

贝叶斯推理的三重加工心智模型^{*}

谢云天^{1,2}, 史滋福¹

(1. 湖南师范大学心理学系, 认知与人类行为湖南省重点实验室, 长沙 410081;

2. 长沙师范学院应用心理学教研室, 长沙 410100)

摘 要:自二十世纪 60 年代 Edwards 首次用实验研究人类推理是否遵循贝叶斯规则以来, 国内外贝叶斯推理研究取得了长足的发展, 但也出现了一些困境: 对影响贝叶斯推理的客体因素和主体因素研究未成体系, 解释理论莫衷一是。未来的研究应该重新审视客体与主体的关系, 系统整合和多角度分析影响贝叶斯推理的因素, 尝试以三重加工心智模型解释人类贝叶斯推理行为, 并对以往的解释理论进行融合, 从而更好地揭示人类不确定性决策的本质。

关键词:贝叶斯推理; 客体因素; 主体因素; 三重加工心智模型

中图分类号:B842.5

文献标识码:A

文章编号:1003–5184(2021)03–0230–07

贝叶斯推理是推理者对先验知识和当前证据信息进行锚定、组合、调整, 对逆条件事件进行主观概率估计的过程(史滋福, 张庆林, 2009)。日常的、科学的推论大多源于不确定性的前提, 人们据此形成和修改信念并做出决定(Cruz, Baratgin, Oaksford, & Over, 2015), 这一过程在日常生活中普遍存在。自上世纪 60 年代 Edwards 首次用实验研究人类推理是否遵循贝叶斯规则以来, 关于推理的进化本质、认知能力在推理中的作用机制等方面的研究取得了长足的发展(Navarrete, Correia, Sirota, Juanchich, & Huepe, 2015)。但最新研究表明, 无论信念更新、验证性偏见, 还是动机推理等, 有关人类信念的形成是否遵循贝叶斯规则依然没有定论(Tappin & Gadsby, 2019)。

纵观以往, 为了揭示人们主观概率估计的认知加工过程及规律, 贝叶斯推理研究虽然从重推理问题轻推理者因素逐渐转向重视推理者因素和推理过程, 最后发展到将推理问题、推理者和推理过程整合的趋势(史滋福, 王香香, 陈姣, 张庆林, 2010), 但人们依然在探讨一系列问题: 其一, 贝叶斯推理的客体因素如何整合? 其二, 贝叶斯推理的主体因素如何整合? 其三, 贝叶斯推理的理论如何融合? 因此, 未来需要在过往研究的基础上深入思考这些问题, 并提出未来贝叶斯推理研究的新思路, 进而推动该领域研究取得实质性进展。

1 贝叶斯推理的影响因素

1.1 客体因素

在贝叶斯推理研究中, 推理问题情境、信息表征、任务中的关系复杂性等都属于客体因素。诸多研究发现, 它们会影响人们的推理成绩。

推理问题情境。对于贝叶斯推理研究经常选用的情境——经典乳癌问题, 近来研究者通过编制与经典乳癌问题同型但情境不同的推理材料(如中彩问题、研发部问题、肝炎问题等)来探测不同问题情境对人们推理成绩的影响(史滋福, 张庆林, 2011)。有趣的是, 在低基础比率的中彩问题中, 后验概率估计值先随击中率的增加而增加, 之后却随击中率的继续提高而显著降低, 被试表现出了“自击中率参照抑制”(唐源鸿, 史滋福, 2011)。还有研究发现, 与解决出租车问题相比, 人们在解决疾病问题时更容易高估任务中的后验概率(Stock, Fisk, & Montgomery, 2016)。

信息表征。大多数人不喜欢纯文本格式的推理问题(Reani, Davies, Peek, & Jay, 2018), 而更倾向于数字、视觉格式等表征形式的问题(Ottley et al., 2016)。比如, 使用图表可以进一步提高人们对定量信息的理解(Garcia – Retamero & Hoffrage, 2013)。即使同为图形表征, 不同的图形表征(如树图、韦恩图)也会导致不同的推理表现, 树图的方向性有助于人们更快地提取信息, 而韦恩图中清晰的

^{*} 基金项目: 国家社会科学基金教育学一般课题“青少年概率推理的发展特点及其机制研究: 基于‘三重加工心智’模型”(BBA160044)。

通讯作者: 史滋福, E-mail: shizf@hunnu.edu.cn。

嵌套集合有助于人们关注问题的最显著特征(Reani et al., 2018)。此外,人们在贝叶斯推理中会同时使用先验信息和可能性信息。其中,先验信息是指任何与实际测量结果无关的模型参数以及数据获取或处理的信息(Afonson et al., 2013),而可能性信息是指观察到的信息或新知觉到的信息(Vilares & Kording, 2011)。与先验信息的影响相比,可能性信息的影响更强。即使都属于可能性信息,基础比率、击中率、虚报率的作用也不尽不同。虽然基础比率受关注的程度没有击中率和虚报率高,但它仍是个体考虑的因素之一。人们在运用虚报率信息对所锚定的基础比率或击中率进行调整的时候,可能依据虚报率信息的“可得性启发”来进行调整,结果出现“直觉调整误差”偏向(史滋福,张庆林,2011)。

