

类别和语义距离调节预期对记忆的影响*

代矫剑¹ 孙明泽³ 王东方³ 毛新瑞² 郭春彦¹

(¹首都师范大学心理学院, 北京市“学习与认知”重点实验室; ²首都师范大学初等教育学院, 北京 100048)

(³华南师范大学心理学院/华南师范大学心理应用研究中心, 广州 510631)

摘要 人类经常需要根据当前的情景做出预测, 以指导后续的行为。然而, 目前研究者关于可预测和不可预测的记忆表现孰好孰坏争论不休。在本研究中(实验 1: 项目再认; 实验 2: 联结再认), 我们通过类别和语义距离操纵预期, 考察了不同预期程度下的记忆表现。两个实验一致表明, 在学习阶段, 参与者加工符合类别规则的项目时正确率更高, 反应时更短。实验 2 发现, 语义距离越近, P600 (语义整合的 ERP 指标)越正。两个实验中, 多变量模式分析表明不同条件下的神经表征存在显著差异。两个实验均发现, 随着类别规则的违反和语义距离的增加, 学习阶段 N400 (预测程度的 ERP 指标)的波幅变得更负, 测验阶段的记忆表现变得更差。此外, 学习阶段的 N400 可以显著预测记忆表现。这些结果表明, 类别和语义距离通过不同的机制调节预期对记忆的影响: 类别通过调节编码负担影响记忆, 而语义距离通过调节语义整合影响记忆。这些发现为解决可预测与不可预测项目在记忆表现上的争论提供了新的视角。

关键词 类别规则, 语义距离, 预期, 再认, EEG

分类号 B842

1 引言

人类经常需要根据当前的情景做出预测, 以指导后续的行为(Bar, 2007, 2009)。然而, 人类并不是天生的预言家, 我们需要不断从过去的预期经历中进行学习来提高预测能力。所以理解不同预期情况下的记忆表现至关重要。目前, 研究者们对于预期究竟会提高还是降低记忆表现这一问题争论不休。在本研究中, 我们使用脑电技术探讨了不同预期程度下的记忆表现。

一些研究发现, 如果在学习过程中可以根据语义背景对学习材料进行预测, 那么可以获得更好的记忆表现(Craik & Tulving, 1975; Kutas, 1993; Schulman, 1974; Silcox et al., 2023)。例如, Schulman (1974)通过类别操纵预期, 研究了可预测和不可预测项目的记忆表现。作者向参与者呈现了符合预期的事件(例如, “is a corkscrew an opener (开酒瓶器是一种开瓶器吗?)”)和不符合预期的事件(例如, “is

a corkscrew a scholar (开酒瓶器是学者吗?)”), 结果发现, 符合预期的项目的记忆表现更好。之后, Silcox 等人(2023)通过操纵类别和语义距离, 研究了预期的 ERP 指标(即 N400, DeLong et al., 2005; Federmeier et al., 2007; Kutas & Hillyard, 1984)和记忆表现之间的关系。作者在学习阶段使用 TMS (transcranial magnetic stimulation)刺激了左侧下额叶皮层(left inferior frontal cortex, 简称 LIFC), 这是言语生成网络的中心(Bonhage et al., 2015; Giglio et al., 2022; Menenti et al., 2011; Silbert et al., 2014)。另外, 他们刺激了右侧下额叶皮层(right inferior frontal cortex, 简称 RIFC)作为对照条件。在进行记忆测试时, 不对任何脑区施加刺激。结果发现, 无论刺激哪个脑区, 学习阶段 N400 的波幅在三种条件下(高典型: 花——玫瑰, 低典型性: 花——罂粟和不一致: 花——歌剧)依次变负。这表明目标词的可预测性逐渐降低。当刺激 RIFC 时, 三种条件下的记忆表现依次下降。当刺激 LIFC 时, 高

收稿日期: 2025-02-25

* 国家自然科学基金资助项目(31671127)。

通信作者: 毛新瑞, E-mail: maixinrui.123@163.com; 郭春彦, E-mail: guocy@cnu.edu.cn

典型条件下的记忆表现下降到了低典型水平,但是高典型和低典型的记忆表现仍显著高于不一致条件。这些发现表明类别和语义距离均会对记忆产生影响。然而,目前还不清楚这两个因素是通过什么机制影响记忆表现的。

另一些研究发现,不符合预期的学习材料的记忆表现更好(Frank et al., 2020; Kafkas & Montaldi, 2015; Rajaram, 1998; Nyberg, 2005)。例如, Rajaram (1998)发现,当“bank (银行)”处在不符合预期的情境中(如“river (河流)”)时,它的记忆表现要好于处在符合预期的情境(如“money (金钱)”)。Kuperberg 等人(2003)发现,异常项目(例如,“eggs (鸡蛋)”在“*For breakfast the eggs would only eat toast and jam (鸡蛋的早餐只吃烤面包和果酱)*”)会诱发更正的 P600。作者认为,这可能反映了大脑处理异常项目时在努力进行修复或整合。与 Kuperberg 等人(2003)的研究结果类似, Schotter 等人(2023)发现,与符合预期的项目相比,异常项目诱发了更正的 LPC。这表明,读者花费了更大的努力将异常目标词的意义整合到语义背景中¹。总之,这些研究表明,与可预测的项目相比,异常(或不可预测)项目在 N400 时程之后会诱发更正的 ERP 活动,这反映了参与者对其进行的整合加工。然而,作者(Kuperberg et al., 2003; Schotter et al., 2023)并未研究 P600 和记忆表现之间的关系。

本研究旨在比较不同预期程度下的记忆表现,同时测量记忆编码的神经过程。在本研究中,我们通过类别和语义距离对预期进行操纵。具体而言,我们设置了三个条件:类别(category)内和近语义距离(semantic distance) (简称“C+S+”)、类别外和近语义距离(简称“C-S+”)以及类别外和远语义距离(简称“C-S-”)。在 C+S+条件下,词对符合类别规则且语义距离很近(例如,家具:沙发,因为沙发属于家具),参与者可以有效预测即将出现的目标词(沙发)。在 C-S+条件下,词对违反类别规则但语义距离很近(如家具:装修)。在这种设置下,虽然目标词不属于该类别,但词对之间的语义距离很近。在 C-S-条件下,词对违反类别规则且语义距离很远(如家具:阶段)。本研究与之前的研究(Federmeier et al., 2010; Ryskin et al., 2020; Silcox et al., 2023)在条

件设置上存在一些差异。具体而言,在 Silcox 等人(2023)的研究中,语义背景是“flower (花)”,高预期条件下的目标词是“rose (玫瑰)”,低预期条件下的目标词是“poppy (罂粟)”,不一致条件下的目标词是“opera (歌剧)”。Silcox 等人(2023)研究中高预期条件与本研究中的 C+S+条件相似,不一致条件与 C-S-条件相似,低预期条件与 C-S+条件存在差异。在低预期条件下(Silcox et al., 2023),目标词(罂粟)属于花,但其典型性较低(即 C+S-)。换句话说,它与花的语义距离较远。与此相反,在本研究的 C-S+条件下,目标词(装修)不是家具,但在语义距离上与“家具”相近。

本研究这样设计的目的是在严格控制类别和语义距离的基础上探究预期对记忆的影响。具体来说,以往的研究通过比较三种条件:高典型、低典型和不一致(Federmeier et al., 2010; Ryskin et al., 2020; Silcox et al., 2023),比较了不同预期程度下的编码差异和记忆表现。我们认为有两个因素在预期影响记忆的过程中起到了关键作用——类别和语义距离。具体而言,以往研究中发现的 N400 分级效应可以从三个方面来解释。一是类别典型性的依次降低,二是语义距离的依次变远,三是类别和语义距离的混合影响。这使得解释预期对记忆的影响时无法明确类别和语义距离的独特机制。在本研究中,通过对 C+S+和 C-S+条件的比较,我们可以在控制语义距离的情况下研究类别对记忆的影响。通过 C-S+和 C-S-条件之间的比较,我们可以在控制类别的同时研究语义距离对记忆的影响。这有助于明确预期的不同方面对记忆的影响。

基于以往的研究,我们假设:(1)在 C+S+、C-S+和 C-S-条件下,N400 的波幅依次变负。这是因为在 C+S+、C-S+和 C-S-条件下目标词的可预测性依次下降,而 N400 是可预测性的指标。(2)在 C-S-条件下,P600 的波幅最正。这是因为该条件下的词对不符合类别规则,并且语义距离较远,整合难度最大。为了提供多角度的证据,我们使用机器学习作为单变量分析的补充。机器学习是区分不同条件下神经表征的有效方法(Haxby et al., 2001)。它使用一部分数据训练分类器,然后在剩余数据上进行测试(Treder, 2020)。另外,我们还进行了时间泛化分析。时间泛化是指在某一时刻点训练分类器,然后在所有时刻点进行测试。这样可以研究不同条件下神经表征的稳定性(King & Dehaene, 2014)。

¹ 虽然这两项研究(Kuperberg et al., 2003; Schotter et al., 2023)的作者对异常项目诱发的正偏转活动命名不同,但它们都是 N400 时程之后位于顶叶的 ERP 活动。作者也都认为,两者(P600 和 LPC)反映了参与者在花费更大的努力对异常项目进行整合加工。因此,在本文中,我们将它们统称为 P600。

