

# 认知老化中时间线索与准备间隔的影响

姚婷婷, 刘丽庆\*

天津师范大学心理学部, 天津

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年6月1日; 发布日期: 2026年6月11日

## 摘要

处理来自内部和外部的时间信息对个体的日常生活至关重要。但由内部和外部触发的时间预测能力是否以及如何随着年龄增长过程而变化, 目前仍不清晰。目的: 本研究旨在探究在不同时间信息背景和可变前期下, 老化对时间预测能力的影响。方法: 本研究采用包含十个不同的可变前期和两种线索条件(时间线索条件和中性线索条件)的反应时任务。在时间线索条件下, 参与者会收到关于即将出现的目标的时间信息; 而中性线索条件下, 不提供任何时间信息。结果: 在两种线索条件下, 老年人的反应时都比年轻人慢。在时间线索条件下, 老年人能够像年轻人一样利用时间信息加快反应。在中性线索条件下, 随着可变前期的增加, 两组被试都能优化他们的反应表现。结论: 这些研究结果表明, 尽管老年人反应速度较慢, 但其时间准备机制可能仍得以保留。

## 关键词

老年人, 时间线索, 准备间隔, 反应时

# The Effects of Temporal Cues and Preparation Intervals in Cognitive Aging

Tingting Yao, Liqing Liu\*

Faculty of Psychology, Tianjin Normal University, Tianjin

Received: April 27, 2026; accepted: June 1, 2026; published: June 11, 2026

## Abstract

Processing temporal information from both internal and external sources is essential for our daily lives. However, it is still not well understood how the ability to predict time, triggered by internal and external cues, changes with aging. Objective: This study aimed to examine the impact of aging on temporal prediction processes across various contexts and different foreperiods. Methods: A

\*通讯作者。

reaction time task with ten different variable foreperiods and two cue conditions (temporal cue condition and neutral cue condition) was employed. In the temporal cue condition, participants received temporal information about the upcoming target; in the neutral cue condition, no temporal information was provided. Results: Older adults had slower reaction times than younger adults in both cue conditions. In the temporal cue condition, older adults were able to use temporal information to speed up their responses, similar to younger adults. In the neutral cue condition, both groups optimized their response performance as the variable foreperiods increased. Conclusion: These findings indicate that although older adults have slower reaction speeds, their temporal preparation mechanism may remain preserved.

## Keywords

Older Adults, Temporal Cue, Preparation Interval, Reaction Time

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

时间预测是人们生存的基本能力,因为它可以减少对未来事件的不确定性,优化个体对刺激发生的反应(Nobre et al., 2007)。反应之前,如果能够预测刺激发生的时间、方位或难度等信息,对时间和空间规律有一定的掌握,那么就可以更好的集中注意力,应对刺激的发生(Petersen & Posner, 2012)。这种良好的时间预测能力依赖于两种信息来源的调节和控制,即基于外部驱动的时间预测和基于内部驱动的时间预测。外部驱动的时间预测是指根据环境线索,预先分配认知资源的能力,或者提供任务相关刺激开始的预测性信号,这也被称为时间定向预测(Coull, 2009)。内部驱动的时间预测则是根据时间单向维度的流逝,在没有外部线索信息的提示下,对目标刺激到来的一种可预测性能力(Karlin, 1959; Niemi & Näätänen, 1981)。

在时间预测的反应时任务中,警告信号和命令刺激之间的准备间隔(Foreperiod, FP),是运动准备充分与否和反应时快慢的决定性因素,对刺激的出现具有很强的预测价值。在 FP 均匀分布的可变前期范式中,反应时随着间隔时间的增加而呈现下降趋势,这一功能被称为可变前期效应(Niemi & Näätänen, 1981)。关于可变前期效应,已有多种理论解释,其中一种解释认为其源于风险函数(hazard function)。如果一个事件在给定的时间内尚未发生,则该事件发生的概率会不断增加,导致事件的确信性不断增强。人们对目标事件等待的时间越长,对其发生的把握也就越大,做出反应的速度也就越快。另一种解释是多重痕迹理论(Multiple trace theory, MTP),该理论认为可变前期效应可能反映了对实验中先前试验所创建的记忆痕迹(memory traces)的检索。MTP 理论假定,在 FP 内施加抑制以防止过早反应,当目标出现的时候,就会发生一个激活过程。每一个试次中的行为序列都会被存储为一个单独的记忆痕迹。这些记忆痕迹会与先前形成的记忆痕迹共同作用,为后续试次的准备过程提供支持。因此,可变前期效应可能反映的是对先前实验情境中创建的记忆痕迹的提取过程。

不同类型的时间预测,受到可变前期效应的影响也有不同。在外部驱动的时间预测中,时间线索会告知受试者,目标刺激将在多长的 FP 后出现。与无线索提示(“中性线索”)或误导性线索(“无效线索”)相比,正确预测目标出现时间的线索会引发更快更准确的反应(Correa et al., 2005; Davranche et al., 2011)。当 FP 所处的背景环境是外部驱动的有线索提示的情况时,相对较短 FP 的反应时通常比较长 FP

的反应时更快, 即较短的 FP 能够对即将到来的事件的发生进行准确而有信心的预测, 而较长的 FP, 预测更可变且更不准确, 具有更高的时间不确定性, 导致响应较慢(Gibbon et al., 1984)。这种效果部分是受益于运动系统在短时间范围内具有更高效的准备机制(Tandonnet et al., 2003)和相对较短的时间间隔中具有更有效的计时过程(Gibbon, 1977)。当 FP 所处背景是不可预测状态, 即没有时间线索提示参与者目标刺激将在什么时候出现。那么当 FP 的持续时间最长时, 通常会观察到最短的反应时, 即较短 FP 的反应时比较长 FP 的反应时慢, 可变前期效应显著(Coull et al., 2016; Duma et al., 2017; Mento & Valenza, 2016; Zanto et al., 2011)。

