

孤独症患者在不确定世界中的预期加工缺陷^{*}

谭成慧^{1,2} 张雨晴^{1,2} 幸琪琪^{1,2} 赵源³ 刘电芝^{**1,2}

(¹苏州大学教育学院, 苏州, 215123) (²苏州大学孤独症研究中心, 苏州, 215123)

(³山东政法学院警官学院, 济南, 250014)

摘要 现实世界往往是复杂多变且充满不确定性的, 娴熟的社交互动需要个体具备一定的预期加工能力以学习和适应环境变化。研究通过系统梳理预期障碍假说、贝叶斯知觉理论与预期编码理论并从条件概率估计、先验知识使用及预期误差动态调整三个层面, 探讨了孤独症谱系障碍个体预期加工缺陷的理论机制及其在不同领域的实证证据。基于现有理论与实证研究的整合分析, 研究指出孤独症个体的预期加工缺陷并非表现为领域普遍的预测障碍, 而是具有一定的情境依赖性: 在确定性环境下可基于稳定规则形成预期, 但在不确定的变动环境下灵活使用和调整预期的能力受损。在此基础上以期为未来针对孤独症个体的研究提供更多的理论依据和研究思路, 加深对此类特殊人群的了解。

关键词 孤独症 预期加工 预期障碍假说 贝叶斯知觉理论 预期编码理论

1 引言

娴熟的社交互动需要个体具备关于他人行为意图的知识, 并能实时应用这些知识对他人行为做出适当反应, 这要求个体具备一定的预期加工能力以学习和适应复杂环境 (Krogh-Jespersen et al., 2018)。例如, 通过整合先验知识 (如社交规则) 与即时线索 (如面部表情) 形成预期, 个体得以流畅地参与互动。若预期加工能力不足, 则可能阻碍个体准确预测他人的行为和意图, 进而导致社交互动困难。孤独症谱系障碍 (Autism spectrum disorder, ASD) 是一种由于神经系统失调导致的广泛性发育障碍 (pervasive developmental disorders, PDD), 其典型症状即社会互动及沟通困难, 同时伴随重复刻板行为、兴趣有限以及对感觉刺激的过度敏感或敏感不足 (American Psychiatric Association, 2013)。2020年美国疾控中心 (centers for disease control and prevention, CDC) 最新监测结果显示, 美国儿童孤独症患病率达 1/36, 较此前上升近 10% (Maenner, 2020)。此外, 据 2022 年《中国孤独症教育康复行业发展状况报告 IV》的统计, 目前我国孤独症人群已超过 1000 万, 其中 0~14 岁孤独症儿童超过 200 万,

并以每年近 20 万的速度增长。随着孤独症患病率的逐年攀升, 多学科背景的研究人员正深入探讨孤独症的表现、成因及其背后可能的神经心理机制。诊断标准的不断完善与早期筛查工具的进步 (陈光华等, 2022), 推动研究者提出多种理论假说, 试图揭示其核心症状的本质。

许多理论将孤独症与认知障碍相联系, 主要理论框架可分为两类, 取决于将孤独症何种症状视为主要症状, 其他症状为次要症状。其中社交优先理论如心理理论框架 (Baron-Cohen, 2000), 主要着眼于社交问题, 认为孤独症的核心缺陷在于无法依据自己可能的心理状态来理解他人的行为。非社交理论则认为一般的认知或感知问题才是其症状的主要原因, 其中弱中枢统合理论 (weak central coherence theory, WCC; Frith & Happé, 1994) 和感知功能增强理论 (enhanced perceptual functioning theory, EPF; Motttron et al., 2006) 聚焦于孤独症个体以局部导向而非整体导向的感知加工模式。此外, 执行功能障碍假说从执行功能低下的角度解释孤独症重复和刻板行为症状, 也属于非社交理论范畴 (Hill, 2004)。

早期的理论框架并不是相互排斥的, 而是针对

* 本研究得到江苏省社科基金项目 (25JYB007) 的资助。

** 通讯作者: 刘电芝, E-mail: liudzh@suda.edu.cn

DOI:10.16719/j.cnki.1671-6981.20260323

不同的行为症状提出。每种理论均对孤独症研究领域的发展产生了重大影响，并将研究和临床的重点从单纯的描述性行为方法转向探索症状背后的认知神经机制。然而，这些框架的局限性也在近些年的实证研究中逐渐凸显。首先，尽管这些框架考虑到了认知神经机制，却难以将特定症状与对应的神经机制关联起来，联系在一起的往往是与每个功能领域都相关的广泛神经激活网络（Van de Cruys et al., 2014）；其次，各框架虽试图包含并解释孤独症的所有核心症状，但恰恰由于每种理论的构建都是基于某种症状群，导致其难以全面涵盖孤独症的异质性表现（Chrysaitis, & Seriès, 2023）。近年来基于预期加工视角提出的多种新理论则能在一定程度上解决上述问题（Pellicano & Burr, 2012; Sinha et al., 2014; Van de Cruys et al., 2014），主张预测能力的不足是孤独症症状的核心成因，随着实证研究的增加也逐步受到了研究者的重视。

2 孤独症谱系障碍个体的预期加工理论

2.1 预期障碍假说

孤独症预期障碍假说（predictive impairment in autism hypothesis, PIA）认为孤独症个体存在领域普遍性预测障碍（Sinha et al., 2014），源于其对时间序列马尔可夫系统的估计缺陷，即无法根据事件 A 的发生准确估计事件 B 发生的条件概率，导致其依赖信息加工提取环境实体间预测关系的能力受损。马尔可夫系统估计的基本前提是从观察的事件流中提取状态转移概率，量化状态 A 出现后经时间间隔 Δt 后出现事件 B 的概率，即 $P(B|A, \Delta t)$ 。PIA 假说认为孤独症的核心问题就在于无法正确估计 $P(B|A, \Delta t)$ 条件概率，这种预测能力的不足直接或间接引发感知环境时的异常行为和反应，表现为重复行为、感觉输入过度敏感和心理理论缺陷等核心症状（Sinha et al., 2014）。

具体而言，PIA 假说认为孤独症个体的重复刻板行为是缓解环境不可预测性引发焦虑的适应性策略，环境的不可预测性与焦虑存在强相关（Bondi et al., 2008），动物和人类研究均表明仪式化行为是应对不可预测条件下产生的外部压力的反应（Eilam et al., 2011）。同时孤独症表现出的自我刺激行为也可

能是应对不确定性的一种焦虑反应，通过周期性的行为过滤掉不可预测的环境输入，使自己知觉到更多的可预测信息。此外，刺激序列预测性联系的提取困难导致的习惯化降低，可以解释感觉输入过度敏感现象（Kleinhans et al., 2009）。同样，心理理论作为核心预测任务，需整合历史行为与当下情境来推断他人意图并预测未来行为，即对过往行为执行后验更新或对未来状态进行先验预测，其缺损也源于条件概率估计异常。相反，在规则明确、不确定性较低的领域，如数学（Iuculano et al., 2014）、视觉搜索（Gonzalez et al., 2013）和绘画（Wallace, 2008），部分孤独症个体则表现出优势，这与预测障碍的情境依赖性一致。最后，预测障碍会显著影响运动预期：多项研究表明孤独症患者的基本运动检测和方向感知阈值正常（Milne et al., 2005; Mottron et al., 2006），但与动态物体互动需要预测物体的移动轨迹以便适当规划自己的运动动作。预测能力缺损导致拦截或躲避物体的困难，如避车和接球等简单任务（Robison, 2008），这种动态预测障碍进一步延伸至社交领域，解释其在实时互动中的表现不佳。

