在节律的编码阶段, 有意识状态下的 α 震荡抑制更有效且更为广泛, 反映出大脑能够更有效地整合和

利用来自不同脑区的信息, 从而提高对节律刺激响应和处理能力。

3.3 讨论

在实验 1 的基础上, 实验 2 结合脑电指标进一步探究跨秒时间尺度下有无意识状态的节律线索诱发的时间注意效应的神经基础。与实验 1 结果相同的是, 无意识状态下, 节律线索诱发的时间注意效应依然存在, 尽管该效应弱于有意识状态。有意识状态下的时间注意效应得益于节律条件的决策边界降低, 被试对节律线索的把握更确信从而加快了行为反应, 而无意识状态下的时间注意效应未能体现决策边界的作用。实验 2 的结果再次验证了节律时间注意存在决策这一内源性成分, 并且决策过程受到意识状态的调节。此外, 实验 2 也发现 ISI 显著影响反应时, 超秒时间间隔的节律背景会使反应加快, 且这种反应增益并非来源于决策过程中漂移率, 而是存在其它潜在的亚秒和超秒的认知机制差异, 反应时的结果支持了时间认知分段综合模型。

然而, 与实验 1 结果不同的是, 实验 2 发现 ISI

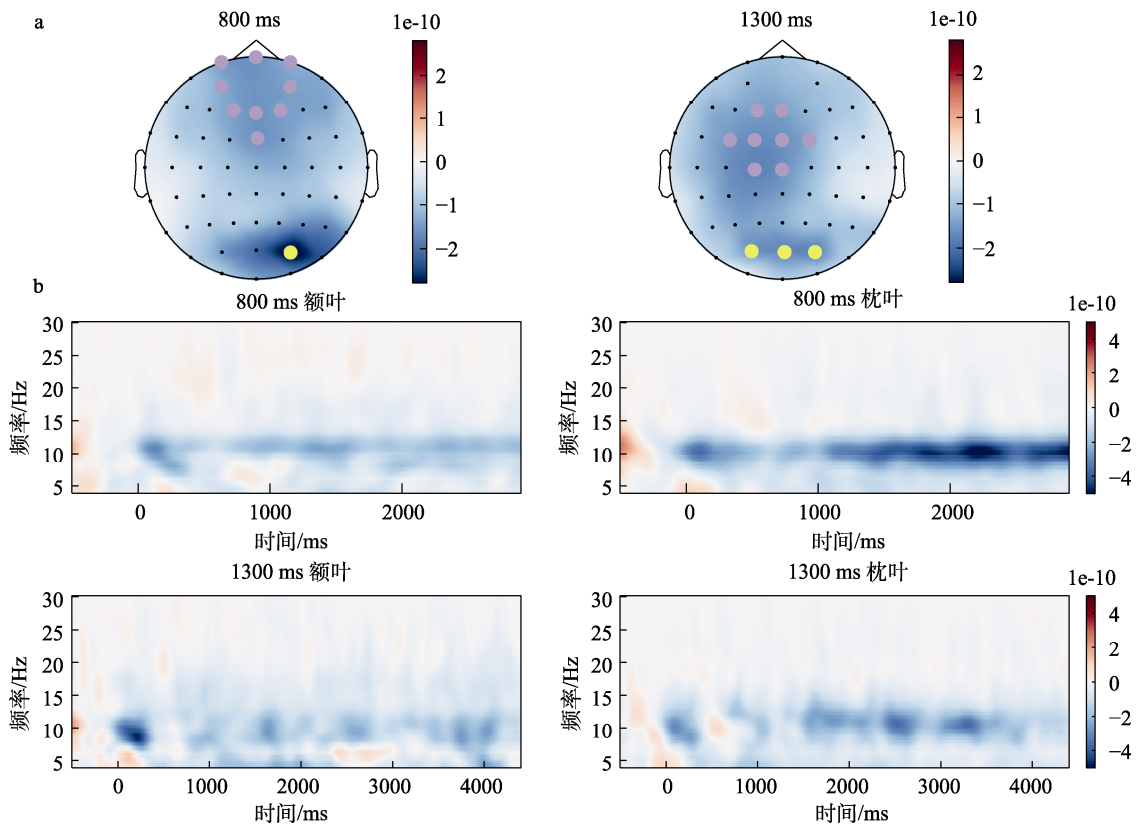


图 13 实验 2 编码阶段的 α 频段地形图以及时频图

注: a 图为 α 频段意识状态差值(有意识-无意识)地形图, 左图为 800 ms ISI 条件, 右图为 1300 ms ISI 条件。图 a 中的紫色圆点为 b 图时频分析中所挑选的额叶电极, 黄色圆点则为所挑选的枕叶电极。b 图为不同时间间隔和脑区下的意识状态差值(有意识-无意识)时频图。

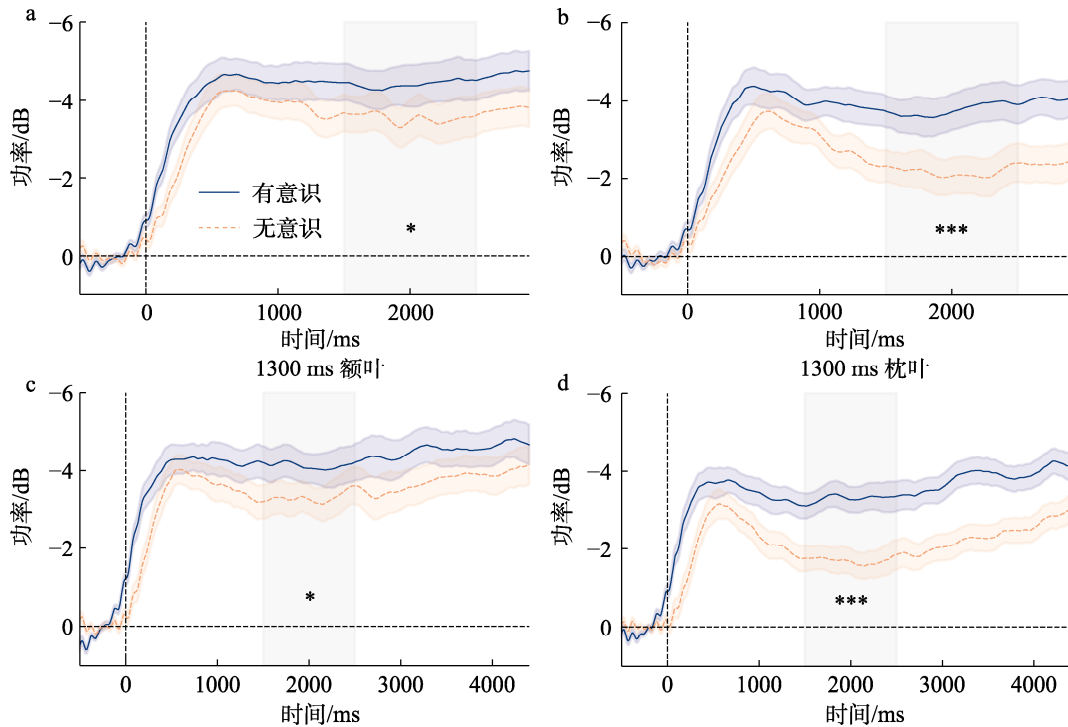


图 14 实验 2 编码阶段的 α 频段功率图

注：图中蓝色实线代表有意识状态下的 α 频段功率，橙色虚线代表无意识状态下的 α 频段功率；蓝色、橙色阴影是误差线，代表被试内 95% 的置信区间；灰色阴影区域代表分析的时间窗口(1500~2500 ms)。*表示 $p < 0.05$ ，***表示 $p > 0.001$ 。

