



贝叶斯框架下的自闭症感知觉异常

崔可^{1,2}, 罗非^{1,2}, 王锦琰^{1,2*}

1. 中国科学院心理健康重点实验室(中国科学院心理研究所), 北京 100101;

2. 中国科学院大学心理学系, 北京 100049

* 联系人, E-mail: wangjy@psych.ac.cn

2023-09-06 收稿, 2023-10-27 修回, 2023-10-27 接受, 2023-10-30 网络版发表

摘要 自闭症谱系障碍(autism spectrum disorders, ASD)是一种复杂的神经发育疾病, 其典型特征是社交障碍、限制和重复的行为和兴趣。此外, ASD个体往往表现出感知功能的非典型性(如感觉超敏感或低敏感)。先前的知觉理论只能部分解释ASD个体与典型发育个体(typically developing, TD)之间的差异。Pellicano和Burr提出了贝叶斯预测模型, 通过贝叶斯计算建模和预测编码理论将感知过程概念化, 从新的角度去理解这种差异。该模型描述了感觉自下而上和认知自上而下的过程如何共同作用, 并以不同的方式塑造了ASD的感知。本文对贝叶斯模型进行了全面的回顾, 其中最突出的两个理论是“弱先验假设”和“ASD预测误差高且不灵活精度的假设”(HIPPEA)。我们从高级的社会认知功能上和不同的感觉通道角度上检验了这些理论。结果显示, 目前支持贝叶斯预测理论的证据是混合的, 有的研究支持ASD个体的先验不足或在不断变化的环境中调整这些预测的灵活性较差, 也有的研究指出ASD个体能够学习预测, 拥有完整的预测能力, 贝叶斯先验的整合上没有差异, 还有一些研究在行为与神经影像学发现不一致。尽管贝叶斯ASD理论很有前途, 可以帮助我们更好地理解ASD患者的非典型感知觉, 但它在实证方面还面临着挑战。基于此, 我们提出了现有研究的局限和未来发展的建议。总之, 贝叶斯预测模型自提出以来, 已经得到了有效应用和不断的验证。然而, 该理论仍然是一个不断发展的概念, 未来还需要大量的研究来更新和改进。

关键词 贝叶斯模型, 预测, 自闭症谱系障碍, 弱先验, 预测误差

自闭症谱系障碍(autism spectrum disorders, ASD)是一种普遍的神经发育障碍, 其特征为社交障碍, 以及受限的、重复的行为和兴趣(american psychiatric association, APA)。同时, 对ASD的感觉和信息处理的研究表明, ASD个体可能以独特的方式获取或处理知觉信息, 从而导致了許多ASD的非典型特征^[1]。之前的研究发现, ASD个体更善于感知细节而不是整体^[2]。例如, ASD个体可以很好地理解单个句子的意思, 但是很难理解上下文的意思^[3,4]。对此的解释大多集中在ASD个体感觉功能的差异上, 如感知功能的增强(enhanced perceptual functioning, EPF)^[5]或认知风格的差异, 优越

的局部处理能力而缺少全局处理能力, 即弱中央统合理论(weak central coherence, WCC)^[6]。这些感知模型并没有提出一个具体的机制, 他们认为自闭症患者对感官输入的接受和反应方式与典型发育(typically developing, TD)个体的差异是明显的, 有研究将差异视为自下而上刺激驱动过程的产物, 也有研究将差异视为自上而下认知驱动过程的产物^[7], 二者之间存在着长期的争论。2012年Pellicano和Burr^[8]将不同的解释整合在了一个新的框架里, 通过贝叶斯(Bayesian)模型讲述了感觉自下而上和认知自上而下的过程如何共同作用, 并以不同的方式塑造了ASD的感知。

引用格式: 崔可, 罗非, 王锦琰. 贝叶斯框架下的自闭症感知觉异常. 科学通报, 2024, 69: 489–498

Cui K, Luo F, Wang J Y. Atypical sensory perception in autism from the perspective of Bayesian framework (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 489–498, doi: 10.1360/TB-2023-0939

1 贝叶斯模型

1.1 概述

现实生活中,人们对“前因”和“后果”之间的关联,依赖于我们大脑内部的推理机制^[9],它不是被动地通过感知觉信息来维持认知加工,而是主动地结合已有经验来推测感知觉信息的成因,从而形成对外部世界的假设。例如,听到雷声就想到下雨。我们需要根据过去的经验计算概率来预测最可能的结果。

贝叶斯推理类似于感知过程,并被视为内隐推理^[10,11],已知贝叶斯模型对知觉现象的解释应用在许多场景中,包括多感官整合、知觉推断、错觉等,其中最受欢迎的贝叶斯推理实现是预测编码^[12]。

预测编码模型认为,我们对周围世界的认识是由自下而上的感觉信号和自上而下的预期相结合形成的,且这一过程是通过大脑分层结构实现的^[13]。大脑具有层级结构,信息从感觉皮层传递到更高层级的皮层结构,层级越高,对信息的加工越具有高度提取和精确预测,且受外部影响越小。我们需要从混乱嘈杂的感官输入中提取信息,信念以概率分布的方式表示,贝叶斯模型描述了感官数据(似然函数)是如何将先验信念更新,以形成或者调整后验信念的。先验代表了之前的内部预测模型,后验代表更新的信念^[14]。如图1(a)所示,感官输入(灰色)与先验(紫色)相乘,得到后验分布(红色),最理想的状态是,后验分布的中心逐步向先验偏移,后验和前验之间的差异减小。在贝叶斯模型中,大脑可以使用其内部模型来预测和计算由特定行为引起的某些情况的可能性。

我们的大脑通过快速、持续地对各种信息进行自上而下的预测,并不断地将这些预测与传入的感官数据进行比较,目的是最小化“预测误差”,即预测与实际感官输入之间的差异,以实现内部预测模型(先验)的更新,做出最佳推断。因此,贝叶斯模型可以通过使用每个新产生的预测误差迭代来更新预测^[15],如图2所示。

