

预期调整视觉感知的的时间进程： 来自脑电的证据*

付春野^{1,2} 李艾馨² 吕勇^{**1}

(¹天津师范大学心理学部, 天津, 300387) (²南开大学社会心理学系, 天津, 300350)

摘要 视觉预测编码的相关研究通常比较符合和违反预期两类刺激诱发的神经活动差异, 而忽略了一类两者折中的刺激: 违反预期但与符合预期的刺激具有相似性。通过结合事件相关电位技术与视觉统计学习范式, 考察符合预期、非相似性违反预期和相似性违反预期三种条件下视觉感知的动态神经过程。结果发现: 在早期阶段 (90~140ms), 符合预期和相似性违反预期条件均激发更大 P1; 在中期阶段 (200~280ms), 仅非相似性违反预期条件激发更大 N2; 在晚期阶段 (350~500ms), 仅符合预期条件激发更大 P3。相似性违反预期条件早期的 ERP 活动与符合预期相似, 但晚期却出现差异, 这表明预测编码机制能动态地在效率与精确度间权衡, 将相似性违反预期刺激纳入研究可更深入揭示视觉预测编码的内部模型。

关键词 视觉感知 预测编码 感知相似性 事件相关电位 视觉统计学习

1 引言

感知是人类认知的基石。预测编码理论 (predictive coding theory) 提出, 感知是一个主动的建构过程 (Clark, 2013; Friston, 2005)。大脑不断生成对外部世界的预测或假设, 并将其与实际的感官输入进行对比, 以优化感知体验 (Summerfield & Egner, 2016)。根据预测编码理论, 感知源于先验信息 (prior) 和感官 (sensory) 信息的动态整合。先验代表个体在接收到感官信息之前已有的知识和信念 (Teufel & Fletcher, 2020), 其不仅作用于决策过程, 还会影响大脑对感官信息本身的编码 (Walsh et al., 2024)。先验信息如何被编码并整合到感知过程是视觉感知研究领域中的关键问题。

聚焦视觉预测编码, 研究者使用功能性核磁共振成像、脑磁和脑电等技术开展了大量研究 (Alink et al., 2010; Richter et al., 2018; Stefanics et al., 2018; Zhou et al., 2020)。这些研究多数集中于考察两类刺激之间的神经活动对比: 一类是符合预期的刺激 (expected stimuli), 另一类是违反预期的刺激 (unexpected stimuli)。前者与先验一致, 后者则与

先验冲突。这两类刺激是预测编码框架下的两个关键维度, 其理论基础是当感官输入与预期不符时, 会产生预测误差 (prediction errors), 进而驱动神经活动的变化 (Friston, 2005; Rao, 2005; Rao & Ballard, 1999)。然而, 这种二分的研究范式忽略了现实世界的复杂性。在日常生活中, 我们经常遇到介于完全符合预期和完全违反预期之间的情况, 例如所感知到的刺激虽然违反预期, 但却与符合预期的刺激高度相似。

在视觉预测编码研究中, 引入“违反预期但与符合预期相似”这一新的刺激类别具有理论意义。这类刺激兼具符合和违反预期的部分特征: 一方面, 其在某些维度上 (例如颜色等低层级特征或类别等高层级属性) 与符合预期的刺激一致; 另一方面, 由于这类刺激并非完全符合先前的预期, 因此其仍属于违反预期的范畴。这种独特性质的刺激类别为探索预测编码内部模型的特性提供了新的视角。假如这类刺激的神经反应模式与符合预期的刺激一致, 则代表预测编码的内部模型并非精细化的; 反之, 如果这类刺激的神经反应模式与违反预期的刺激一致,

* 本研究得到中央高校基本科研业务费 (63232141) 的资助。

** 通讯作者: 吕勇, E-mail: ly6312@163.com

DOI:10.16719/j.cnki.1671-6981.20260105

则表明内部模型对预期违反高度敏感。此外,这类刺激的神经反应模式也可能呈现出独特的时间动态特征。例如,早期阶段表现出与符合预期一致的模式,而晚期阶段则转变为与违反预期一致的模式。这种动态转变可能反映了内部模型从稳定到更新的过程。总之,将这类兼具符合和违反预期特征的新刺激类型纳入预测编码框架,有助于更全面地理解感知推理过程,这是对预测编码理论的重要补充和完善。

基于此,本研究结合视觉统计学习范式(visual statistical learning paradigm)和事件相关电位(event-related potentials)技术,探究符合预期、违反预期且与符合预期的刺激相似(unexpected-similar,相似性违反预期)和违反预期且与符合预期的刺激不相似(unexpected-dissimilar,非相似性违反预期)三种类型刺激在不同时间进程上的神经活动差异,并从以下两个方面提出研究假设。

首先,以往研究发现符合预期的刺激会在视觉加工早期激活更强的神经活动。例如,使用oddball范式和线索提示范式的研究均发现,符合预期的刺激激活了更大的P1成分(Kouider et al., 2015; Saurels et al., 2024);还有研究通过听觉线索为视觉刺激出现的时间点提供预测,结果发现符合预期时会产生更大的N1成分(Xu et al., 2021)。P1与早期的注意调节有关(Di Russo et al., 2002),而N1与对刺激的知觉辨别有关(Luck, 2014)。因此,这些研究表明符合预期的刺激会在早期迅速获得更多注意资源且知觉敏感性更高。更进一步研究发现,当两个刺激被感知为相似时,它们的神经表征或神经激活的潜在模式也相似(Cichy et al., 2019; Edelman, 1998; Wardle et al., 2016)。因此,当违反预期的刺激与符合预期的刺激相似时,可能也会在视觉加工的早期阶段产生与符合预期刺激相似的神经获益。据此提出假设1:相比于非相似性违反预期的刺激,符合预期和相似性违反预期的刺激可产生更大的P1和N1成分。

在视觉加工的后期阶段,大多数研究均发现违反预期的刺激会激活更强的神经活动(Hughes et al., 2013; Klaffehn et al., 2019; Le Bars et al., 2019; Todorovic & de Lange, 2012)。前述介绍的几项研究也在视觉加工后期发现了预测编码模式的反转。例