与意识状态在反应时上存在交互作用。相较于有意识状态，在无意识状态下，超秒时间间隔的反应时显著短于亚秒时间间隔的反应时，且差值绝对值更大。对此，我们进行 HDDM 拟合分析发现，亚秒时间间隔条件与超秒时间间隔条件的漂移率在有意识状态下无显著差异，而在无意识状态下差异显著，超秒时间间隔条件的漂移率更大，这意味着信息处理的速度更快。可能的解释是在无意识状态下，由于线索不易被感知，因此无论时间间隔是多少，线索呈现方式是节律还是随机，目标出现前的光栅几乎是固定不动的，被试在主观上无法凭借有效的信息来预测目标出现时间，只能被动等待，此时风险率会发生作用，即随着时间的推移，被试逐渐警醒以便为即将到来的目标做好准备(Nobre et al., 2007)，加快了对目标的处理速度。等待的时间拉长而导致反应更快的结果在一项触觉节律刺激影响时间注意的研究中也有所体现(Pomper, 2023)。

实验 1 与实验 2 的任务设计相同，但在反应时上意识状态和 ISI 的交互作用结果存在差异，结合 p 和 BF_{10} 来看，实验 1 的结果不显著并非实验操作不敏感，而是确无此效应。对此可能的解释是：首先，两个实验的被试群体存在差异。研究中实验 1 的被试与实验 2 的被试完全不同，这可能影响了

交互作用的表现，尤其是当实验 2 的被试更容易在无法预测的情况下提高警觉时，如同上文提到的那样，被试将会在无意识状态且时间间隔为 1300 ms 条件下反应更快；其次，实验 2 中佩戴脑电设备可能影响被试的状态，如更为紧张或警觉。因此，对于 ISI 与意识状态的交互作用的稳定性应保持谨慎态度。

ERP 结果表明，无论意识状态是有或无，节律线索均比随机线索诱发更负的 CNV 波幅。同时，有意识状态比无意识状态有更大的 CNV 波幅差值(节律-随机)绝对值，这与行为上的时间注意效应结果相吻合，且与 Sun 等人(2024)研究结果一致。此外，行为上的时间注意效应并未受到 ISI 的影响，这一点在 CNV 波幅差值绝对值上也有所体现。但可惜的是，我们发现 CNV 波幅未在不同的 ISI 中产生显著差异，这与反应时中 ISI 主效应的结果不相符。事实上，CNV 更多地反映目标的期待，往往出现在目标和目标前一个刺激之间，越靠近目标时刻 CNV 越负，如图 11 所示。但我们的结果表明无论这一时间间隔是 800 ms 还是 1300 ms，CNV 最终达到的水平是没有显著差异的，这说明时间间隔不会影响最终的期待水平，但可能会影响 CNV 建立的速度(Breska & Deouell, 2017)。这一结果提示我们，

反应速度的差异可能并非完全由目标期待所决定, 而是受其它潜在因素所影响, 例如, 被试可能在超秒时间间隔条件下利用工作记忆来处理节律线索, 从而加快了反应速度(Xu et al., 2021)。

最后, 我们通过比较节律编码阶段的 α 震荡在有无意识状态下的差异, 发现有意识状态比无意识状态有更强的 α 震荡抑制, 主要体现在枕叶和额叶, 且有意识状态下的抑制范围更大, 枕叶的 α 震荡抑制反映出对视觉节律线索的处理增强, 额叶的 α 震荡抑制反映出节律编码阶段的注意维持。总之, 节律编码阶段中更大面积的大脑同步活动似乎为有无意识状态下的时间注意差异提供了先决条件。

4 总讨论

本研究在时间线索任务的基础上, 通过高频闪烁技术操纵感知视觉节律刺激的意识状态, 探讨不同意识状态对节律线索诱发的时间注意的影响。另外通过设置 ISI 的大小, 试图揭示亚秒和超秒时间跨度的认知机制差异。具体而言, 实验 1 在有、无意识状态下设置 800 ms (亚秒) 和 1300 ms (超秒) 两种时间间隔, 根据行为数据以及通过 HDDM 分析来探究跨秒时间尺度下意识状态对节律性时间注意的影响; 实验 2 在实验 1 的基础上增加 CNV 和 α 频段振荡的分析, 以进一步探究节律性时间注意神经机制。本研究发现无意识状态下节律线索仍能够诱发时间注意效应, 只是效应弱于有意识状态; 亚秒和超秒时间跨度的认知机制存在差异; 节律性时间注意受决策这一内源性成分的影响, 并且意识状态会对决策过程进行调节。