那我们在多大程度上依赖预测或感觉输入呢?当接收到感觉信息,大脑会给予先验预测和当前信息适当的加权,不同情况下的加权值会有所不同:当感官证据相对更精确时,给予自下而上的证据相对更多的权重;而当感官世界模糊的时候,我们则更多地依赖自上而下的先验信念。例如,如果在南极,猛烈的风雪模糊了我们的视线,使我们难以辨别前方的动物,那我们最好的判断强烈地依赖我们的先验信念,即那可能是企

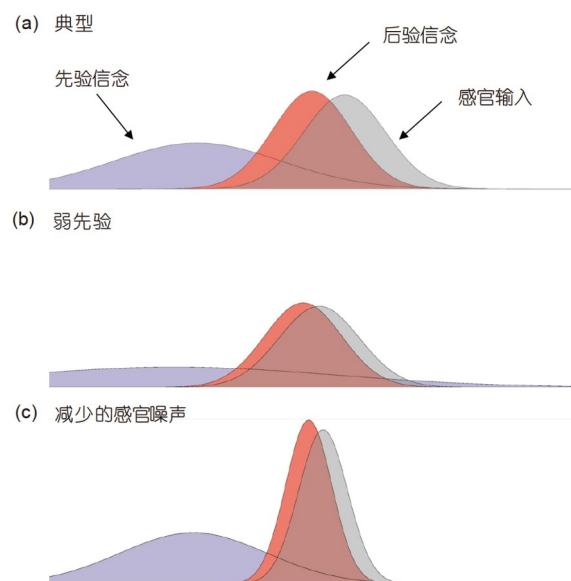


图1 (网络版彩色)贝叶斯感知的个体差异。(a) 典型发育的状态;(b) 弱先验的状态;(c) 减少的感官噪声状态

Figure 1 (Color online) Individual differences in Bayesian perception. (a) Typical development; (b) hypo-priors; (c) reduced sensory noise.

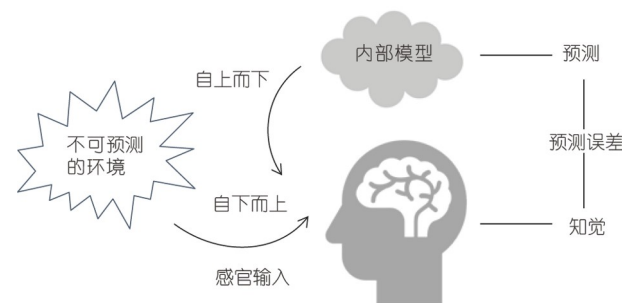


图2 贝叶斯框架下的预测

Figure 2 Prediction in a Bayesian framework

鹅而不可能是北极熊——因为这时依赖于嘈杂和不确定的感官证据只会破坏我们的感知推断。当然,在这个过程中预测的精度也十分重要,当自上而下的预测变得不那么精确,我们应该给予自下而上的信号相对更多的权重,反之亦然。

1.2 ASD预测理论

自闭症谱系障碍被认为存在感知推理方面的障碍^[14]。以往的研究发现,ASD个体存在普遍的预测缺陷^[8,16,17],如在语言预测、时间感知、视觉预测、处理社会信息等方面的受损。

Pellicano和Burr^[8]用“弱先验”来解释ASD个体非典

型的感知觉,即ASD个体的先验比典型发育个体的权重不足或使用较少的情况。其本质是Mitchell和Ropar^[18]早期提出的“先验知识的影响减弱”的贝叶斯形式化,表现为感官处理的自上而下调节减弱,造成知觉加工的异常。也就是说,ASD个体倾向于更准确地感知世界,而不是受先前经验的调节。如图1(b)表示了一种弱先验的状态,由于先验分布更平坦(更不精确),因此后验更偏向于感官数据。而Brock^[19]在贝叶斯预测推理框架内提出了另一种可能性,如图1(c)所示,即一种自下而上感官增强的加工模式——感官噪声减少或感官数据过于精确。这两种说法的共同点是,ASD无法根据环境调节精度,要么感知过于精确,要么先前经验的不足,导致后验信念由感觉输入所支配。然而Skewes等人^[20]比较了两种加工模式,实验结果支持弱先验的理论,而不是增强感官精度模型。

还有一种理论认为,问题不在于先前的预期本身,而在于预测误差的精度改变,关注的是先验和感官精度的比例^[16,17]。Lawson等人^[17]在贝叶斯推理的神经实例化(预测编码)中解释了ASD的感知觉非典型性,并提出这种非典型性可以解释为大脑分层信息传递过程中精度的异常编码,即感觉信息和先验经验之间的不平衡,更大的权重被赋予感觉信息。而van de Cruys等人^[16]提出ASD预测误差大且不灵活精度的假设(high, inflexible precision of prediction errors in autism, HIPPEA),认为自下而上的预测误差被赋予了过高且不灵活的精度,并不能适应环境中的不确定性。虽然理论的细节不同,但是它们都强调先前的信念对ASD的认知和感知影响较弱,即过度地依赖于感觉输入。

这其中影响力最大的就是Pellicano和Burr^[8]提出的“弱先验”假设。关于弱先验对ASD个体的影响,有两种不一样的看法:在某些情况下,弱先验可能会导致更准确的感知,而在另外的情况下则表现更差,这取决于任务是更多地利用感官输入本身还是利用先验知识进行成功的感知预测。一些研究结果是支持弱先验假设的,例如ASD个体适应能力的降低可以作为先验减弱的证据,适应能力是一种依赖经验的可塑性形式^[21],它是由感官经验和先期期望之间的不匹配而导致感知变化所驱动的,神经系统根据先前的经验调整当前的感知^[22]。这些研究包括了视觉、触觉、听觉等多个领域,Turi等人^[23]通过测量游戏计算了心理测量函数,估计了被试的主观相等得分,结果发现ASD组的分值显著低于对照组,即ASD个体对数字的适应性降低,作者认为这是

由于在当前的感知任务中,ASD个体较少使用既往经验所致。同样,Goris等人^[24]发现,ASD患者在调节预测方面的灵活性较差;Molesworth等人^[25]报告了在ASD个体中,先前经验(序列效应的形式)对分类决策的影响降低。