总的来说，预期障碍假说强调孤独症个体存在领域普遍性条件概率估计障碍。该障碍可能体现于预测能力相关脑区的异常上：如基底节（负责习惯形成、奖励预测及动作选择）和纹状体（负责奖励学习与概率学习）的功能损伤，可能阻碍环境条件概率规律的有效提取，进而影响预期形成，而小脑（协调时序预测和动作预期）的功能障碍，则与对时间序列事件预测能力下降相关。神经影像学、尸检及动物模型研究证实这些区域的非典型性激活与孤独症关联（Fatemi et al., 2012; Peça et al., 2011; Tsai et al., 2012）。预期障碍假说在一定程度上解决了早期理论框架神经机制映射模糊的问题，并从条件概率估计的角度统合了行为症状的异质性表现，然而其主张的预测障碍普遍性仍值得探讨。此外，虽然解释了感觉输入的过度敏感，但无法解释敏感不足的同时存在；同时其对社交缺陷的解释主要依赖间接证据（如孤独症儿童抛接球动作技能与社交能力的相关性）（MacDonald et al., 2013），强调不同行为特征间的潜在共性联系，因此仍需更多实证研究加以

验证。

2.2 贝叶斯知觉理论

贝叶斯知觉理论 (Bayesian perceptual theory) 认为, 孤独症个体对世界的感知较少受到先验经验的调节 (Pellicano & Burr, 2012), 这种“低先验” (hypo-priors) 导致其知觉过度依赖实时感觉输入, 形成过度精确的感知表征。该理论基于贝叶斯决策框架, 即个体的知觉体验受即时感觉信息与环境先验知识的共同影响。随着感觉加工异常纳入孤独症核心症状, 其非社交症状可能与感知觉异常有关 (Robertson & Baron-Cohen, 2017)。因此, 贝叶斯知觉理论指出孤独症的核心缺损并非感觉输入本身, 而在于对感觉输入的解释异常, 表现为先验知识整合能力受损。相应地, 该理论聚焦于统一解释孤独症的感知非典型性及其他非社会特征, 如重复行为、兴趣有限以及感觉输入的过度敏感或敏感不足。

先验知识权重降低使孤独症个体过于依赖自下而上的感觉输入, 导致其感觉输入过于敏感 (Grandin, 2009)。该机制也可以解释其感觉过度和感觉不足的同时存在: 先验知识的不足使得个体在知觉感觉信息时难以找到与之相匹配的模板来解决知觉歧义, 促使其寻求额外的感觉刺激; 同时缺乏先验也会使得内部约束和限制较少, 这就导致感觉刺激可能出现负载和过度 (Pellicano & Burr, 2012)。此外, 先验整合不足会阻碍孤独症个体预测新的感觉事件的发生, 变化的不可预测性得其需要接受更多的刺激输入才能在新情境中建立安全感, 进而引发对同一性的强烈需求和兴趣有限。特定先验经验的缺乏会导致泛化能力的降低, 迫使行动计划只能限制在已知的范围内, 而重复性自我刺激行为可能就是为了减少环境的不确定性 (Palmer et al., 2017)。

简而言之, 贝叶斯知觉理论强调孤独症个体在感知世界的方式上存在异常, 即先验知识依赖性减弱且过度受感觉输入驱动。这种“低先验”可能表现为无法应用先验知识或者无法学习和产生新的先验知识, 抑或是两者兼而有之 (Fiser et al., 2010)。其神经机制可能涉及负责整合多模态感觉信息的颞顶联合区 (temporoparietal junction, TPJ) 的激活不足, 导致无法利用先验知识补全模糊输入以及初级感觉

皮层的过度激活 (Palmer et al., 2017), 反映对即时感觉输入的过度依赖。相较于预期障碍假说, 该理论聚焦先验知识在孤独症个体预期加工和感知世界中的异常, 为解释孤独症感觉异常同时伴随过度敏感或敏感不足的双向表现提供了新视角, 并深层次探讨了孤独症预测加工缺陷的可能机制。但该假说的理论观点主要局限于孤独症的感知与非社会特征, 并未对社交缺陷进行直接的解释, 而是主张感知源于外部输入与内部模型的交互 (Chrysaitis, & Seriès, 2023)。感知过程上的差异通过影响信息的加工与解释过程, 起到了一定的基础作用, 对社会特征的间接影响需要通过实验操纵的方式加以验证。

2.3 预期编码理论

预期编码理论 (predictive coding theory) 指出, 孤独症的核心缺陷在于对预期误差 (prediction error) 赋予了过高且非灵活的精度 (high inflexible precision of prediction errors in autism, HIPPEA), 即低级感觉预期误差的精度水平过高, 且缺乏对情境相关性的考虑 (Palmer et al., 2013; Van de Cruys et al., 2013)。该理论认为个体对环境的知觉不仅仅依赖于感觉输入, 也要基于我们对周围世界可能的预期 (Clark, 2013)。大脑会持续不断地对世界做出预测并根据这些预测加工感觉输入 (Friston, 2010), 通过分层结构系统, 持续比较传入的感觉信息 (自上而下) 和向下的预期 (自上而下)。那些与预期不匹配的信息会被加工为预期误差, 提示我们接下来的预测可能需要调整。关键机制在于区分相关误差与噪声, 部分预期误差提示环境中存在一些应该学习的信息, 而其他的噪声信息应该被忽略 (Sarafyazd & Jazayeri, 2019)。这种估计哪些线索能够发挥预测作用的元学习能力, 使得典型发展个体能够将感觉输入中的随机变化与环境规律中可学习的变化区分开来。而对于孤独症个体, 在相对稳定的情况下能成功地学习和应用新的环境规律 (Mottron et al., 2013), 但当线索的预测性改变时 (如不稳定环境), 其灵活调整预期误差权重的能力受损, 给予预期误差过高的权重往往会使其高估环境规律的变化量 (Van de Cruys et al., 2014)。因此该理论能够解释孤独症的社会互动及沟通困难、重复行为、兴趣有限及感觉输入的过度敏感等核心症状。

孤独症个体对实时预期误差分配过高的权重，迫使其对每个新异事件均需重新学习，导致对感觉输入的过度敏感。特别是对意外输入引发的无关预期误差也过度加权，最终会导致感官超载（Van de Cruys et al., 2014）。重要的是，这类预期主要基于环境中不太可能重复出现的噪音信息而形成，导致习得的预期泛化效能低下（甚至完全无法泛化）。长此以往，个体容易产生习得性无助感，感到学习投入与功能获益严重不匹配。尤其是在社会互动等复杂情境中，线索与预期无法精确匹配的情况频繁发生，这要求个体能够忽略无关细节或进行有效泛化。这种预测编码异常机制就可以解释孤独症个体在社交沟通方面遇到的困难。此外，预期误差权重异常使孤独症个体频繁遭遇预期违背事件，迫使其采用更占优势的、冲动的或无组织模型的行为模式来应对突发情况（Clark, 2013），外在表现即为重复刻板行为。多次尝试无果后，为了避免失败预期带来的负面体验，孤独症个体倾向于选择那些即便无效但自身高度可预测的线索，导致其注意力和行为过度集中于少数特定线索（Lovaas et al., 1979），表现为兴趣有限和刺激过度选择（stimulus overselectivity）。