4.1 意识状态能够调节节律线索诱发的时间注意效应

在本研究中, 意识状态是通过高频闪烁技术来操纵的。我们的预实验发现, 当线索光栅以 30 Hz 频率闪烁时, 被试能够明显感知到刺激的闪烁, 此时为有意识状态; 正式实验 1c 和 2c 中发现, 高频闪烁技术能够使节律线索不可见, 此时为无意识状态。

我们的研究结果表明, 相较于有意识状态, 无意识状态下的节律线索诱发的时间注意效应更小。在神经层面上, 与无意识状态相比, 有意识状态下节律线索比随机线索诱发了更负的 CNV 波幅。将节律条件和随机条件的 CNV 波幅作差以对应行为上的时间注意效应, 发现有意识状态比无意识状态具有更大的 CNV 波幅差值绝对值, 这表明意识状态会影响节律线索诱发的时间注意, 但无意识状态

下时间注意效应并没有完全消失, 而是在一定程度上减弱。该结果与 Sun 等人(2024)对时间关联线索的研究结果基本一致, 这意味着不同时间结构在引导时间注意时受意识状态调控的效果是类似的。一方面, 利用节律线索和时间关联线索对未来目标进行简单或辨别反应均属于隐性时间处理(implicit timing; Wiener et al., 2010), 即根据线索来把握目标的出现时间而非直接报告时间间隔(对时间的显性加工), 不过分依赖有意识的时间处理, 这意味着在无意识状态下, 线索依然可以在一定程度上被加工从而诱发时间注意效应。另一方面, 无意识状态下的效应削弱是一种普遍的现象。我们的研究发现, 有意识状态下节律编码阶段的 α 震荡抑制比无意识状态更强, 抑制范围也更广, 正如整体工作空间理论(global workspace theory, GWT)所述, 相较于有意识状态下的多个脑区的协同活动, 无意识状态下只有有限的模块处理信息, 信息处理的范围和效率相对较低(Baars, 2005)。

同时, 本研究的 HDDM 分析也为意识状态对节律性时间注意的影响提供了新的见解。在有意识状态下, 节律线索条件的决策边界低于随机线索条件, 而在无意识状态下, 二者无显著差异, 该结果反映了节律线索的感知对于引导节律性时间注意的重要性, 也体现了节律性时间注意中存在决策这一内源性成分, 且决策过程受到意识状态的调节。被试在可以明显感知的节律背景下能够对目标的出现时刻有更好的把握, 对自己的反应更有信心, 这与 Tian 等人(2025)的研究结果类似, 即发现节律背景能够促进听觉工作记忆, 这得益于节律条件决策边界的降低。然而, 我们的研究发现, 在不易感知的节律背景中, 被试依然存在较弱的时间注意效应, 虽然该结果没有得到决策边界的支持, 但这从某种程度上反映出节律性时间注意作为一种“外源性时间注意”的特性, 即更依赖外界刺激的夹带, 而非依赖于内源性成分的参与。

4.2 时间间隔尺度不影响时间注意效应但影响整体反应时

本研究的两个实验均发现节律线索诱发的时间注意效应并不受时间间隔尺度的影响, 但发现个体在超秒时间间隔条件下的反应时比亚秒时间间隔条件下的反应时更快, 这意味着亚秒和超秒时间间隔的认知加工机制可能存在一定的差异, 结果支持时间认知分段综合模型。