2 实验 1: 类别和语义距离调节预期对项目再认的影响

2.1 方法

2.1.1 参与者

根据 Elmer 等人(2022)实验中效应量($\eta_p^2 = 0.114$)进行的分析表明, 22 个样本足以以 95% 的统计检验力($\alpha = 0.05$)研究预期对记忆的影响。实验 1 招募了 28 名年龄在 18~25 岁之间的在读本科生和硕士生(平均年龄 22 岁, 包括 18 名女性和 10 名男性, 母语是汉语)。本研究获得了心理研究伦理委员会的批准, 参与者在实验前签署了知情同意书, 并获得了参与实验的报酬。所有参与者均为右利手, 视力正常或矫正正常, 无精神疾病。整个实验时长约 90 分钟。

2.1.2 实验材料

学习阶段的实验材料由两个词对组成(例如, “水果: 香蕉::家具: 沙发”) (赵鸣 等, 2012)。每个词对中的第二个词都属于第一个词。例如, “香蕉”属于“水果”, “沙发”属于“家具”。“水果: 香蕉”为每个试次提供了语义背景, 指示参与者需要判断接下来呈现的词对之间的关系。词对 1 和词对 2 之间这种关系一致的作为 C+S+条件。

另外, 本研究还包括 C-S+和 C-S-两种条件。在 C-S+条件下, 我们选择了“水果: 香蕉::家具: 装修”作为实验材料。在此条件下, “装修”不属于“家具”, 但它们的语义距离很近。在 C-S-条件下, 我们选择了“水果: 香蕉::家具: 阶段”作为实验材料。在此条件下, “阶段”不属于“家具”, 并且两者之间的语义距离很远。

本研究使用的实验材料首先由两名主试从名词库中进行挑选。然后由 12 名不参加正式实验的参与者对实验材料进行评分。他们从可接受性、语义距离和熟悉性三个方面对实验材料进行评分。可接受性是指参与者认为后一个词在多大程度上属于前一个词(1: 完全不接受; 9: 完全接受)。为确保较高的可接受性, C+S+条件下的实验材料评分均高于 7.0, 而 C-S+和 C-S-条件下的实验材料评分均低于 3.0。参与者对词对内的语义距离进行了评分: $M(C+S+) = 8.10, SE = 0.13$; $M(C-S+) = 7.87, SE = 0.16$; $M(C-S-) = 1.23, SE = 0.03$ 。结果表明, C+S+和 C-S+条件下语义距离的分数没有显著差异, $t(11) = 2.31, p = 0.123$, 但都显著高于 C-S-条件(C+S+ vs C-S-: $t(11) = 51.80, p < 0.001, Cohen's d = 14.95$; C-S+ vs C-S-: $t(11) = 42.36, p < 0.001,$

$Cohen's d = 12.23$)。参与者对每个词语的熟悉性进行了评分, 不同条件下的熟悉性没有显著差异, $F(2, 22) = 0.93, p = 0.411$ 。这避免了不同条件下实验材料熟悉性差异对记忆测验的影响。最终, 符合要求的词对一共有 336 对(每个条件下 112 对, 不包括学习阶段填充试次中使用的词对)。

2.1.3 实验流程

参与者在间隔音, 照明良好的房间内完成整个实验。他们被要求保持一个舒适的姿势, 身体保持静止。电脑屏幕距离参与者 100 厘米。实验中的所有刺激均在黑色背景上以白色呈现。整个实验由学习阶段和测验阶段组成。

在学习阶段, 刺激的呈现方式参照赵鸣等人(2012)的研究。在正式实验之前, 参与者首先完成了一个练习 Block 以熟悉实验流程。练习 Block 与正式实验完全相同。首先, 屏幕中央出现一个中央注视点(1400~1600 ms)。紧接着, 词对 1 (例如, “水果: 香蕉”, $6.8^\circ \times 1.3^\circ$)呈现 1000 ms。然后, 启动词(词对 2 的第一个词, 如“家具: ”; $3.1^\circ \times 1.3^\circ$)呈现 1500 ms。最后, 目标词(词对 2 的第二个词, 如“沙发”; $2.6^\circ \times 1.3^\circ$)呈现 2000 ms。相邻两个刺激之间由一个 300~500 ms 的 jitter 隔开。当目标词呈现时, 参与者需要通过按键对当前序列做出反应。他们被提前告知: “如果你认为目标词属于启动词, 请按‘1’; 如果你认为目标词不属于启动词, 但两者之间的语义距离很近, 请按‘2’; 如果你认为目标词不属于启动词, 并且两者之间的语义距离很远, 请按‘3’”²。按键顺序在不同参与者间进行平衡, 不同条件下的试次随机呈现。为了尽量减少首因效应和近因效应的影响, 每个学习 Block 在开始和结束都有两个试次作为填充试次, 这些试次不包括在正式的分析中。参与者一共需要完成 6 个 3 分钟的学习 Block, 每个 Block 包括 8 个 C+S+试次、8 个 C-S+试次和 8 个 C-S-试次。参与者完成所有学习 Block 后进行惊喜记忆测验(见图 1A)。

在测验阶段, 参与者首先完成一个和正式实验完全相同的练习 Block 以熟悉实验流程。首先, 屏幕中央出现一个中央注视点(900~1300 ms)。随后,

² 为了与全文术语保持一致, 指导语介绍部分使用了“启动词”“目标词”等术语。在正式实验时, 这些词语被“词对 2 的第一个词”“词对 2 的第二个词”所代替, 确保参与者正确理解实验任务。

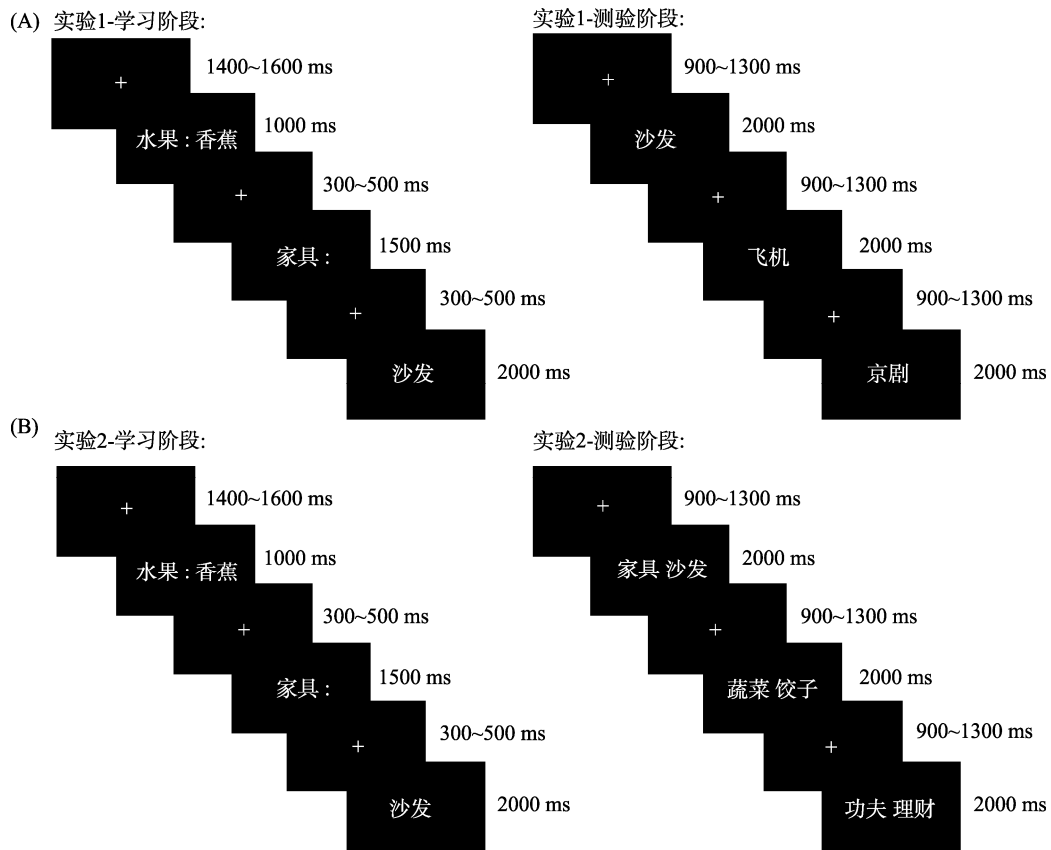


图 1 正式实验的流程图。(A)实验 1 学习和测验阶段的流程图。(B)实验 2 学习和测验阶段的流程图。

学习阶段的目标词(旧词)或学习阶段未出现的词(新词)出现在屏幕中央。参与者通过 6 点评分对呈现的词语进行判断(1: 肯定没学过; 2: 可能没学过; 3: 猜测没学过; 4: 猜测学过; 5: 可能学过; 6: 肯定学过)。“肯定”“可能”“猜测”表示参与者对自己判断的自信心的不同程度。新旧词语以 1:1 的比例随机呈现, 按键顺序在不同参与者之间进行平衡。参与者一共完成了 6 个 3 分钟的 Block, 每个 Block 由 24 个旧词和 24 个新词组成(见图 1A)。第 1 个测验 Block 中的旧词全部来自第 1 个学习 Block, 第 2 个测验 Block 中的旧词全部来自第 2 个学习 Block, 以此类推。