在健康老化过程中, 与年龄相关的大脑功能的变化会对老年人的认知功能和运动能力产生重要影响。但是在时间预测的老化上, 研究相对较少且得出了不同的结论。例如, Zanto 等人采用时间线索任务发现在较短的 FP (600 ms)下, 只有年轻人能够从时间线索中受益。老年人的时间定向能力受损, 导致他们无法有效的利用时间线索来优化行动表现。但是在较长的 FP (1400 ms)下, 年轻人和老年人均不能从时间线索中受益。因此研究者提出老年人在时间定向上的损伤可能是由于老年人整体预期机制受损, 这也是正常老化过程中多种认知缺陷的基础(Zanto et al., 2011)。另一项研究发现, 在可预测条件下, 老年人可以整合外部的时间线索来优化言语产生和手部运动的反应速度, 但是在不可预测的条件下, 反应的速度显著慢于年轻人。因此, 作者提出老年人保存了和年轻人一样好的基于外部驱动的时间预测的机制, 但是基于内部驱动的时间预测可能受到损伤, 这可能与风险函数的衰减有关(Johari et al., 2019)。而 Chauvin 等人基于时间线索有效性的任务发现, 老年人的时间定向能力并没有受损, 他们可以和年轻人一样从时间预期中受益(Chauvin et al., 2016)。Droit-Volet 等人发现在外部驱动和内部驱动的时间预测中, 老年人对时间的估计和年轻人一样准确。只是在外部驱动的时间预测中, 年长的参与者比年轻的参与者变化更大(Droit-Volet et al., 2019)。

先前研究者探讨不同时间预测情境下可变前期效应对反应表现的影响时, 通常选择少量 FPs 进行分析, 无法探究受风险函数影响的反应时的动态变化。同时, 在探究不同类型的时间预测的老化时, 研究者多采用不同的时间预测任务, 有的采用固定的 FP, 有的采用可变的 FP, 且 FP 的数量和长度存在差异。在这种情况下, 不同的时间预测任务的时间变异性不一致, 可能使得不同的时间预测任务在时间信息处理的难度上存在差异, 这也可能会影响实验结果(Johari et al., 2019)。

因此, 关于老年人与年轻人的反应时在两种时间预测背景下是否相同以及如何和时间进程上受到 FP 的影响这一问题仍有待进一步研究。本研究采用时间线索反应时任务, 以有无线索提示来区分时间预测的两种类型, 即有线索提示的外部驱动的时间预测(时间线索条件)和没有线索提示的内部驱动的时间预测(中性线索条件)。基于不同长度的准备间隔, 探讨外部驱动和内部驱动的时间预测的老化进程。本研究提出以下假设: (1) 反应表现可能受到时间预测类型及可变前期效应的影响, 这一现象在年轻组和老年组中均存在; (2) 无论在外部驱动还是内部驱动的时间情境下, 老年组的表现均较差; (3) 虽然老年人的表现较差, 但其时间预测能力可能依然得以保留。

## 2. 方法

### 2.1. 被试

使用 G Power3.1 (Faul et al., 2007)对给定重复测量的间隔内相互作用进行了先验功率分析, 使用了 0.25 的效应量, alpha 值为 0.05, 重复测量和非球形校正之间的相关性为默认值。结果表明, 每组共需要 19 个样本才能使统计检验力达到 0.8。考虑到真实效应量的不确定性, 将样本量增加到了 25 个。本研究从天津某大学和社区分别招募了 25 名年轻人(男性 12 名, 平均年龄为  $19.82 \pm 1.63$  岁)和 25 名老年人(男性 11 名, 平均年龄为  $65.70 \pm 3.42$  岁)。被试均为右利手, 视力或矫正视力正常, 没有精神疾病史或神经

系统疾病史, 没有已知的神经或注意力相关障碍。采用贝克抑郁量表(BDI) (Beck et al., 1961), 排除有抑郁倾向的受试者(所有受试者的得分均低于 13 分), 老年组采用简易精神状态检查量表(MMSE) (Folstein et al., 1975)排除有认知障碍的被试(所有受试者的得分均大于或等于 27 分)。本研究经天津师范大学伦理委员会批准(批准号: 2022030706)。所有受试者在实验前签署知情同意书, 实验结束后获得少量报酬。

## 2.2. 实验设备

实验在标准行为学实验室中进行, 实验程序的编写和刺激的呈现均采用 E-Prime (3.0)。实验刺激呈现在惠普(型号为 HP Pavilion Gaming Laptop 16-a0xxx)笔记本电脑上, 分辨率为  $1920 \times 1080$  像素, 屏幕尺寸为 15.6 英寸, 刷新率为 60 Hz。参与者舒适地坐在椅子上, 被试眼睛距屏幕中心约 60 cm。实验刺激的字体为宋体 22 pt, 圆形刺激直径 4.5 cm, 线型为 3 磅。

## 2.3. 实验设计

本研究采用 2 (条件: 时间线索条件, 中性线索条件)  $\times$  2 (组别: 年轻组, 老年组)  $\times$  10 (准备间隔: 100 ms, 200 ms, 300 ms, 500 ms, 800 ms, 1100 ms, 1400 ms, 2000 ms, 2600 ms, 3200 ms) 的三因素混合实验设计。鉴于对短 FP (<300 ms) 的加工主要与相变性唤醒有关(Tona et al., 2016), 本研究在 100 毫秒至 300 毫秒的 FP 范围内, 采用了 100 毫秒的步长。其中条件和准备间隔为被试内变量, 组别为被试间变量。因变量指标包括: 平均反应时间(RT)、正确率(ACC)和反效率分数(IES)。反效率分数由反应时/正确率而来, 反效率分数越高, 表明被试越倾向于保证速度而忽视正确率。相反, 反效率分数越低, 意味着被试越注重正确率, 并倾向于通过牺牲速度来确保反应的正确性。在某些情况下, IES 虽然能更好地概括研究的发现, 但也会增加数据的变异性(Bruyer & Brysbaert, 2011)。当在速度和准确性之间进行权衡时, IES 将补偿错误反应百分比的差异(Statsenko et al., 2020)。既往研究表明, 老年人反应速度较慢但更为准确, 即其倾向于采用更保守的策略进行反应。反应速度与准确性均表现出与年龄相关的变化, 其模式为: 老年被试倾向于在高准确率水平下执行决策(Fechner et al., 2019)。为排除年轻人和老年人在速度和准确性之间的权衡差异, 本研究也使用了 IES。