对于不同时间间隔的反应时差异, 有以下两种

可能的解释: (1)风险率发挥着一定的作用,即随着时间的推移,个体可能会增加对事件发生的感知概率,以便为即将发生的未知时间分布的事件做好准备(Nobre et al., 2007),从而加快了超秒时间间隔条件下的反应。(2)加工以超秒时间间隔呈现的节律线索时可能需要工作记忆的参与(Xu et al., 2021),如Wiener等人(2010)利用fMRI技术观察了被试在执行持续时间估计任务时的大脑活动,发现右侧背外侧前额皮层与长时间间隔计时任务相关联,这表明进行较长时间间隔的计时任务需要依赖工作记忆(Koch et al., 2009)。因此,长时间跨度工作记忆的卷入可能会导致更多的认知资源的集中,使得超秒时间间隔条件下的反应更快。

尽管我们在两个实验的HDDM结果中均未发现漂移率在ISI不同水平下存在显著差异,但能看到超秒时间间隔条件的漂移率均有升高的趋势,且实验2中发现,在无意识状态下,超秒时间间隔条件的漂移率显著大于亚秒时间间隔条件,这说明不同时间间隔的反应时差异受潜在决策过程的影响。总之,当前研究结果支持了时间认知分段综合模型的假设,认为不同时间跨度具有不同的认知过程和加工机制(黄希庭等,2003)。

4.3 研究局限性

需要承认本研究的几点不足。首先,本研究发现节律线索和时间关联线索在诱发时间注意效应上存在相似性,在先前的EEG研究中,也发现了基于节拍和基于记忆的时间预测具有类似的神经基础(Breska & Deouell, 2017; Bouwer et al., 2020)。然而,时间结构如节奏和序列可以独立于其他时间线索增强绩效(Nobre & van Ede, 2018)。根据动态注意理论(dynamic attending theory, DAT; Jones & Boltz, 1989),当存在外界节奏刺激时,注意力的振荡会调整其频率和相位,以实现与外界节奏刺激的时间同步,这种调整被称为夹带,它使得注意能够在特定时刻集中于预期的刺激,从而提高对这些刺激的处理效率。也就是说,节律线索可能在预期(其它时间线索的主要作用)的基础之上叠加节律夹带效果来促进时间注意。然而,我们的研究结果未能比较出节律线索和时间关联线索诱发的时间注意差异以突出节奏夹带的作用。甚至,研究发现节律夹带的神经响应并不是由刺激直接驱动的,人对节奏的主观感知(如想象)也会增强神经上的夹带效果,这表明反映外界节律刺激夹带的神经振荡可能会混入一些主观因素,而非纯自下而上的感知表征

(Nozaradan et al., 2011; Tal et al., 2017)。

第二,本研究是通过操纵意识状态来探究节律性时间注意是否会像内源性时间注意一样受到意识状态的调节。尽管我们的结果表明,意识状态能够调节节律线索诱发的时间注意效应,但不清楚这种调节是仅作用在节律刺激的夹带效果上还是仅作用在节律性时间注意的内源性成分(如决策过程)上,亦或是二者均受到影响。节奏夹带效果与刺激的物理属性有关,如亮度,对比度等,这些因素会影响刺激的感知效果从而影响夹带所带来的时间注意增益。在本研究的无意识状态条件下,线索光栅以50 Hz频率闪烁,被试不易感知到光栅闪烁,从而可能削弱了节律线索的夹带效果。另一方面,节律性时间注意包含内源性成分,在无意识状态下,由于不易感知节律线索而无法自上而下利用时间间隔信息来预测目标出现,从而导致无意识状态下节律线索诱发的时间注意效应减弱。未来研究可以尝试将节律性时间注意中的主动控制和夹带作用进行分离,以进一步探讨不同意识状态对节律线索诱发的时间注意效应的影响。

5 结论

节律性时间注意存在内源性成分,节律线索诱发的时间注意效应受到意识状态的调节,无意识状态下节律线索诱发的时间注意效应弱于有意识状态。节律刺激的时间间隔不影响时间注意效应,但影响整体反应的快慢,说明不同时间跨度的认知加工机制存在差异,支持时间认知分段综合模型。