如,违反预期的刺激激活了更大的P400和晚期慢波(Kouider et al., 2015)、更大的N2成分(Xu et al., 2021)和P3成分(Saurels et al., 2024)。N2反映了对视觉新异刺激的检测(Folstein & Van Petten, 2008);而P3则是一种多功能正成分,与注意分配、工作记忆和情境更新等认知过程有关,波幅受到刺激重要性的调节(Glazer et al., 2018; Nieuwenhuis et al., 2005; Polich, 2007)。因此整体来讲,违反预期所产生的预测误差主要作用于视觉加工的晚期阶段,以促进内部模型的更新。但也有研究者强调预期违反程度的重要性,当违反预期的刺激与符合预期的刺激较为相似时,可能会因预期违反程度较小而导致无法更新内部模型(Meindertsma et al., 2018; Press et al., 2020)。因此,可能仅足够“意外”的非相似性违反预期的刺激才能触发视觉加工后期预测编码模式的反转。据此提出假设2:相比于符合预期和相似性违反预期的刺激,非相似性违反预期的刺激会激活更大的N2和P3成分。

基于以上,本研究在视觉预测编码的框架下引入相似性违反预期这一新的刺激类别,通过比较其与符合预期和非相似性违反预期的刺激在不同时间进程上的神经反应模式差异,进而更全面地理解预测编码的动态机制。

2 方法

2.1 参与者

使用G*Power估算样本量($effect\ size = .40$, $p < .01$, $power = .95$),估算结果为24人。共招募26名参与者,其中有3名参与者的数据因脑电伪迹过多被视为无效。共得到有效数据23人,其中男生8人,女生15人,平均年龄19岁($SD = 1.1$ 岁)。所有参与者无神经或精神病史,视力或矫正视力正常。实验前参与者均签署知情同意书,任务完成后获得相应报酬。

2.2 实验设计

本实验采用单因素三水平的被试内实验设计,分为符合预期、相似性违反预期和非相似性违反预期三个实验条件。因变量包括行为学指标(反应时和正确率)和脑电指标。

2.3 实验材料

实验材料分为线索刺激和目标刺激两种。前者使用 Duñabeitia 等 (2018) 开发的一套应用于心理学和认知科学等领域的彩色图片中的 4 张(图 1 左); 后者为 Cohen 等 (2020) 研究中使用的 4 幅黑色线条画 (图 1 右)。选择两种物理属性差异较大的刺激分别作为线索和目标, 有助于避免参与者在实验中发生混淆。

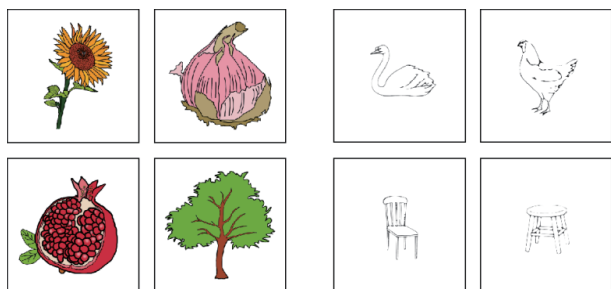


图 1 线索刺激 (左) 和目标刺激 (右)

更进一步, 通过目标刺激类别操纵感知相似性。Mohan 和 Arun (2012) 的研究表明, 同类客体可引发感知相似性。为确保同类目标刺激间具有感知相似性, 且不同目标刺激的辨别难度无差异, 通过实验对目标刺激进行检验。检验结果发现, 同类刺激可引发参与者更高的感知相似性, 且不同客体的识别难度均无显著差异。

2.4 实验程序

实验程序改编自 Richter 和 de Lange (2019) 研究中使用的视觉统计学习范式, 程序包括统计学习、阈限测试和正式实验三个阶段。统计学习范式可在有效建立预期的基础上, 保证不同实验条件下每个目标刺激出现的概率保持一致, 进而分离物理属性对神经活动的影响 (Feuerriegel et al., 2021)。采用 E-Prime 2.0 (Psychology Software Tools, Inc., Sharpsburg, PA) 编写实验程序, 屏幕分辨率为 1024×768 像素, 刷新率为 60 Hz。实验中参与者使用头托固定头部位置, 以保持实验过程中眼睛与屏幕的距离为 60 cm。

2.4.1 统计学习阶段

首先, 参与者需要记忆线索刺激和目标刺激之间的关系, 进而在相应线索与目标刺激之间形成准确的预期。如图 2 左所示, 其中“L”代表线索刺激, “T”代表在线索刺激之后出现的目标刺激。每一个线索刺激都有与其相对应概率的目标刺激。在参与者报告能记住线索与目标之间的关系后, 请其完成学习

阶段的实验任务。线索和目标的关系在不同参与者间进行平衡, 以抵消实验材料自身差异所造成的影响。

统计学习阶段的实验程序与正式实验相似 (图 4)。首先呈现注视点界面, 注视点大小为 $.5^\circ \times .5^\circ$, 呈现时间为 300ms。注视点消失后, 呈现 300ms 的线索刺激, 大小为 $11^\circ \times 11^\circ$ 。在线索刺激消失 400~600ms 后, 呈现目标刺激。目标刺激的呈现时间为 67ms, 大小为 $16^\circ \times 16^\circ$, 每个目标刺激的高斯白噪声方差均为 .05。在看到目标刺激后, 参与者需要立刻判断刚刚呈现的一对刺激是否与记忆阶段一致, 当符合记忆时按“是”, 违反时按“否”。80% 的试次中, 刺激呈现顺序符合记忆阶段顺序, 20% 的试次违反记忆阶段顺序。要求参与者又快又准确地作出判断, 超过 2000ms 未作答则将该试次记为错误试次。在每个组块完成后, 将该组块的正确率反馈给参与者。当正确率低于 90% 时, 该组块重做。统计学习阶段共 480 个试次, 平均分为 6 个组块。

2.4.2 阈限测试阶段

阈限测试阶段的目标是为每个参与者“量身定制”一个符合其自身阈限水平的视觉刺激强度, 以保证任务难度在参与者间保持一致性。该设置主要为了促使不同参与者所建立的预期对视觉感知的影响模式更趋同, 进而有效排除潜在混淆因素。