2.1.4 脑电记录和分析

本实验采用 Neuroscan 公司生产的 ESI-64 导脑电记录系统记录相应 EEG。电极帽采用国际 10-20 扩展电极位置系统的 Ag/AgCl 电极帽。数据采集时左侧乳突处电极为参考电极, 右侧乳突处电极为记录电极, 当离线数据分析时采用双侧乳突的平均值做为参考。左眼眶上下的 2 个电极进行垂直眼电(VEOG)的记录, 两侧外眼角处的 2 个电极进行水平眼电(HEOG)的记录, 接地电极位于 Fpz 和 Fz 之间。脑电信号的采样频率为 500 Hz, 记录 EEG 时

每个电极与头皮之间的电阻均小于 5 k Ω 。

我们使用基于 Matlab 的 eeglab (Delorme & Makeig, 2004)对 EEG 数据进行预处理。首先, 对 EEG 数据进行 0.1 Hz 到 40 Hz 的带通滤波, 然后使用左右乳突的平均值进行重参考。通过独立成分分析(ICA)识别与眨眼和水平眼跳有关的成分, 这些成分被人工去除。以目标词呈现前 200 ms (作为基线)和呈现时 1000 ms 进行分段, 删除在任一时刻和电极上波幅超过 $\pm 75 \mu\text{V}$ 的试次。最后, 每种条件下有效试次的平均数(范围)分别为: C+S+条件下 43.5 (25~48), C-S+条件下 43.0 (25~48), C-S-条件下 43.2 (21~48)。

ERP 分析: 根据以往的研究和对总 ERP 波形的观察, 我们选择了 3 个时间窗对学习阶段的 EEG 数据进行统计检验。(1)计算 300~500 ms 内 ERP 波幅的平均值以获得 N400 成分; (2)计算 500~700 ms 内 ERP 波幅的平均值以获得早期 P600 成分; (3)计算 700~1000 ms 内 ERP 波幅的平均值以获得晚期 P600 成分。分别计算额区(F1、Fz、F2)、中央区(C1、Cz、C2)和顶区(P1、Pz、P2)电极的平均值, 以获得相应脑区的 ERP 成分。例如, 顶区的 N400 成分是 P1、Pz 和 P2 三个电极在 300~500 ms 内波幅的平

均值。在所有分析中,当数据不符合球形假设时,采用 Greenhouse-Geisser 法进行校正;事后检验或简单效应分析通过配对样本 t 检验进行,涉及多重比较时,采用 Bonferroni 法进行校正。

EEG 解码: 使用基于 Matlab 的 MVPA-light 工具箱(Treder, 2020)对 EEG 数据进行解码分析。LDA (Linear Discriminant Analysis)用于区分不同条件下的 EEG 数据。我们使用经过预处理的 EEG 数据进行解码分析,这些数据不包括眼电电极(VEOG 和 HEOG)和参考电极(M1、M2)。在正式分析之前,为减少计算量,我们将 EEG 数据降采样至 250 Hz。为保证不同条件下的试次数相等,每次解码分析都采用随机抽样的方式平衡试次数。我们还将 EEG 数据转换为 z 分数,以提高模型的表现和稳定性。为了提高信噪比,我们随机将 5 个试次平均为 1 个试次,直至剩余试次数小于 5。在 EEG 解码过程中,我们将数据随机分为 3 部分,其中两部分数据用于训练模型,剩余数据用于测试模型。重复这一过程 3 次,因此每一部分数据都被用作测试数据。这一交叉验证过程一共重复了 10 次。

解码完成后,对解码正确率进行基于聚类的置换检验,以找出显著高于几率水平(几率水平 = 33.33%, $\alpha = 0.05$, 置换次数=1000)的时间点。

回归分析: 为了更直接地研究学习阶段的 ERP 成分与后续记忆表现之间的关系,我们进行了回归分析。我们计算了每名参与者的 ERP 成分(N400、早期 P600、晚期 P600)和记忆表现(Pr)之间的回归系数。因此,对于每个 ERP 成分,每名参与者都有 3 个 ERP 值和 3 个行为值。ERP 值是每个条件(C+S+、C-S+、C-S-)下参与者的 ERP 平均波幅值。Pr 值是每个条件下参与者的平均 Pr 值。因此,每名参与者都可以计算一个回归系数,然后我们检查了标准化的 beta 系数是否与 0 有显著差异(Lorch & Myers, 1990)。

2.2 结果

2.2.1 行为结果

(1)测验阶段:

Pr 为了消除不同条件下新旧判断的反应偏差,我们使用击中率减去虚报率,计算不同条件下的 Pr。单因素重复测量方差分析表明,不同条件下的 Pr 存在显著差异, $F(2, 54) = 30.59, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.53$ 。事后检验表明, C+S+条件下的 Pr 显著高于 C-S+ ($t(27) = 3.62, p = 0.004, \text{Cohen's } d = 0.68$) 和 C-S-条件($t(27) = 6.42, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.21$), C-S+条件下的 Pr 显著高于 C-S-条件, $t(27) = 5.11, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.97$ (见表 1, 图 2A)。这些结果表明,记忆表现随着预期程度的降低而变差。

为了考察不同预期程度下的编码差异,我们分析了学习阶段的行为数据。

(2)学习阶段:

正确率 单因素重复测量方差分析表明,不同条件下的正确率存在显著差异, $F(2, 54) = 16.70, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.38$ 。事后检验表明, C-S-条件下的正确率显著高于 C-S+条件($t(27) = 6.09, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.15$)和 C+S+条件($t(27) = 3.31, p = 0.008, \text{Cohen's } d = 0.63$), C+S+条件下的正确率显著高于 C-S+条件, $t(27) = 2.67, p = 0.038, \text{Cohen's } d = 0.50$ (见表 1, 图 2A)。

反应时(RT) 单因素重复测量方差分析表明,不同条件下的反应时存在显著差异, $F(2, 54) = 19.68, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.42$ 。事后检验表明, C-S+条件下的反应时显著长于 C+S+ ($t(27) = 5.15, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.97$)和 C-S-条件($t(27) = 4.85, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.92$), C+S+和 C-S-条件之间的差异不显著, $t(27) = -0.64, p = 1$ (见表 1, 图 2A)。

学习阶段的行为结果表明,与 C-S+条件相比, C+S+和 C-S-条件下的正确率更高,反应时更短。这表明,与 C-S+条件相比, C+S+和 C-S-条件下的

表 1 实验 1 和实验 2 的行为结果

	实验 1			实验 2		
	C+S+	C-S+	C-S-	C+S+	C-S+	C-S-
正确率(%)	84.46(1.90)	76.61(2.64)	90.05(1.99)	82.19(1.99)	67.41(3.57)	85.51(2.96)
RT (ms)	1115(44)	1267(54)	1129(45)	1145(48)	1341(53)	1201(50)
Pr	45.97(3.16)	40.32(2.85)	31.09(3.27)	68.76(3.39)	58.01(3.73)	44.17(4.03)

注: 每个单元格内呈现了该条件下的平均值(标准误)。C: 类别(category); S: 语义距离 (semantic distance)。C+S+: 类别内高相关; C-S+: 类别外高相关; C-S-: 类别外低相关。