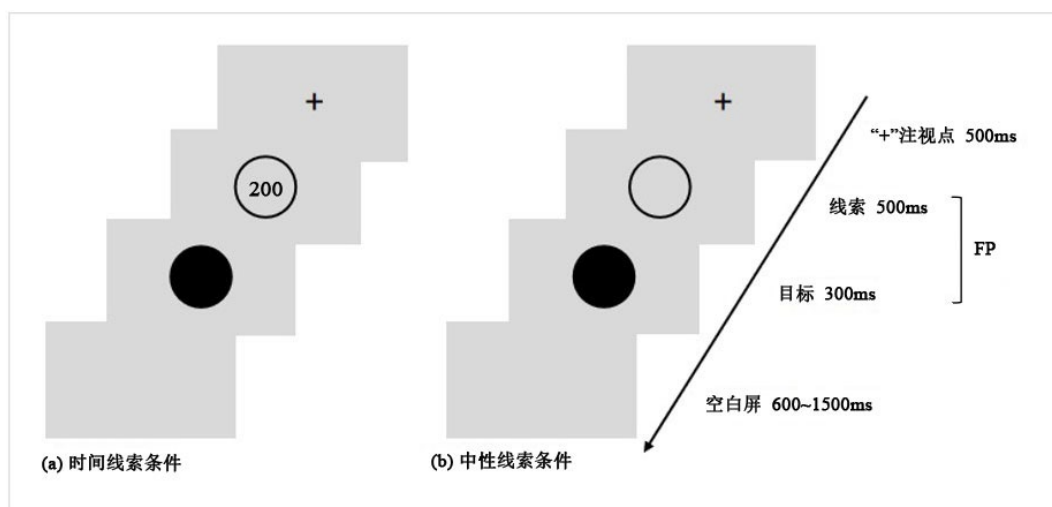
## 2.4. 实验任务

实验采用时间线索反应时任务, 改编自 Coull 等人(Coull et al., 2016)。该任务包含两个实验条件: 时间线索条件和中性线索条件(见图 1)。在时间线索条件中, 视觉线索会提示被试目标刺激将要出现的时间。在中性线索条件中, 视觉线索仅提示被试目标会出现, 但不会提示具体的时间。两种条件下, 都要求被试在目标刺激出现的时候, 尽快对目标刺激做出反应。因此, 在时间线索条件下, 被试可以通过时间信息预测目标刺激何时出现。由于该任务为简单的反应时(RT)任务, 且时间条件下的线索有效性为 100%, 因此在时间线索条件下鼓励预期行为。在中性线索条件下, 被试不会收到目标刺激何时出现的时间提示。

## 2.5. 实验流程

实验流程如图 1 所示。首先, 实验开始前, 屏幕中央会显示一个黑色的“+” (500 ms)提醒被试需集中注意力在屏幕中央。随后呈现一个视觉提示(500 ms), 视觉提示提供了目标刺激出现的时间信息(例如 200 毫秒表示目标刺激将在视觉提示呈现后 200 毫秒出现)(图 1(a)), 或不提供时间提示(图 1(b))。紧接着在一段可变的 FP 后会呈现一个目标刺激(300 ms)。视觉提示和目标刺激之间的 FP 长度共有 10 种, 每个长度的 FP 出现的概率相等(FP: 100 ms, 200 ms, 300 ms, 500 ms, 800 ms, 1100 ms, 1400 ms, 2000 ms, 2600 ms, 3200 ms)。当目标刺激出现时, 要求被试用右手食指尽快按下键盘上的 J 键作反应。最后, 实验进入空屏状态, 持续时间在 600~1500 ms 中随机呈现。视觉提示为一个空心圆, 而目标刺激则由一个黑色的

实心圆构成, 视觉提示和目标刺激大小相同。在两种线索条件下, 每种长度的 FP 各有 48 个试次, 总共 960 个试次, 以随机顺序呈现。正式实验前, 所有受试者均进行充分练习。当正确率达到 90% 以上时, 程序会自动进入正式实验, 否则将返回练习部分继续练习。整个实验时间大约持续 60 分钟, 实验过程中每完成 80 个试次, 被试可进行短暂休息。



**Figure 1.** Time-line reaction time task  
**图 1.** 时间线索反应时间任务

## 2.6. 数据分析

数据整理和统计分析采用 E-prime 3.0 和 SPSS 23.0 软件,  $p < 0.05$  为差异具有统计学意义。对年轻组和老年组的平均反应时间(RT), 正确率(ACC)以及反效率分数(IES)进行混合方差分析, 检验它们在两种线索条件和不同 FP 下的年龄差异。当球形度检验不满足时, 采用 Greenhouse Geisser 校正法对结果进行校正。剔除错误试次, 包括(1) 在视觉提示呈现期间按下目标按键的试次; (2) 在可变 FP 期间按下目标按键的试次; (3) 未在目标刺激呈现时进行按键的试次; (4) 反应时小于 100 ms 或大于 1000 ms 的试次 (Tzagarakis et al., 2010)。错误试次占总试次的比值为 6.03%。

## 3. 结果

### 3.1. 反应时(RT)

在时间线索条件和中性线索条件下, 两组被试在各种可变 FP 下平均反应时和标准差的变化见表 1。混合方差分析结果显示: 组别主效应显著,  $[F(1, 48) = 62.981, p < 0.001, \eta^2 p = 0.567]$ 。老年组在时间线索条件( $340.93 \pm 11.79$ )和中性线索条件( $373.95 \pm 24.31$ )下的反应时均慢于年轻人( $243.65 \pm 20.94; 286.63 \pm 25.98$ ); 条件主效应显著,  $[F(1, 48) = 85.001, p < 0.001, \eta^2 p = 0.639]$ , 时间线索条件下的反应时更短; FP 主效应显著,  $[F(2.62, 48) = 5.115, p = 0.004, \eta^2 p = 0.096]$ 以及条件和 FP 的交互作用显著,  $[F(2.68, 48) = 110.047, p < 0.001, \eta^2 p = 0.696]$ 。组别、线索条件与 FP 的三阶交互作用不显著,  $[F(2.68, 48) = 2.372, p = 0.013, \eta^2 p = 0.047]$ 。对“条件  $\times$  FP”交互作用进行进一步简单效应分析发现, 当 FP 小于等于 800 ms 时, 时间线索条件的反应时显著小于中性线索条件。FP 从 1100 ms 开始, 时间线索条件和中性线索条件的反应时无显著差异。由于 FP、条件和 FP 的交互作用检验结果不满足球形度检验, 因此采用了 Greenhouse Geisser 校正法对结果进行了校正。