通过 MATLAB R2018a (MathWorks) 对目标刺激进行处理, 共设置 20 个高斯白噪声阶梯 (噪声方差从 .05 到 .24), 阶梯越高则刺激越清晰 (示例见图 3 左)。采用阶梯自适应程序, 阈限阶段的测试过程如图 3 右。初始阶梯的噪声方差为 .12, 每做错一次升高一个阶梯 (降低 .01 的噪声方差), 每连续做对三次降低一个阶梯 (增加 .01 的噪声方差)。阈限阶段共进行 80 个试次, 以后 40 个试次的结果平均值作为正式实验的噪声值。前后 40 个试次中每个目标出现的次数均为 10 次, 参与者需要判断刺激是什么。在键盘和电脑屏幕下方分别粘贴对应的刺激选项, 并在实验前要求参与者对每个刺激的按键位置进行记忆和练习。当平均后的阶梯值为非整数时, 按照四舍五入来确定目标刺激阈限。要求参与者在看见刺激之后又快又准确地作出判断, 超过

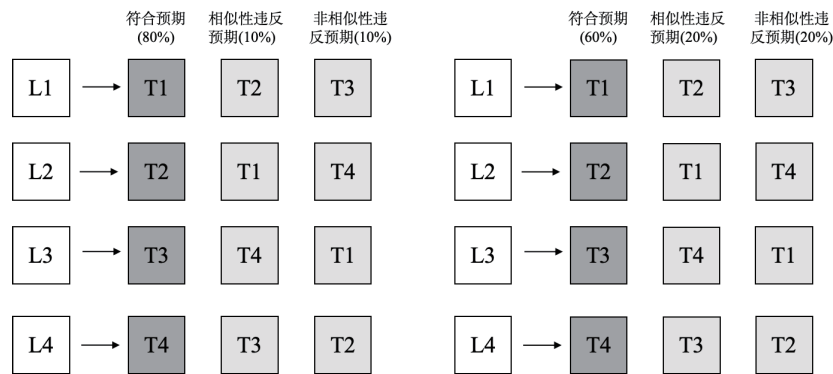


图2 统计学习阶段（左）和正式实验阶段（右）线索刺激和目标刺激之间的概率关系

2000ms 未反应则将该试次视为错误试次。

2.4.3 正式实验阶段

正式实验的流程图见图4。正式实验程序与统计学习阶段有三个不同。首先，正式实验阶段目标刺激的高斯白噪声方差按照阈限阶段的结果来呈现；其次，正式实验阶段，符合预期条件的试次占总试次数的60%，相似性和非相似性违反预期条件的试次均占总试次数的20%（图2右）；最后，参与者需要判断目标刺激是什么。

正式实验阶段每个组块120个试次，共10个组块。参与者先完成32个试次的练习。在练习试次中，线索刺激以100%的有效性预测目标刺激，每对线索与目标均呈现8个试次。正式实验的持续时间约50分钟，参与者可在组块间自由决定休息时间。

2.5 脑电记录与分析

采用Neuroscan公司生产的Curry 8系统采集脑电数据，按照国际10-20系统扩展的64导电极帽进行EEG记录。以右眼眼眶上和下1.5cm处的电极点记录垂直眼电（VEOG），以左眼和右眼外侧1.5cm处的电极记录水平眼电（HEOG）。脑电数据

采集时以左侧乳突为参考电极、右侧乳突为记录电极。模拟滤波带通为.05~400Hz，A/D采样频率为1000Hz/导。以AFz点接地，电极与头皮间的电阻小于5KΩ。

使用Curry 8软件完成预处理阶段工作：对原始数据中的眼电干扰进行矫正，采用双侧乳突平均作为参考；以.1~30Hz进行带通滤波，同时剔除波幅超过 $\pm 100\mu\text{V}$ 的其它噪声伪迹；取目标刺激呈现前200ms至目标刺激呈现后800ms时间窗内脑电叠加获得ERP成分，并以目标刺激呈现前200ms作为基线。使用基于MATLAB R2018a的ERPlab工具包（Lopez-Calderon & Luck, 2014）对预处理后的脑电数据进行平均、导出数据及作图等工作。

以P1、N1、N2和P3四个ERP成分作为分析指标。通过脑电结果的人工识别及参考相关研究（Marzecová et al., 2017; Koivisto et al., 2017）确定各成分的取值电极点和时间窗口，分别如下：取Oz、O1/2三个电极点和目标刺激后90~140ms时间窗的平均值作为枕区P1的平均波幅；取Fz、F1/2、F3/4、F5/6七个电极点和100~160ms时间