1.2.1 贝叶斯理论用于解释ASD症状

最近的一项系统综述证实了ASD和TD个体在预测学习和预测反应方面的一些差异^[26]。自闭症的许多显著特征可能是预测能力受损的表现,这种缺陷增加了ASD个体的内在不确定性,可以解释一些自闭的典型症状^[27]。众所周知,社会互动具有复杂的动态过程和许多不相关的随机特征,这需要个体具有高度提取和精确的内部预测模型,而这种模型的相对缺乏使得ASD个体难以推断社会刺激的原因(即理解社会过程的意义),从而难以与他人互动^[14]。有研究者指出,如果ASD个体确实表现出减弱的先验,那么在需要大量先验的社交场合中,这种缺陷会更严重^[17]。因此,与自闭症症状学特别相关的假设是,较差的“社会特异性”先验,可能导致ASD个体增加社会行为的内在不确定性,从而损害了与他人有效互动的能力^[27,28]。

如果ASD个体的预测机制不是最优的,那么对他们来说,世界似乎是不可预测的。ASD的重复、刻板行为被描述为试图将环境的不可预测性最小化^[27]。ASD个体对同一性的强烈渴望可能不是变化本身的问题,而是预测变化的问题。对于ASD个体而言,缺乏能够非常精确的表征外部环境的内部模型,即先验的不足,过于专注感官世界可能会加剧这种不可预测性,而从不可预测的环境中转移到具有高度规则感的环境中,可以最小化预测误差,减少认知压力^[14]。因此,重复的行为可以作为一种缓解不可预测性的方式。

同时弱先验也可以解释ASD个体出现的超敏感和低敏感的非社会性症状。弱先验会导致ASD更加依赖自下而上的感觉信号,进而会导致对更广泛的感觉刺激体验增强,这种增强的感觉与对感觉信息超敏感相一致^[29]。但是如果内部模型中没有合适的先验可以匹配输入的感官信息,ASD个体无法很好地预测当前的感官信息,就会出现对感知的低敏感。因此,Pellicano和Burr^[8]指出,自闭症个体中非典型的不是感觉处理本身,而是对感觉输入的解释。

贝叶斯模型也可能适用于自闭症的高级认知过程,如统计规律和关联的学习,为了做出最佳预测,需要跟踪环境中的统计规律,包括线索-结果关联。有研

究发现,在概率学习任务(研究ASD个体如何在不确定环境中学习预期)中,相对于TD组,ASD个体在不稳定的环境中统计规律的表现更差^[30],也有研究发现ASD个体能够在不确定的环境中适应学习速度^[31].在关联学习的任务中,当预测特征的不明显或难以辨识时,ASD的关联学习尤其困难^[26].在学习动态方面,ASD个体更新预测的速度较慢^[32],这或许可以解释ASD中先验权重较不固定的原因^[26].但从以往的研究来看,尚不清楚ASD个体是否在学习环境中的统计规律方面存在更多困难,在一些环境中,他们的能力可能会保持不变^[32,33].

1.2.2 非典型性的神经证据

Dichter等人^[34]认为,与执行功能障碍相关的异常的前额叶皮层(prefrontal cortex, PFC)激活可能与这些异常的自上而下预测有关. ASD个体对他人行为做出可靠预测的能力下降,可能是由于大脑先验的减弱,这与大脑皮层功能连接性不足的发现是一致的^[35]. ASD的神经生物学研究发现,枕颞区后部负责感觉处理的高阶区域,出现了自上而下的神经调控异常^[36].而Lawson等人^[17]强调突触后增益控制作为精确加权的潜在神经生物学机制的重要性,并假设 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)、乙酰胆碱和催产素可能在不同层次的精度调整中发挥核心作用.也有研究指出,ASD可能与去甲肾上腺素、乙酰胆碱这两种神经调节系统的损伤有关^[26].对ASD个体的全脑静息态研究发现,静息状态神经活动显示出更少的可预测信息,在默认模式网络的后部区域尤其明显^[37].这些研究为ASD的预测处理差异提供了一种可能的神经生理机制.

2 基于贝叶斯模型的自闭症研究

Angeletos Chrysaitis和Seriès^[38]在贝叶斯模型的框架下,探究了这一理论是否得到实验证据的支持,其结果是高度混合的,有的研究发现ASD和TD在贝叶斯先验的整合上没有差异,有的则发现在实验中发展的先验比之前获得的先验更频繁地表现出减少的现象.虽然预测加工缺陷为自闭症的特征提供了一个可信的解释模型,但是研究结果存在异质性,实验证据并不一致.当然上述的系统综述是从不同的先验类型角度来分类现有研究,而关于贝叶斯理论的自闭症研究任务不仅存在于高级的社会认知功能上,也存在于不同的感觉通道上,从这个角度或许能更直观地看出现有研究的异质性.

2.1 社会相关信息预测

由于ASD具有典型的社会沟通障碍^[39,40],研究者们试图在贝叶斯预测理论的框架下,从ASD个体对人脸的识别^[41,42]、对他人行为想法的预测^[43,44]以及对社会信息的编码异常^[45]等方面,探索ASD个体社会沟通障碍背后的机制.

有研究者提出,人类有一种先前的预期,即目光是指向他们的,当在合成人脸的眼睛中加入噪音(增加凝视方向的不确定性)时,凝视更有可能被视为直接的.时,凝视更有可能被视为直接的. Pell等人^[42]想要探究先验对凝视的感知是否降低,结果并没有发现ASD组这种偏倚程度有所减少,即ASD个体的注视方向的先验可能是完整的.

