

# 《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：孤独症谱系障碍者的视觉感知：基于贝叶斯和预测编码视角

作者：付春野 李艾馨 吕小康 王崇颖

---

## 第一轮

### 审稿人 1 意见：

孤独症谱系障碍(ASD)的传统理论将社会交互或社会性信息加工异常视作该疾病的核心障碍，而近年来研究者提出感觉加工异常也是 ASD 的核心因素，并从贝叶斯理论及预测编码的视角对 ASD 患者的感觉加工异常提出理论解释。该综述系统梳理了上述视角的理论观点，从三个层面(贝叶斯推理、预测编码过程及预测编码精度)对现有理论进行了归纳和对比，并总结了相应的实验证据，提出了未来理论和实证研究的方向。综述选题具有重要的理论意义，为理解 ASD 的认知异常提供了一个重要的切入点。文章内容组织合理，逻辑清晰，行文流畅。以下是一些可考虑改进的方面：

**回应：**非常感谢审稿专家对本文的认可，您的问题切中要害，非常有建设性，不仅提升了我们对这一主题的理解，也帮助我们进一步完善写作。

**意见 1：**作者将贝叶斯框架下的理论假说统称为弱先验假说，然而在文中实际包含了两类假说，即弱先验和精确似然(P8, Brock, 2012)。这两种假说本质上对应了感觉产生的不同过程，建议分别阐述。在术语翻译方面，建议参考前人标准或统一表述，如 P7：“次级先验(hypo-priors)”和“弱先验假说(hypo-priors hypothesis)”用不同的中文对应了同样的英文表述。

**回应：**感谢审稿专家建设性的意见。的确如您所言，弱先验假说和精确似然假说实际上对应了贝叶斯框架下不同的感知形成过程。写在一起不仅导致文章结构混乱，仅粗略提及精确似然假说也有失偏颇。在您的建议下，我们将两个假说分开论述，并添加了精确似然假说的理论和实证内容。

首先，在理论论述上，我们单独将精确似然假说列为一段，并概述弱先验假说和精确似然假说的差异，主要修改内容如下(P5)：

弱先验假说认为 ASD 者感觉异常的关键在于较弱的先验，但 Brock(2012)却指出从贝叶斯理论出发还存在另一种可能性。基于贝叶斯理论模型，ASD 者处于感官信息淹没的状态有两种途径：一种是降低先验的集中程度(先验的方差增大，即更广泛的弱先验)，另一种则是增加感官信息的集中程度(似然性的方差减小，即更少的感觉噪声)。对应弱先验假说，后者可称为精确似然假说(sharper likelihood hypothesis, Brock, 2012)。例如在橡胶手视错觉的研究

中发现, 相比 TD 成人, ASD 成人估计感官信息时精确性更高(Paton et al., 2012)。精确似然假说为 ASD 者的感觉加工异常提供了自下而上的解释路径。

精确似然假说的提出, 并非旨在形成与自上而下的弱先验假说的竞争关系, 而是强调客观平等地讨论贝叶斯理论下这两种解释路径的重要性。这两种假说均有能力解释当前 ASD 者的感官体验在贝叶斯结果中的偏移。因此, 实现这两种假说对结果影响的分离至关重要。

第二, 在实证证据的总结部分, 进一步搜索相关文献, 总结了支持精确似然假说的实证证据, 修改内容如下(P6):

即使支持弱先验假说的结果也无法排除精确似然假说的解释, 有研究者开始尝试使用技术手段分离先验和似然性对视觉感知的影响。有研究者指出, 导致目前不一致结果的关键是缺乏能计算出行为差异是来自于较弱的先验还是较强的似然性的计算模型(Karvelis et al., 2018)。Karvelis 等(2018)以视觉运动感知为研究内容, 使用统计学习任务, 参与者需在任务中估计连贯的点云运动方向。以往研究表明, TD 个体会迅速、内隐地对最常出现的运动方向产生预期, 进而使他们在低对比度试次中对点云运动方向的感知产生偏差(Chalk et al., 2010)。通过贝叶斯计算模型定量评估似然性和先验的变化, 结果显示, ASD 成人的先验并没有减弱, 而是形成更精确的感官表征。另一项脑电研究中, 通过提供目标出现位置的概率性信息, 考察先验信息对视觉检测任务(灰色棋盘格)的影响。采用信号检测理论(signal detection theory)和漂移扩散模型(drift diffusion model)揭示视觉感知形成的决策参数, 结果发现 ASD 成人在视觉决策中赋予感官信息更高的权重(Tarasi et al., 2023)。这些结果明确支持了 Brock(2012)的精确似然假说。