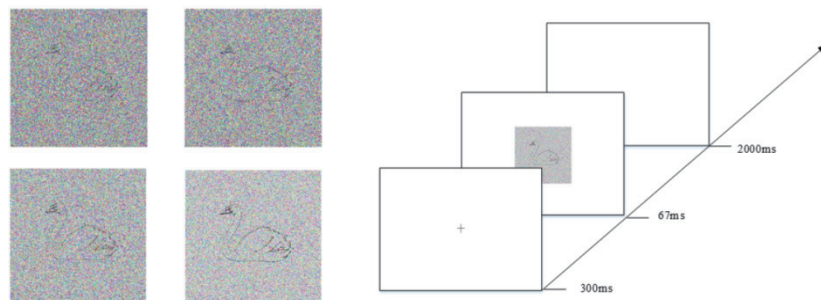


图3 阈限阶段的刺激材料示例（左）和阈限阶段流程图（右）

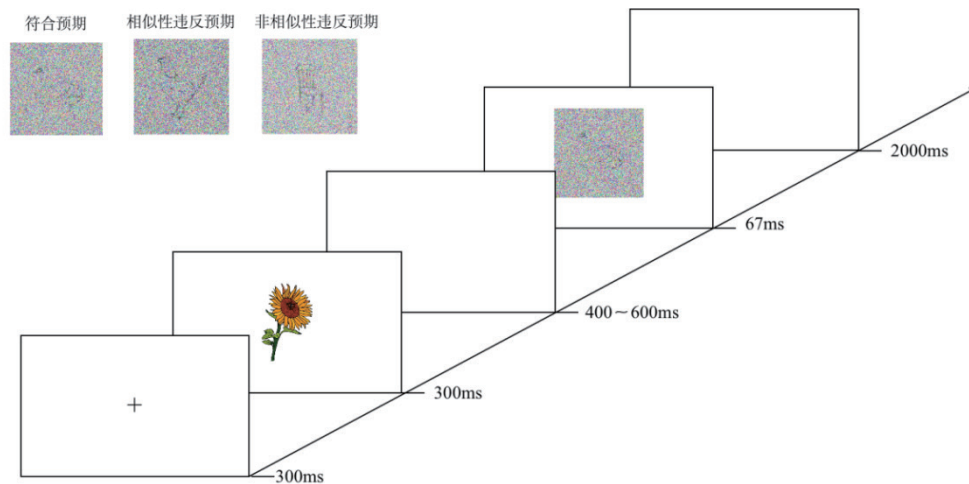


图4 单个试次流程图

窗的平均值作为额叶 N1 的平均波幅；取 FPz、FP1/2、AF3/4、Fz、F1/2、F3/4、F5/6 十二个电极点和 200~280ms 时间窗的平均值作为前额叶 N2 的平均波幅；取 Pz、P1/2、P3/4、P5/6 七个电极点和 350~500ms 时间窗口的平均值作为顶叶 P3 的平均波幅。

3 结果

对目标刺激的高斯白噪音方差值进行计算，平均值为 .23 ($SD = .01$)，无参与者的高斯白噪音方差超过平均值的 3 个标准差；正确率为 91.8% ($SD = 4.2$)，所有参与者的正确率均在平均值的 3 个标准差之内。

3.1 行为数据结果

对正确率进行单因素重复测量方差分析，结果表明，实验条件对正确率的影响显著， $F(2, 21) = 19.01, p < .001, \eta^2 = .64$ 。两两条件间进行配对样本 t 检验的结果显示：符合预期条件的正确率 (94.9 ± 3.5) 显著高于相似性违反预期条件 (84.6 ± 7.8)， $t(22) = 6.23, p < .001, \text{Cohen's } d = 1.30$ ；符合预期条件的正确率显著高于非相似性违反预期条件 (89.8 ± 7.3)， $t(22) = 4.02, p < .001, \text{Cohen's } d = .84$ ；非相似性违反预期条件的正确率显著高于相似性违反预期条件， $t(22) = 6.23, p < .001, \text{Cohen's } d = 1.01$ 。

删除所有反应错误的试次，对反应时进行单因素重复测量方差分析。结果表明，实验条件对反应时的影响显著， $F(2, 21) = 34.50, p < .001, \eta^2 = .61$ 。两两条件间进行配对样本 t 检验的结果显示：符合

预期条件的反应时 (739 ± 150) 显著短于相似性违反预期条件 (801 ± 139)， $t(22) = 6.55, p < .001, \text{Cohen's } d = 1.37$ ；符合预期条件的反应时显著短于非相似性违反预期条件 (819 ± 150)， $t(22) = 6.15, p < .001, \text{Cohen's } d = 1.28$ ；相似性违反预期条件的反应时显著短于非相似性违反预期条件， $t(22) = 2.62, p < .05, \text{Cohen's } d = .55$ 。

3.2 脑电数据结果

对 N1、P1、N2 和 P3 这四个成分分别进行单因素重复测量方差分析。

N1 成分的结果表明，实验条件对 N1 的平均波幅影响不显著， $F(2, 21) = 1.89, p > .05$ ，符合预期 (-2.44 ± 2.06)、相似性违反预期 (-2.42 ± 2.15) 和非相似性违反预期 (-2.68 ± 2.33) 三个条件下的 N1 波幅不存在显著差异。

P1 成分的结果表明，实验条件对 P1 的平均波幅影响显著， $F(2, 21) = 4.44, p < .05, \eta^2 = .17$ 。两两条件间进行配对样本 t 检验，统计结果显示：符合预期条件的平均波幅 ($-.02 \pm 3.35$) 和相似性违反预期条件 ($-.03 \pm 3.54$) 无显著差异， $t(22) = .08, p > .05$ ；非相似性违反预期条件的平均波幅 ($-.33 \pm 3.41$) 显著低于符合预期条件， $t(22) = 2.84, p < .05, \text{Cohen's } d = 1.21$ ；非相似性违反预期条件的平均波幅显著低于相似性违反预期条件， $t(22) = 2.46, p < .05, \text{Cohen's } d = 1.05$ 。

N2 成分的结果表明，实验条件对 N2 的平均波幅影响显著， $F(1, 21) = 4.98, p < .05, \eta^2 = .18$ 。两两条件间进行配对样本 t 检验，统计结果显示：符

合预期条件的平均波幅 (-6.10 ± 4.57) 和相似性违反预期条件 (-6.11 ± 4.59) 无显著差异, $t(22) = .07, p > .05$; 相比于符合预期条件, 非相似性违反预期条件的平均波幅 (-6.60 ± 4.52) 更负, $t(22) = -2.84, p < .05$, Cohen's $d = 1.21$; 相比于相似性违反预期条件, 非相似性违反预期条件的平均波幅更负, $t(22) = 2.62, p < .05$, Cohen's $d = 1.12$ 。

P3 成分的结果表明, 实验条件对 P3 的平均波幅影响显著, $F(2, 21) = 4.52, p < .05, \eta^2 = .17$ 。两两条件间进行配对样本 t 检验, 统计结果显示: 符合预期条件的平均波幅 (5.84 ± 4.58) 显著高于相似性违反预期条件 (5.04 ± 4.94), $t(22) = 2.53, p < .05$, Cohen's $d = 1.08$; 符合预期条件的平均波幅显著高于非相似性违反预期条件 (5.17 ± 4.61), $t(22) = 2.53, p < .05$, Cohen's $d = 1.08$; 相似性违反预期条件的平均波幅与非相似性违反预期条件无显著差异。

P1、N2 和 P3 这三个结果显著的成分的示例电极波形图和地形图见图 5。

4 讨论

结合视觉统计学习范式和 ERP 技术, 本研究聚焦于符合预期、相似性违反预期和非相似性违反预期三种条件在不同时间进程上的神经活动差异。研究结果呈现了视觉预测编码多阶段和非线性的特征, 揭示了大脑如何在准确性和效率之间进行权衡。