参 考 文 献

- Baars, B. J. (2005). Global workspace theory of consciousness: Toward a cognitive neuroscience of human experience. *Progress in Brain Research*, 150, 45–53.
- Bauer, F., Cheadle, S. W., Parton, A., Müller, H. J., & Usher, M. (2009). Gamma flicker triggers attentional selection without awareness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(5), 1666–1671.
- Bouwer, F. L., Honing, H., & Slagter, H. A. (2020). Beat-based and memory-based temporal expectations in rhythm: Similar perceptual effects, different underlying mechanisms. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32(7), 1221–1241.
- Breska, A., & Deouell, L. Y. (2014). Automatic bias of temporal expectations following temporally regular input independently of high-level temporal expectation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(7), 1555–1571.
- Breska, A., & Deouell, L. Y. (2016). When synchronizing to rhythms is not a good thing: Modulations of preparatory and post-target neural activity when shifting attention away from on-beat times of a distracting rhythm. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for*

- Neuroscience*, 36(27), 7154–7166.
- Breska, A., & Deouell, L. Y. (2017). Neural mechanisms of rhythm-based temporal prediction: Delta phase-locking reflects temporal predictability but not rhythmic entrainment. *PLoS Biology*, 15(2), e2001665. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2001665>
- Breska, A., & Ivry, R. B. (2020). Context-specific control over the neural dynamics of temporal attention by the human cerebellum. *Science Advances*, 6(49), eabb1141. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb1141>
- Correa, A., & Nobre, A. C. (2008). Neural modulation by regularity and passage of time. *Journal of Neurophysiology*, 100(3), 1649–1655.
- Coull, J. T., & Nobre, A. C. (1998). Where and when to pay attention: The neural systems for directing attention to spatial locations and to time intervals as revealed by both PET and fMRI. *The Journal of Neuroscience*, 18(18), 7426–7435.
- Coull, J., & Nobre, A. (2008). Dissociating explicit timing from temporal expectation with fMRI. *Current Opinion in Neurobiology*, 18(2), 137–144.
- Denison, R. N., Heeger, D. J., & Carrasco, M. (2017). Attention flexibly trades off across points in time. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(4), 1142–1151.
- Faul, F., Erdfelder, E., Buchner, A., & Lang, A. G. (2009). Statistical power analyses using G*Power 3.1: tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41(4), 1149–1160.
- Gooch, C. M., Wiener, M., Hamilton, A. C., & Coslett, H. B. (2011). Temporal discrimination of sub- and suprasecond time intervals: A voxel-based lesion mapping analysis. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5, 59. <https://doi.org/10.3389/fnint.2011.00059>
- Gramfort, A., Luessi, M., Larson, E., Engemann, D. A., Strohmeier, D., Brodbeck, C., ... Hämäläinen, M. (2013). MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Frontiers in Neuroscience*, 7, 267. <https://doi.org/10.3389/fnins.2013.00267>
- Huang, X., Li, B., & Zhang, Z. (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.]
- Jiang, Y., Zhou, K., & He, S. (2007). Human visual cortex responds to invisible chromatic flicker. *Nature Neuroscience*, 10(5), 657–662.
- Jones, M. R., & Boltz, M. (1989). Dynamic attending and responses to time. *Psychological Review*, 96(3), 459–491.
- Kingstone, A. (1992). Combining expectancies. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 44(1), 69–104.
- Koch, G., Oliveri, M., & Caltagirone, C. (2009). Neural networks engaged in milliseconds and seconds time processing: Evidence from transcranial magnetic stimulation and patients with cortical or subcortical dysfunction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 364(1525), 1907–1918.
- Lange, K. (2009). Brain correlates of early auditory processing are attenuated by expectations for time and pitch. *Brain and Cognition*, 69(1), 127–137.