另外, 根据您的建议, 我们统一了对“弱先验”术语上的表述以及确保其他专业术语在全文中保持一致。非常抱歉写作上的不规范所带来的不良阅读体验, 也感谢您的细心提醒。

**意见 2:** 在 3.2 基于预测编码过程的假说一章, 作者将假说分为“符合预测”和“违反预测”两个维度, 根据后文的内容, 似乎称之为“预期建立损伤”和“预期更新损伤”更为合适。此外, 一个重要的理论层面的问题是, 这两种损伤背后是否反映了同一种能力的异常? 是否有可能是 ASD 患者学习效率降低, 从而导致其在建立预期时较 TD 更慢, 表现为对感官刺激过度敏感, 但最终建立的效果无差别, 而在更新预期时亦较慢, 表现为开始对新输入的信息不敏感, 但通过较长时间的学习, 亦能达到和 TD 类似的效果。与之相关的一个问题, 对感官输入过高或过低的反应性是同时存在于相同的个体上, 还是表现为个体之间的异质性。厘清这些问题有助于理解 ASD 中不同表现背后的机制。

**回应:** 首先, 非常感谢审稿专家专业性的建议, 您提出的“预期建立损伤”和“预期更新损伤”

能够更准确地归纳预测编码过程中的两个假说。参考您的建议，在这一部分的修改中，我们在表述上均改为“预期建立损伤”和“预期更新损伤”。主要修改内容如下(P7):

围绕预测编码过程，提出了多种关注 ASD 预测特异性的相关假说或观点。根据对预测编码过程中不同阶段的关注，这些假说和观点可划分为预测建立损伤和预测更新损伤两个阶段，统称为预测编码损伤假说。

第二，您指出的“这两种损伤背后是否反映了同一种能力的异常”非常具有启发性，我们很赞同您的观点。在对这部分的总结部分，参考您的建议添加了以下内容(P8):

总的来说，预测建立损伤和更新损伤基于预测编码过程的不同阶段，因此两者之间并不存在冲突。此外，这两个阶段的损伤可能反映了同一种预测机制的异常。相比于 TD 者，ASD 者建立预测内部模型的过程更困难；而预测一旦建立，当外界环境发生变化时，他们在更新预测内部模型时亦较难。

第三，针对“对感官输入过高或过低的反应性是同时存在于相同的个体上，还是表现为个体之间的异质性”这一问题，答案为前者。关于这一现象与相应理论之间的关系，添加了如下内容(P14):

这些理论的主要矛盾点在于预测更新损伤(Greene et al., 2019; Sapey-Triomphe et al., 2022; Treves et al., 2023)和 HIPPEA 理论。前者表明对预测误差的低敏感，而后者则提出存在过高且不灵活的预测误差精确度(Van de Cruys et al., 2014)。尽管这两种假说未能形成统一的理论观点，但鉴于 ASD 症状在个体身上的多重异质性表现，这样的多样性似乎也能够被认为是可能甚至是必要的。ASD 者的感觉体验同时出现过高或过低反应性(hyper- or hypo-responsiveness)，例如对新奇的视觉刺激视而不见和对视觉信息的轻微变化异常敏感(Baranek et al., 2006; Baranek et al., 2013; Foss-Feig et al., 2012; Robertson & Baron-Cohen, 2017)。预测更新损伤和 HIPPEA 理论是分别解释低反应性和高反应性，还是应整合到一个框架中，还需要进一步探索。值得注意的是，HIPPEA 理论中不仅指出预测误差精确度过高的精确度，也强调其不灵活性。预测更新损伤是否可整合到预测误差精确度不灵活的假设中，是进一步完善 HIPPEA 理论的关键。

**意见 3:** 作者将预测编码理论视作贝叶斯视角的神经实现，暗示二者具有紧密的联系。建议对这两种框架下理论之间的对应关系进行更好的梳理。比如在贝叶斯框架下，“弱先验和精确似然”两种假设，与预测编码框架下异常精度假说中的“低先验精确度和高感觉精确度”是否具有可类比性？HIPPEA 理论与预期更新损伤之间是否有关联？虽然可能不存在简洁的单