在早期阶段, 相比于非相似性违反预期的刺激, 符合预期和相似性违反预期的刺激均激发更强的枕区 P1。该结果部分地支持了假设 1。枕区 P1 反映了对刺激的早期注意增强, 且其同时受自下而上的感官输入和自上而下的注意的影响 (Di Russo et al., 2002; Herrmann & Knight, 2001)。这表明在早期阶段, 符合预期的视觉感官刺激会与自上而下的预期产生共鸣, 进而优先获得注意资源 (Auzstulewicz & Friston, 2016; Todorovic et al., 2012)。而相似性违反预期的刺激在客体类别上与预期的模版更为匹配 (例如同为禽类动物), 因而也能够快速激活相应的感知过程, 并获取更多注意资源。这也与行为指标中反应时的结果一致, 相比于非相似性违反预期的刺激, 参与者对相似性违反预期的刺激反应更快。这些结果共同表明, 早期的预测编码更可能遵循效率优先原则, 并非完全精确。

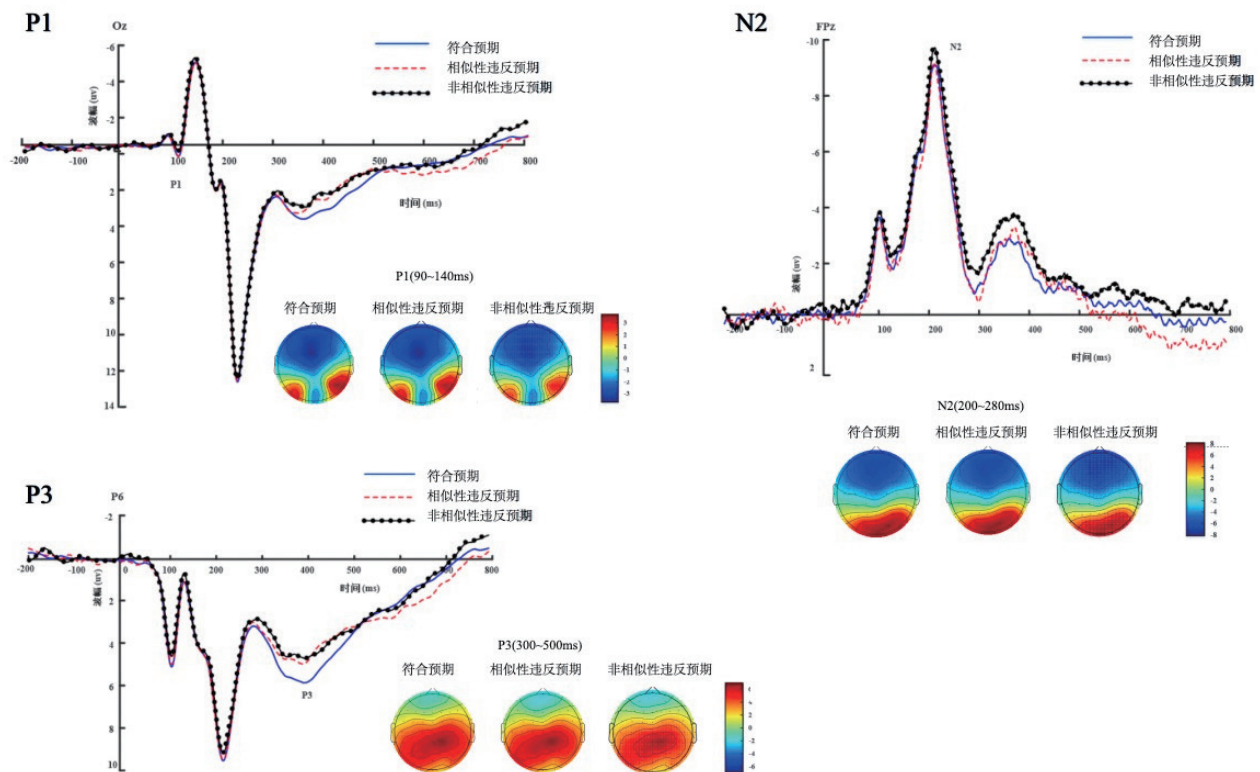


图 5 P1、N2 和 P3 成分的示例电极波形图和地形图

此外,在 N1 成分上并未发现与 P1 成分一致的结果,三种条件间的 N1 波幅不存在显著差异。N1 与个体对刺激的知觉辨别相关 (Luck, 2014),视觉 N1 反映的是自下而上的辨别过程 (Vogel & Luck, 2000)。与 P1 成分主要反映注意增益调制不同, N1 成分更多地受到刺激的物理属性 (如复杂度、突显性等) 及个体的识别经验影响 (Ronga et al., 2013; Scott et al., 2006)。在本研究中,我们采用短暂的统计学习 (学习阶段约 20~30 分钟) 来建立被试对刺激的预期。这种操纵可能导致被试对三种刺激类别的识别经验十分有限,因而尚不足以显著改变符合预期、相似性违反预期和非相似性违反预期的刺激在知觉辨别阶段 (即 N1) 的加工方式。这提示调制 N1 可能需要更充分和持久的学习,以建立稳固的预期和辨别经验。未来研究可考虑延长统计学习时程或使用与生俱来的先验 (例如光线自上而下; Girshick et al., 2011) 来建立预期,以考察符合预期、相似性违反预期和非相似性违反预期三种条件在 N1 成分上的差异是否会显现出来。

紧接着,在 N2 成分上,预测编码的方向发生了反转,仅非相似性违反预期的刺激激活了更强的 N2。该结果部分支持假设 2。前额 N2 反映检测到视觉新异刺激或强烈意外感知输入的神经活动 (Folstein & Van Petten, 2008),这表明预测误差信号被激活,从而触发了更高层级的加工以更新内部模型 (Arnal & Giraud, 2012; Friston, 2005)。但是,相似性违反预期并不能激活更大的 N2。相似性违反预期虽然在客体身份上与预期不一致 (例如鸡和鹅是不同的动物),但其在客体属性上却与符合预期的刺激一致 (例如鸡和鹅同属于禽类)。这种部分匹配可能减弱了冲突或预测误差的大小,使得相似性违反预期的刺激未能激活更强的 N2。总体来说, N2 成分上的结果揭示了预测编码的一个重要特征,即预测误差信号的强度取决于刺激与预期的偏离程度。当刺激在多个维度上都与预期不一致时,预测误差信号最强,触发了感知过程中更新内部模型的需要。但当刺激仅在某些维度上违反预期,预测误差信号相对较弱,内部模型可能仍保持稳定。这表明预测编码过程并非是“全或无”的,而是根据刺激与预期的具体偏离程度进行灵活调节。