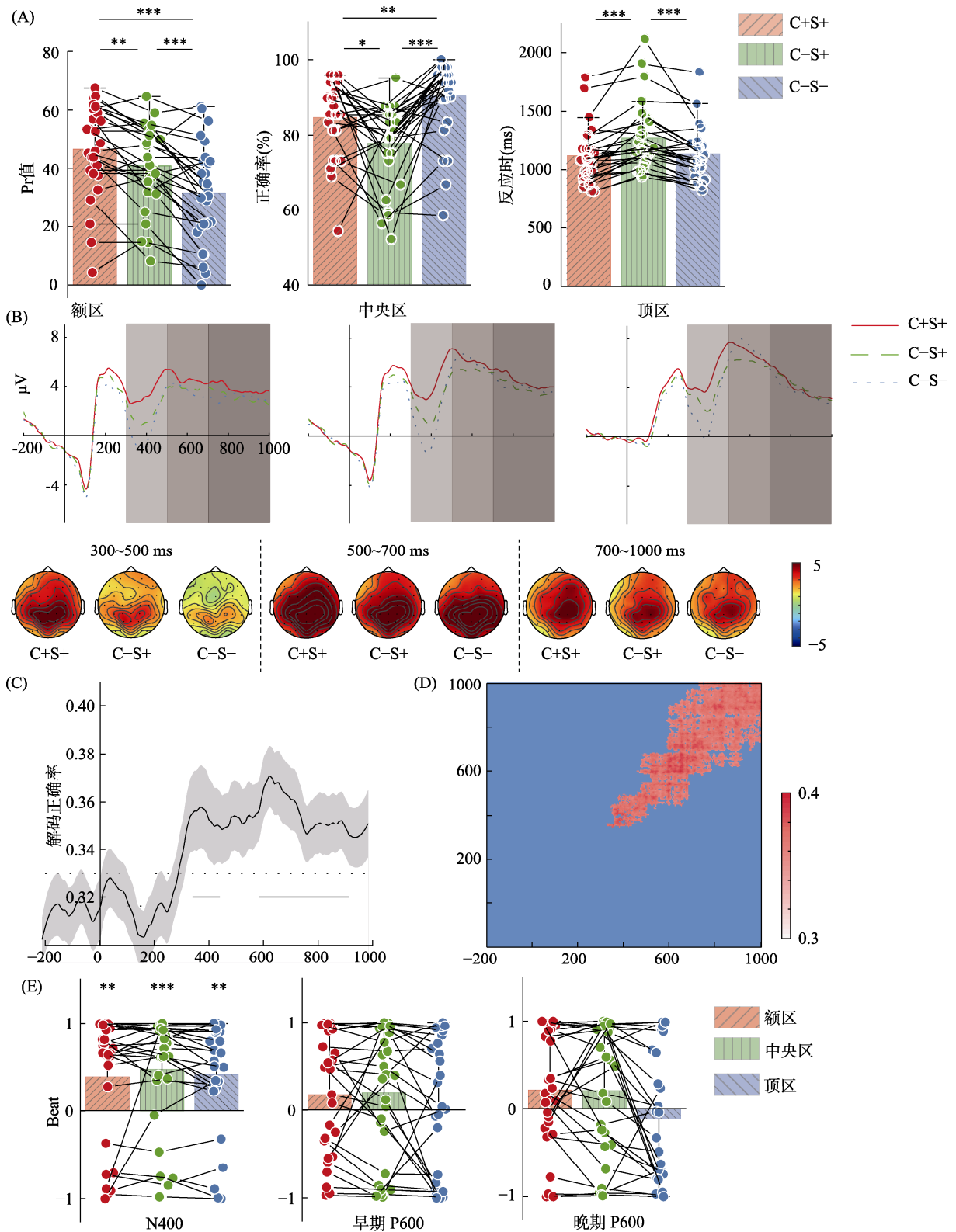


图 2 实验 1 的行为和脑电结果。C: 类别(category); S: 语义距离 (semantic distance)。C+S+: 类别内高相关; C-S+: 类别外高相关; C-S-: 类别外低相关。* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ 。(A)实验 1 的 Pr、正确率和反应时, 每个点代表一名参与者的数据。(B) ERP 结果。从左到右显示了额区、中央区 and 顶区的 ERP 结果。阴影部分表示用于统计分析的时间窗(300~500 ms、500~700 ms、700~1000 ms), 下方展示了相应窗口的地形图。(C) EEG 解码结果。图中显示了 LDA 在不同时间点对三种条件进行分类的正确率。黑色虚线表示几率水平(33.33%), 阴影部分表示标准误, 下方的水平黑色实线表示解码正确率显著高于几率水平的时间段。(D)跨时间解码的 EEG 结果。横轴为训练时间点, 纵轴为测试时间点。红色区域表示显著高于几率水平(33.33%)的时间点。(E) ERP 成分和 Pr 的平均回归系数, 每个点代表一名参与者的数据。彩图见电子版。下同。

加工具有优势(即更高的准确率和更短的反应时)。

2.2.2 脑电结果

利用 EEG 高时间分辨率的特点, 我们从三个时间窗[300~500 ms (N400)、500~700 ms (早期 P600) 和 700~1000 ms (晚期 P600)]考察了不同预期程度下编码的神经过程。

N400 3 (脑区: 额区、中央区、顶区) × 3 (条件: C+S+、C-S+、C-S-) 重复测量方差分析表明, 条件的主效应显著, $F(2, 54) = 22.89, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.50$; 脑区 × 条件的交互效应不显著, $F(4, 108) = 0.85, p = 0.496$ 。条件的事后检验表明, C+S+ 条件 ($M = 4.28 \mu V, SE = 0.94$) 下 N400 的波幅比 C-S+ ($M = 2.54 \mu V, SE = 0.74, t(27) = 4.18, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.79$) 和 C-S- 条件 ($M = 1.41 \mu V, SE = 0.79, t(27) = 5.66, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.07$) 更正, C-S+ 条件下 N400 的波幅比 C-S- 条件更正, $t(27) = 3.30, p = 0.008, \text{Cohen's } d = 0.62$ 。鉴于 N400 是一个顶区分布的 ERP 成分, 我们在顶区进行了单独的单因素重复测量方差分析。结果表明, 在顶区 ($F(2, 54) = 19.67, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.42$), C+S+ 条件下 N400 的波幅 ($M = 5.00 \mu V, SE = 0.85$) 比 C-S+ ($M = 3.46 \mu V, SE = 0.68, t(27) = 4.12, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.78$) 和 C-S- 条件 ($M = 2.32 \mu V, SE = 0.64, t(27) = 5.76, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.09$) 下的更正, C-S+ 条件比 C-S- 更正, $t(27) = 2.59, p = 0.046, \text{Cohen's } d = 0.49$ (见图 2B)。这表明 C+S+、C-S+ 和 C-S- 条件下目标词的可预测性依次下降。

早期 P600 3 (脑区: 额区、中央区、顶区) × 3 (条件: C+S+、C-S+、C-S-) 重复测量方差分析表明, 条件的主效应不显著, $F(2, 54) = 1.49, p = 0.235$; 脑区 × 条件的交互效应显著, $F(4, 108) = 4.43, p = 0.002, \eta_p^2 = 0.14$ 。简单效应分析没有发现三个条件之间存在显著差异(见图 2B)。

晚期 P600 3 (脑区: 额区、中央区、顶区) × 3 (条件: C+S+、C-S+、C-S-) 重复测量方差分析表明, 条件的主效应不显著, $F(2, 54) = 0.67, p = 0.52$; 脑区 × 条件的交互效应不显著, $F(4, 108) = 1.24, p = 0.297$ (见图 2B)。

为了提供多角度的证据, 我们对学习阶段的 EEG 数据进行了 MVPA 分析(即解码)。

EEG 解码 我们使用 LDA 对学习阶段的 EEG 数据进行了解码分析。基于聚类的置换检验表明, 在目标词呈现后的 340~440 ms、584~912 ms 的时间窗内, LDA 成功区分了不同条件下的 EEG 数据

($p < 0.05$, 见图 2C)。我们还进行了时间泛化分析, 结果表明, N400 和 P600 的时间窗间无法进行跨时间解码(见图 2D)。

这些结果表明, 在目标词呈现后的 N400 和 P600 时间窗内, 不同条件下的神经表征存在显著差异。时间泛化分析表明, N400 和 P600 时间窗间不能跨时间解码。这一结果与 He 等人(2024)的研究结果一致。这表明 N400 和 P600 反映了两个不同的认知过程(Schotter et al., 2023)。

最后, 为了检验学习阶段的 ERP 成分与记忆表现之间的关系, 我们对学习阶段的 ERP 成分与测验阶段记忆表现进行了回归分析。

回归 为了考察学习阶段的 ERP 成分能否显著预测记忆表现, 我们检验了标准化回归系数是否和 0 有显著差异。结果发现, N400 与 Pr 的回归系数在额区 ($M = 0.40, SE = 0.14, t(27) = 2.88, p = 0.008, \text{Cohen's } d = 0.55$)、中央区 ($M = 0.47, SE = 0.12, t(27) = 3.93, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.74$) 和顶区 ($M = 0.42, SE = 0.12, t(27) = 3.51, p = 0.002, \text{Cohen's } d = 0.66$) 均显著大于 0。早期 P600 与 Pr 的回归系数在额区 ($M = 0.18, SE = 0.13, t(27) = 1.44, p = 0.162$)、中央区 ($M = 0.21, SE = 0.14, t(27) = 1.45, p = 0.159$) 和顶区 ($M = 0.02, SE = 0.15, t(27) = 0.11, p = 0.916$) 和 0 的差异不显著。晚期 P600 与 Pr 的回归系数在额区 ($M = 0.22, SE = 0.12, t(27) = 1.78, p = 0.087$)、中央区 ($M = 0.21, SE = 0.14, t(27) = 1.48, p = 0.150$) 和顶区 ($M = -0.11, SE = 0.14, t(27) = -0.83, p = 0.417$) 和 0 的差异不显著(见图 2E)。

这些结果表明, 学习阶段的 N400 可以有效预测随后的记忆表现, 而 P600 (早期和晚期) 则不能。

2.3 讨论

在实验 1 中, 我们考察了不同预期程度下项目再认的记忆表现。在学习阶段, 与 C-S+ 条件相比, C+S+ 条件下的正确率更高, 反应时更短, 这表明 C+S+ 条件下的加工具有优势。在 C+S+、C-S+ 和 C-S- 条件下, N400 的波幅依次变负。在测验阶段, C+S+、C-S+ 和 C-S- 条件下的记忆成绩依次变差, 学习阶段的 N400 可以有效预测测验阶段的记忆表现。这些结果表明, 预期程度可以有效预测随后的记忆表现。这支持了可预测项目有更好记忆表现的观点(Craik & Tulving, 1975; Kutas, 1993; Schulman, 1974; Silcox et al., 2023)。

P600 可以反映词义与语义背景的整合 (Brouwer et al., 2017; Federmeier, 2022; Schotter et

al., 2023)。以往的研究发现,与可预测的词语相比,异常词语会诱发更正的 P600,这反映了个体需要花费更大的认知努力才能将异常词语整合到语义背景中(Kuperberg et al., 2003; Schotter et al., 2023)。然而,本研究并未发现不同条件下 P600 的差异。我们推测,实验 1 学习阶段的任务(词对判断)并不依赖于语义整合。换句话说,个体可以在没有语义整合的情况下完成词对判断。为了研究 P600 和记忆表现之间的关系,我们进行了实验 2(联结再认)。