综上所述，预期编码理论主张孤独症个体并非无法形成预期误差，而是对预期误差的权重估计缺乏灵活性且过度追求高精度，表明其元学习或情境敏感性存在缺陷。这种非灵活的高精度权重分配机制导致个体为偶然和非重复性变化分配过多权重，阻碍了抽象表征的形成，并引发冗余学习，进而造成定义狭窄、预测水平低下以及分层模型不完整。同时，该机制还可能损害基于刺激信息性（即根据感觉输入中不同类型信息的不确定性）进行自主、灵活注意力选择的能力（Van de Cruys et al., 2014）。其神经基础可能涉及脑岛和前扣带回（anterior cingulate cortex, ACC）：前扣带回不仅表征预期误差，还负责精度适应性调节的基础计算；脑岛则参与不确定性条件下的预期加工；值得注意的是，前扣带回与脑岛活动耦合性强，且受预期误差调节（Limongi et al., 2013）。此外，乙酰胆碱（acetylcholine, ACh）和去甲肾上腺素（norepinephrine, NE）等神经调节剂分别编码预期和意外的不确定性，二者之

间平衡的情境性调节对基于预期误差的预期调整至关重要（Van de Cruys et al., 2014）。因此，该理论将孤独症的核心问题定位于感知、注意、学习和执行功能的交叉点，其核心症状正是这些功能障碍的外在行为表现。区别于认为孤独症存在普遍预测障碍的预期障碍假说，预期编码理论更强调个体在实时变化情境中应用和调整预期的困难，即在不确定环境下难以区分有效与无效预期误差以分配合适权重，使得他们总是在做次优的选择。值得说明的是，该理论虽未直接解释感觉输入过度敏感或敏感不足的同时存在，但可以间接推断为当个体过度关注某些细节（如局部特征）时，可能对其他刺激（如全局信息或社交线索）表现出敏感性不足。

总体而言，三种预期加工理论并非互斥，而是从不同视角剖析预期加工过程，涉及不同的层次关系。预期障碍假说聚焦于预期形成的基础层，强调个体在整合环境统计规律时存在条件概率估计困难，导致预期形成障碍。贝叶斯知觉理论则关注预期使用的中间层，强调个体先验知识使用不足，表现为过度依赖即时感觉输入而无法有效利用先验知识优化预测模型。预期编码理论侧重预期动态调整的调控层，强调个体面临感觉输入与预期冲突时预期误差权重失衡，无法灵活调整预期误差的可信度，导致预期僵化。

随着上述理论的提出，研究者们从不同角度对其核心假说进行多领域验证。这些研究涉及不同的领域，主要集中在概率学习、先验知识和预期误差等方面。相关研究结果在不同程度上分别支持或质疑了特定理论，表1呈现了三种理论的系统对比框架，对于深入理解孤独症谱系障碍个体的预期加工障碍具有重要的理论与实践意义。

3 孤独症谱系障碍个体预期加工障碍的证据

3.1 概率学习

检验预期障碍假说的研究主要聚焦于孤独症个体的概率学习能力，旨在考察其是否存在普遍的预测障碍。概率学习任务要求被试根据不同刺激或选项的反馈积累经验，灵活调整选择以尽可能多地获得奖励（Zamarian, 2011）。多数研究采用双项迫选范式，探究孤独症个体能否通过刺激-反馈关系学

表 1 三种理论的对比框架表

主要理论	预期障碍假说	贝叶斯知觉理论	预期编码理论
核心观点	基于条件概率的预期形成障碍	基于先验知识的预期使用不足	基于预期误差的预期调整困难
研究方法	概率学习任务	错觉任务；知觉闭合任务	预期误差任务
支持证据	变动情境下概率学习困难	错觉效应更弱；知觉闭合更差	违反预期时眼动和神经指标上的异常
适用性	重复行为；感觉输入过度敏感；心理理论缺陷	重复行为；兴趣有限；感觉输入过度敏感或不足	社会互动及沟通困难；重复行为；兴趣有限；感觉输入过度敏感
局限性	无法解释感觉输入过度敏感或敏感不足的同时存在	缺乏对社会特征缺陷的直接解释	缺乏对感觉输入敏感不足的直接解释

习事件发生概率并形成预期，但结果并不一致：其表现取决于反馈奖励类型及情境确定性（即刺激-反馈之间概率关系的稳定程度）。具体而言，在涉及社交奖励或规则频繁变动的低确定性情境下，孤独症个体较难形成预期；但当重复试次增加、情境确定性提高时，他们也能形成预期。例如，研究表明孤独症个体对奖励反馈的学习速度慢于典型发展个体，更频繁地在选项间切换，难以形成准确预期（Mussey et al., 2015）。后续研究进一步揭示，奖励类型显著影响其概率学习效果：相比金钱奖励，孤独症个体在社交奖励学习上表现出更明显的困难（Lin et al., 2012），表明其利用社会反馈进行学习的速度更慢。此外，他们在任务中更倾向于依赖自身偏好而非反馈信息进行选择，其行为模式更符合无学习模型的特征（Rosenblau et al., 2021）。

此外，刺激-反馈概率关系的稳定程度也会显著影响孤独症个体预期的形成。Schuwerk 等人（2016）通过眼动指标考察孤独症儿童的概率学习，发现其预期注视频率低于控制组；刺激重复能增强控制组的预期，但对孤独症组的效应较弱。后续研究表明，孤独症个体在初始试次中缺乏基于反馈的正确预期注视偏向，但随着试次增加能产生学习效应（Chambon et al., 2017）。类似地，Gordon 和 Stark（2007）发现，在序列规则的概率学习中，增加重复训练试次可提升孤独症个体的成绩。其他偏向内隐的概率学习研究也报告了可训练性的结果（Kourkoulou et al., 2012; Scott-Van Zeeland et al., 2010）。这表明，相较于奖励类型，情境的确定性可能对孤独症的概率学习和预期形成影响更大：在刺激-反馈概率关系固定的高确定性情境中，他们更易形成预期。理论上，在稳定的情境中，整合多个重复试次的结果更有利；而在不稳定的情境中，

近期经验应比远期经验权重更高。因此，情境变化时，成功的概率学习需追踪奖励概率来估计情境的不稳定性，并据此动态调整学习速率（Behrens et al., 2007）。支持该观点的是，Robic 等人（2015）发现，在奖励概率变化的情境下，孤独症组达到成功学习标准（60%）的比例低于对照组，但在稳定情境下无差异；同样，高孤独症特质的典型发展个体在变动规则环境中的概率学习表现也更差（Goris et al., 2021）。这些发现符合预期障碍假说，即当刺激-反馈的预测关系模糊时，孤独症个体进行条件概率估计和形成稳定预期更为困难。其潜在机制可能是过度估计了试次间刺激规律的变化（Lawson et al., 2017; Robic et al., 2015），导致条件概率估计障碍。然而，有研究者通过外显测量学习速率，未发现孤独症组在稳定与变动情境下与控制组存在差异（Manning et al., 2017）。Lawson 等人（2017）甚至观察到孤独症个体在反应更变动的环境时能上调学习速率。这些看似矛盾的结果提示：孤独症个体预期加工的缺陷可能并非简单的、领域普遍的预测障碍，而是在不同情境中形成和使用预期的能力存在特异性困难，其表现高度依赖于情境的确定性要求及个体对变化的感知。

因此，在基于奖赏的概率学习范式中，奖励类型和刺激-反馈概率关系的稳定性仍是未来研究需要系统操控与对比的关键变量。此外，反应指标的选取也可能影响实验结果：相比于外显行为指标，眼动追踪等内隐的认知测量指标更能敏感地捕捉孤独症群体的预期加工过程本身，而非单纯的行为结果。但需注意的是，无论实验操纵如何精细，此类范式本质上以获得奖励最大化为目标；而该目标对孤独症个体的驱动程度也可能成为影响结果解释的一个关键限制因素。