**Table 1.** Effects of interval time, cue conditions, and group on average reaction time (ms)  
**表 1.** 间隔时间、线索条件及组别对平均反应时间的影响关系(ms)

FP (ms)	年轻组 - 时间线索	老年组 - 时间线索	年轻组 - 中性线索	老年组 - 中性线索
100	203.30 ± 43.39	321.01 ± 92.67	342.27 ± 36.12	425.24 ± 56.25
200	220.79 ± 27.41	328.03 ± 72.08	320.19 ± 42.92	404.37 ± 54.80
300	223.92 ± 28.47	329.75 ± 66.33	306.15 ± 39.78	392.34 ± 58.30
500	234.33 ± 25.80	334.95 ± 69.37	288.77 ± 34.29	375.16 ± 51.89
800	242.51 ± 27.76	335.20 ± 53.31	276.58 ± 36.74	367.52 ± 60.17
1100	262.81 ± 32.83	353.61 ± 53.18	269.25 ± 37.80	365.71 ± 57.90
1400	263.67 ± 30.46	352.58 ± 53.60	267.27 ± 34.95	355.08 ± 58.10
2000	260.41 ± 35.04	349.29 ± 47.20	265.36 ± 37.40	354.82 ± 50.17
2600	264.03 ± 41.04	351.58 ± 44.04	265.08 ± 34.97	349.35 ± 54.34
3200	260.75 ± 37.09	353.33 ± 48.99	265.44 ± 33.85	349.95 ± 60.55

### 3.2. 正确率(ACC)

在时间线索条件和中性线索条件下, 两组被试在各种可变 FP 下正确率的平均值和标准差见表 2。总体而言, 老年组在时间线索条件与中性线索条件下的正确率( $0.91 \pm 0.05$ ;  $0.97 \pm 0.02$ )与年轻组( $0.89 \pm 0.08$ ;  $0.97 \pm 0.01$ )相当。混合方差分析结果显示: 组别主效应不显著, [ $F(1, 48) = 0.710, p = 0.403, \eta^2p = 0.015$ ]。条件主效应显著, [ $F(1, 48) = 65.798, p < 0.001, \eta^2p = 0.578$ ]; FP 主效应显著, [ $F(1.64, 48) = 9.318, p = 0.001, \eta^2p = 0.163$ ]以及条件和 FP 的交互作用显著, [ $F(2.59, 48) = 41.534, p < 0.001, \eta^2p = 0.464$ ]。组别、线索条件与 FP 的三阶交互作用不显著, [ $F(2.59, 48) = 2.551, p = 0.067, \eta^2p = 0.050$ ]。进一步简单效应分析发现, 当 FP 为 100 ms、200 ms、300 ms、500 ms、800 ms、1400 ms、2600 ms 及 3200 ms 时, 时间线索条件和中性线索条件之间的正确率存在显著差异。

**Table 2.** Average accuracy and standard error (%), calculated under two cue conditions and different FP levels, for the young and elderly groups

**表 2.** 年轻组和老年组在两种线索条件和不同 FP 下的平均正确率和标准差(%)

FP (ms)	年轻组 - 时间线索	老年组 - 时间线索	年轻组 - 中性线索	老年组 - 中性线索
100	73.08 ± 17.55	83.17 ± 16.09	97.42 ± 3.25	98.42 ± 2.19
200	76.33 ± 14.93	84.58 ± 14.35	96.83 ± 4.13	98.17 ± 2.97
300	85.00 ± 11.92	87.75 ± 10.93	97.50 ± 5.03	98.33 ± 1.59
500	92.25 ± 7.50	90.92 ± 7.91	96.92 ± 3.46	98.42 ± 2.19
800	92.17 ± 6.97	94.17 ± 5.83	98.08 ± 4.29	98.42 ± 1.83
1100	94.92 ± 6.37	97.00 ± 2.63	97.17 ± 5.20	97.33 ± 2.72
1400	94.83 ± 6.94	95.50 ± 4.61	97.00 ± 5.11	97.58 ± 2.14
2000	93.92 ± 8.48	95.83 ± 6.13	96.58 ± 5.34	97.08 ± 4.08
2600	93.33 ± 8.92	92.58 ± 19.64	95.83 ± 5.61	93.58 ± 19.86
3200	93.50 ± 9.03	91.42 ± 19.83	96.33 ± 4.86	93.50 ± 19.90

### 3.3. 反效率分数

对两组被试的反效率分数进行混合方差分析(表 3), 结果显示: 组别主效应显著, [ $F(1, 48) = 44.531, p < 0.001, \eta^2p = 0.481$ ], 老年组的反效率分数高于年轻组; 条件主效应显著, [ $F(1, 48) = 25.937, p < 0.001, \eta^2p = 0.351$ ], 中性线索条件的反效率分数高于时间线索条件。FP 主效应显著, [ $F(4.23, 48) = 34.998, p < 0.001, \eta^2p = 0.422$ ]以及条件和 FP 的交互作用显著, [ $F(4, 48) = 15.722, p < 0.001, \eta^2p = 0.247$ ]。组别、线索条件和 FP 之间的相互作用不显著[ $F(4, 48) = 1.246, p = 0.293, \eta^2p = 0.0247$ ]。进一步分析发现, 当 FP 为 100 ms、200 ms、300 ms、500 ms、800 ms 和 3200 ms 时, 时间线索条件和中性线索条件之间的反效率分数存在显著差异( $p < 0.001$ )(表 3)。IES 的结果显示, 在较短 FP 下, 时间线索条件下的反应时显著快于中性线索条件; 在较长的 FP 下(1100 ms 及其以上), 两种线索下的反应时不存在显著差异。在中性线索条件下, 老年组和年轻组的反效率分数呈现相似趋势: 先下降后趋于平稳, 而 FP 在约 1 秒后出现变化。