随后一个有趣的发现是:预期影响神经活动的

方向又发生了第二次反转。相比于两种违反预期的条件,符合预期时激活了更大的 P3 成分。根据假设, P3 成分应获得与 N2 成分相一致的结果。P3 成分的心理含义本身比较复杂,根据不同的心理过程和出现的脑区, P3 可进一步分为 P3a 和 P3b。P3a 通常与新奇或意外刺激的检测有关,主要出现在额叶区域; P3b 则与刺激判断和决策过程有关,主要出现在顶叶区域 (Verleger, 2020)。鉴于本研究中 P3 成分主要分布在顶叶区域,因此应属于 P3b。关于视觉选择性注意的研究发现,自上而下的注意引发的 P3 主要集中在顶叶 (Zhang et al., 2022)。视觉感知的研究还发现,相比于检测任务 (是否出现数字),辨别任务 (出现的数字是什么) 在顶叶出现了更大的 P3 成分 (Koivisto et al., 2017)。另有研究发现,对视觉判断的信心程度可调节顶叶 P3 的大小,当参与者的决策信心更高时,顶叶 P3 更大 (Ye et al., 2019)。基于以上发现,可推测在目标刺激较为模糊的视觉判断过程中 (本研究使用的是阈限刺激),符合预期的刺激由于在物理属性、客体类别以及客体身份上均与先验信息一致,因此可能在视觉加工后期获得更强的注意、更准确的辨别力以及更高的决策信心。这说明视觉加工后期,预测编码模型会进一步精细化。在这个阶段相似性违反预期的刺激并不会与感官信息进行有效整合,进而形成更精确或更高确定性的视觉体验,这与 P1 阶段具有较大差异。

值得注意的是,在 P3 成分上获得的结果与前人的研究结果不一致。在 Kouider 等 (2015) 的研究中,符合预期的刺激在早期激活了更大的 P1,而违反预期的刺激则激活了更大的 P400 和晚期慢波。一种可能的解释是, Kouider 等 (2015) 的研究对象是婴儿,相较于成人,婴儿不能形成对刺激的高层级概念或元觉知层面的确定性感知,或视觉加工后期的精细化预测模型的发展并不成熟。而在 Xu 等 (2021) 的研究中,仅在 N1 和 N2 成分上发现了先后的对立加工过程。这可能是因为 Xu 等 (2021) 的研究所使用的目标是视觉简单刺激 (double-flash, 双闪灯),因此参与者不会对目标刺激形成更高层级的概念层面的感知。当然,还有一种解释是这两项研究使用的是跨通道线索提示范式,即用听觉线索来预测视觉刺激,而当前不同研究结果上的差异

是因感觉通道的变化所致。对这些结果的精确解释需要后续的实证研究加以检验。

通过在预测编码框架下引入违反预期但与符合预期相似的刺激类型,本研究结果可为预测编码理论的相关争议提供新的视角。尽管预测编码理论已激发了大量实证研究,但研究者对其具体预测编码模式仍存在较大分歧(Rossel et al., 2023)。这种分歧不仅体现在理论层面,也反映在现实情境中大脑如何平衡预测和预测误差的加工。一方面,依赖预测信号有助于提高感知效率,但可能降低感知灵敏度;另一方面,对预测误差的敏感虽然会带来更大的神经代价,但却能更快地适应动态变化的环境。本研究结果为理解这一悖论提供了新的解释。我们发现,在早期阶段,大脑对符合预期和相似性违反预期的刺激表现出类似的神经获益,而非相似性违反预期的刺激则受到抑制。这一结果支持了 Press 等(2020)的观点,即在感知加工的早期阶段,预测信号的优先性有助于在感官不确定性下快速生成对外界的初步感知,尽管这种感知可能牺牲部分精确性。本研究行为数据中相似性违反预期的较高错误率,也表明了遵循预测信号可能导致的感知偏差。更进一步地,Corlett(2020)认为,在早期偏向于符合预期事件的过程使得对意外事件的加工过于迟缓,不符合人类的适应机制。而本研究在中期阶段的结果发现,非相似性违反预期的刺激激发了更强的神经活动,而相似性违反预期则与符合预期刺激激发的神经活动无显著差异。这提示预测编码可能遵循一个动态演变的过程:与预期相似的意外事件会在早期获得一定程度的优先加工,而在之后的阶段才会与预期事件区分开来并被识别为预测误差。

本研究虽然发现了一些有意义的结果,但仍存在几个局限,需要在未来研究中加以探究。首先,本研究主要关注客体类别一致所建立的感知相似性对预测加工的影响,而没有系统地考察其他类型的相似性,例如低层级特征和语义相似性等。未来研究应系统探讨不同类型相似性在预测编码中的差异,以更全面地理解相似性违反预期的神经机制。其次,本研究采用事件相关电位技术揭示了符合预期、相似性违反预期和非相似性违反预期的刺激在不同加工阶段的神经活动差异,但其对表征内容的敏感性有限,难以准确刻画这三种条件在神经表征空间中

的位置关系和动态演变。未来研究应综合运用不同的神经科学技术,并结合多元分析方法,以更精细地描绘三种条件的刺激在时空维度上的神经表征动态变化。最后,本研究未要求参与者对视觉感知进行主观感知或信心水平等报告。将此类指标纳入考量范畴,有助于揭示符合预期、相似性违反预期和非相似性违反预期三种条件如何影响感知决策的信心和准确性,并理解元觉知在预测编码中的作用。