3.2 先验知识

为检验贝叶斯知觉理论的核心观点，研究者主要考察孤独症个体在易受先验知识影响的任务中的表现，这类影响可表现为两类：一是固有先验知识对当前感知信息的干扰（如错觉任务），二是先验经验对模糊感知信息解歧的促进（如知觉闭合任务）。错觉任务通过诱发先验知识与感觉信号的冲突，揭示先验知识对感知的干扰作用。例如，在大小-重量错觉范式中，个体需移动实际重量与体积不匹配的物品，若其施加的力受“大物品应更重”的先验期待影响，则表明先验知识扭曲了当前感觉信号（Buckingham, 2014）。相反，知觉闭合任务则评估先验知识如何促进感知：通过呈现部分遮挡或加噪的视觉图像，考察个体能否基于先验经验“补全”缺失信息以完成图像识别。根据“低先验”观点，孤独症个体在两类任务中均应表现出更弱的干扰效应（错觉任务）和更弱的促进效应（知觉闭合任务）。

错觉任务研究为贝叶斯知觉理论提供了部分支持性证据：孤独症个体在多种错觉任务中表现出减弱的效应，包括 Kanizsa 错觉和 Titchener 错觉（Mitchell & Ropar, 2004）。孤独患者也更准确地复制不可能的图形，如无透视线索下更精确地复制椭圆，而对照组则将其画得更偏圆形（Ropar & Mitchell, 2002）。在类似任务中，先验知识通常会干扰表现。此外，孤独症成人较少受到记忆错觉的影响（Parra et al., 2016），非临床研究也发现高孤独症特质与错觉效应的降低相关（Chouinard et al., 2013; Chouinard et al., 2016）。具体而言，大小-重量错觉范式中，高孤独症特质个体抓握物品时更少依赖“大物品更重”的先验（Pellicano & Burr 2012）；橡胶手错觉研究也报告了高孤独症特质组效应减弱的类似结果（Palmer et al., 2013; Palmer et al., 2015）。然而，研究结果并非完全一致。例如，Croydon 等人（2017）发现孤独症儿童对“光来自上方”的先验知识应用正常，对材料-重量错觉（即花岗岩比聚苯乙烯显得更重的预期）也表现出与对照组相似的效应强度。进一步研究发现，孤独症特质水平越高，个体在环境不确定性变化时适应性调整注视的能力越低（Arthur et al., 2019）。这些矛盾结果可能源于孤独症个体对环境不确定性的表征异

常（Lawson et al., 2017; Lawson et al., 2014），当环境不确定性高时，他们倾向于高估感觉表征的准确性（Karvelis et al., 2018），这会削弱先验知识在预期中的作用，导致其更依赖当前的感觉输入。

知觉闭合任务研究进一步支持了贝叶斯知觉理论，Król 和 Król（2019）发现，在图片逐渐降噪的过程中，首次和末次呈现时对照组的眼动模式变化反映了其注视受到了自上而下先验知识的优化；而孤独症个体中这种效应较弱，表明其利用先验知识补全信息的速度较慢或眼动模式的可预测性较低。Molesworth 等人（2015）也观察到孤独症个体对连续感知刺激的反应较少受到先前刺激序列的影响。此外，在社会互动情境中先验知识的使用不足尤为明显，Chambon 等人（2017）研究要求孤独症成人推断演员意图，发现其基于单一演员视觉运动线索的推断并无困难，但难以利用两个演员互动提供的社交先验信息（例如两个演员表现出互惠行为）进行意图推断。

总的来说，对于考察先验知识的范式而言，影响研究结果的关键因素需考虑在内。首先，个体是否具备任务要求的特定先验知识是范式有效性的前提，个体间的经验差异是不可避免的考虑因素。其次，实验操纵的一致性至关重要（如错觉范式中期待重量和实际重量差异的稳定性），其变化会引入整体环境的不确定性，混淆结果。值得注意的是，根据先验知识的形成机制，可将其分为结构性和情境性的先验知识（Seriès & Seitz, 2013）。结构性先验知识反映了默认期待，是一种固有的或经过长期学习获得的，因而不易改变，例如对“光来自上方”的先验期待；情境性先验知识是短期学习获得的，与具体的时空框架、线索或任务指令相联系，是由研究者通过情境创设的。近年来研究发现，孤独症个体在结构性先验知识的任务中多表现正常，而情境性先验知识使用不足更常见（Chrysaitis, & Seriès, 2023）。未来研究可以在严格控制的情境性先验知识的框架下，深入探索短期形成的先验知识在使用过程上的差异，尤其是该过程是否会受到不同先验知识类型的影响。

3.3 预期误差

预期编码理论的检验主要聚焦于预期误差加工，

而非预期形成本身,考察当感觉输入违反预期时,个体对预期误差的权重分配是否存在异常(尤其在整合情境性信息方面)。在范式设计上,一方面,预期误差研究的范式与概率学习范式的区别在于:概率学习范式关注的是从刺激-反馈关系中提取条件概率规则,侧重于预期形成过程,而预期误差范式则在建立预期后,通过改变结果制造违反预期的情境来考察预期调整过程;另一方面,区别于考察先验知识的研究,预期误差研究更关注变动情境下的预期灵活调整,而不仅仅是先验知识使用上的依赖程度。在操作实现上,预期的违反可通过改变既定预期结果或操纵重复序列中的变异刺激实现。相应地,常用指标包括:眼动模式变化(反映预期注视调整)、瞳孔大小(反映违反预期的惊讶程度)及脑电指标上的失匹配负波(mismatch negative, MMN)。

多项研究从不同角度检验了孤独症个体的预期误差加工异常。眼动研究表明,当视觉预期(无论是社交刺激还是非社交刺激)被违反时,孤独症个体对预期位置的注视点数和注视时间都更少,且对非预期位置的注视与其症状严重程度相关(Greene et al., 2019)。这说明在结果违反预期时,孤独症个体可能为预期误差分配更多的权重,调整已形成的预期。瞳孔和行为建模研究采用等级学习模型来量化个体对概率关系及其随时间变化的预期(De Berker et al., 2016; Iglesias et al., 2013; Mathys et al., 2014),研究发现面对预期违背,孤独症个体表现出更弱的惊讶反应,且惊讶程度的降低可预测症状严重程度(Marshall et al., 2016)。这表明其难以根据环境不确定性灵活调整先前预期与感觉输入的权重,倾向于高估环境变动(Lawson et al., 2017)。听觉脑电研究通过操纵听觉刺激序列中变异音出现的频率,发现孤独症个体MMN波幅对局部变异调节减弱,反映预期误差权重分配的灵活性不足;但反映整体变异加工的P3b波幅无组间差异,说明孤独症个体自上而下的预期能力相对完好,支持了预期编码理论的解释(Goris et al., 2018)。fMRI研究进一步揭示神经机制差异:孤独症个体对违反预期事件反应时额上回(superior frontal cortex, FC)激活减弱,对预期事件反应时背外侧前额叶皮层

(dorsolateral prefrontal cortex, dPFC)激活增强,且此模式与抑制控制能力相关(Gonzalez-Gadea et al., 2015)。