**Table 3.** Average counter-efficiency scores and standard errors for the young and elderly groups under two cue conditions and different FP levels

**表 3.** 年轻组和老年组在两种线索条件和不同 FP 下的平均反效率分数和标准差

FP (ms)	年轻组 - 时间线索	老年组 - 时间线索	年轻组 - 中性线索	老年组 - 中性线索
100	291.04 ± 81.91	385.43 ± 71.09	352.03 ± 42.13	432.08 ± 56.03
200	300.28 ± 72.19	389.00 ± 57.26	332.37 ± 55.08	412.88 ± 61.33
300	271.43 ± 75.10	375.36 ± 53.07	315.65 ± 51.01	398.94 ± 58.80
500	256.29 ± 42.12	367.62 ± 63.65	298.55 ± 39.24	381.33 ± 52.80
800	265.09 ± 41.20	356.62 ± 55.22	282.99 ± 43.84	373.38 ± 59.79
1100	278.07 ± 39.59	364.77 ± 55.21	278.83 ± 50.82	376.08 ± 60.48
1400	279.89 ± 40.58	369.64 ± 55.64	276.83 ± 44.90	363.85 ± 58.74
2000	280.43 ± 52.85	365.34 ± 49.36	276.21 ± 47.81	365.85 ± 51.32
2600	286.11 ± 55.29	364.64 ± 48.64	277.80 ± 43.60	358.08 ± 54.17
3200	281.85 ± 51.91	371.75 ± 56.90	276.28 ± 39.50	359.07 ± 60.78

## 4. 讨论

本研究采用视觉提示反应时任务, 考察了在有线索提示和无线索提示的时间预测背景下, 可变 FP 对年轻和老年受试者运动准备和反应时的影响。结果发现老年人和年轻人在时间线索下的反应时显著快于中性线索, 表明老年人和年轻人均可受益于目标刺激发生前线索所提供的时间信息。老年人和年轻人在两种线索条件下的表现均受到可变前期效应的影响。这些结果表明, 尽管反应速度较慢, 但老年人的时间预测机制可能仍得以保留。

在接收到时间线索后, 参与者能够实现自上而下的注意力调节, 从而提高运动准备度, 并最终加快对即将到来的目标的反应速度(Mento & Tarantino, 2015)。因此, 时间线索条件下的反应时间比中性线索条件下的反应时间更快。时间线索带来的反应优势至少部分取决于对刺激呈现前视觉线索的有意注意。由于注意定向涉及自上而下系统的加工, 内侧额叶皮层和内侧顶叶区域的脑激活促进了对目标相关信息的预期性偏向(Apolinário-Souza et al., 2022; Xu et al., 2021)。结果表明, 在时间线索条件下, 反应时间先增加, 然后在 1,100 毫秒后达到渐近线。这些结果与之前的研究结果一致(Coull et al., 2016)。基于时间线索任务, 他们发现时间线索条件下的反应时显著快于中性条件, 且在中性条件下, 反应时也随着 FP 的增

加而加快。与中性线索条件相反, 在时间线索条件下, 反应时在最短 FP 时最快(Coull et al., 2016)。反应时随 FP 增加而加快可能是由于较长的 FP 导致时间估计的变异性更大。因此, 即使时间线索的有效性为 100%, 在较长的 FP 内, 对目标出现时间的预测也可能不太准确, 从而导致反应时变慢且变异性更大(Piras & Coull, 2011)。也有研究表明, 在中性线索条件和时间线索条件下反应时均较快, 这与本研究的发现不一致(Mento & Valenza, 2016)。这可能是因为这些研究中仅设置了两个 FP 水平, 且其时长通常足以完成准备过程。这一设置使得目标预测的难度降低, 因此被试通常表现较高的准确率。然而, 本研究中存在 10 个 FP 水平, 导致目标的出现时间较难预测。特别是当 FP 非常短时, 受试者的表现会受到速度-准确率权衡更显著的影响。

在中性线索条件下, 反应时间随着 FP 的增加而减少。有趣的是, 在外部触发的时间预测情境下, 随着 FP 的增加, 时间不确定性对反应时间的影响在 1,100 毫秒后开始消失。同样在中性线索条件下, 随着 FP 的增加, 风险函数对反应时间的益处也在 1,100 毫秒处终止。从大约 1 秒开始, 两种条件下的反应时间逐渐收敛于一条相似的水平线上, 反应时间不再受时间线索和 FP 长度的影响。这一发现与之前的研究一致(Mento & Tarantino, 2015)。这些结果可以用风险函数来解释。当 FP 均匀分布时, 随着 FP 的增加, 目标出现的条件概率也随之增加。一种解释认为, 这种效应取决于事件的条件概率——即在事件尚未发生的情况下, 该事件发生的可能性(Vallesi & Shallice, 2007; Nobre & van Ede, 2018)。条件概率可以描述为时间的函数(风险函数), 当 FP 均匀分布时, 该函数单调递增; 但其他分布可能导致不同的风险函数。另一种解释将可变前期效应解释为记忆激活的结果。多重痕迹理论(Multiple Trace Theory, MTP)提出, 时间准备是联想学习的结果, 每个实验中, 参与者都会经历一个“等待-反应”的过程, 在 FP 阶段需要抑制自己出现过早反应, 而在目标出现的时候需要快速激活反应。这个过程会被大脑存储为一个“记忆痕迹”。当下次开始实验的时候, 大脑就会自动检索之前的痕迹, 并且根据以往的经验来调整准备状态(Salet et al., 2022; Los et al., 2014)。Los 等人(2014, 2017)发现, 即便通过特殊的 FP 分布设计使风险函数保持恒定, 但是参与者的反应时仍然会受到最近几个实验中 FP 的顺序的显著影响。这一结果就表明驱动可变前期效应的不是当前实验内部基于时间概率的推理, 而是过去经验积累的联想学习。基于这个现象, 他们提出了形式化多痕迹理论(fMTP)。这个理论可以解释两个现象, 一是整个实验中 FP 的整体分布对反应产生的长期影响, 二是 FP 顺序对反应的短期影响(本实验设计了 10 个 FP 水平恰好产生了丰富的顺序变化, 可以用来检验这一预测)。两种效应都源于同一种联想学习机制。无论采用何种解释, 可变前期效应都反映了先前 FP 的分布如何调节时间预期。