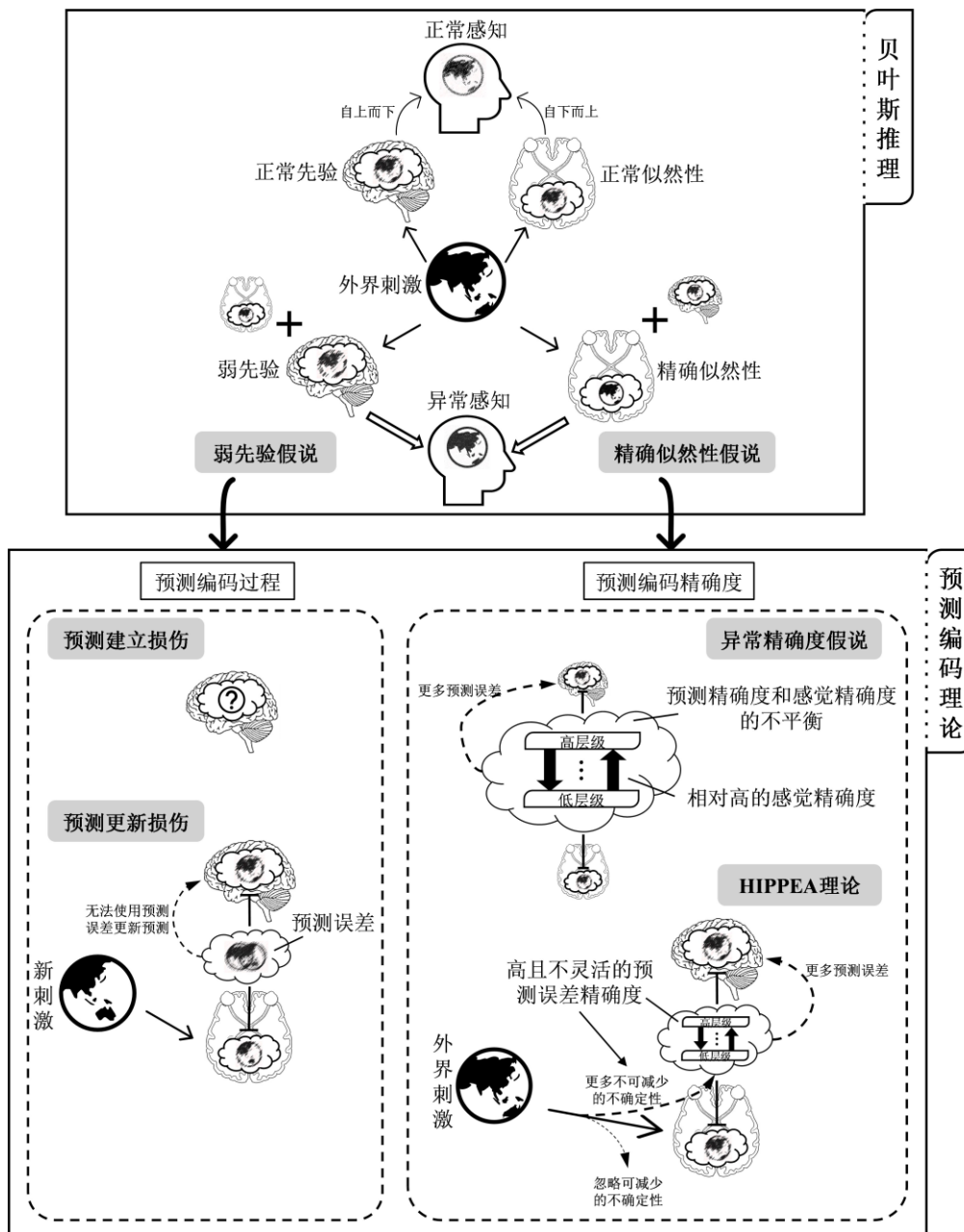
一理论解释 ASD 的感觉加工异常,但找出各类理论间的联系是发展复杂整合理论的前提。建议作者对这方面进行更多的思考,并在正文和图 1 中改进。

回应:异常精确度假说与精确似然模型一脉相承。非常感谢审稿人对这一关键问题的指出,在原稿件的图 1 以及正文中,我们并未对这一问题深入思考,图 1 也仅是按照时间轴对理论进行了梳理。在您的启发之下,我们对这一部分进行了大幅度修改。主要修改思路分为两点:一是突出三个层次理论之间的差异;二是厘清理论之间的联系,包括预测编码过程的理论可视为弱先验假说的发展,而聚焦精确度的理论则与精确似然模型一致,将重点均放在了感官信息上。修改后的内容如下(P12-P13):

Pellicano 和 Burr(2012)开创性地从贝叶斯理论视角解释 ASD 感觉加工异常并提出弱先验假说,而 Brock(2012)则提出精确似然假说,认为过于精确的感觉表征导致 ASD 者的感知难以与自上而下的先验整合。这两种假说都能够一定程度上对应 ASD 者易被感官细节吸引、难以建立整体表征或被感官信息淹没等症状。然而,当前的实证证据存在分歧。发现和未发现弱先验的研究几乎处于持平状态,关键的是,当采用一些分析方法将感官信息编码强度与先验使用能力分离开来进行评估时,结果发现 ASD 者主要是在感官信息编码方面存在增强(Karvelis et al., 2018; Tarasi et al., 2023)。这一发现似乎更支持精确似然假说。