Pell等人^[42]认为,如果先验在ASD中是非典型的(弱先验),这应该表现在由先前视觉经验不同而造成的知觉差异上.传入感官信息的不确定性增加将导致先前预期对感知的影响增加,研究者提出人类有一种先前的预期,即目光是指向他们的,当在合成人脸的眼睛中加入噪音(增加不确定凝视方向)时,凝视更有可能被视为直接的.研究想要通过视觉社会知觉任务确定ASD的知觉减弱先验理论,并假设TD组将表现出直接凝视的先验证据,如果这种效应在ASD中减弱,或者ASD组相对于对照组明显减弱,这就为ASD中知觉的减弱先验理论提供了支持.研究者人脸的眼睛中加入了不同的噪音,要求被试在迫选任务中区分凝视方向,其特点是拟合斜率存在显著差异,噪音条件下的拟合斜率为正,而无噪音条件下的拟合斜率为负.结果显示,噪声条件下的斜率明显比测试噪声条件下的斜率更正,即人们更受之前预期的影响,偏向于将不确定凝视方向视为直接的偏见,且无交互作用和组间差异,这就说明在不确定的条件下,两组人都倾向于将凝视视为直接的,并没有发现ASD组这种偏倚程度有所减少,即ASD个体的注视方向的先验可能是完整的.这点在脑网络上也得到了证实. Ewbank等人^[41]认为,重复抑制(相同刺激的重复会导致BOLD反应的减少)的个体差异可能反映了预期过程的差异.当刺激的重复性可预测时,重复抑制更大,而先验不足可能是ASD个体中这种效应降低的基础.作者以面孔图片为刺激材料,操纵刺激呈现的概率,以梭状回面孔区(fusiform face area, FFA)、枕叶面孔区(occipital face area, OFA)、右颞上沟(superior temporal sulcus, STS)作为感兴趣区域(re-

gion of interest, ROI), 结果并没有发现自闭特质与感知预期对重复抑制的影响存在显著关系。

理解他人的意图对社会互动至关重要, 并依赖于预测他人行为的能力。关于自闭症的各种理论(如心理理论)都假设ASD个体很难理解他人的意图, 即他们通过行为预测来理解他人意图的能力下降。在贝叶斯预测编码框架下, 研究者同样做了许多实证研究, 然而实验结果并不统一, ASD在一些研究中表现出较低的行为预测, 而在另一些研究中则表现正常。

ASD个体先前预期的减弱, 更多的是与预测社会意图的能力受损有关, 而不是由于精神障碍的普遍损害, 且社会领域的减弱先验与社会互动领域临床症状的严重程度呈负相关^[43]。给儿童展示不同情境下表演动作的视频, 在减少了运动学信息的数量后, 要求儿童预测接下来的动作。TD儿童偏向依赖于情境先验, 从而弥补知觉的不确定性, 而ASD儿童在这种不确定环境中, 难以利用情境先验来预测他人行为^[44]。

也有研究者通过信任游戏, 为ASD个体构建了社交场景, 探讨名誉先验和直接互惠对ASD信任决策的影响, 结果发现虽然ASD和TD两组都受直接互惠的影响, 即都可以根据伙伴是合作的还是个人主义的来修改他们的投资, 但ASD被试的名誉先验权重明显强于TD被试。与贝叶斯理论相符的是, ASD个体在编码传入的社会信息, 并使用它来修改和灵活更新先前的社会期望方面存在困难^[45]。

2.2 听觉预测

有研究指出, 对于ASD预测编码的研究应该关注早期感觉加工(如听觉加工)。具体来说, Lin等人^[46]通过延迟ASD听觉的反馈来研究反馈控制, 利用Lombard效应(当存在较大的背景噪音时, 说话者的语音产生强度和发声时间会增加)来研究前馈控制, 结果发现, TD组的被试更多地依赖于对自己声音的预测, 而ASD个体更多地依赖于听觉反馈, 这与减弱的贝叶斯先验假设一致。van Laarhoven等人^[47]研究了ASD个体和与之年龄匹配的TD个体对自我和外部启动音调的神经反应。研究者将听觉N1衰减效应(即预测误差越小, N1的振幅越小)的减弱作为预测编码机制受损的证据。他们观察了被试对自我和外部启动音调的神经反应, 发现ASD个体自我启动的音调并没有减弱听觉N1, 而TD对照组表现出显著的N1衰减效应, 表明ASD个体可能无法预测自我动作的听觉感官后果。扩大到视觉-听觉预测编

码方面, 同样发现ASD个体自我启动音调并没有减弱听觉N1^[48]。研究结果证实了ASD缺乏精确的内部预测模型, 其感知更多地受到感官输入的驱动, 支持了预测编码受损作为ASD非典型感官知觉基础的核心缺陷的概念。

Goris等人^[24]利用分层听觉oddball任务, 操控局部和整体规则违反的比率, 发现失匹配负波(mismatch negativity, MMN)的反应幅度(即预测误差)在ASD个体中受到环境的调节程度相比较TD更小, 即ASD表现出调节局部预测方面不太灵活。这些研究结果支持了ASD个体听觉预测编码可能受损。但是也有对MMN的研究指出情境依赖预测误差与自闭症特征无关, 可能仅仅受益于ASD个体的感官高敏感性^[49]。

2.3 视觉预测

以往的研究发现, ASD个体更容易注意到视觉刺激的局部方面, 更善于视觉搜索且越准确、越高水平的自闭特征越不容易受到视觉错觉的影响^[18,50]。为推断其内在原因, 研究者通常使用模糊的或嘈杂的刺激来给视觉系统带来困难。例如, Mooney图像是黑色和白色斑块组成的高度分解的图片, 在暴露于未退化的图像前后会有显著不同的感知。对于退化后的图片, 先前的经验会将碎片重新组织起来, 并组合成一个有意义的整体^[51,52]。利用Mooney图像, Król等人^[52]发现先前的经验和知识对青少年ASD个体感知事物的方式影响较小, TD个体对模糊刺激的眼动模式发生了自上而下的优化(即注视次数和注视距离减少, 注视时间增加), 这种效应在ASD个体中反而减弱。而对于Mooney图像的识别准确性的行为研究却发现了没有组间差异, ASD同样具有完整的先验^[51]。

Braukmann等人^[53]研究了10个月大的有ASD家族风险的婴儿的预测能力。他们把被试划分为高风险和低风险婴儿, 通过眼动追踪技术评估婴儿对实际目标或替代位置的预期。结果发现, 两组婴儿在预测眼球运动方面没有差异, 但是在局部样本中, 高风险婴儿表现出完全缺乏预期的趋势, 这个结果还需要后续的研究。然而, Greene等人^[54]却得到不一样的结论。研究者想用眼球追踪技术解释不同刺激类型下ASD的预测能力缺陷, 正确的预测线索-刺激配对按比例呈现, 结果发现ASD青少年症状的严重程度与观看正确预测位置的次数成反比。作者得出结论, ASD个体有相对受损的预测能力, 这与贝叶斯感知理论相一致, 即ASD个体可能更