在实验 2 中,我们测试了不同条件下联结再认的记忆表现。联结再认是指再认两个或两个以上曾经一起出现过的项目的的能力。与实验 1 相比,实验 2 做了以下改动:首先,在正式实验之前,参与者被明确告知学习阶段(词对判断)和测验阶段(联结再认)的任务要求。其次,参与者在完成一个学习 Block 后,会立即接受联结再认测验。这样做的目的是鼓励参与者整合目标词和启动词。

3 实验 2: 类别和语义距离调节预期对联结再认的影响

3.1 方法

3.1.1 参与者

实验 2 招募了 26 名年龄在 18~25 岁之间的在读本科生和硕士生(平均年龄 22 岁,包括 17 名女性和 9 名男性,母语是汉语)。本研究获得了心理研究伦理委员会的批准,参与者在实验前签署了知情同意书,并获得了参与实验的报酬。所有参与者均为右利手,视力正常或矫正正常,无精神疾病。整个实验时长约 100 分钟。

3.1.2 实验材料

与实验 1 相同。

3.1.3 实验流程

与实验 1 相比,实验 2 有以下 3 点改动:

(1)测验阶段从测试词对 2 中的目标词(沙发)改为启动词和目标词的组合(家具:沙发)。参与者需要对呈现的词对进行旧、重组和新的判断;(2)在每个测验 Block 中,重组词对作为填充词对,目的是防止参与者根据单个词语做出判断。这些填充词对是通过随机挑选一个 C+S+词对(如“中药:人参”)、一个 C-S+词对(如“家具:装修”)和一个 C-S-词对(如“颜色:子弹”),然后将它们重新组合成重组词对进行测试(例如“中药:装修”,“家具:子弹”,“颜色:人参”)。这些重组词对不包括在正式分析中;(3)参与者完成一个学习 Block 后,立即进行联结再认测

试。整个实验包括 7 个学习-测验 Block,每个学习 Block 包含 8 个 C+S+、8 个 C-S+和 8 个 C-S-试次。每个测验 Block 包括 7 个 C+S+旧词对、7 个 C-S+旧词对和 7 个 C-S-旧词对,以及 7 个 C+S+新词对、7 个 C-S+新词对和 7 个 C-S-新词对,另外还有 3 个被排除在正式分析之外的重组词对(见图 1B)。

3.1.4 脑电记录和分析

经过预处理后,C+S+条件下平均有效试次数(范围)为 50.7 (34~56),C-S+条件为 50.6 (41~56),C-S-条件为 51.0 (38~56)。

其他部分与实验 1 相同。

3.2 结果

3.2.1 行为结果

(1)测验阶段:

Pr 单因素重复测量方差分析表明,不同条件下的 Pr 存在显著差异, $F(2, 50) = 54.44, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.69$ 。事后检验表明,C+S+条件下的 Pr 显著高于 C-S+ ($t(25) = 4.61, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 0.90$)和 C-S-条件($t(25) = 9.43, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.85$),C-S+条件下的 Pr 显著高于 C-S-条件, $t(25) = 6.52, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.28$ (见表 1, 图 3A)。这些结果表明,记忆表现随着预期程度的降低而变差。

(2)学习阶段:

正确率 单因素重复测量方差分析表明,不同条件下的正确率存在显著差异, $F(2, 50) = 14.85, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.37$ 。事后检验表明,C-S+条件下的正确率显著低于 C+S+ ($t(25) = -3.52, p = 0.005, \text{Cohen's } d = -0.69$)和 C-S-条件($t(25) = -5.85, p < 0.001, \text{Cohen's } d = -1.15$),而 C+S+和 C-S-条件之间的差异不显著, $t(25) = -1.03, p = 0.934$ (见表 1, 图 3A)。

反应时(RT) 单因素重复测量方差分析表明,不同条件下的反应时存在显著差异, $F(2, 50) = 29.51, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.54$ 。事后检验表明,C-S+条件下的反应时显著长于 C+S+ ($t(25) = 7.48, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.47$)和 C-S-条件($t(25) = 6.10, p < 0.001, \text{Cohen's } d = 1.20$),而 C+S+和 C-S-条件之间的差异不显著, $t(25) = -1.88, p = 0.214$ (见表 1, 图 3A)。

3.2.2 脑电结果

N400 3 (脑区:额区、中央区、顶区)×3 (条件:C+S+、C-S+、C-S-)重复测量方差分析表明,条件的主效应显著, $F(2, 50) = 20.76, p < 0.001, \eta_p^2 =$

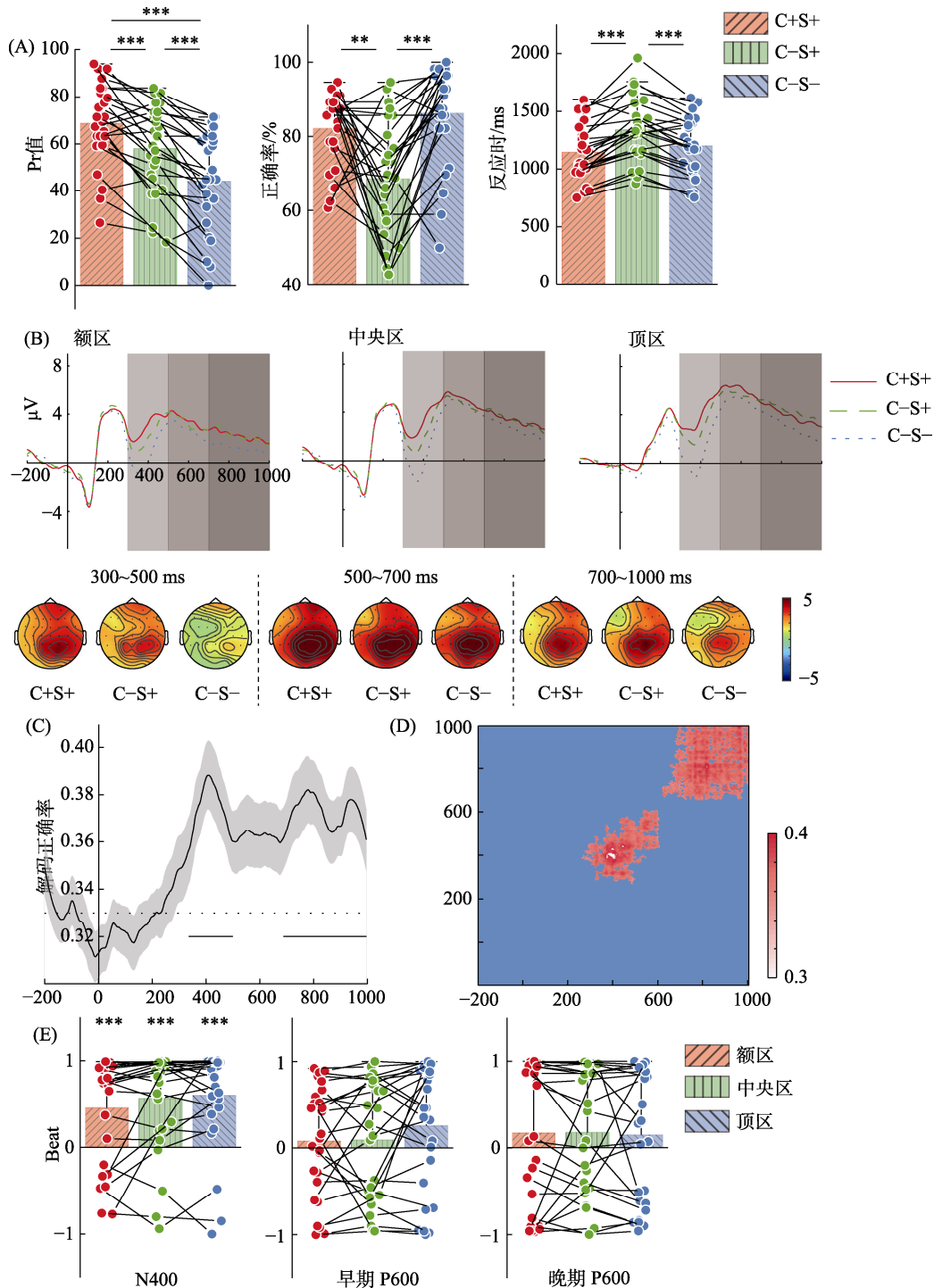


图 3 实验 2 的行为和脑电结果。C: 类别(category); S: 语义距离(semantic distance)。C+S+: 类别内高相关; C-S+: 类别外高相关; C-S-: 类别外低相关。* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ 。(A)实验 2 的 Pr、正确率和反应时, 每个点代表一名参与者的数据。(B) ERP 结果。从左到右显示了额区、中央区 and 顶区的 ERP 结果。阴影部分表示用于统计分析的时间窗(300~500 ms、500~700 ms、700~1000 ms), 下方展示了相应窗口的地形图。(C) EEG 解码结果。图中显示了 LDA 在不同时间点对三种条件进行分类的正确率。黑色虚线表示几率水平(33.33%), 阴影部分表示标准误, 下方的水平黑色实线表示解码正确率显著高于几率水平的时间段。(D) 跨时间解码的 EEG 结果。横轴为训练时间点, 纵轴为测试时间点。红色区域表示显著高于几率水平(33.33%)的时间点。(E) ERP 成分和 Pr 的平均回归系数, 每个点代表一名参与者的数据。