综上所述,孤独症预期加工异常的研究需高度关注情境因素。在精心设计的情境操纵下,更能揭示其预期误差的权重分配异常及情境敏感性缺陷。这种预期误差的加工异常不仅阻碍个体调整已有预期,也损害其在新情境中的预期泛化能力。未来预期误差研究需对预期违反程度进行更连续性的操纵,以精细刻画预期误差权重分配的灵活调整过程;解释不同研究的结果时,也须考虑违反程度的影响。此外,该领域研究的另一挑战是难以完全分离预期形成障碍(预期障碍假说)与先验知识使用不足(贝叶斯知觉理论),因为预期调整过程本身即涉及预期的形成与使用。尽管如此,预期误差研究聚焦变动情境下的预期加工,更具现实性与灵活性,能更有效地解释同种条件下行为反应的差异性。

4 总结与展望

近年来,预期障碍假说、贝叶斯知觉理论和预期编码理论从预期加工的不同层面(形成、使用、灵活调整)出发。为理解孤独症谱系障碍个体的核心症状和行为表现提供了新视角。特别是在高度复杂或动态的情境(如社交互动)或刺激(如运动的物体或人脸)下,预期加工缺陷更为突显,导致孤独症个体出现社交互动困难及动态环境适应障碍等典型特征。基于这三种理论的实证研究,分别从条件概率估计困难、先验知识使用不足和预期误差加工异常等角度进行了验证。总的来说,三种理论的核心主张既有共性又存差异。其中,预期障碍假说强调普遍的预测能力不足,根源在于条件概率估计障碍;贝叶斯知觉理论则主张过度依赖感觉输入,贝叶斯先验的形成和应用困难是预期加工的核心问题;预期编码理论则聚焦感觉输入违反先验预期时知觉到的预期误差的加工异常,表现为无法根据情境区分预期误差的价值以灵活调整权重。综合现有证据,我们认为孤独症个体的预期加工缺陷并非领域普遍的预测障碍,而是具有一定的情境依赖性:在确定性高、规则稳定的环境中能够形成一定的预期;但在不确定性高、规则变动的环境中,则表现

出预期使用和灵活调整的困难，其中社交情境对于孤独症个体而言正是复杂的变动环境。据此，未来研究可围绕以下几方面进行深入探讨。

第一，预期加工理论在解释孤独症谱系障碍普遍核心缺陷上的挑战。当前试图解释孤独症谱系障碍个体核心症状的神经认知理论，普遍面临难以阐明孤独症个体“谱系”症状表现的困境。但通过梳理相关的文献，我们认为如果预期加工障碍是孤独症个体普遍存在的核心缺陷，其可能表现为两种主要机制：一种是预期精度神经调节机制上的直接缺陷，另一种是从经验中提取元学习信息以估计预期精度的缺陷。阐明这些机制亟需更多的神经生物学研究进行深入探索。近年来神经生物学研究揭示，神经调节是通过改变神经元的生物物理属性来实现的，而认知功能的改变并不是直接由单个神经元的调节引起的，而是由介观神经丛中的群体动力学活动所驱动。有研究者正运用计算模型（Shine et al., 2021），将经典的神经调节参数映射至系统级神经活动模型，以连接微尺度神经元的神经调节与系统水平的大脑功能。这类计算建模有望为预期加工理论提供框架，突破其在阐明孤独症谱系障碍普遍核心缺陷上的困境。

第二，开发整合性范式检验不同预期加工理论的相对解释力。当前针对孤独症谱系障碍预期加工的三种理论的主要观点虽各有侧重，但现有研究多孤立验证单一理论，难以评估其在解释孤独症核心症状及预期加工异常上的相对优势。因此，未来研究需要开发或改编能同时考察概率学习、先验知识和预期误差的整合范式。感觉运动学习（sensorimotor learning）和感觉运动适应（sensorimotor adaptation）领域为构建此类范式提供了理想框架。感觉运动学习是对运动和感觉变量之间新的映射关系进行学习（Wolpert et al., 2011），而感觉运动适应则强调基于感觉误差动态调整运动指令以适应躯体和环境变化的能力（Bock, 2012）。学习更强调习得新的联结，而适应可以理解为在评估有关行为表现的感觉误差信息后通过改变现有的行为而不是通过习得新的行为来完成。因此，这两个领域可能同时涉及了概率学习、先验知识使用和预期误差加工等过程。以材料-重量错觉范式（Arthur et al., 2019）为例，在学习阶

段训练被试掌握不同材料物体所需施加的适宜力度后，在适应阶段线性改变实际重量制造预期违反程度，并整合自我报告（重量感知）、眼动（预期注视模式）、运动捕捉（抬起动作）以及力量传感器（力度调整）等多模态指标量化预期加工。此外，计算建模为检验理论解释力提供了重要工具。以贝叶斯计算模型为例，通过与非贝叶斯模型对比，可验证贝叶斯知觉理论的普适性；通过不同贝叶斯变体模型比较，可甄别最优的模型结构；结合模型与参数恢复分析，可确保模型估计的可靠性（Wilson & Collins, 2019）。基于此，通过系统对比不同理论观点的计算建模预测力，可在统一实验框架下解析各理论对孤独症预期加工机制的解释效能。

第三，情境因素须纳入孤独症预期加工的理论及实证框架中。三种理论假说均强调情境在预期加工中的核心作用，其中预期编码理论指出孤独症个体难以区分情境信息而导致预期加工缺乏情境调节，表现为跨情境预期误差权重调整僵化（Lawson et al., 2014）；预期障碍假说和贝叶斯知觉理论则揭示其跨情境预期泛化困难，即无法将已形成的预期迁移至新环境。已有的实证研究进一步证实，无论是条件概率估计困难、先验知识使用不足抑或预期误差加工异常，均会引发过度学习、泛化困难及对情境变化估计偏差。神经行为学研究发现孤独症个体形成的感觉运动信息在泛化过程中存在异常的特异性（Ament et al., 2015; Nebel et al., 2016; Sharer et al., 2015）。然而，当前仍缺乏对孤独症个体已形成的预期能否根据情境需求动态泛化和调整的系统考察，这种情境灵活性缺失可能是重复刻板行为的关键成因。因此，未来研究亟需将情境变量纳入孤独症预期加工的理论构建与实验设计，通过贴近真实场景的范式深化机制理解，并为开发针对性干预策略提供直接实证依据。

参考文献

- 陈光华, 陶冠澎, 翟璐煜, 白学军. (2022). 自闭症谱系障碍的早期筛查工具. *心理科学进展*, 30(4), 738-763.
- Ament, K., Mejia, A., Buhlman, R., Erkin, S., Caffo, B., Mostofsky, S., & Wodka, E. (2015). Evidence for specificity of motor impairments in catching and balance in children with autism. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(3), 742-751.
- Arthur, T., Vine, S., Brosnan, M., & Buckingham, G. (2019). Exploring how material cues drive sensorimotor prediction across different levels of autistic-