- Laquitaine, M., Polosan, M., Kahane, P., Chabardes, S., Yelnik, J., Fernandez-Vidal, S., ... Bastin, J. (2024). Optimal level of human intracranial theta activity for behavioral switching in the subthalamo-medio-prefrontal circuit. *Nature Communications*, 15(1), 7827. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52290-w>
- Lewis, P. A., & Miall, R. C. (2003). Brain activation patterns during measurement of sub- and supra-second intervals. *Neuropsychologia*, 41(12), 1583–1592.
- Mankowska, N. D., Marcinkowska, A. B., Waskow, M., Sharma, R. I., Kot, J., & Winklewski, P. J. (2021). Critical flicker fusion frequency: A narrative review. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 57(10), 1096. <https://doi.org/10.3390/medicina57101096>
- Miller, J. E., Carlson, L. A., & McAuley, J. D. (2013). When what you hear influences when you see: Listening to an auditory rhythm influences the temporal allocation of visual attention. *Psychological Science*, 24(1), 11–18.
- Miniussi, C., Wilding, E. L., Coull, J. T., & Nobre, A. C. (1999). Orienting attention in time. Modulation of brain potentials. *Brain: A Journal of Neurology*, 122(Pt 8), 1507–1518.
- Myers, C. E., Interian, A., & Moustafa, A. A. (2022). A practical introduction to using the drift diffusion model of decision-making in cognitive psychology, neuroscience, and health sciences. *Frontiers in Psychology*, 13, 1039172. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.1039172>
- Nobre, A. C. (2010). How can temporal expectations bias perception and action. In A. C. Nobre, & J. T. Coull (Eds.), *Attention and time* (pp. 371–392). Oxford.
- Nobre, A. C., & van Ede, F. (2018). Anticipated moments: Temporal structure in attention. *Nature Reviews. Neuroscience*, 19(1), 34–48.
- Nobre, A., Correa, A., & Coull, J. (2007). The hazards of time. *Current Opinion in Neurobiology*, 17(4), 465–470.
- Nozaradan, S., Peretz, I., Missal, M., & Mouraux, A. (2011). Tagging the neuronal entrainment to beat and meter. *The Journal of Neuroscience*, 31(28), 10234–10240.
- Peirce, J. W. (2007). PsychoPy-Psychophysics software in Python. *Journal of Neuroscience Methods*, 162(1–2), 8–13.
- Pomper, U. (2023). No evidence for tactile entrainment of attention. *Frontiers in Psychology*, 14, 1168428. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1168428>
- Pouthas, V., George, N., Poline, J. B., Pfeuty, M., Vandemoortele, P. F., Hugueville, L., ... Renault, B. (2005). Neural network involved in time perception: An fMRI study comparing long and short interval estimation. *Human Brain Mapping*, 25(4), 433–441.
- Praamstra, P., Kourtis, D., Kwok, H. F., & Oostenveld, R. (2006). Neurophysiology of implicit timing in serial choice reaction-time performance. *The Journal of Neuroscience*, 26(20), 5448–5455.
- Rammseyer, T., & Ulrich, R. (2011). Elaborative rehearsal of nontemporal information interferes with temporal processing of durations in the range of seconds but not milliseconds. *Acta Psychologica*, 137(1), 127–133.
- Rohenkohl, G., & Nobre, A. C. (2011). α oscillations related to anticipatory attention follow temporal expectations. *The Journal of Neuroscience*, 31(40), 14076–14084.
- Rozier, C., Seidel Malkinson, T., Hasboun, D., Baulac, M., Adam, C., Lehongre, K., ... Naccache, L. (2020). Conscious and unconscious expectancy effects: A behavioral, scalp and intracranial electroencephalography study. *Clinical Neurophysiology*, 131(2), 385–400.
- Shady, S., MacLeod, D. I., & Fisher, H. S. (2004). Adaptation from invisible flicker. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(14), 5170–5173.
- Sun, Y., Wang, K., Liang, X., Zhou, P., & Sun, Y. (2024). Unconscious temporal attention induced by invisible temporal association cues. *Consciousness and Cognition*, 126, 103786. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2024.103786>
- Tal, I., Large, E. W., Rabinovitch, E., Wei, Y., Schroeder, C. E., Poeppel, D., & Zion Golumbic, E. (2017). Neural entrainment to the beat: The "missing-pulse" phenomenon.