参考文献

- Alink, A., Schwiedrzik, C. M., Kohler, A., Singer, W., & Muckli, L. (2010). Stimulus predictability reduces responses in primary visual cortex. *The Journal of Neuroscience*, 30(8), 2960–2966.
- Arnal, L. H., & Giraud, A. L. (2012). Cortical oscillations and sensory predictions. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(7), 390–398.
- Auksztulewicz, R., & Friston, K. (2016). Repetition suppression and its contextual determinants in predictive coding. *Cortex*, 80, 125–140.
- Cichy, R. M., Kriegeskorte, N., Jozwik, K. M., van den Bosch, J. J. F., & Charest, I. (2019). The spatiotemporal neural dynamics underlying perceived similarity for real-world objects. *NeuroImage*, 194, 12–24.
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *The Behavioral and Brain Sciences*, 36(3), 181–204.
- Cohen, M. A., Ortego, K., Kyroudis, A., & Pitts, M. (2020). Distinguishing the neural correlates of perceptual awareness and postperceptual processing. *The Journal of Neuroscience*, 40(25), 4925–4935.
- Corlett, P. (2020). Predicting to perceive and learning when to learn. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(4), 259–260.
- Di Russo, F., Martínez, A., Sereno, M. I., Pitzalis, S., & Hillyard, S. A. (2002). Cortical sources of the early components of the visual evoked potential. *Human Brain Mapping*, 15(2), 95–111.
- Duñabeitia, J. A., Crepaldi, D., Meyer, A. S., New, B., Pliatsikas, C., Smolka, E., & Brysbaert, M. (2018). MultiPic: A standardized set of 750 drawings with norms for six European languages. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71(4), 808–816.
- Edelman, S. (1998). Representation is representation of similarities. *The Behavioral and Brain Sciences*, 21(4), 449–498.
- Feuerriegel, D., Vogels, R., & Kovács, G. (2021). Evaluating the evidence for expectation suppression in the visual system. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 126, 368–381.
- Folstein, J. R., & Van Petten, C. (2008). Influence of cognitive control and mismatch on the N2 component of the ERP: A review. *Psychophysiology*, 45(1), 152–170.
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 815–836.
- Glazer, J. E., Kelley, N. J., Pompattananangkul, N., Mittal, V. A., & Nusslock, R. (2018). Beyond the FRN: Broadening the time-course of EEG and ERP components implicated in reward processing. *International Journal of Psychophysiology*, 132(PB), 184–202.
- Girshick, A. R., Landy, M. S., & Simoncelli, E. P. (2011). Cardinal rules: Visual

- orientation perception reflects knowledge of environmental statistics. *Nature Neuroscience*, 14(7), 926–932.
- Herrmann, C. S., & Knight, R. T. (2001). Mechanisms of human attention: Event-related potentials and oscillations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 25(6), 465–476.
- Hughes, G., Desantis, A., & Waszak, F. (2013). Mechanisms of intentional binding and sensory attenuation: The role of temporal prediction, temporal control, identity prediction, and motor prediction. *Psychological Bulletin*, 139(1), 133–151.
- Klaffehn, A. L., Baess, P., Kunde, W., & Pfister, R. (2019). Sensory attenuation prevails when controlling for temporal predictability of self- and externally generated tones. *Neuropsychologia*, 132, 107145.
- Koivisto, M., Grassini, S., Salminen-Vaparanta, N., & Revonsuo, A. (2017). Different electrophysiological correlates of visual Awareness for detection and identification. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 29(9), 1621–1631.
- Kouider, S., Long, B., Le Stanc, L., Charron, S., Fievet, A. C., Barbosa, L. S., & Gelskov, S. V. (2015). Neural dynamics of prediction and surprise in infants. *Nature Communications*, 6, 8537.
- Le Bars, S., Darriba, Á., & Waszak, F. (2019). Event-related brain potentials to self-triggered tones: Impact of action type and impulsivity traits. *Neuropsychologia*, 125, 14–22.
- Lopez-Calderon, J., & Luck, S. J. (2014). ERPLAB: An open-source toolbox for the analysis of event-related potentials. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, 213.
- Luck, S. (2014). *An introduction to the event-related potential technique*. The MIT Press.
- Marzecová, A., Widmann, A., SanMiguel, I., Kotz, S. A., & Schröger, E. (2017). Interrelation of attention and prediction in visual processing: Effects of task-relevance and stimulus probability. *Biological Psychology*, 125, 76–90.
- Meindertsma, T., Kloosterman, N. A., Engel, A. K., Wagenmakers, E. J., & Donner, T. H. (2018). Surprise about sensory event timing drives cortical transients in the beta frequency band. *The Journal of Neuroscience*, 38(35), 7600–7610.
- Mohan, K., & Arun, S. P. (2012). Similarity relations in visual search predict rapid visual categorization. *Journal of Vision*, 12(11), 19.
- Nieuwenhuis, S., Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). Decision making, the P3, and the locus coeruleus-norepinephrine system. *Psychological Bulletin*, 131(4), 510–532.
- Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128–2148.
- Press, C., Kok, P., & Yon, D. (2020). The perceptual prediction paradox. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(1), 13–24.
- Rao, R. P., & Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: A functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nature Neuroscience*, 2(1), 79–87.
- Rao, R. P. N. (2005). Bayesian inference and attentional modulation in the visual cortex. *NeuroReport*, 16(16), 1843–1848.
- Richter, D., & de Lange, F. P. (2019). Statistical learning attenuates visual activity only for attended stimuli. *eLife*, 8, e47869.
- Richter, D., Ekman, M., & de Lange, F. P. (2018). Suppressed sensory response to predictable object stimuli throughout the ventral visual stream. *The Journal of Neuroscience*, 38(34), 7452–7461.
- Ronga, I., Valentini, E., Mouraux, A., & Iannetti, G. D. (2013). Novelty is not enough: Laser-evoked potentials are determined by stimulus saliency, not absolute novelty. *Journal of Neurophysiology*, 109(3), 692–701.
- Rossel, P., Peyrin, C., & Kauffmann, L. (2023). Subjective perception of objects depends on the interaction between the validity of context-based expectations and signal reliability. *Vision Research*, 206, 108191.
- Saurels, B. W., Johnston, A., Yarrow, K., & Arnold, D. H. (2024). Event probabilities have a different impact on early and late electroencephalographic measures regarded as metrics of prediction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 36(1), 187–199.
- Scott, L. S., Tanaka, J. W., Sheinberg, D. L., & Curran, T. (2006). A reevaluation of the electrophysiological correlates of expert object processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(9), 1453–1465.
- Stefanics, G., Heinzle, J., Horváth, A. A., & Stephan, K. E. (2018). Visual mismatch and predictive coding: A computational single-trial ERP study. *The Journal of Neuroscience*, 38(16), 4020–4030.
- Summerfield, C., & Egner, T. (2016). Feature-based attention and feature-based expectation. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(6), 401–404.
- Teufel, C., & Fletcher, P. C. (2020). Forms of prediction in the nervous system. *Nature Reviews Neuroscience*, 21(4), 231–242.
- Todorovic, A., & de Lange, F. P. (2012). Repetition suppression and expectation suppression are dissociable in time in early auditory evoked fields. *The Journal of Neuroscience*, 32(39), 13389–13395.
- Verleger, R. (2020). Effects of relevance and response frequency on P3b amplitudes: Review of findings and comparison of hypotheses about the process reflected by P3b. *Psychophysiology*, 57(7), e13542.
- Vogel, E. K., & Luck, S. J. (2000). The visual N1 component as an index of a discrimination process. *Psychophysiology*, 37(2), 190–203.
- Walsh, K., McGovern, D. P., Dully, J., Kelly, S., & O'Connell, R. (2024). Prior probability cues bias sensory encoding with increasing task exposure. *eLife*, 12, RP91135.
- Wardle, S. G., Kriegeskorte, N., Grootswagers, T., Khaligh-Razavi, S. M., & Carlson, T. A. (2016). Perceptual similarity of visual patterns predicts dynamic neural activation patterns measured with MEG. *NeuroImage*, 132, 59–70.
- Xu, M., Meng, J., Yu, H., Jung, T. P., & Ming, D. (2021). Dynamic brain responses modulated by precise timing prediction in an opposing process. *Neuroscience Bulletin*, 37(1), 70–80.
- Ye, M., Lyu, Y., Sclođnick, B., & Sun, H. J. (2019). The P3 reflects awareness and can be modulated by confidence. *Frontiers in Neuroscience*, 13, 510.
- Zhang, Q., Luo, C., Ngetich, R., Zhang, J., Jin, Z., & Li, L. (2022). Visual selective attention P300 source in frontal-parietal lobe: ERP and fMRI study. *Brain Topography*, 35(5), 636–650.
- Zhou, Y. J., Pérez-Bellido, A., Haegens, S., & de Lange, F. P. (2020). Perceptual expectations modulate low-frequency activity: A statistical learning magnetoencephalography study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 32(4), 691–702.