0.45, 脑区×条件的交互效应不显著, $F(4, 100) = 1.21, p = 0.312$ 。条件的事后检验表明, C+S+条件 ($M = 3.55 \mu V, SE = 0.70$)下 N400 的波幅比 C-S+ ($M = 2.60 \mu V, SE = 0.63, t(25) = 2.67, p = 0.040$,

Cohen's $d = 0.52$)和 C-S-条件($M = 0.86 \mu\text{V}$, $SE = 0.66$, $t(25) = 5.37$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.05$)更正, C-S+条件下 N400 的波幅比 C-S-条件更正, $t(25) = 4.35$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.85$ 。鉴于 N400 是一个顶区分布的 ERP 成分,我们在顶区进行了单独的单因素重复测量方差分析。结果表明,在顶区($F(2, 50) = 27.92$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.53$), C+S+条件下 N400 的波幅($M = 4.03 \mu\text{V}$, $SE = 0.81$)比 C-S+ ($M = 3.13 \mu\text{V}$, $SE = 0.65$, $t(25) = 2.41$, $p = 0.071$ (边缘显著), Cohen's $d = 0.47$)和 C-S-条件($M = 1.07 \mu\text{V}$, $SE = 0.63$, $t(25) = 6.00$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.18$)下的更正, C-S+条件比 C-S-更正, $t(25) = 6.17$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.21$ (见图 3B)。这表明 C+S+、C-S+和 C-S-条件下目标词的可预测性依次下降。

早期 P600 3 (脑区: 额区、中央区、顶区) \times 3 (条件: C+S+、C-S+、C-S-)重复测量方差分析表明,条件的主效应不显著, $F(2, 50) = 1.80$, $p = 0.175$; 脑区 \times 条件的交互效应不显著, $F(4, 100) = 1.24$, $p = 0.298$ (见图 3B)。

晚期 P600 3 (脑区: 额区、中央区、顶区) \times 3 (条件: C+S+、C-S+、C-S-)重复测量方差分析表明,条件的主效应显著, $F(2, 50) = 2.85$, $p = 0.046$, $\eta_p^2 = 0.12$; 脑区 \times 条件的交互作用不显著, $F(4, 100) = 0.62$, $p = 0.653$ 。条件的事后检验表明, C-S+条件下的波幅($M = 3.32 \mu\text{V}$, $SE = 0.74$)比 C-S-条件下的($M = 2.26 \mu\text{V}$, $SE = 0.63$)更正, $t(25) = 2.90$, $p = 0.023$, Cohen's $d = 0.57$ 。C+S+ ($M = 3.16 \mu\text{V}$, $SE = 0.79$)和 C-S+ ($t(25) = -0.33$, $p = 1$)与 C-S- ($t(25) = 1.81$, $p = 0.249$)条件之间的差异不显著。鉴于 P600 是一个位于顶区的 ERP 成分,我们对顶区进行了单独的单因素重复测量方差分析。结果表明,在顶区($F(2, 50) = 6.18$, $p = 0.004$, $\eta_p^2 = 0.20$), C+S+ ($M = 3.90 \mu\text{V}$, $SE = 0.75$, $t(25) = 2.63$, $p = 0.044$, Cohen's $d = 0.52$)和 C-S+ ($M = 4.28 \mu\text{V}$, $SE = 0.67$, $t(25) = 3.80$, $p = 0.003$, Cohen's $d = 0.74$)条件下的波幅比 C-S-条件($M = 2.91 \mu\text{V}$, $SE = 0.64$)更正,而 C+S+和 C-S+条件之间的差异不显著, $t(25) = -0.83$, $p = 1$ (见图 3B)。这些结果表明,在顶区, C+S+和 C-S+条件下的波幅比 C-S-更正。

EEG 解码 我们使用 LDA 对学习阶段的 EEG 数据进行解码分析。基于聚类的置换检验表明,在目标词呈现后的 336~500 ms、668~1000 ms 的时间窗内, LDA 成功区分了不同条件下的 EEG 数据($p < 0.05$, 见图 3C)。我们还进行了时间泛化分析,结

果表明, N400 和 P600 的时间窗内无法进行跨时间解码(见图 3D)。这些结果与实验 1 的结果一致。

回归 为了考察学习阶段的 ERP 成分能否显著预测记忆表现,我们检验了标准化回归系数是否和 0 有显著差异。结果发现, N400 与 Pr 的回归系数在额区($M = 0.45$, $SE = 0.12$, $t(25) = 3.78$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.74$)、中央区($M = 0.56$, $SE = 0.11$, $t(25) = 4.94$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 0.97$)和顶区($M = 0.60$, $SE = 0.11$, $t(25) = 5.37$, $p < 0.001$, Cohen's $d = 1.05$)均显著大于 0。早期 P600 与 Pr 的回归系数在额区($M = 0.08$, $SE = 0.12$, $t(25) = 0.67$, $p = 0.511$)、中央区($M = 0.09$, $SE = 0.14$, $t(25) = 0.68$, $p = 0.501$)和顶区($M = 0.25$, $SE = 0.15$, $t(25) = 1.75$, $p = 0.092$)和 0 的差异不显著。晚期 P600 与 Pr 的回归系数在额区($M = 0.17$, $SE = 0.16$, $t(25) = 1.07$, $p = 0.297$)、中央区($M = 0.17$, $SE = 0.15$, $t(25) = 1.20$, $p = 0.243$)和顶区($M = 0.15$, $SE = 0.15$, $t(25) = 1.00$, $p = 0.327$)和 0 的差异不显著(见图 3E)。

3.3 讨论

在实验 2 中,我们研究了不同预期程度下联结再认的记忆表现。在学习阶段,与 C-S+条件相比, C+S+条件下的正确率更高,反应时更短, C+S+、C-S+和 C-S-条件下的 N400 波幅依次变负。在测验阶段, C+S+、C-S+和 C-S-条件下联结再认的记忆表现依次变差,并且学习阶段的 N400 与联结记忆表现出显著的正相关。这些结果与实验 1 一致。另外,与 C-S-条件相比, C+S+和 C-S+条件下的 P600 更正,联结记忆表现更好。这表明语义距离可以促进启动词和目标词的整合,这种整合可以提高随后的联结记忆表现。

4 总讨论

本研究(实验 1: 项目再认; 实验 2: 联结再认)通过类别和语义距离操纵预期,考察了不同预期程度下的编码差异和记忆表现。在学习阶段,两个实验一致发现,与 C-S+条件相比, C+S+和 C-S-条件下的正确率更高,反应时更短。C+S+、C-S+和 C-S-条件下 N400 的波幅依次变负。只在实验 2 发现 C+S+和 C-S+条件下的 P600 波幅比 C-S-条件更正。两个实验中, LDA 在 N400 和 P600 的时间范围内成功区分了不同条件下的神经表征。在测验阶段,实验 1 发现在 C+S+、C-S+和 C-S-条件下,项目再认的记忆表现依次变差,实验 2 发现 C+S+、C-S+和 C-S-条件下联结再认的记忆成绩依次变

差。此外, 两项实验一致发现学习阶段的 N400 可以有效预测测验阶段的记忆表现。这些结果表明, 预期对记忆表现的影响会受到类别和语义距离的调节。接下来我们将详细讨论这些发现。

实验 1 和 2 一致发现, 与 C-S+ 条件相比, C+S+ 和 C-S- 条件下的正确率更高, 反应时更短。虽然在行为上 C+S+ 和 C-S- 条件都表现出了加工优势(即更高的正确率和更快的反应时), 但我们认为它们反映了不同的认知机制。具体来说, C+S+ 条件下更好的行为表现来自语义背景的促进作用(Silcox & Payne, 2021)。换句话说, 正确的语义背景会促进与之匹配的词语的语义加工。C-S- 条件下的加工优势可能是由于自我终止程序。具体来说, LeFevre 和 Bisanz (1986) 发现, 当个体加工异常序列时, 一旦识别到异常元素, 加工就会停止(自我终止), 从而节省了后续的加工时间。这可能是本研究中 C-S- 条件下的反应时短于 C-S+ 条件下的原因。值得注意的是, 在 Rommers 等人(2013)使用句子框架的实验中, 参与者在异常条件下的反应时更长。这表明异常项目的加工会受到不同实验范式的影响, 接下来我们将结合脑电结果进一步讨论这个问题。

类别和语义距离会显著影响预期程度。实验 1 和 2 一致发现, 在 C+S+、C-S+ 和 C-S- 条件下, N400 的波幅依次变负。这与之前高典型的类别内成员可预测性最高(Federmeier et al., 2010; Silcox et al., 2023)的研究结果相一致。本研究发现 C+S+ 条件下的 N400 波幅比 C-S+ 更正, 这表明类别会影响预期程度。C-S+ 条件下的 N400 波幅比 C-S- 更正, 这表明语义距离会影响预期程度。总之, 这些结果表明, 预测是一个复杂的认知过程。在这个过程中, 个体会综合多方面的信息(如类别、语义距离), 从而预测接下来要发生的事件。