在预测编码理论框架下,对 ASD 者感觉异常的解释可进一步区分为两个层面:预测编码过程和精确度。预测编码过程集中于预测建立损伤和更新损伤,其为贝叶斯理论框架下 ASD 的弱先验假说提供了更深入的解释路径。之所以 ASD 者难以利用先验,核心原因是整个预测与更新的动态编码过程障碍—既难以形成稳定的预测表征,也难以根据预测误差调整更新预测模型。聚焦精确度的理论与精确似然假说一致,均将 ASD 异常感知归因于感觉输入出现了问题(Van de Cruys et al., 2014),不过其进一步深化和明确了预测编码机制。与精确似然假说聚焦于感官信息编码本身的高强度不同,异常精确度假说和 HIPPEA 理论进一步阐明了 ASD 者为何会对感官信息过度投入注意和认知资源的机制,更为微观地剖析了预测编码中权重分配的紊乱。同时,预测编码框架下提出的理论也强调了动态预测编码过程的重要性。

整体来讲,三个层次的理论相互衔接、递进发展(图 1)。贝叶斯框架为预测编码理论奠定了基础,而预测编码理论则对贝叶斯框架中的观点作了更为系统性的发展与理解。同时,这三个层面也存在关注重点的差异。贝叶斯框架主要是表象层面的理论假说,预测编码过程理论则更多聚焦于编码动态的失常环节,而精确度理论则直接分析了预测编码中感官信息权重分配的偏差。三者共同构建了一个多层次、系统性的理论架构,有助于我们全方位地描绘 ASD 视觉加工的独特“画像”。这些假说或理论的核心是强调预测加工的可分离的组成部分,这些部分并不需要在一个层次框架内相互排斥。



但同时，这并不意味着这些理论或假说均可解释 ASD 的视觉加工异常。这些假说或理论可被视为是精确性的连续体—从相对宽泛且更倾向描述性的理论到越来越精细、更具有解释性的理论。在最宽泛的层面上，贝叶斯理论视角下的弱先验和精确似然假说关注先验和似然性建构感知的过程，但未考虑先验和似然性本身是如何发生问题的。这一层面的理论提供了一个精度较低的标尺，无法在研究中一致地衡量预测加工模式；侧重于预测编码过程的理论提供了更精确的标尺，可以更好地描述不同现象，适应了不同组成部分之间的相互作用，而不是将功能障碍定位在孤立的成分中；精确的标尺是基于精确度的理论，其强调了预测、预测误差或二者整合的不平衡的精确度权重是问题的关键所在，也具有更强的解释力。值得注意的是，在聚焦检验精确度的实证研究中，其理论解释可存在排他性，例如支持 HIPPEA

假说而同时不支持弱先验等其他假说(Sapey-Triomphe et al., 2021)。

**意见 4:** ASD 的感觉损伤和社会性信息加工损伤是何种关系？前者是后者的基础还是与后者独立存在？建议在展望中对此问题进行更深入的探讨。

**回应:** 非常感谢审稿专家的建议和对思考方向的指导。我们认为您提出的这一问题，与展望中第一部分的内容密切相关。在展望的第一部分，本文提出今后的研究方向应按照先细化再整合的路线，细化即类似本文的做法，聚焦于具体领域来检验相关理论，而整合则是针对不同的领域。在原稿件的整合部分，我们写得相对较空，不够具体。思考之下，我们结合您的建议，修改了展望部分的内容，具体修改如下(P15):

另一方面则为在领域细分的基础上展开进一步对比与整合，明确各个领域间预测编码机制的共性与个性。例如针对 ASD 者的非典型感觉加工和社会性信息加工之间的关系，存在以下三种观点：第一，实证研究可能直接将非社会视觉层面的结果推广到社会性认知层面，认为两者互相关联，且源于共同的预测受损机制(Ganglmayer et al., 2020)；第二种观点则更进一步地指出，ASD 者感觉加工的预测障碍是导致社会性信息预测障碍的前因(Falck-Ytter & Bussu, 2023)；但也有研究者提出两者之间可能彼此分离，例如非社会性信息预测编码正常，而社会性信息的预测编码受损(Bosch et al., 2022)。因此，ASD 者的非典型感觉加工和社会性信息加工之间的关系，究竟是相关、因果还是分离，仍然需要更多的实证研究和理论整合加以验证和深化。

.....