重视感官刺激(相比于先前的经验),进而导致预测推理能力和学习能力的缺陷。

2.4 运动控制

感觉运动非典型性影响ASD的生活质量和社会能力。ASD中常见的感觉运动障碍有姿势不稳定、笨拙等^[55],这些感觉运动困难可能源于非典型的预测处理,研究者想要在贝叶斯理论下探究ASD感觉运动困难背后的机制^[56,57]。Arthur等人^[56]利用物质-重量错觉(MWI)范式来分离自闭特征和预测性感觉运动控制之间的关联,结果发现两者之间并没有预测相关的联系,但具有更大自闭症特征的被试更容易受到MWI在多个感觉运动水平上引起的预测偏差的影响。在2020年的研究中,该团队拓展了原有的研究,通过两项物体举起实验检验了ASD预测性感觉运动控制的差异,实验结果却与贝叶斯预测的观点不一致,ASD先验的权重并没有过低,但有精度异常的趋势^[57]。虽然上述研究没有明确地发现ASD运动控制与预测之间的关系,但更好地帮助我们理解ASD的感觉运动困难。

2.5 其他

然而也有研究反驳了预测处理在ASD个体中受到绝对损害的观点。有趣的是,研究者在贝叶斯预测框架内关于ASD个体的研究,在行为上和脑神经活动或神经生物学上发现了结果的分离。Beker等人^[58]将听觉目标和视觉线索结合起来,通过行为和电生理方法来验证ASD个体在时间预测方面的缺陷。在行为上,尽管ASD被试总体的反应时较慢,但是却表现出了完整的预测加工能力。在电生理上,发现TD组的CNV(contingent negative variation)具有明显的预期功能,随着提示序列的推移和目标的临近,CNV波幅呈系统性地增加,然而ASD却表现出明显减少的夹带(intertrial phase coherence, ITPS)和预期(CNV)活动。对此研究者认为,基于当前的范式,被试对刺激的即时反应(行为)并不与潜在的振荡活动共同变化。虽然ASD个体对刺激呈现节奏的神经振荡带被破坏,但是他们的基本感觉处理是完整的。

Sapey-Triomphe等人^[33]提出ASD个体预测能力的缺陷可能是由谷氨酸和GABA介导的。被试参加了一个联想学习任务,并同时测量了磁共振波谱(magnetic resonance spectroscopy, MRS),让被试通过高音或低音音调来预测一对圆点的顺时针或逆时针旋转。结果在行

为上,ASD和对照组都能成功地学习和更新预测,这表明在此研究中,ASD的预测能力没有特别的损伤。但是相比较对照组,ASD个体却在右侧额下回(Inferior frontal gyrus, IFG)表现出较高的Glx(glutamate and glutamine, Glx),正确预测的能力与IFG的Glx/GABA⁺比率呈负相关,这表明ASD个体更难做出正确的预测,难以灵活更新先验。这些结果表明,ASD能够在一些特定的实验环境中学习和更新他们的先验,而右IFG较高的Glx可能表现了ASD个体预测性大脑功能障碍。

总的来说,一些基于脑神经的证据通常表明ASD的预测差异,但是这些脑神经证据与行为之间并没有明确的对应关系,因此很难从这些数据中得出关于预测功能行为差异的结论。但是这种分离的结果也很有研究意义,神经影像测量的是ASD预测的过程,替代补偿的过程还是其他相关却不同的大脑过程,这还需要未来更多的研究来证明。

3 总结与展望

贝叶斯预测模型从提及至今,得到了很好的应用和不断的验证,它可以很好地解释自闭症中的非典型感知,不仅体现在高级社会认知能力上,也体现在不同的感官属性中。感知预测具有很强的依赖经验的可塑性,在贝叶斯框架内,正是由于感官经验和先前预期之间的不匹配,从而驱动导致知觉的变化。贝叶斯假设表明ASD个体很难预测他们的环境,但是一些研究表明,在背景信息变化后,即使ASD对预测的调整程度较低或较慢,但他们也能进行完整的预测。

有些原因可能造成了研究结果的差异,如不同的学习时间尺度也可能作为造成差异的原因。一些在较长时间尺度上学习先验的研究报告中,TD和ASD之间并没有差异^[22,53]。而在较短时间尺度上的ASD研究中,ASD成年人表现出较慢的且不灵活的^[59]先验学习,给出了更多的异质性的结果。

现有的研究对ASD被试的选择标准并不一致。有的研究选择的是具有遗传风险的被试^[53],有的是符合临床诊断标准的^[54],还有的是具有自闭特质的^[42],造成最后结果的出入可能是由于被试纳入的标准不一。

同一刺激材料,预测重复的概率呈现的不同也会造成结果的不同。例如,在Ewbank^[60]的研究中,所有面孔刺激呈现重复或交替的概率为100%,结果发现自闭症特质对刺激的重复抑制效应产生负向预测;而在作者2016年的研究中,面孔刺激呈现的重复(交替)概率为

75%或者25%, 结果并没有发现显著的关系^[41]。

还有一些情况下, 先验获得的途径不一样。情境性先验是在实验过程中通过连续暴露获得, 并与特定的目标线索、任务指令、时空环境等实验条件所绑定^[54], 这种先验更多的受研究者的控制, 研究者可以直接操纵数据, 所以这样得出的结果, 不能排除实验室因素。相比之下, 结构性先验是特定于社会领域的先验, 可能是天生的, 也可能是长期学习获得的, 不容易塑造^[53], 不过已有的研究表明, 这种先验似乎对自闭症谱系障碍没有太大影响^[61]。