以往的研究发现了不同线索条件下可变 FP 对反应时的影响, 但其选取的可变 FP 数量较少, 无法确定不同时间背景下反应时的动态变化。本研究将 FP 的个数增加到 10 个, 探究在外部驱动与内部驱动的时间预测背景下, 反应时受风险函数影响的时间点及其发展趋势。

本研究发现, 在时间线索条件和中性线索条件下, 老年人的反应时显著大于年轻人, 这和以往很多研究发现的老年人具有更慢的反应时是一致的(Loehrer et al., 2021; Seidler et al., 2010)。这可能和老年人认知功能的老化以及较低的运动准备效率相关。虽然老年人整体的表现较差, 但是其仍然可以有效的整合内部和外部的时间信息, 优化反应表现。和年轻人一样, 老年人在有线索提示的时间预测下, 其表现要好于没有线索提示的时间预测。时间线索的确能提高老年人对时间可预测目标的反应速度和准确性, 这和前人的研究结果是一致的(Chauvin et al., 2016)。在中性线索条件下, 老年组的反应时间受 FP 影响, 同年轻组一样, 随着 FP 长度的增加反应时逐渐变快, 表明老年人在维持最佳状态方面并未存在障碍(Droit-Volet et al., 2019; Gallego Hiroyasu & Yotsumoto, 2020)。老年人保留了更优的时间预测机制, 这可能与老年人大脑中的代偿机制有关(Cabeza, 2002; Cabeza et al., 2018; Rosjat et al., 2018)。当然, 也有研究者得出了相反的研究结果, 比如之前的研究发现只有在不可预测的刺激上, 老年人的反应时显著大于年轻人。

一方面可能是因为实验任务的模态不一致, 另一方面也可能是因为本研究中采用了数量较多的可变 FP, 在时间处理上难度加大, 而任务难度的增加也可能会扩大年龄(Gallego Hiroyasu & Yotsumoto, 2020; Johari et al., 2019)。

根据表 1 对比两组在各种 FP 下平均反应时的变化趋势发现, 相比于中性线索条件, 年轻组和老年组在时间线索条件中的反应时差异更大。这可能是因为基于外部驱动的时间预测和老年人的注意、记忆等认知功能之间的关系更大(Capizzi et al., 2022)。在外部驱动的时间预测任务中, 低认知能力与老年人对时间判断变异性的增加直接相关。相比之下, 在内部驱动的时间预测任务中, 受风险函数影响的反应时分布则与认知得分的个体间差异无关(Droit-Volet et al., 2019)。因为内部驱动的时间预测任务在认知控制功能方面的需求较少, 即与要求更高的外部驱动的时间预测任务相比, 没有要求注意时间或记忆准备间隔的时间长短。这种观点也得到了来自病理老年人群研究的支持。例如, 与年龄匹配的对照组相比, 存在严重认知缺陷的阿尔茨海默氏病(AD)患者在外驱动的时间预测任务上表现更差(El Haj & Kapogiannis, 2016)。因此, 虽然老年人保留了较好的内部驱动和外部驱动的时间预测能力, 但是外部驱动的时间预测能力可能对老化更敏感(Capizzi et al., 2022; Najberg et al., 2021)。

本研究仍存在若干局限。首先, 由于设置了十个 FP 水平, 实验中采用数字形式的具体时长作为时间提示线索。而在典型的时间提示范式中, 线索所提供的信息通常具有符号性(例如通过两种颜色或形状中的一种提示短间隔时间, 另一种提示长间隔时间)。这一设计可能引入了额外的认知加工负荷。数字提示不仅传达时间信息, 而且还会涉及到数字识别、语义提取以及工作记忆维持等加工过程。当处理语义时间信息时, 被试需调用语义记忆系统, 这一过程可能耗费额外的认知加工时间(Correa et al., 2006a, 2006b)。关于线索透明度的研究表明, 线索和任务之间的关系越直接, 那么准备过程越高效, 但是当提示线索需要额外转换的时候, 准备需求就会显著增加(Berger & Kiefer, 2026)。这个现象对于老年人来说尤其明显, 在需要同时利用语义信息和时间信息的情景中, 老年人会表现出显著的认知资源限制(Baudouin et al., 2006)。这就意味着本研究中我们观察到的年龄组之间存在的差异可能部分反映出了老年人在处理语义信息和时间信息时工作记忆方面存在的困难, 而不仅仅是时间预测能力导致的差异。但由于本研究主要关注不同情境与不同 FP 条件下老化对时间预测的影响, 该差异不影响主要研究结论。未来研究可采用符号性线索(如不同颜色和形状)来代替数字信息, 以此来分离时间准备过程和语义加工过程, 能够更加纯粹的分析时间预测的老化效应。

其次, 本研究中老年组的平均年龄为 65 岁。老年群体的时间预测机制可能已发生改变, 后续研究可对此进行深入探讨。

最后, 由于本研究未纳入任何电生理学及神经影像学测量指标, 关于外部驱动与内部驱动时间处理涉及的脑区仍属推测性结论, 需进一步研究以阐明时间预测中与年龄相关的神经机制基础。需要强调的是, 本研究中关于神经机制的讨论, 如内外源时间预测以及内侧额叶皮层、内侧顶叶区域以及代偿机制的作用, 主要是基于已有文献的推测, 并非是本研究的直接测量结果。这些推测为理解时间预测的认知神经基础提供了可以进行检验的方向, 后续研究可以结合脑电或者神经影像技术对这些假设进行验证。

## 5. 结论

综上所述, 本研究采用了时间线索反应时任务, 基于不同的时间预测类型和可变前期效应, 探讨了不同时间预测类型背景下的老化进程。结果发现, 虽然老年人总体的表现差于年轻人, 但是老年人在时间预测能力上和年轻人有相当的表现, 并未出现明显损伤。在基于外部驱动的时间预测任务上, 老年人和年轻人都可以从时间线索中受益从而优化反应表现。在没有外部时间信息的时候, 老年人和年轻人一样, 也可以根据风险函数评估将要出现的刺激的时间。老年人和年轻人的外部、内部的时间预测均受到