**审稿人 2 意见:**

文章对孤独症谱系障碍视角感知的理论，主要是贝叶斯推理和预测编码理论，进行了述评，描述了各自的理论观点以及支持和不支持的证据，并进行了评论，条理比较清楚，内容比较翔实。有以下问题供参考：

**回应:** 非常感谢审稿专家对本文的认可，您的每个问题和建议都很具体和具有建设性，帮助我们改进文章的同时也认识到了自己表述上的不足，对此向您表示衷心的感谢。

**意见 1:** “这种理论层面的妥协并没有获得明确的结论，实证结果仍然是混乱且不可整合的 (Chrysaitis & Seriès, 2023)”，没有明确的结论是什么意思？实证结果混乱不可整合是什么意思？

**回应:** 非常抱歉原稿件没有写清楚这一部分内容，在此次修改稿中，我们明确了实证结果是怎样混乱且不可整合的，修改内容如下(P2):

虽然该主题下研究内容广泛、方法多样，但支持或不支持不平衡假说的结果各半，且存在矛盾。基于这一局面，Chrysaitis 和 Seriès(2023)认为将大量实证证据统一成连贯的理论整

体, 是一项几乎不可能完成的任务。

**意见 2:** “孤独特质(*autistic traits*)指智力正常的成年人 ...”, 孤独特质个体不一定是成年人, 儿童青少年也可以是。

**回应:** 非常感谢审稿专家的提醒, 我们在修改稿中已经该为“孤独特质(*autistic traits*)指 TD 个体在多大程度上具有与 ASD 个体相关的特征(*Baron-Cohen et al., 2001*)”。

**意见 3:** “先验和似然性均是对多个相关变量的概括性描述, 因此将讨论停留在这一水平将很难得出明确结果, 并且还会限制实证研究的拓展”, 不太清楚, “这一水平”指什么? 为什么会很难得出明确结果和限制实证研究?

**回应:** 非常抱歉我们在写作上的过度概括给您造成的困惑。在这一版的修改中, 我们删除了此类表述, 替换为更加明确的论述内容。主要修改如下(P13-P14):

但同时, 这并不意味着这些理论或假说均可解释 ASD 的视觉加工异常。这些假说或理论可被视为是精确性的连续体—从相对宽泛且更倾向描述性的理论到越来越精细、更具有解释性的理论。在最宽泛的层面上, 贝叶斯理论视角下的弱先验和精确似然假说关注先验和似然性建构感知的过程, 但未考虑先验和似然性本身是如何发生问题的。这一层面的理论提供了一个精度较低的标尺, 无法在研究中一致地衡量预测加工模式; 侧重于预测编码过程的理论提供了更精确的标尺, 可以更好地描述不同现象, 适应了不同组成部分之间的相互作用, 而不是将功能障碍定位在孤立的成分中; 精确的标尺是基于精确度的理论, 其强调了预测、预测误差或二者整合的不平衡的精确度权重是问题的关键所在, 也具有更强的解释力。值得注意的是, 在聚焦检验精确度的实证研究中, 其理论解释可存在排他性, 例如支持 *HIPPEA* 假说而同时不支持弱先验等其他假说(*Sapey-Triomphe et al., 2021*)。

**意见 4:** “研究结果发现 ASD 成年人的任务表现与 TD 成年人相当”, 在文中需指出哪些研究针对的是 ASD 儿童, 哪些是其他年龄的 ASD 个体。一般的趋势是, ASD 个体的缺损随着年龄的发展会降低, 所以, 不同的研究结果存在不同可能是针对不同年龄的被试群体导致的。在后面展望中提到, “ASD 儿童的统计学习发展则受到了阻碍, 进而导致在成年后体现出预测编码障碍”, 这一点需要仔细看文献, 一般来说, ASD 个体的缺损随年龄增加而减轻, 较少有问题是成年后才出现的。

**回应:** 非常感谢审稿专家的提醒与建议, 您提出的观点非常具有建设性和启发性, 我们之前的论述过于片面。在此次修改中, 根据您的建议与提示, 我们首先将正文中所有涉及到 ASD 者的实证研究均写清楚参与者的年龄阶段。此外, 在展望部分对这一问题进行了更全面的探讨。主要修改内容如下(P16-P17):

多数实证研究均基于特定年龄阶段的 ASD 者开展, 例如幼儿、儿童、青少年或成人等, 较少有研究同时考虑不同年龄阶段 ASD 者的预测编码差异。这可能是由于面临研究对象获取困难和研究范式需兼顾不同年龄阶段 ASD 者能力差异的双重挑战, 但从发展性视角考察 ASD 者的预测编码机制也非常重要。

一种可能性, ASD 者的预测编码异常会随着心理年龄的增长而逐渐缓解。这一假设来自于关于对 ASD 者感觉症状的观察, 例如有研究发现 ASD 者感觉症状与心理年龄呈负相关 (Baranek et al., 2006)。如果预测编码机制的异常确实是导致这些感觉症状的主因, 那么随着大脑发育的进一步成熟, 这种异常可能也会逐步减弱。研究发现, 高功能 ASD 者在不断用自己的方式适应外界环境 (Ai et al., 2022)。因此, 年龄的增长可能使 ASD 者逐步建立起更有效的内部模型, 从而提高对预测误差的容忍度, 降低对细微变化的过度敏感性。那么, 预测编码异常症状的关键缓解时间点可能就需要进一步的纵向追踪研究来验证。另外, 不同的研究结果差异也可能因不同年龄的被试群体所致。