实际上在日常生活和学习中, 人们不断地进行预测, 但是为了减少预测误差, 人们一方面可以不断地调整和更新内部模型, 另一方面也可以作用于环境, 使其更符合先前的模型。而对于ASD个体, 可能倾向于改变他们的环境, 而不是调整他们的先验(比如在新环境中, 坚持重复行为)。但是在从上述的研究中发现, 在许多情况下, ASD个体同样可以发现并学会使用规则。他们在实验过程中可以学习概率和隐式规则, 并表现出完整的预测能力。研究表明, 薄弱的社会先验可以通过实验中连续的经验学习得到补偿, 一旦成功内化, 先验可以被ASD组有效利用^[43]。甚至如果任务明确了哪些刺激或维度是相关的, ASD个体可能对环境的变化更敏感, 对目标刺激分配更多的注意力^[62]。但是当规则需要在不稳定的环境中学习和更新时, 相对于TD被试, ASD表现得更差^[59], 这点与HIPPA假说不谋而合, 精度不能根据刺激和环境灵活地改变。ASD个体能够在一些特定的实验环境中学习和更新他们的先验知识, 这或许有助于自闭症贝叶斯假设的改进。

到目前为止, 支持自闭症贝叶斯假设的证据是混合的: 一方面, 一些研究的结果支持弱先验或精度异常的解释; 另一方面, 一些研究并没有发现ASD与TD之间显著的差异。而且已发表的行为学研究比神经影像学更多的报告无差异, 究其原因, 最近的系统综述对于这种现象有2种可能性的解释: 一种可能是神经成像方法更灵敏, 在行为测量先验影响的同时, 还测量了相关但不同的大脑过程差异(如更新或注意力转移过程); 还有一种可能是ASD利用替代策略来弥补减少的先前

影响, ASD与TD行为表现是相似的, 但是神经成像测量却揭示了其潜在的补偿机制^[38]。由此看来, 行为与神经成像未来还需要大量的研究去分离这个过程, 探究脑成像所代表的意义。

总之, 贝叶斯预测理论能帮助我们更好地理解ASD个体感知觉非典型性, 并且也有一些实证研究的证据支持它。贝叶斯理论试图用同样的机制来解释自闭症谱系障碍的所有症状, 从低水平的感觉敏感性到高水平的社交缺陷。从本篇综述来看, 实证研究结果的不一致, 说明可能这个框架并不适用于ASD的所有非典型表现。但是, 未能支持这一解释的研究也很重要, 这意味着需要更多的研究来了解在什么情况下, 贝叶斯预测模型可能适用于自闭症的感知预测。当然目前的研究也存在一些局限, 少有研究利用理论驱动, 更有研究进行理论模型间(贝叶斯和非贝叶斯, 或是贝叶斯框架下)的对比, 这样虽说能更好地解释研究现有的数据, 但是不同的理论模型差异很大, 很难比较研究间的发现, 也难以理解模型选择的准确性。自上而下的先验很难剥离, 先验类型太多(如社会性的先验、线索关联的先验、学习概率的先验等), 加之先验本身的复杂抽象, 这就可能涉及不同的机制, 或是产生于不同的认知层级, 目前的研究也并未明确大脑的先验层次结构。大多数研究以贝叶斯理论对现有的研究结果进行解释, 并少有涉及相关的计算模型, 这样使得解释更加模糊抽象且可重复性低。

未来需要大量的研究将不同的非贝叶斯模型与贝叶斯模型进行比较, 或者进行贝叶斯模型间的比较, 当然已有少数做这方面的研究^[20], 也有这样的研究趋势^[63], 这有利于理论的建设研究的推进。同样重要的是, 可以适当地增加贝叶斯预测编码的计算模型来分析研究结果, 增加模型估计的可靠性。目前研究行为学的偏多, 虽然贝叶斯假说引发了发人深省的争论, 但其中的神经关联知之甚少, 也并没有确定预测过程, 预测障碍的相关神经机制, 未来可以适当增加神经影像学的研究, 进一步来探索自闭症中非典型预测加工的局限性, 结合起来揭示ASD大脑内在的活动过程。贝叶斯预测理论需要更新和改进以解释这些问题。

参考文献

- 1 Horlin C, Black M, Falkmer M, et al. Proficiency of individuals with autism spectrum disorder at disembedding figures: A systematic review. *Dev Neurorehabil*, 2016, 19: 54-63