Time Course of Predictions Adjustment to Visual Perception: Evidence from EEG

Fu Chunye^{1,2}, Li Aixin², Lyu Yong¹

(¹Faculty of Psychology, Tianjin Normal University, Tianjin, 30007)

(²Department of Social Psychology, Nankai University, Tianjin, 300350)

Abstract Visual predictive coding theory posits that the brain actively generates predictions about incoming sensory input and computes prediction errors when the input deviates from expectations. Numerous studies have investigated the neural correlates of predictive coding by comparing brain responses to expected and unexpected stimuli. However, most research has focused on the dichotomy between stimuli that either conform to or violate expectations, neglecting an intermediate stimulus type that falls between these two extremes: stimuli that violate expectations but share perceptual similarity with expected stimuli. Incorporating this novel stimulus type into the predictive coding framework could offer a more nuanced understanding of the neural mechanisms underlying visual perception and the updating of internal models. The present study aimed to investigate the dynamic neural processes underlying visual perception in three conditions – expected stimuli, unexpected-dissimilar stimuli, and unexpected-similar stimuli – by combining event-related potential (ERP) techniques with a visual statistical learning paradigm. We hypothesized that the perceptual similarity between unexpected and expected stimuli would modulate neural activity in a stage-specific manner, revealing the dynamic interplay between expectation and perceptual similarity in shaping visual predictive coding processes.

In this ERP study, human participants were exposed to sequentially presented pairs of visual object stimuli, where the identity of the first object predicted the second object to varying degrees of expectancy based on learned conditional probabilities. On expected trials, the first object effectively predicted the identity of the second object with a 60% probability, whereas on unexpected trials, the first object only predicted the second object with a 20% probability. For unexpected stimuli, perceptual similarity was further manipulated by presenting either two visually similar objects or two perceptually distinct objects. These were referred to as “unexpected-similar stimuli” and “unexpected-dissimilar stimuli”, respectively. The experiment progressed through three phases, including an initial statistical learning phase to implicitly establish predictive relationships between the object pairs, a thresholding phase to calibrate task difficulty and equate baseline performance across participants, and the main experimental phase.

The results revealed clear differences in the pattern of neural activity related to predictive coding over time, demonstrating dynamic influences of predictions on visual processing and consciousness. In the early time window around 100ms, both expected and unexpected-similar stimuli elicited enhanced P1 ERP components. Considering the cognitive functions referred to P1 components, this indicates rapid attentional selection for both stimulus types. In addition, only the unexpected-dissimilar stimuli subsequently elicited a greater N2 component around 200~300ms, which is consistent with neural surprise responses and suggests that the prediction error signal is activated, triggering higher-level processing to update the internal model. Finally, in the later time window around 350~500ms, only the expected stimuli elicited an enhanced P3 component, suggesting facilitated perceptual discrimination and decision-making for expected inputs. Beyond that, the absence of heightened N2 and P3 components in response to unexpected-similar stimuli reflects the presence of intricate mechanisms in predictive coding process. In other words, although violating predictions, unexpected-similar stimuli do not prompt the updating of internal models, and are incapable of forming more accurate visual representations.

By incorporating the novel stimulus type of unexpected stimuli with similarity into the predictive coding framework, this study sheds light on the characteristics and necessary conditions for updating internal models, providing a more comprehensive understanding of visual predictive coding processes. The results highlight the dynamic interplay between expectation and perceptual similarity in shaping neural responses across different stages of visual processing. This research not only advances our theoretical understanding of predictive coding mechanisms but also has practical implications for optimizing the design of brain-inspired artificial intelligence systems. Furthermore, the findings may offer valuable insights into the neural basis of perceptual and cognitive dysfunctions in certain neurological and psychiatric disorders characterized by impaired predictive coding.

Key words visual perception, predictive coding, perceptual similarity, ERP, visual statistical learning paradigm