语义距离可以调节启动词和目标词的整合编码。在实验 1 和 2 中, LDA 在 P600 的时间窗内区分了不同条件下的神经表征, 实验 2 发现 C+S+ 和 C-S+ 条件下的 P600 波幅比 C-S- 条件更正。这表明语义距离可以促进启动词和目标词的整合编码。虽然实验 1 没有发现不同条件下 P600 的差异, 但我们认为这可能是实验任务的不同导致的。首先, 在实验 2 中, 参与者明确知道会进行联结再认测试, 这会促使参与者花费更多的努力进行整合编码。P600 是语义整合的指标(Brouwer et al., 2017; Federmeier, 2022; Schotter et al., 2023), C+S+ 和 C-S+ 条件下更近的语义距离促进了启动词和目标

词的整合, 所以 C+S+ 和 C-S+ 条件下的 P600 波幅比 C-S- 条件下更正。然而, C-S- 条件下的自我终止程序(LeFevre & Bisanz, 1986)导致参与者并没有花费太多的努力进行整合编码, 这导致了 C-S- 条件下较小的 P600。使用句子框架范式的研究发现, 异常词语的反应时更长(Rommers et al., 2013), P600 更正(Schotter et al., 2023)。我们认为, 相较于词对关系判断, 句子阅读任务可能对语义整合的要求更高, 因此不同实验范式之间异常词的结果出现了差异。其次, 与单变量分析相比, MVPA 是一种更敏感的分析方法, 它能捕捉到 ERP 无法检测到的差异(Davis et al., 2014; Petit et al., 2024)。实验 1 不像实验 2 那样促使参与者在整合启动词和目标词上花费更多的努力, 不同条件下的差异并没有表现在 P600 的波幅上, 但这种差异可以通过更敏感的 MVPA 方法来捕捉。

类别和语义距离会影响记忆表现。两项实验一致发现, C+S+ 条件下的 Pr 高于 C-S+ 条件, 这表明符合类别规则可以提高记忆表现。C-S+ 条件下的 Pr 高于 C-S- 条件, 这表明相近的语义距离可以提高记忆表现。学习阶段的 N400(预期的 ERP 指标)可以显著预测记忆表现。这支持了可预测的学习材料有更好记忆表现的观点(Craik & Tulving, 1975; Kutas, 1993; Schulman, 1974; Silcox et al., 2023)。结合本研究和之前的研究(Silcox et al., 2023; Silcox & Payne, 2021), 我们认为, 符合预期可以减轻参与者的编码负担, 促进目标词和语义背景(启动词)的整合加工, 从而提高记忆表现。

我们认为, 类别和语义距离可能通过不同的机制对记忆产生影响。第一, 类别和语义距离均会对记忆产生影响。之前的研究通过典型性(高/低)来操纵预期。结果显示, 高典型(如花: 玫瑰)的记忆表现好于低典型(花: 罂粟)(Silcox et al., 2023)。在这里, 两者的目标词都是类别内的, 但是在语义距离上有所不同。这表明了语义距离会影响记忆表现。在本研究中, C+S+ (家具: 沙发)的记忆表现好于 C-S+ (家具: 装修)。在这种情况下, 目标词和启动词之间的语义距离很近。但是, C+S+ 是类别内的, 而 C-S+ 是类别外的, 这表明了类别会影响记忆表现。综上所述, 这些结果表明记忆表现会受到类别和语义距离的调节。第二, 我们推测类别和语义距离可能通过不同的机制影响记忆。一方面, 一些研究(Frank & Kafkas, 2021; Silcox & Payne, 2021)表明, 符合规则的项目可以通过减轻参与者的编码负

担来促进记忆表现。本研究学习阶段的结果也表明,与 C-S+条件相比, C+S+条件下的反应时更短、正确率更高、记忆表现更好。这表明符合规则的项目具有编码优势。这些发现表明,符合规则的项目可以通过减轻参与者的编码负担来提高记忆成绩。另一方面,本研究发现,与 C-S-条件相比, C+S+和 C-S+条件下的 P600 更正,记忆表现更好。这表明近的语义距离可以通过促进启动词和目标词的整合来提高记忆表现。另外,最近一项针对提取阶段的研究(Dai et al., 2025)发现,语义可预测性(即 C+S+)条件下有显著的 LPC 新旧效应,而语义相关性(即 C-S+)条件下有显著的 FN400 新旧效应,这表明了语义可预测性和语义相关性通过不同的机制提取信息。无独有偶, Silcox 等人(2023)使用 TMS 发现, LIFC 是一个和语义距离影响记忆相关的脑区,而不是和类别影响记忆相关的脑区。这在脑区上为类别和语义距离通过不同的机制影响记忆提供了证据。这些发现表明,类别和语义距离通过不同的机制影响记忆表现。这为我们解释可预测和不可预测记忆表现之间的分歧提供了可能。

我们推测,可预测和不可预测记忆表现之间的分歧可能是由编码难度和编码努力的相对大小决定的,并且这两个因素对记忆的影响是相互分离的。首先,尽管目前研究者们关于 N400 和 P600 确切的功能意义还存在争论,但是大家普遍认为这是两个相互分离的 ERP 成分,反映了不同的认知过程(He et al., 2024; Kutas & Federmeier, 2011; Troyer et al., 2024)。本研究(见图 2D、3D)发现, N400 和 P600 的时间范围间不能交叉解码,这支持了 N400 和 P600 反映了两个不同认知过程的观点。因此,我们有理由相信,在预期影响记忆的过程中,至少有两个独立的认知过程在起作用。其次, N400 可以反映语义加工的难度(Hagoort et al., 2009; Kutas & Federmeier, 2011), P600 与个体在加工过程中花费的认知努力有关(Rosburg et al., 2015)。我们提出,在预期影响记忆的过程中, N400 反映了编码难度, P600 反映了编码努力。当个体花费相同的认知努力时,较低难度的编码会带来更好的记忆表现。同样,当编码难度相同时,个体花费的认知努力越多,记忆表现越好。值得注意的是, N400 和 P600 之间没有必然联系。换句话说,编码简单并不意味着个体花费的努力少,而花费较多的努力也并不意味着编码困难。可预测条件下的编码通常比较简单,因为它与个体对世界的先验知识是一致的(Frank &

Kafkas, 2021)。编码努力会受到不同实验范式的影响。当个体在可预测条件下(如本研究)花费更多努力时,最终表现为可预测的记忆表现高于不可预测,而当个体在不可预测条件下花费更多努力时,记忆表现取决于编码难度和编码努力的相对大小。

我们的研究结果支持了可预测的学习材料有更好的记忆表现的观点。然而,鉴于众多研究在实验范式、实验材料和预期操纵上的差异(相关评论见 Frank & Kafkas, 2021),我们必须严格界定本研究结论的适用范围。首先,本研究使用词对判断的实验范式,通过类别和语义距离对预期进行了操纵。其次,我们在需要判断的词对前呈现了一个 C+S+词对,这可能会引导参与者从类别和语义关系的维度产生预期。而现实生活的预期是基于更多维度生成的,一个潜在的问题是可能无法准确描述现实生活中复杂的预期形成过程。此外,还有一些问题需要在今后的研究中加以解决。首先,我们对预期影响记忆的两个子过程(即编码难度和编码努力)提供了自己的见解。但是,目前研究者关于 N400 和 P600 确切的功能意义还存在争论,因此本研究对这两个子过程的解释带有一定的推测性质,这一点需要在今后的研究中加以确定。其次,在不同的实验范式中,不可预测条件下 P600 的结果是不同的,这表明 P600 会受到不同实验范式的影响。未来的研究可以尝试通过研究 P600 和记忆表现之间的关系来解决可预测和不可预测记忆表现之间的分歧。

综上所述,本研究的结果表明,类别和语义距离会调节预期对记忆表现的影响。可预测的语义背景能提高后续的记忆表现,这种提高是通过减少编码负担和(或)促进语义整合实现的。这些发现表明可预测的项目有更好的记忆表现。我们展示了编码过程中的加工过程与后续记忆表现之间的关系,这促进了我们对预期和记忆之间关系的理解。

参 考 文 献

- Bar, M. (2007). The proactive brain: Using analogies and associations to generate predictions. *Trends in Cognitive Sciences, 11*(7), 280-289.
- Bar, M. (2009). Predictions: A universal principle in the operation of the human brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences, 364*(1521), 1181-1182.
- Bonhage, C. E., Mueller, J. L., Friederici, A. D., & Fiebach, C. J. (2015). Combined eye tracking and fMRI reveals neural basis of linguistic predictions during sentence comprehension. *Cortex, 68*, 33-47.