可变前期效应的影响。在较短的时间间隔的情况下,老年人和年轻人可受益于外部的时间信息;在较长的时间间隔的情况下,两种线索条件下的反应时逐渐趋于一致,反应时将不再受时间线索和FP长短的影响。

## 基金项目

本研究获得教育部人文社会科学规划一般项目资助(项目号:20YJC190014)。

## 参考文献

- Apolinário-Souza, T., Parma, J. O., Carvalho, V. R., Albuquerque, M. R., Lage, G. M., & Fernandes, L. A. (2022). Electrocortical Activity Prior to Predictable and Unpredictable Stimuli Requiring a Motor Response. *Brazilian Journal of Motor Behavior*, *16*, 240-253. <https://doi.org/10.20338/bjmb.v16i3.299>
- Baudouin, A., Vanneste, S., Pouthas, V., & Isingrini, M. (2006). Age-Related Changes in Duration Reproduction: Involvement of Working Memory Processes. *Brain and Cognition*, *62*, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.03.003>
- Beck, A. T., Ward, C. H., Mendelson, M. et al. (1961). An Inventory for Measuring Depression. *Archives of General Psychiatry*, *4*, 561-571.
- Berger, A., & Kiefer, M. (2026). Task Cue Transparency Shapes Cognitive and Visual Demands in Task Preparation. *Cognitive Processing*, *37*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10339-026-01331-x>
- Bruyer, R., & Brysbaert, M. (2011). Combining Speed and Accuracy in Cognitive Psychology: Is the Inverse Efficiency Score a Better Dependent Variable than the Mean Reaction Time and the Percentage of Errors. *Psychologica Belgica*, *51*, 5-13. <https://doi.org/10.5334/pb-51-1-5>
- Cabeza, R. (2002). Hemispheric Asymmetry Reduction in Older Adults: The HAROLD Model. *Psychology and Aging*, *17*, 85-100. <https://doi.org/10.1037/0882-7974.17.1.85>
- Cabeza, R., Albert, M., Belleville, S., Craik, F. I. M., Duarte, A., Grady, C. L. et al. (2018). Maintenance, Reserve and Compensation: The Cognitive Neuroscience of Healthy Ageing. *Nature Reviews Neuroscience*, *19*, 701-710. <https://doi.org/10.1038/s41583-018-0068-2>
- Capizzi, M., Visalli, A., Faralli, A., & Mioni, G. (2022). Explicit and Implicit Timing in Older Adults: Dissociable Associations with Age and Cognitive Decline. *PLOS ONE*, *17*, e0264999. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264999>
- Chauvin, J. J., Gillebert, C. R., Rohenkohl, G., Humphreys, G. W., & Nobre, A. C. (2016). Temporal Orienting of Attention Can Be Preserved in Normal Aging. *Psychology and Aging*, *31*, 442-455. <https://doi.org/10.1037/pag0000105>
- Correa, Á., Lupiáñez, J., & Tudela, P. (2005). Attentional Preparation Based on Temporal Expectancy Modulates Processing at the Perceptual Level. *Psychonomic Bulletin & Review*, *12*, 328-334. <https://doi.org/10.3758/bf03196380>
- Correa, A., Lupiáñez, J., & Tudela, P. (2006a). The Attentional Mechanism of Temporal Orienting: Determinants and Attributes. *Experimental Brain Research*, *169*, 58-68. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0131-x>
- Correa, A., Sanabria, D., Spence, C. et al. (2006b). Selective Temporal Attention Enhances the Temporal Resolution of Visual Perception. *Experimental Brain Research*, *169*, 58-68. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0131-x>
- Coull, J. T. (2009). Neural Substrates of Mounting Temporal Expectation. *PLOS Biology*, *7*, e1000166. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000166>
- Coull, J. T., Cotti, J., & Vidal, F. (2016). Differential Roles for Parietal and Frontal Cortices in Fixed versus Evolving Temporal Expectations. *NeuroImage*, *141*, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.07.036>
- Davranche, K., Nazarian, B., Vidal, F., & Coull, J. (2011). Orienting Attention in Time Activates Left Intraparietal Sulcus for Both Perceptual and Motor Task Goals. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*, 3318-3330. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00030](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00030)
- Droit-Volet, S., Lorandi, F., & Coull, J. T. (2019). Explicit and Implicit Timing in Aging. *Acta Psychologica*, *193*, 180-189. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.01.004>
- Duma, G. M., Mento, G., Manari, T., Martinelli, M., & Tressoldi, P. (2017). Driving with Intuition: A Preregistered Study about the EEG Anticipation of Simulated Random Car Accidents. *PLOS ONE*, *12*, e0170370. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170370>
- El Haj, M., & Kapogiannis, D. (2016). Time Distortions in Alzheimer's Disease: A Systematic Review and Theoretical Integration. *npj Aging and Mechanisms of Disease*, *2*, Article No. 16016. <https://doi.org/10.1038/npjamd.2016.16>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A., & Buchner, A. (2007). G\*Power 3: A Flexible Statistical Power Analysis Program for the Social, Behavioral, and Biomedical Sciences. *Behavior Research Methods*, *39*, 175-191.