- like traits. *Experimental Brain Research*, 237(9), 2255–2267.
- Baron-Cohen, S. (2000). Theory of mind and autism: A review. In L. M. Glidden (Ed.), *International review of research in mental retardation: Autism* (pp. 169–184). Academic Press.
- Behrens, T. E. J., Woolrich, M. W., Walton, M. E., & Rushworth, M. F. S. (2007). Learning the value of information in an uncertain world. *Nature Neuroscience*, 10(9), 1214–1221.
- Bock, O. (2012). Sensorimotor adaptation. In Seel, N. M. (Eds), *Encyclopedia of the sciences of learning*. Springer.
- Bondi, C. O., Rodriguez, G., Gould, G. G., Frazer, A., & Morilak, D. A. (2008). Chronic unpredictable stress induces a cognitive deficit and anxiety-like behavior in rats that is prevented by chronic antidepressant drug treatment. *Neuropsychopharmacology*, 33(2), 320–331.
- Buckingham, G. (2014). Getting a grip on heaviness perception: A review of weight illusions and their probable causes. *Experimental Brain Research*, 232(6), 1623–1629.
- Chambon, V., Farrer, C., Pacherie, E., Jacquet, P. O., Leboyer, M., & Zalla, T. (2017). Reduced sensitivity to social priors during action prediction in adults with autism spectrum disorders. *Cognition*, 160, 17–26.
- Chouinard, P. A., Noulty, W. A., Sperandio, I., & Landry, O. (2013). Global processing during the Muller-Lyer illusion is distinctively affected by the degree of autistic traits in the typical population. *Experimental Brain Research*, 230(2), 219–231.
- Chouinard, P. A., Unwin, K. L., Landry, O., & Sperandio, I. (2016). Susceptibility to optical illusions varies as a function of the autism-spectrum quotient but not in ways predicted by local-global biases. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(6), 2224–2239.
- Chrysaïtis, N. A., & Seriès, P. (2023). 10 years of Bayesian theories of autism: A comprehensive review. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 145, Article 105022.
- Clark, A. (2013). The many faces of precision (Replies to commentaries on “Whatever next? Neural prediction, situated agents, and the future of cognitive science”). *Frontiers in Psychology*, 4, Article 270.
- Croydon, A., Karaminis, T., Neil, L., Burr, D., & Pellicano, E. (2017). The light-from-above prior is intact in autistic children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 161, 113–125.
- De Berker, A. O., Rutledge, R. B., Mathys, C., Marshall, L., Cross, G. F., Dolan, R. J., & Bestmann, S. (2016). Computations of uncertainty mediate acute stress responses in humans. *Nature Communications*, 7, Article 10996.
- Eilam, D., Izhar, R., & Mort, J. (2011). Threat detection: Behavioral practices in animals and humans. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 35(4), 999–1006.
- Fatemi, S. H., Aldinger, K. A., Ashwood, P., Bauman, M. L., Blaha, C. D., Blatt, G. J., Chauhan, A., Chauhan, V., Dager, S. R., Dickson, P. E., Estes, A. M., Goldowitz, D., Heck, D. H., Kemper, T. L., King, B. H., Martin, L. A., Millen, K. J., Mittleman, G., Mosconi, M. W., & Welsh, J. P. (2012). Consensus paper: Pathological role of the cerebellum in autism. *Cerebellum*, 11(3), 777–807.
- Fiser, J., Berkes, P., Orbán, G., & Lengyel, M. (2010). Statistically optimal perception and learning: From behavior to neural representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(3), 119–130.
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: A unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 127–138.
- Frith, U., & Happé, F. (1994). Autism: Beyond “theory of mind”. *Cognition*, 50(1–3), 115–132.
- Gonzalez, C., Martin, J. M., Minschew, N. J., & Behrmann, M. (2013). Practice makes improvement: How adults with autism out-perform others in a naturalistic visual search task. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(10), 2259–2268.
- Gonzalez-Gadea, M. L., Chennu, S., Bekinschtein, T. A., Rattazzi, A., Beraudi, A., Tripicchio, P., Moyano, B., Soffita, Y., Steinberg, L., Adolphi, F., Sigman, M., Marino, J., Manes, F., & Ibanez, A. (2015). Predictive coding in autism spectrum disorder and attention deficit hyperactivity disorder. *Journal of Neurophysiology*, 114(5), 2625–2636.
- Gordon, B., & Stark, S. (2007). Procedural learning of a visual sequence in individuals with autism. *Focus on Autism and Other Developmental Disabilities*, 22(1), 14–22.
- Goris, J., Braem, S., Nijhof, A. D., Rigoni, D., Deschrijver, E., Van de Cruys, S., Wiersema, J. R., & Brass, M. (2018). Sensory prediction errors are less modulated by global context in autism spectrum disorder. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 3(8), 667–674.
- Goris, J., Silvetti, M., Verguts, T., Wiersema, J. R., Brass, M., & Braem, S. (2021). Autistic traits are related to worse performance in a volatile reward learning task despite adaptive learning rates. *Autism*, 25(2), 440–451.
- Grandin, T. (2009). Visual abilities and sensory differences in a person with autism. *Biological Psychiatry*, 65(1), 15–16.
- Greene, R. K., Zheng, S., Kinard, J. L., Mosner, M. G., Wiesen, C. A., Kennedy, D. P., & Dichter, G. S. (2019). Social and nonsocial visual prediction errors in autism spectrum disorder. *Autism Research*, 12(6), 878–883.
- Hill, E. L. (2004). Executive dysfunction in autism. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(1), 26–32.
- Iglesias, S., Mathys, C., Brodersen, K. H., Kasper, L., Piccirelli, M., den Ouden, H. E. M., & Stephan, K. E. (2013). Hierarchical prediction errors in midbrain and basal forebrain during sensory learning. *Neuron*, 80(2), 519–530.
- Iuculano, T., Rosenberg-Lee, M., Supekar, K., Lynch, C. J., Khouzam, A., Phillips, J., Uddin, L. Q., & Menon, V. (2014). Brain organization underlying superior mathematical abilities in children with autism. *Biological Psychiatry*, 75(3), 223–230.
- Karvelis, P., Seitz, A. R., Lawrie, S. M., & Seriès, P. (2018). Autistic traits, but not schizotypy, predict increased weighting of sensory information in Bayesian visual integration. *eLife*, 7, Article e34115.
- Kleinmans, N. M., Johnson, L. C., Richards, T., Mahurin, R., Greenson, J., Dawson, G., & Aylward, E. (2009). Reduced neural habituation in the amygdala and social impairments in autism spectrum disorders. *American Journal of Psychiatry*, 166(4), 467–475.
- Kourkoulou, A., Leekam, S. R., & Findlay, J. M. (2012). Implicit learning of local context in autism spectrum disorder. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 42(2), 244–256.
- Krogh-Jespersen, S., Kaldy, Z., Valadez, A. G., Carter, A. S., & Woodward, A. L. (2018). Goal prediction in 2-year-old children with and without autism spectrum disorder: An eye-tracking study. *Autism Research*, 11(6), 870–882.
- Król, M., & Król, M. (2019). The world as we know it and the world as it is: Eye-movement patterns reveal decreased use of prior knowledge in individuals