- 2 Shah A, Frith U. An islet of ability in autistic children: A research note. *Child Psychol Psychiatry*, 1983, 24: 613–620
- 3 Nuske H J, Bavin E L. Narrative comprehension in 4–7-year-old children with autism: Testing the Weak Central Coherence account. *Int J Lang Commun Disord*, 2010, 100824014249025
- 4 Happé F. Autism: Cognitive deficit or cognitive style? *Trends Cogn Sci*, 1999, 3: 216–222
- 5 Mottron L, Dawson M, Soulières I, et al. Enhanced perceptual functioning in autism: An update, and eight principles of autistic perception. *J Autism Dev Disord*, 2006, 36: 27–43
- 6 Happé F, Frith U. The weak coherence account: Detail-focused cognitive style in autism spectrum disorders. *J Autism Dev Disord*, 2006, 36: 5–25
- 7 Hill E L. Executive dysfunction in autism. *Trends Cogn Sci*, 2004, 8: 26–32
- 8 Pellicano E, Burr D. When the world becomes ‘too real’: A Bayesian explanation of autistic perception. *Trends Cogn Sci*, 2012, 16: 504–510
- 9 Friston K. Learning and inference in the brain. *Neural Networks*, 2003, 16: 1325–1352
- 10 Gregory R L. Perceptions as hypotheses. *Phil Trans R Soc Lond B*, 1980, 290: 181–197
- 11 Friston K. A theory of cortical responses. *Phil Trans R Soc B*, 2005, 360: 815–836
- 12 Rao R P N, Ballard D H. Predictive coding in the visual cortex: A functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nat Neurosci*, 1999, 2: 79–87
- 13 Friston K. Hierarchical models in the brain. *PLoS Comput Biol*, 2008, 4: e1000211
- 14 Haker H, Schneebeli M, Stephan K E. Can bayesian theories of autism spectrum disorder help improve clinical practice? *Front Psychiatry*, 2016, doi: 10.3389/fpsy.2016.00107
- 15 Mathys C. A Bayesian foundation for individual learning under uncertainty. *Front Hum Neurosci*, 2011, 5: 39
- 16 Van de Cruys S, Evers K, Van der Hallen R, et al. Precise minds in uncertain worlds: Predictive coding in autism. *Psychol Rev*, 2014, 121: 649–675
- 17 Lawson R P, Rees G, Friston K J. An aberrant precision account of autism. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8: 1
- 18 Mitchell P, Ropar D. Visuo-spatial abilities in autism: A review. *Inf Child Dev*, 2004, 13: 185–198
- 19 Brock J. Alternative Bayesian accounts of autistic perception: Comment on Pellicano and Burr. *Trends Cogn Sci*, 2012, 16: 573–574
- 20 Skewes J C, Jegindø E M, Gebauer L. Perceptual inference and autistic traits. *Autism*, 2015, 19: 301–307
- 21 Kohn A. Visual adaptation: Physiology, mechanisms, and functional benefits. *J NeuroPhysiol*, 2007, 97: 3155–3164
- 22 Croydon A, Karaminis T, Neil L, et al. The light-from-above prior is intact in autistic children. *J Exp Child Psychol*, 2017, 161: 113–125
- 23 Turi M, Burr D C, Igliozzi R, et al. Children with autism spectrum disorder show reduced adaptation to number. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2015, 112: 7868–7872
- 24 Goris J, Braem S, Nijhof A D, et al. Sensory prediction errors are less modulated by global context in autism spectrum disorder. *Biol Psychiatry-Cogn Neurosci NeuroImag*, 2018, 3: 667–674
- 25 Molesworth C, Chevallier C, Happé F, et al. Children with autism do not show sequence effects with auditory stimuli. *J Exp Psychol-Gen*, 2015, 144: 48–57
- 26 Cannon J, O’Brien A M, Bungert L, et al. Prediction in autism spectrum disorder: A systematic review of empirical evidence. *Autism Res*, 2021, 14: 604–630
- 27 Sinha P, Kjelgaard M M, Gandhi T K, et al. Autism as a disorder of prediction. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 15220–15225
- 28 Chambon V, Domenech P, Pacherie E, et al. What are they up to? The role of sensory evidence and prior knowledge in action understanding. *PLoS One*, 2011, 6: e17133
- 29 Grandin T. Visual abilities and sensory differences in a person with autism. *Biol Psychiatry*, 2009, 65: 15–16
- 30 Robic S, Sonié S, Fonlupt P, et al. Decision-making in a changing world: A study in autism spectrum disorders. *J Autism Dev Disord*, 2015, 45: 1603–1613
- 31 Manning C, Kilner J, Neil L, et al. Children on the autism spectrum update their behaviour in response to a volatile environment. *Dev Sci*, 2017, 20: 1–3
- 32 Sapey-Triomphe L A, Weilhhammer V A, Wagemans J. Associative learning under uncertainty in adults with autism: Intact learning of the cue-outcome contingency, but slower updating of priors. *Autism*, 2022, 26: 1216–1228
- 33 Sapey-Triomphe L A, Temmerman J, Puts N A J, et al. Prediction learning in adults with autism and its molecular correlates. *Mol Autism*, 2021, 12: 64
- 34 Dichter G S, Felder J N, Bodfish J W. Autism is characterized by dorsal anterior cingulate hyperactivation during social target detection. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2009, 4: 215–226
- 35 Brock J, Brown C C, Boucher J, et al. The temporal binding deficit hypothesis of autism. *Dev Psychopathol*, 2002, 14: 209–224
- 36 Just M A. Cortical activation and synchronization during sentence comprehension in high-functioning autism: Evidence of underconnectivity. *Brain*, 2004, 127: 1811–1821
- 37 Brodski-Guerniero A, Naumer M J, Moliadze V, et al. Predictable information in neural signals during resting state is reduced in autism spectrum

- disorder. *Hum Brain Mapping*, 2018, 39: 3227–3240
- 38 Angeletos Chrysaitis N, Seriès P. 10 years of Bayesian theories of autism: A comprehensive review. *Neurosci Biobehav Rev*, 2023, 145: 105022
 - 39 Lord C, Brugha T S, Charman T, et al. Autism spectrum disorder. *Nat Rev Dis Primers*, 2020, 6: 1–23
 - 40 Lai M C, Lombardo M V, Baron-Cohen S. Autism. *Lancet*, 2014, 383: 896–910
 - 41 Ewbank M P, von dem Hagen E A H, Powell T E, et al. The effect of perceptual expectation on repetition suppression to faces is not modulated by variation in autistic traits. *Cortex*, 2016, 80: 51–60
 - 42 Pell P J, Mareschal I, Calder A J, et al. Intact priors for gaze direction in adults with high-functioning autism spectrum conditions. *Mol Autism*, 2016, 7: 25
 - 43 Chambon V, Farrer C, Pacherie E, et al. Reduced sensitivity to social priors during action prediction in adults with autism spectrum disorders. *Cognition*, 2017, 160: 17–26
 - 44 Amoroso L, Narzisi A, Pinzino M, et al. Contextual priors do not modulate action prediction in children with autism. *Proc R Soc B*, 2019, 286: 20191319
 - 45 Maurer C, Chambon V, Bourgeois-Gironde S, et al. The influence of prior reputation and reciprocity on dynamic trust-building in adults with and without autism spectrum disorder. *Cognition*, 2018, 172: 1–10
 - 46 Lin I F, Mochida T, Asada K, et al. Atypical delayed auditory feedback effect and Lombard effect on speech production in high-functioning adults with autism spectrum disorder. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 510
 - 47 van Laarhoven T, Stekelenburg J J, Eussen M L J M, et al. Electrophysiological alterations in motor-auditory predictive coding in autism spectrum disorder. *Autism Res*, 2019, 12: 589–599
 - 48 van Laarhoven T, Stekelenburg J J, Eussen M L, et al. Atypical visual-auditory predictive coding in autism spectrum disorder: Electrophysiological evidence from stimulus omissions. *Autism*, 2020, 24: 1849–1859
 - 49 Randeniya R, Mattingley J B, Garrido M I. Increased context adjustment is associated with auditory sensitivities but not with autistic traits. *Autism Res*, 2022, 15: 1457–1468
 - 50 Chouinard P A, Unwin K L, Landry O, et al. Susceptibility to optical illusions varies as a function of the autism-spectrum quotient but not in ways predicted by local–global biases. *J Autism Dev Disord*, 2016, 46: 2224–2239
 - 51 Van de Cruys S, Vanmarcke S, Van de Put I, et al. The use of prior knowledge for perceptual inference is preserved in ASD. *Clin Psychol Sci*, 2018, 6: 382–393
 - 52 Król M, Król M. 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 Res*, 2019, 12: 1386–1398
 - 53 Braukmann R, Ward E, Hessels R S, et al. Action prediction in 10-month-old infants at high and low familial risk for Autism Spectrum Disorder. *Res Autism Spectrum Disord*, 2018, 49: 34–46
 - 54 Greene R K, Zheng S, Kinard J L, et al. Social and nonsocial visual prediction errors in autism spectrum disorder. *Autism Res*, 2019, 12: 878–883
 - 55 Fournier K A, Hass C J, Naik S K, et al. Motor coordination in autism spectrum disorders: A synthesis and meta-analysis. *J Autism Dev Disord*, 2010, 40: 1227–1240
 - 56 Arthur T, Vine S, Brosnan M, et al. Exploring how material cues drive sensorimotor prediction across different levels of autistic-like traits. *Exp Brain Res*, 2019, 237: 2255–2267
 - 57 Arthur T, Vine S, Brosnan M, et al. Predictive sensorimotor control in autism. *Brain*, 2020, 143: 3151–3163
 - 58 Beker S, Foxe J J, Molholm S. Oscillatory entrainment mechanisms and anticipatory predictive processes in children with autism spectrum disorder. *J Neurophysiol*, 2021, 126: 1783–1798
 - 59 Sapey-Triomphe L A, Timmermans L, Wagemans J. Priors bias perceptual decisions in autism, but are less flexibly adjusted to the context. *Autism Res*, 2020, 14: 1134–1146
 - 60 Ewbank M P, Rhodes G, von dem Hagen E A H, et al. Repetition suppression in ventral visual cortex is diminished as a function of increasing autistic traits. *Cereb Cortex*, 2014, 25: 3381–3393
 - 61 Van de Cruys S, Lemmens L, Sapey-Triomphe L A, et al. Structural and contextual priors affect visual search in children with and without autism. *Autism Res*, 2021, 14: 1484–1495
 - 62 Westerfield M A, Zinni M, Vo K, et al. Tracking the sensory environment: An ERP study of probability and context updating in ASD. *J Autism Dev Disord*, 2015, 45: 600–611
 - 63 Sapey-Triomphe L A, Pattyn L, Weilhhammer V, et al. Neural correlates of hierarchical predictive processes in autistic adults. *Nat Commun*, 2023, 14: 3640