- <https://doi.org/10.3758/bf03193146>
- Fechner, H. B., Pachur, T., & Schooler, L. J. (2019). How Does Aging Impact Decision Making? The Contribution of Cognitive Decline and Strategic Compensation Revealed in a Cognitive Architecture. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *45*, 1634-1663. <https://doi.org/10.1037/xlm0000661>
- Folstein, M. F., Folstein, S. E., & McHugh, P. R. (1975). Mini-Mental State: A Practical Method for Grading the Cognitive State of Patients for the Clinician. *Journal of Psychiatric Research*, *12*, 189-198. [https://doi.org/10.1016/0022-3956\(75\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0022-3956(75)90026-6)
- Gallego Hiroyasu, E. M., & Yotsumoto, Y. (2020). Older Adults Preserve Accuracy but Not Precision in Explicit and Implicit Rhythmic Timing. *PLOS ONE*, *15*, e0240863. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240863>
- Gibbon, J. (1977). Scalar Expectancy Theory and Weber's Law in Animal Timing. *Psychological Review*, *84*, 279-325. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.84.3.279>
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Scalar Timing in Memory. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *423*, 52-77. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23417.x>
- Johari, K., den Ouden, D. B., & Behroozmand, R. (2019). Behavioral and Neural Correlates of Normal Aging Effects on Motor Preparatory Mechanisms of Speech Production and Limb Movement. *Experimental Brain Research*, *237*, 1759-1772. <https://doi.org/10.1007/s00221-019-05549-4>
- Karlin, L. (1959). Reaction Time as a Function of Foreperiod Duration and Variability. *Journal of Experimental Psychology*, *58*, 185-191. <https://doi.org/10.1037/h0049152>
- Loehrer, P. A., Nettersheim, F. S., Oehr, C. R., Homberg, F., Tittgemeyer, M., Timmermann, L. et al. (2021). Increased Prefrontal Top-Down Control in Older Adults Predicts Motor Performance and Age-Group Association. *NeuroImage*, *240*, Article 118383. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118383>
- Los, S. A., Kruijine, W., & Meeter, M. (2014). Outlines of a Multiple Trace Theory of Temporal Preparation. *Frontiers in Psychology*, *5*, Article 1058. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.01058>
- Los, S. A., Kruijine, W., & Meeter, M. (2017). Hazard versus History: Temporal Preparation Is Driven by Past Experience. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *43*, 78-88. <https://doi.org/10.1037/xhp0000279>
- Mento, G., & Tarantino, V. (2015). Developmental Trajectories of Internally and Externally Driven Temporal Prediction. *PLOS ONE*, *10*, e0135098. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135098>
- Mento, G., & Valenza, E. (2016). Spatiotemporal Neurodynamics of Automatic Temporal Expectancy in 9-Month Old Infants. *Scientific Reports*, *6*, Article No. 36525. <https://doi.org/10.1038/srep36525>
- Najberg, H., Wachtl, L., Anziano, M., Mouthon, M., & Spierer, L. (2021). Aging Modulates Prefrontal Plasticity Induced by Executive Control Training. *Cerebral Cortex*, *31*, 809-825. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhaa259>
- Niemi, P., & Näätänen, R. (1981). Foreperiod and Simple Reaction Time. *Psychological Bulletin*, *89*, 133-162. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.89.1.133>
- Nobre, A. C., & van Ede, F. (2018). Anticipated Moments: Temporal Structure in Attention. *Nature Reviews Neuroscience*, *19*, 34-48. <https://doi.org/10.1038/nrn.2017.141>
- Nobre, A., Correa, A., & Coull, J. (2007). The Hazards of Time. *Current Opinion in Neurobiology*, *17*, 465-470. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.07.006>
- Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The Attention System of the Human Brain: 20 Years after. *Annual Review of Neuroscience*, *35*, 73-89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- Piras, F., & Coull, J. T. (2011). Implicit, Predictive Timing Draws Upon the Same Scalar Representation of Time as Explicit Timing. *PLOS ONE*, *6*, e18203. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018203>
- Rosjat, N., Liu, L., Wang, B. A., Popovych, S., Tóth, T., Viswanathan, S. et al. (2018). Aging-Associated Changes of Movement-Related Functional Connectivity in the Human Brain. *Neuropsychologia*, *117*, 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.07.006>
- Salet, J. M., Kruijine, W., van Rijn, H., Los, S. A., & Meeter, M. (2022). FMTP: A Unifying Computational Framework of Temporal Preparation across Time Scales. *Psychological Review*, *129*, 911-948. <https://doi.org/10.1037/rev0000356>
- Seidler, R. D., Bernard, J. A., Burutolu, T. B., Fling, B. W., Gordon, M. T., Gwin, J. T. et al. (2010). Motor Control and Aging: Links to Age-Related Brain Structural, Functional, and Biochemical Effects. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *34*, 721-733. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.10.005>
- Statsenko, Y., Habuza, T., van Gorkom, K. N. et al. (2020). Applying the Inverse Efficiency Score to Visual-Motor Task for Studying Speed-Accuracy Performance While Aging. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *12*, Article 574401. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.574401>
- Tandonnet, C., Burle, B., Vidal, F., & Hasbroucq, T. (2003). The Influence of Time Preparation on Motor Processes Assessed

- 
- by Surface Laplacian Estimation. *Clinical Neurophysiology*, 114, 2376-2384. [https://doi.org/10.1016/s1388-2457\(03\)00253-0](https://doi.org/10.1016/s1388-2457(03)00253-0)
- Tona, K., Murphy, P. R., Brown, S. B. R. E., & Nieuwenhuis, S. (2016). The Accessory Stimulus Effect Is Mediated by Phasic Arousal: A Pupillometry Study. *Psychophysiology*, 53, 1108-1113. <https://doi.org/10.1111/psyp.12653>
- Tzagarakis, C., Ince, N. F., Leuthold, A. C., & Pellizzer, G. (2010). Beta-Band Activity during Motor Planning Reflects Response Uncertainty. *The Journal of Neuroscience*, 30, 11270-11277. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.6026-09.2010>
- Vallesi, A., & Shallice, T. (2007). Developmental Dissociations of Preparation over Time: Deconstructing the Variable Foreperiod Phenomena. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33, 1377-1388. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.6.1377>
- Xu, Z., Ren, Y., Guo, T., Wang, A., Nakao, T., Ejima, Y. et al. (2021). Temporal Expectation Driven by Rhythmic Cues Compared to That Driven by Symbolic Cues Provides a More Precise Attentional Focus in Time. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 83, 308-314. <https://doi.org/10.3758/s13414-020-02168-y>
- Zanto, T. P., Pan, P., Liu, H., Bollinger, J., Nobre, A. C., & Gazzaley, A. (2011). Age-Related Changes in Orienting Attention in Time. *The Journal of Neuroscience*, 31, 12461-12470. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.1149-11.2011>