- with autism. *Autism Research*, 12(9), 1386–1398.
- Lawson, R. P., Mathys, C., & Rees, G. (2017). Adults with autism overestimate the volatility of the sensory environment. *Nature Neuroscience*, 20(9), 1293–1299.
- Lawson, R. P., Rees, G., & Friston, K. J. (2014). An aberrant precision account of autism. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, Article 302.
- Limongi, R., Sutherland, S. C., Zhu, J., Young, M. E., & Habib, R. (2013). Temporal prediction errors modulate cingulate–insular coupling. *NeuroImage*, 71(5), 147–157.
- Lin, A., Adolphs, R., & Rangel, A. (2012). Impaired learning of social compared to monetary rewards in autism. *Frontiers in Neuroscience*, 6, Article 143.
- Lovaas, O. I., Koegel, R. L., & Schreibman, L. (1979). Stimulus overselectivity in autism: A review of research. *Psychological Bulletin*, 86(6), 1236–1254.
- MacDonald, M., Lord, C., & Ulrich, D. A. (2013). The relationship of motor skills and social communicative skills in school-aged children with autism spectrum disorder. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 30(3), 271–282.
- Maenner, M. J., Shaw, K. A., Baio, J., Eds1, Washington, A., Patrick, M., DiRienzo, M., Christensen, D. L., Wiggins, L. D., Pettygrove, S., Andrews, J. G., Lopez, M., Hudson, A., Baroud, T., Schwenk, Y., White, T., Rosenberg, C. R., Lee, L. C., Harrington, R. A., Huston, M., & Dietz, P. M. (2020). Prevalence of autism spectrum disorder among children aged 8 years—Autism and developmental disabilities monitoring network, 11 sites, United States, 2016. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 69(4), 1–12.
- Manning, C., Kilner, J., Neil, L., Karaminis, T., & Pellicano, E. (2017). Children on the autism spectrum update their behaviour in response to a volatile environment. *Developmental Science*, 20(5), Article e12435.
- Marshall, L., Mathys, C., Ruge, D., de Berker, A. O., Dayan, P., Stephan, K. E., & Bestmann, S. (2016). Pharmacological fingerprints of contextual uncertainty. *PLoS Biology*, 14(11), Article e1002575.
- Mathys, C. D., Lomakina, E. I., Daunizeau, J., Iglesias, S., Brodersen, K. H., Friston, K. J., & Stephan, K. E. (2014). Uncertainty in perception and the Hierarchical Gaussian Filter. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8, Article 825.
- Milne, E., Swettenham, J., & Campbell, R. (2005). Motion perception and autistic spectrum disorder: A review. *Current Psychology of Cognition*, 23(1–2), 3–33.
- Mitchell, P., & Ropar, D. (2004). Visuo-spatial abilities in autism: A review. *Infant and Child Development: An International Journal of Research and Practice*, 13(3), 185–198.
- Molesworth, C., Chevallier, C., Happé, F., & Hampton, J. A. (2015). Children with autism do not show sequence effects with auditory stimuli. *Journal of Experimental Psychology: General*, 144(1), 48–57.
- Mottron, L., Bouvet, L., Bonnel, A., Samson, F., Burack, J. A., Dawson, M., & Heaton, P. (2013). Veridical mapping in the development of exceptional autistic abilities. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37(2), 209–228.
- Mottron, L., Dawson, M., Soulières, I., Hubert, B., & Burack, J. (2006). Enhanced perceptual functioning in autism: An update, and eight principles of autistic perception. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 36(1), 27–43.
- Mussey, J. L., Travers, B. G., Klinger, L. G., & Klinger, M. R. (2015). Decision-making skills in ASD: Performance on the Iowa gambling task. *Autism Research*, 8(1), 105–114.
- Nebel, M. B., Eloyan, A., Nettles, C. A., Sweeney, K. L., Ament, K., Ward, R. E., Choe, A. S., Barber, A. D., Pekar, J. J., & Mostofsky, S. H. (2016). Intrinsic visual-motor synchrony correlates with social deficits in autism. *Biological Psychiatry*, 79(8), 633–641.
- Palmer, C. J., Lawson, R. P., & Hohwy, J. (2017). Bayesian approaches to autism: Towards volatility, action, and behavior. *Psychological Bulletin*, 143(5), 521–542.
- Palmer, C. J., Paton, B., Hohwy, J., & Enticott, P. G. (2013). Movement under uncertainty: The effects of the rubber-hand illusion vary along the nonclinical autism spectrum. *Neuropsychologia*, 51(10), 1942–1951.
- Palmer, C. J., Paton, B., Kirkovski, M., Enticott, P. G., & Hohwy, J. (2015). Context sensitivity in action decreases along the autism spectrum: A predictive processing perspective. *Proceedings of the Royal Society B—Biological Sciences*, 282(1802), Article 20141557.
- Parra, M. A., Cubelli, R., Bellamy, K., Abrahams, S., Avila, C., Castro-Jaramillo, L., & Della Sala, S. (2016). Gist-based illusions within and across stimulus modalities in autism spectrum disorder. *Memory*, 24(3), 295–305.
- Peça, J., Feliciano, C., Ting, J. T., Wang, W., Wells, M. F., Venkatraman, T. N., Lascola, C. D., Fu, Z., & Feng, G. (2011). Shank3 mutant mice display autistic-like behaviours and striatal dysfunction. *Nature*, 472(7344), 437–442.
- Pellicano, E., & Burr, D. (2012). When the world becomes ‘too real’: A Bayesian explanation of autistic perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(10), 504–510.
- Robertson, C. E., & Baron-Cohen, S. (2017). Sensory perception in autism. *Nature Reviews Neuroscience*, 18(11), 671–684.
- Robic, S., Sonié, S., Fonlupt, P., Henaff, M. A., Touil, N., Coricelli, G., Mattout, J., & Schmitz, C. (2015). Decision-making in a changing world: A study in autism spectrum disorders. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 45(6), 1603–1613.
- Robison, J. E. (2008). *Look me in the eye: My life with Asperger's*. Broadway Books.
- Ropar, D., & Mitchell, P. (2002). Shape constancy in autism: The role of prior knowledge and perspective cues. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 43(5), 647–653.
- Rosenblau, G., Korn, C. W., Dutton, A., Lee, D., & Pelphrey, K. A. (2021). Neurocognitive mechanisms of social inferences in typical and autistic adolescents. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 6(8), 782–791.
- Sarafyazd, M., & Jazayeri, M. (2019). Hierarchical reasoning by neural circuits in the frontal cortex. *Science*, 364(6441), Article eaav8911.
- Schuwerk, T., Sodian, B., & Paulus, M. (2016). Cognitive mechanisms underlying action prediction in children and adults with autism spectrum condition. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 46(12), 3623–3639.
- Scott-Van Zeeland, A. A., McNealy, K., Wang, A. T., Sigman, M., Bookheimer, S. Y., & Dapretto, M. (2010). No neural evidence of statistical learning during exposure to artificial languages in children with autism spectrum disorders. *Biological Psychiatry*, 68(4), 345–351.
- Seriès, P., & Seitz, A. (2013). Learning what to expect (in visual perception). *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, Article 668.
- Sharer, E., Crocetti, D., Muschelli, J., Barber, A. D., Nebel, M. B., Caffo, B. S., Pekar, J. J., & Mostofsky, S. H. (2015). Neural correlates of visuomotor learning in autism. *Journal of Child Neurology*, 30(14), 1877–1886.

- Shine, J. M., Müller, E. J., Munn, B., Cabral, J., Moran, R. J., & Breakspear, M. (2021). Computational models link cellular mechanisms of neuromodulation to large-scale neural dynamics. *Nature Neuroscience*, *24*(6), 765–776.
- Sinha, P., Kjelgaard, M. M., Gandhi, T. K., Tsourides, K., Cardinaux, A. L., Pantazis, D., Diamond, S. P., & Held, R. M. (2014). Autism as a disorder of prediction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(42), 15220–15225.
- Tsai, P. T., Hull, C., Chu, Y., Greene-Colozzi, E., Sadowski, A. R., Leech, J. M., Steinberg, J., Crawley, J. N., Regehr, W. G., & Sahin, M. (2012). Autistic-like behaviour and cerebellar dysfunction in Purkinje cell Tsc1 mutant mice. *Nature*, *488*(7413), 647–651.
- Van de Cruys, S., de-Wit, L., Evers, K., Boets, B., & Wagemans, J. (2013). Weak priors versus overfitting of predictions in autism: Reply to Pellicano and Burr (TICS, 2012). *i-Perception*, *4*(2), 95–97.
- Van de Cruys, S., Evers, K., Van der Hallen, R., Van Eylen, L., Boets, B., de-Wit, L., & Wagemans, J. (2014). Precise minds in uncertain worlds: predictive coding in autism. *Psychological Review*, *121*(4), 649–675.
- Wallace, G. L. (2008). Neuropsychological studies of savant skills: Can they inform the neuroscience of giftedness? *Roeper Review*, *30*(4), 229–246.
- Wilson, R. C., & Collins, A. G. (2019). Ten simple rules for the computational modeling of behavioral data. *eLife*, *8*, Article e49547.
- Wolpert, D., Diedrichsen, J., & Flanagan, J. (2011). Principles of sensorimotor learning. *Nature Reviews Neuroscience*, *12*(12), 739–751.