第二种可能性则相反, 即预测编码机制在早期均不完善, 但随着年龄增长, ASD 者无法像 TD 者那样有效地建立和优化预测编码。这一假设来自于部分研究结果。有研究发现, 相比于 TD 成人, ASD 和 TD 儿童的利用先验信息的编码均不精确 (Van de Cruys et al., 2021); 而 Lawson 等 (2017) 发现成年 ASD 者表现出高估感官环境波动性的倾向, 且这种倾向并不存在于 ASD 儿童中。那么, 是否存在这样一种可能性, 即 ASD 和 TD 儿童对语境性先验的建立都比较弱, 而 TD 儿童随着时间发展, 预测编码能力的发育逐渐完善。相比之下, ASD 儿童的统计学习发展则受到了阻碍, 进而导致在成年后出现预测编码障碍。也就是说, 预测编码障碍是随着时间逐渐发展的, 而非从一开始即与 TD 儿童存在巨大差异。

无论哪一种发展轨迹更接近事实, 都需要纵向追踪和多模态的实证研究来加以验证。从发展性视角对于理解 ASD 的预测编码机制至关重要, 这种视角不仅有助于厘清症状变化的时间进程, 更能够揭示症状的发生根源是机制本身存在先天缺陷还是发育过程中出现了障碍, 亦或是二者的共同作用。未来的工作应设置前瞻性的纵向追踪研究, 以找出预测编码随着时间推移在 ASD 中的发展变化。

**意见 5:** “结果发现, ASD 个体在侧枕叶皮层 (lateral occipital cortex) 中存在重复抑制, 而面对符合预测的刺激中则呈现神经活动增强的趋势 (Utzerath et al., 2018)。这表明 ASD 个体存在完整的感受适应, 但对符合预测的刺激则无法实现心理适应”, 这个背后的逻辑是什么? 感觉这个研究的设计有点复杂, 可以稍微详细说明。

**回应:** 感谢审稿专家的建议, 这里的确在实验范式上有些复杂, 且实验范式的改进又与本文所论述的问题密切相关。在原稿件中, 我们存在论述不足、详略不当的问题。



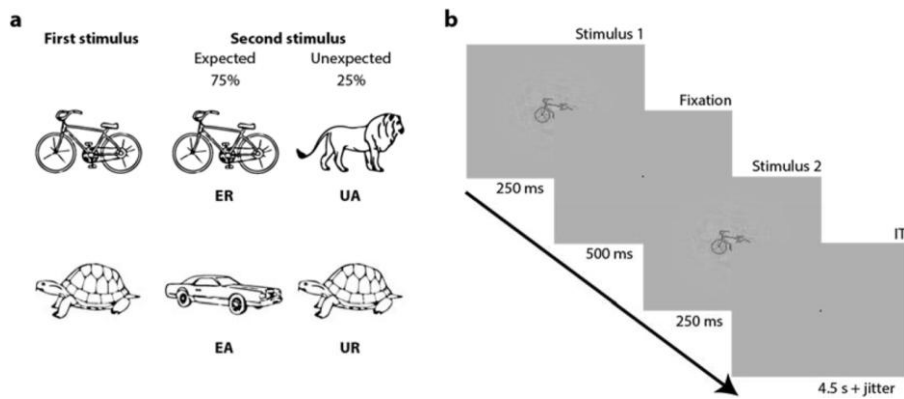


图 A Utzerath 等(2018)实验设计

现首先在此进行解释。重复抑制范式混淆了参与者对刺激的物理适应和心理适应，当一个刺激重复出现时，不仅可能是在心理上符合预测，也可能是因为物理属性上对该刺激产生了习惯化，进而降低神经活动。因此，如何将物理属性和心理层面的预测加工分离是关键。在 Utzerath 等(2018)的研究中，通过改进的统计学习范式(线索与刺激之间的概率性联系)，有效地分离了物理属性和心理层面的概率预测(图 A)。

根据上述内容，在此次修改中，我们将实验范式进行了更加详细的说明，修改内容如下(P8-P9):