- The Journal of Neuroscience*, 37(26), 6331–6341.
- Tian, S., Cheng, Y. A., & Luo, H. (2025). Rhythm facilitates auditory working memory via beta-band encoding and theta-band maintenance. *Neuroscience Bulletin*, 41(2), 195–210.
- Walter, W. G., Cooper, R., Aldridge, V. J., McCallum, W. C., & Winter, A. L. (1964). Contingent negative variation: An electric sign of sensori-motor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 203, 380–384.
- Wiecki, T. V., Sofer, I., & Frank, M. J. (2013). HDDM: Hierarchical bayesian estimation of the drift-diffusion model in Python. *Frontiers in Neuroinformatics*, 7, 14. <https://doi.org/10.3389/fninf.2013.00014>
- Wiener, M., Turkeltaub, P. E., & Coslett, H. B. (2010). Implicit timing activates the left inferior parietal cortex. *Neuropsychologia*, 48(13), 3967–3971.
- Xu, Z., Ren, Y., Misaki, Y., Wu, Q., & Lu, S. (2021). Effect of tempo on temporal expectation driven by rhythms in dual-task performance. *Frontiers in Psychology*, 12, 755490. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.755490>

Modulation of rhythmic temporal attention by conscious awareness: Evidence from behavior, hierarchical drift-diffusion modeling, and EEG measures

LIANG Xingjie, CHEN Huifang, WANG Luyao, SUN Yanliang

(Faculty of Psychology, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract

Temporal cues enable individuals to anticipate upcoming events, thereby facilitating goal-directed behavior. While temporal association cues are known to engage endogenous temporal attention that is modulated by conscious perception, it remains unclear whether rhythmic cues—typically considered to evoke exogenous temporal attention—are similarly affected by the state of consciousness. Addressing this gap, the present study investigated whether rhythmic temporal attention is subject to modulation by conscious awareness and whether it involves endogenous cognitive components akin to those recruited by symbolic temporal cues.

Two experiments were conducted, each involving 24 different Chinese participants and comprising three conditions: (a) a rhythmic cueing task under conscious perception, (b) the same task under unconscious perception manipulated via high-frequency flicker (50 Hz), and (c) a two-alternative forced-choice awareness check. Experiment 2 replicated the design of Experiment 1 with simultaneous EEG recordings. Participants performed an orientation discrimination task in rhythmic versus random cue conditions, with inter-stimulus intervals (ISIs) of either 800 ms or 1300 ms to compare sub-second and supra-second timing.

Behavioral results showed robust temporal attention effects in both conscious and unconscious states, though significantly larger under conscious perception. ERP analyses revealed that rhythmic cues elicited greater contingent negative variation (CNV) amplitudes when participants were conscious, indicating enhanced temporal preparation at the neural level. Hierarchical drift-diffusion modeling (HDDM) further showed that under conscious perception, rhythmic cues reduced decision boundaries, suggesting more confident and efficient decision-making—a hallmark of endogenous control. These effects were absent under unconscious conditions. Additionally, faster responses in supra-second versus sub-second intervals support the segmented timing hypothesis and indicate that longer temporal contexts may recruit higher-order cognitive processes. Importantly, time–frequency analysis revealed stronger alpha-band (8~12 Hz) suppression during the rhythmic encoding phase under conscious perception, particularly over frontal and occipital regions, with wider spatial distribution in the supra-second interval. This enhanced alpha desynchronization suggests greater attentional engagement and top-down modulation of sensory areas, supporting the notion that conscious perception of rhythmic structure facilitates the neural entrainment of anticipatory attention.

Together, these findings challenge the view that rhythmic temporal attention is purely exogenous, showing instead that it contains an endogenous component that is modulated by the state of consciousness. This study provides converging behavioral, electrophysiological, and computational evidence for a dual-process account of rhythmic temporal attention and offers novel insights into the interaction between temporal structure and awareness in shaping anticipatory cognition.

Keywords rhythmic cues, temporal attention, consciousness states, hierarchical drift-diffusion modeling, contingent negative variation