Prediction Processing Deficits in an Uncertain World for Individuals with Autism Spectrum Disorders

Tan Chenghui^{1,2}, Zhang Yuqing^{1,2}, Xing Qiqi^{1,2}, Zhao Yuan³, Liu Dianzhi^{1,2}

(¹ School of Education, Soochow University, Suzhou, 215123)(² Autism Research Center, Soochow University, Suzhou, 215123)

(³ Police Officer Academy, Shandong University of Political Science and Law, Jinan, 250014)

Abstract Autism spectrum disorder (ASD) is a complex neurodevelopmental condition characterized by atypical brain function that significantly impacts social communication, interaction, and induces restricted or repetitive behaviors and interests. Historically, theoretical frameworks focused narrowly on isolated symptom clusters, leading to incomplete explanations and difficulties establishing correlations between these symptoms and underlying neural mechanisms. As research has advanced, more recent hypotheses suggest that abnormalities in predictive processing may play a crucial role in the core symptoms of ASD. In this study, we conduct a comprehensive review of three prominent theories of prediction processing: the predictive impairment in autism hypothesis (PIA), the Bayesian perceptual theory, and the predictive coding theory. We synthesize relevant empirical evidence from diverse methodological approaches and domains. Each theory offers unique insights into the nature of predictive deficits in individuals with ASD.

The PIA hypothesis posits that individuals with ASD exhibit domain-general predictive processing deficits due to impaired estimation of the dynamics of temporally unfolding Markov systems, which reflects failures in learning and utilizing conditional probabilities. Research testing this framework often employs probabilistic learning paradigms to determine the presence of generalized predictive impairments. While much of this research has focused on the ability to form predictions, mixed findings raise questions about the nature of predictive abilities within this population. Bayesian perceptual theory posits that individuals with ASD face difficulties in the formation and application of priors, resulting in perceptual experiences that rely more heavily on immediate sensory input and are less influenced by prior knowledge. Empirical evaluation of this account frequently involves tasks demonstrably modulated by prior knowledge, such as susceptibility to visual illusions or perceptual closure tasks. Findings consistently indicate that individuals with ASD are less likely to use prior knowledge to shape perception. However, it is crucial to clearly define and distinguish between different types of prior knowledge in order to explore core deficits in individuals with ASD in the framework of Bayesian perceptual theory. Predictive coding theory emphasizes abnormalities in processing prediction errors when sensory input violates prior expectations, impairing context-based discrimination between relevant and irrelevant errors. Consequently, research aligned with predictive coding theory has predominantly focused on examining prediction error processing dynamics rather than prediction formation itself. Specifically, studies investigate whether individuals with ASD exhibit atypical weighting of prediction errors when sensory input violates expectations, particularly in relation to situational context. Relevant findings suggest that atypical processing of prediction errors in individuals with ASD is characterized by overweighting of prediction errors, and is potentially linked to low contextual sensitivity.

Synthesizing these perspectives, we propose that predictive differences in ASD manifest in a fundamentally context-dependent manner, rather than constituting a pervasive, domain-general impairment. Individuals with ASD may demonstrate competence in generating predictions within deterministic, rule-based environments, yet exhibit significant difficulties in flexibly adjusting predictions within uncertain, ambiguous, or dynamically changing contexts. This context-dependent deficit profile may arise through at least two potentially dissociable pathways: (1) Neuromodulation Mechanisms: Directly impacting prediction precision estimation, potentially influencing how individuals with ASD process and respond to complex

social information, which is inherently dynamic and probabilistic. (2) Information Extraction Challenges: Difficulties in efficiently extracting and utilizing relevant information from past experiences, which is crucial for estimating prediction precision and adjusting priors in novel or uncertain situations.

Future research could address the limitations of prediction processing theories in accounting for the pervasive core deficit in individuals with ASD via simulation of computational models. Furthermore, appropriate paradigms could be explored in the fields of sensorimotor learning and sensorimotor adaptation to test the plausibility of different prediction processing theories. Finally, the three prediction processing theories should be systematically validated by considering contextual factors and examining whether the anticipations formed by individuals with ASD can be generalized and adapted to different situational demands.

Key words autism spectrum disorders, prediction processing, predictive impairment in autism hypothesis, Bayesian perceptual theory, predictive coding theory

“人工智能与创造力”专辑征稿启事

在人工智能（AI）技术飞速迭代、“人工智能+”行动深入实施的时代背景下，生成式 AI、大型语言模型等技术已深度渗透到教育创新、创意生产、产业升级等各类场景，深刻重塑着人类创造力的表现形式、实现路径与发展规律。而人工智能技术的不当使用也可能对青少年的创造力培养带来毁灭的灾难。

从研究的视角，人工智能不仅为探索人类创造力的认知与情感机制提供了新的技术路径，还构建了“人类-AI”协同创造的全新场景，为探索创造力的动态发展过程、个体差异及环境影响因素开辟了新赛道。

深耕中国心理学研究沃土，承载学科引领使命，《心理科学》始终立足学术前沿，锚定国家战略需求，以搭建学科交流桥梁、推动理论创新突破为己任，致力于促进心理学与相关学科的深度交叉、融合发展。为汇聚人工智能与创造力领域的最新研究成果，搭建学术交流平台，厘清研究前沿与发展方向，破解实践中的核心心理学难题，我们举办“人工智能与创造力”专辑，面向国内外相关领域专家学者征集高质量学术稿件，以期推动创造力心理学理论体系的拓展与完善，促进研究成果向实践转化，为“人工智能+”行动落地、新质生产力培育提供心理学视角的解决方案，助力中国式现代化建设背景下的创新发展。

本专辑欢迎围绕“人工智能与创造力”相关研究来搞，主题涵盖但不限于以下方向：

- 人工智能（如大语言模型）的创造力研究
- 个体对人工智能创造力的接受度与态度研究

· 人类创造力与人工智能创造力的认知与行为差异比较研究

· 人-人工智能协同创造过程的心理互动机制与优化路径

· 人工智能对人类创造力的影响及干预策略研究

· 人工智能创意产出相关的伦理认知、版权判断、身份认同等社会心理问题

· 利用人工智能技术实现创造力的自动化测评、动态检测与结果解读研究

· 人工智能时代创造力测评工具的适配、修订与开发

· 人工智能背景下创造力培养的心理学路径与教育策略

投稿截止日期：2026年10月1日

投稿须知：

1. 请在《心理科学》官网 jps.ecnu.edu.cn 投稿，在“计划栏目”选择“人工智能与创造力专辑”；
2. 本专辑稿件均需经过正常审稿程序、专家匿名评审；
3. 本刊将采用专辑形式对稿件进行发布；
4. 详细的投稿、审稿流程及撰稿要求，请参考《心理科学》投稿指南。

论文类型：

以实证研究为主，采用自主投稿形式；极少数综述性文章采用特约稿件形式。

主编：周晓林

专辑责任副主编：郝宁、高晓雪