值得注意的是，重复抑制范式是否能有效操纵预测实际上存在争议。Feuerriegel 等(2021)指出，重复抑制范式会混淆物理适应和心理适应。简言之，刺激的多次重复会引起物理适应，但要确定是否导致心理适应，则需分离刺激的物理属性。视觉统计学习范式(visual statistical learning paradigm)能够有效地分离刺激的物理属性，在该范式中会相继呈现线索和目标，线索可预测目标出现的概率(高概率为符合预测，低概率为违反预测)。通过平衡不同线索与目标的关系，该范式可实现在同一组块内不同目标出现的次数保持一致，进而控制刺激的物理属性。一项 fMRI 研究在视觉统计学习范式的基础上，通过设置线索与目标是否为同一刺激来操纵重复性，据此分为符合预测的重复和非重复、违反预测的重复和非重复 4 种实验条件。结果发现，ASD 青少年对重复刺激在侧枕叶皮层(lateral occipital cortex)的神经活动减弱，表现出重复抑制；而对符合预测的刺激则神经活动增强(Utzerath et al., 2018)。这表明 ASD 者存在完整的物理适应，但对符合预测的刺激则无法实现心理适应。

意见 6：“研究结果发现，与 TD 个体一致，ASD 个体学会了避免在符合预测的位置上出现的干扰物的注意捕获；而当干扰物出现在违反预测的位置时，ASD 个体则无法避免干扰物的注意捕获(Fredrik et al., 2021)。研究者认为，该结果支持 HIPPEA 理论”，感觉这里的结果都和 TD 个体是一致的，为什么支持 HIPPEA 理论？

回应：抱歉这个地方我们没有表述清楚。这个实验中，TD 者与 ASD 者的主要差异在于，

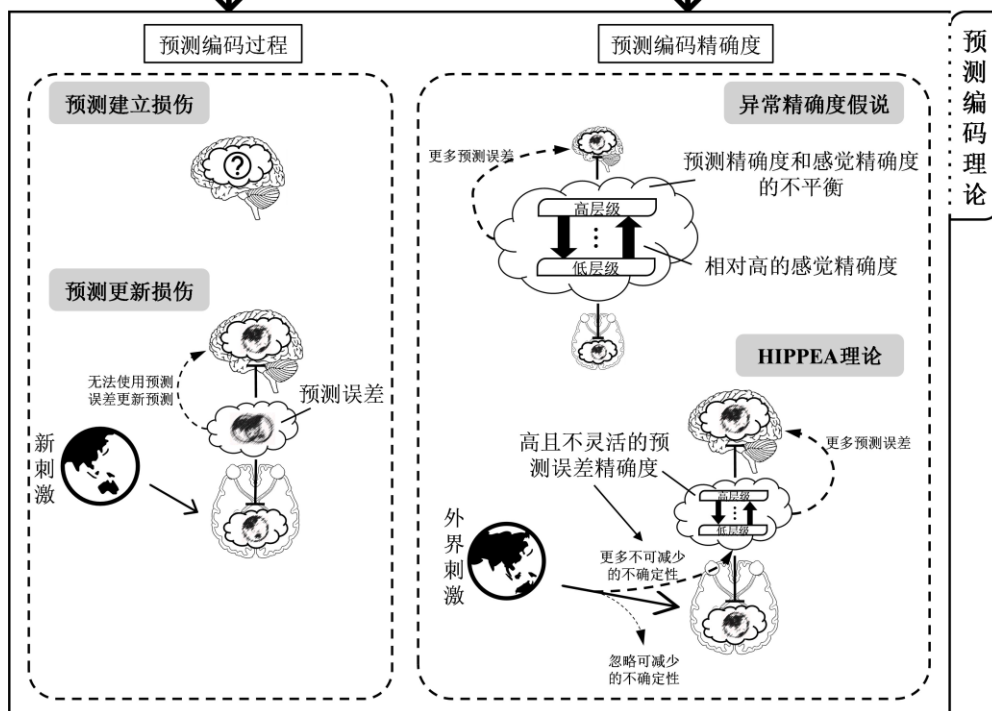
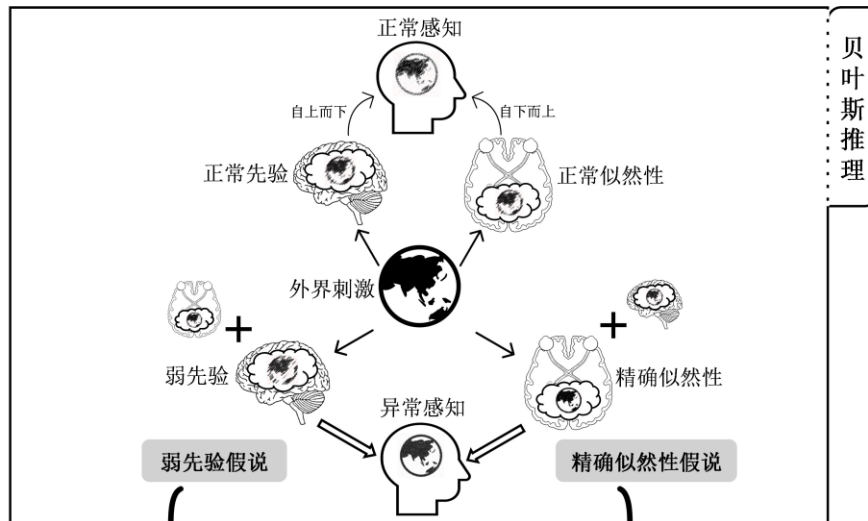
当干扰物出现在违反预测的位置时，ASD 者不能很好地控制注意被干扰，即轻微地环境扰动会对其形成干扰，表明其存在较高的预测误差精确度。在此次修改中，我们对这一问题进行了更详细的论述，修改内容如下(P11):