- Brouwer, H., Crocker, M. W., Venhuizen, N. J., & Hoeks, J. C. J. (2017). A neurocomputational model of the N400 and the P600 in language processing. *Cognitive Science*, 41(Suppl 6), 1318–1352.
- Craik, F., & Tulving, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104(3), 268–294.
- Dai, J., Liang, P., Li, X., Zhang, J., Tian, L., Mao, X., & Guo, C. (2025). Semantic predictability and semantic relevance through different neural mechanisms to improve memory performance. *Brain and Cognition*, 186, 106300.
- Davis, T., LaRocque, K. F., Mumford, J. A., Norman, K. A., Wagner, A. D., & Poldrack, R. A. (2014). What do differences between multi-voxel and univariate analysis mean? How subject-, voxel-, and trial-level variance impact fMRI analysis. *Neuroimage*, 97, 271–283.
- DeLong, K. A., Urbach, T. P., & Kutas, M. (2005). Probabilistic word pre-activation during language comprehension inferred from electrical brain activity. *Nature Neuroscience*, 8(8), 1117–1121.
- Delorme, A., & Makeig, S. (2004). EEGLAB: An open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134(1), 9–21.
- Elmer, S., Besson, M., & Rodríguez-Fornells, A. (2022). The electrophysiological correlates of word pre-activation during associative word learning. *International Journal of Psychophysiology*, 182, 12–22.
- Federmeier, K. D. (2022). Connecting and considering: Electrophysiology provides insights into comprehension. *Psychophysiology*, 59(1), e13940.
- Federmeier, K. D., Kutas, M., & Schul, R. (2010). Age-related and individual differences in the use of prediction during language comprehension. *Brain and Language*, 115(3), 149–161.
- Federmeier, K. D., Wlotko, E. W., De Ochoa-Dewald, E., & Kutas, M. (2007). Multiple effects of sentential constraint on word processing. *Brain Research*, 1146, 75–84.
- Frank, D., & Kafkas, A. (2021). Expectation-driven novelty effects in episodic memory. *Neurobiology of Learning and Memory*, 183, 107466.
- Frank, D., Montemurro, M. A., & Montaldi, D. (2020). Pattern separation underpins expectation-modulated memory. *Journal of Neuroscience*, 40(17), 3455–3464.
- Giglio, L., Ostarek, M., Weber, K., & Hagoort, P. (2022). Commonalities and asymmetries in the neurobiological infrastructure for language production and comprehension. *Cerebral Cortex*, 32(7), 1405–1418.
- Hagoort, P., Baggio, G., & Willems, R. M. (2009). Semantic unification. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *The cognitive neurosciences IV*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Haxby, J. V., Gobbini, M. I., Furey, M. L., Ishai, A., Schouten, J. L., & Pietrini, P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science*, 293(5539), 2425–2430.
- He, Y., Sommer, J., Hansen - Schirra, S., & Nagels, A. (2024). Multivariate pattern analysis of EEG reveals nuanced impact of negation on sentence processing in the N400 and later time windows. *Psychophysiology*, 61(4), e14491.
- Kafkas, A., & Montaldi, D. (2015). Striatal and midbrain connectivity with the hippocampus selectively boosts memory for contextual novelty. *Hippocampus*, 25(11), 1262–1273.
- King, J.-R., & Dehaene, S. (2014). Characterizing the dynamics of mental representations: The temporal generalization method. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(4), 203–210.
- Kuperberg, G. R., Sitnikova, T., Caplan, D., & Holcomb, P. J. (2003). Electrophysiological distinctions in processing conceptual relationships within simple sentences. *Cognitive Brain Research*, 17(1), 117–129.
- Kutas, M. (1993). In the company of other words—Electrophysiological evidence for single-word and sentence context effects. *Language and Cognitive Processes*, 8(4), 533–572.
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, 62(1), 621–647.
- Kutas, M., & Hillyard, S. (1984). Brain potentials during reading reflect word expectancy and semantic association. *Nature*, 307(5947), 161–163.
- LeFevre, J. A., & Bisanz, J. (1986). A cognitive analysis of number-series problems: Sources of individual differences in performance. *Memory & Cognition*, 14(4), 287–298.
- Lorch, R., & Myers, J. (1990). Regression-analyses of repeated measures data in cognitive research. *Journal of Experimental Psychology: Learning Memory and Cognition*, 16(1), 149–157.
- Menenti, L., Gierhan, S. M. E., Segaert, K., & Hagoort, P. (2011). Shared language: Overlap and segregation of the neuronal infrastructure for speaking and listening revealed by functional MRI. *Psychological Science*, 22(9), 1173–1182.
- Nyberg, L. (2005). Any novelty in hippocampal formation and memory? *Current Opinion in Neurology*, 18(4), 424–428.
- Petit, S., Brown, A., Jessen, E. T., & Woolgar, A. (2024). How robustly do multivariate EEG patterns track individual-subject lexico-semantic processing of visual stimuli? *Language Cognition and Neuroscience*, 39(9), 1134–1148.
- Rajaram, S. (1998). The effects of conceptual salience and perceptual distinctiveness on conscious recollection. *Psychonomic Bulletin & Review*, 5(1), 71–78.
- Rommers, J., Dijkstra, T., & Bastiaansen, M. (2013). Context-dependent semantic processing in the human brain: Evidence from idiom comprehension. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(5), 762–776.
- Rosburg, T., Johansson, M., Weigl, M., & Mecklinger, A. (2015). How does testing affect retrieval-related processes? An event-related potential (ERP) study on the short-term effects of repeated retrieval. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience*, 15(1), 195–210.
- Ryskin, R., Ng, S., Mimnaugh, K., Brown-Schmidt, S., & Federmeier, K. D. (2020). Talker-specific predictions during language processing. *Language, Cognition and Neuroscience*, 35(6), 797–812.
- Schotter, E. R., Milligan, S., & Estevez, V. M. (2023). Event-related potentials show that parafoveal vision is insufficient for semantic integration. *Psychophysiology*, 60(7), e14246.
- Schulman, A. I. (1974). Memory for words recently classified. *Memory & Cognition*, 2(1), 47–52.
- Silbert, L. J., Honey, C. J., Simony, E., Poeppel, D., & Hasson, U. (2014). Coupled neural systems underlie the production and comprehension of naturalistic narrative speech. *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, 111(43), E4687–E4696.
- Silcox, J. W., Mickey, B., & Payne, B. R. (2023). Disruption to left inferior frontal cortex modulates semantic prediction effects in reading and subsequent memory: Evidence from simultaneous TMS-EEG. *Psychophysiology*, 60(9), e14312.
- Silcox, J. W., & Payne, B. R. (2021). The costs (and benefits)

- of effortful listening on context processing: A simultaneous electrophysiology, pupillometry, and behavioral study. *Cortex*, *142*, 296–316.
- Treder, M. S. (2020). MVPA-Light: A classification and regression toolbox for multi-dimensional data. *Frontiers in Neuroscience*, *14*, 289.
- Troyer, M., Kutas, M., Batterink, L., & McRae, K. (2024). Nuances of knowing: Brain potentials reveal implicit effects of domain knowledge on word processing in the absence of sentence - level knowledge. *Psychophysiology*, *61*(1), e14422.
- Zhao, M., Xu, Z. Y., Liu, T., Du, F. L., Li, Y. X., & Chen, F. Y. (2012). The neuromechanism underlying language analogical reasoning: Evidence from an ERP study. *Acta Psychologica Sinica*, *44*(6), 711–719.
- [赵鸣, 徐知媛, 刘涛, 杜锋磊, 李永欣, 陈飞燕. (2012). 语言类比推理的神经机制: 来自 ERP 研究的证据. *心理学报*, *44*(6), 711–719.]

Category and semantic distance modulate the impact of prediction on memory

DAI Jiaojian¹, SUN Mingze³, WANG Dongfang³, MAO Xinrui², GUO Chunyan¹

¹ Beijing Key Lab of Learning and Cognition, College of Psychology, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

² College of Elementary Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

³ School of Psychology and Center for Studies of Psychological Application, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract

Humans often make predictions based on current contexts to guide subsequent behavior. However, there is ongoing debate about whether predictable or unpredictable items lead to better memory performance. Some researchers have found better memory performance for predictable items, while others have found better memory performance for unpredictable items. The present study used EEG to examine the relationship between encoding sub-processes and memory performance across different levels of predictability. This provides a new perspective on resolving the discrepancy in memory performance between predictable and unpredictable items.

We manipulated predictability through category and semantic distance to examine memory performance under different levels of predictability (Experiment 1: item recognition; Experiment 2: associative recognition). Specifically, we set up 3 conditions: C+S+ (e.g. furniture: sofa, within-category and near semantic distance), C-S+ (e.g. furniture: decoration, out-of-category and near semantic distance), and C-S- (e.g. furniture: phase, out-of-category and far semantic distance). In the study phase, prime words (e.g., furniture) and target words (e.g., sofa) were presented sequentially. Participants were asked to judge which condition each word pair belonged to by pressing the corresponding key when the target word appeared. In the test phase, 28 participants completed an item recognition test and 26 participants completed an associative recognition test.

In the study phase, both experiments consistently showed higher accuracy and faster reaction times in the C+S+ and C-S- conditions than in the C-S+ condition. The N400 amplitudes became progressively more negative across the C+S+, C-S+, and C-S- conditions. In Experiment 2, the P600 amplitude was more positive in the C+S+ and C-S+ conditions compared to the C-S- condition. In both experiments, linear discriminant analysis (LDA) successfully distinguished neural representations across conditions during the N400 and P600 time windows. In the test phase, item recognition (Experiment 1) and associative recognition (Experiment 2) both showed a graded decline in memory performance across the C+S+, C-S+, and C-S- conditions. In addition, both experiments consistently showed that N400 amplitudes during the study phase significantly predicted memory performance in the test phase.

In conclusion, these results suggest that category and semantic distance modulate the influence of prediction on memory through different mechanisms: category may influence memory by modulating encoding burden, while semantic distance may influence memory performance through semantic integration. These findings not only support the view that predictable items have better memory performance, but also suggest that the divergence between predictable and unpredictable memory performance may arise from the relative contributions of two independent factors: encoding difficulty and encoding effort.

Keywords category rules, semantic distance, prediction, recognition, EEG