Summary for “贝叶斯框架下的自闭症感知觉异常”

Atypical sensory perception in autism from the perspective of Bayesian framework

Ke Cui^{1,2}, Fei Luo^{1,2} & Jinyan Wang^{1,2*}¹ CAS Key Laboratory of Mental Health, Institute of Psychology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;² Department of Psychology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China* Corresponding author, E-mail: wangjy@psych.ac.cn

Autism spectrum disorder (ASD) is a complex neurodevelopmental condition characterized by social impairments and restricted and repetitive behaviours and interests. Moreover, individuals with ASD often exhibit atypical perceptual features (i.e., hypersensitivity or hyposensitivity to stimuli). Previous perceptual models such as enhanced perceptual functioning (EPF) and weak central coherence (WCC) offer only partial explanations for differences between individuals with ASD and typically developing (TD) individuals. A novel approach to understanding these differences is the Bayesian framework, which conceptualizes perceptual processes through the lens of Bayesian computational modelling and predictive coding theory. This framework offers insight into how prediction errors (i.e., bottom-up sensory input) and priors (i.e., top-down cognitive processes) jointly influence perception in individuals with ASD in various ways.

In this paper, we conducted a comprehensive review of prominent Bayesian models of ASD and delved into the intricate explanations provided by these models for both social and nonsocial symptoms of ASD. To evaluate the validity of these models, we also scrutinized a wide range of empirical evidence derived from behavioural and neuroimaging studies. We identified several notable Bayesian models in the literature, two of the most prominent being the “hypo-prior hypothesis” and the “high, inflexible precision of prediction errors in autism theory” (HIPPEA). Empirical studies have examined these theories at different levels of cognitive processing, ranging from higher-level social cognitive functions to sensory perception across multiple modalities, with varying designs and methodological details. Overall, these studies have provided equivocal support for Bayesian theories. While some studies have suggested that individuals with ASD have a lower weighting of prior expectations than TD individuals, other studies have reported inconsistent or even contrasting findings. Similarly, some studies have reported that individuals with ASD exhibit a decreased ability to adapt prediction error signals to varying contexts, whereas other studies have suggested that the neural coding of prediction errors remains intact in ASD. Furthermore, in some studies, behavioural findings were at odds with neuroimaging findings. These mixed outcomes may be attributed to participant heterogeneity, different learning timescales in the task, different presentation probabilities of stimuli material, and variations in how priors were operationalized. In addition, few empirical studies have made comparisons between different Bayesian theories of ASD or between Bayesian theories and traditional perceptual models, and most previous studies have struggled to distinguish between different types of priors.

Although Bayesian theories of ASD are promising and may help us better understand atypical sensory perception in individuals with ASD, they face challenges on the empirical front. For example, there is a lack of comparisons between multiple theories within the same study, and there is a relative scarcity of current neuroscience research. At the theoretical level, following the proposal of the “hypo-priors” hypothesis in 2012, scholars have conducted further studies to develop the hypothesis and provide empirical validation. While the empirical findings have been heterogeneous, this hypothesis has the potential to enhance our comprehension of altered sensory perception in ASD individuals. Ongoing research endeavours will provide substantial empirical data, with ample opportunities to refine the hypothesis and investigatory approach. Subsequent research initiatives should include a comparative analysis of theoretical frameworks within Bayesian theories and expand the integration of neuroimaging studies. In summary, Bayesian theories have demonstrated practical utility and are supported by considerable evidence, thereby contributing to an enriched understanding of atypical sensory perception in individuals with ASD. Nevertheless, Bayesian theories remain an evolving concept, necessitating extensive future research to accommodate updates and refinements.

Bayesian model, prediction, autism spectrum disorders, hypo-priors, prediction errordoi: [10.1360/TB-2023-0939](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0939)