另一项研究使用视觉搜索任务，在实验中，一个显著但与任务无关的干扰物在一侧位置出现的概率更高(符合预测)，而在另一侧的概率更低(违反预测)。结果发现，与 TD 成人组一致，ASD 成人组也学会了避免被出现在符合预测位置的干扰物捕获注意；然而，当干扰物出现在违反预测的位置时，ASD 组则无法像 TD 组那样有效避免注意被捕获，导致任务表现降低。研究者认为该结果支持 HIPPEA 理论(Fredrik et al., 2021)。具体来讲，HIPPEA 理论认为 ASD 者对微小的预测误差过于敏感，导致“每一次轻微的违反规律都会引发新的学习”(Van de Cruys et al., 2014)。当一个突然出现在非预测位置的干扰物违反了先前建立的规律时，所产生的预测误差触发了新的学习过程，使 ASD 者的注意被干扰物所捕获。而 TD 者则能更好地抑制这种注意捕获，因为他们对微小的预测误差的敏感性较低。

**意见 7:** 图 1 理解起来有点困难，在文中也没有提及和解释，请说明清楚。

**回应:** 感谢审稿专家的提醒。在原稿件中，我们主要以时间轴对理论进行了梳理，但是并没有阐述清楚理论之间的差异与联系。在认真思考之后，我们大幅度地修改了这一部分内容，主要希望通过图示结合文字的形式，清楚地表述各理论之间的联系与差异。涉及图的主要修改内容如下，其他内容请您参见正文(P12, 3.4):

整体来讲，三个层次的理论相互衔接、递进发展(图 1)。贝叶斯框架为预测编码理论奠定了基础，而预测编码理论则对贝叶斯框架中的观点作了更为系统性的发展与理解。同时，这三个层面也存在关注重点的差异。贝叶斯框架主要是表象层面的理论假说，预测编码过程理论则更多聚焦于编码动态的失常环节，而精确度理论则直接分析了预测编码中感官信息权重分配的偏差。三者共同构建了一个多层次、系统性的理论架构，有助于我们全方位地描绘 ASD 视觉加工的独特“画像”。这些假说或理论的核心是强调预测加工的可分离的组成部分，这些部分并不需要在一个层次框架内相互排斥。



意见 8：有些文字问题需修改，如“聚集感觉加工的研究者还试图...”，聚集应该为聚焦；“预测编码损伤假指出”，漏了“设”；“prediction errors in antism, HIPPEA”，应为“autism”；“使用 fMIR”，应为 fMRI；还有其他地方，请仔细检查。

回应：非常感谢审稿专家逐字阅读我们的稿件，也很抱歉我们存在这么多疏漏之处。在此次修改中，我们仔细检查和反复校对，对类似失误进行了修改。感谢您的帮助。

意见 9：“本研究”改为“本文”比较合适。

回应：非常感谢审稿专家对我们写作问题的指正，综述类论文的确用“本文”更加合适。

意见 10：“并且其并不会将这些误差视为能够被忽略的错误”，“其”改为“他们”或“ASD 个体”

比较好；文中还有其他类似的地方。

回应：非常感谢审稿专家的提醒和修改建议，我们参考您的意见，对全文有类似问题的地方进行了修改。

再次感谢两位审稿专家对本文的建议。正文中所有主要修改已标注为红色，参考文献比例已经调整。请您再次批评指正！

---

## 第二轮

审稿人 1 意见：作者通过仔细修改很好地解决了上一版中存在的问题，并且让文章的整体结构更加清晰。建议发表，祝贺！

审稿人 2 意见：作者较好地回答了问题，建议发表。

编委 1 意见：这篇稿件经修改后质量更高了，对于孤独症的感知研究给出了很好的综述和思考，很有价值。我同意两位外审专家的意见，建议接受发表。

编委 2 意见：同意发表。

主编意见：根据编委和审稿专家的意见，建议发表。