推理任务中信息的关系复杂性。因果关系会影响个体的信息加工和推理决策(Johnson & Tubau, 2013)。如果明晰因果关系信息,那么贝叶斯推理的准确性可以得到提升(史滋福,李波,龙超钥,2018;史滋福,李珍贵,李波,王诗宇,2019;Krynski & Tenenbaum, 2007)。不过,因果信息的影响并不稳定。在乳腺癌问题中,提供的因果信息能够有效地促进推理表现,而在中彩问题上给予的因果信息并不能很好地促进推理表现,表现出了“少即是多”效应(史滋福,龙超钥,谢贝,2017)。

综上,虽然已有对客体因素的研究取得了许多成果,但它们缺乏统一的研究思路,也未能建立一个完整的足以解释推理过程的心理模型。研究者大多站在各自的立场上,孤立地考察某个或某几个客体因素对贝叶斯推理成绩的影响,抑或以若干客体因素加主体因素的模式进行探究,不仅杂乱无章,而且导致不同研究结果之间的争论、分歧。

1.2 主体因素

对于贝叶斯推理来说,主体就是推理者。贝叶斯推理无法脱离推理者而单独存在,会受到推理者的影响。一方面,主体的任何一种过程性的共性心理,如加工深度、意识性成分、元监控成分,都有可能影响推理成绩(Yin et al., 2020);另一方面,主体会选择性地注意那些与自身特性相一致的信息,如个体信念、知识经验、个性特征、思维风格、情绪特质等(史滋福,王诗宇,李波,李珍贵,2020;史滋福,张庆林,2009)。

认知风格。研究发现,倾向于主动实验的学习风格者和倾向于抽象理解的学习风格者更能正确地

做出估计(史滋福,刘妹,周禹希,2012)。场依存型个体容易受到外部线索的影响,信息加工水平比较浅,而场独立性个体倾向于理性思考,在推理过程中注意力更集中,付出的心理努力更多(史滋福,廖紫祥,刘妹,2015)。此外,贝叶斯推理任务表现与一般认知能力没有正相关(Brase, 2007),计算能力在贝叶斯推理中发挥重要作用(Johnson & Tubau, 2015)。与低认知反思能力的个体相比,具有高认知反思能力的个体表现更好(Lesage, Navarrete, & De Neys, 2013)。被试在解决贝叶斯推理问题的时候倾向于采用一致的但非贝叶斯的策略,表现出基础比率忽视的现象(Cohen & Staub, 2015)。

情绪与信念。在经典乳腺癌问题中,个体在消极情绪状态下比在积极情绪状态下做出更高的概率估计;而在中彩问题中,个体在积极情绪状态下比在消极情绪状态下概率估计更高(史滋福,周禹希,刘妹,2012)。对于积极的重要事件,无论是否与己有关,推理结果都表现为显著的高估,而对于消极的重要事件,则表现得更加谨慎(杨莉,胡竹菁,2010)。影响启发式系统的个人信念影响着个体执行贝叶斯推理任务(Asakura & Inui, 2016)。当新的证据产生并且在这个过程中出现新的信念时,人们在给定时间点持有的信念会被修改(Barash, Brocas, Carrillo, & Kodaverdian, 2018),且倾向于考虑真实情境中对条件概率的信念(Cohen, Sidlowski, & Staub, 2017)。

可见,虽然越来越多的贝叶斯推理研究将人的因素纳入其中,试图将主体因素和客体因素结合起来考量,但许多研究犹如盲人摸象,只是选取了人的某个方面(比如认知风格、数学能力等),而没有把人当成完整的人,没有呈现一幅关于推理者的完整图景。而且,人是不断变化、发展着的人。在影响推理者解决贝叶斯推理问题的过程中,哪些因素相对稳定?哪些因素可以通过干预被改变?如果无法解释这些问题,则难以从整体的、系统的、动态的视野探讨推理者在贝叶斯推理过程中的地位及作用。

2 贝叶斯推理的理论

目前,有关贝叶斯推理解释理论的两大阵营分别是生态理性观和嵌套集合论(Brase & Hill, 2017)。前者突出进化论视野下对自然频数促进效应的分析处理,后者强调嵌套集合对贝叶斯推理作用的分析处理。一直以来,双方各执一词。例如,生态理性观认为视觉辅助的促进作用来源于形象性对被试表现产生的积极影响,但是,Širota, Kostovičová

和 Juanchich (2014) 通过实验发现视觉辅助的形象性并没有显著的促进效应,从而反驳了生态理性论,间接支持了嵌套集合论。

近年来,有研究者提出与生态理性论和嵌套集合论不同的因果贝叶斯框架 (Causal Bayesian Framework),并认为贝叶斯推理中个体的认知有三个过程:模型构建、参数赋值和进行贝叶斯推理 (Krynski & Tenenbaum, 2007)。如果模型架构已知,或给出的统计信息能够与模型架构清晰对应,或分配完所有给出的统计信息之后,没有其他待赋值的变量,则有助于个体进行贝叶斯推理。在因果贝叶斯框架中,研究者引入了因果信息这一因素,试图为假阳性的产生提供证据,并通过实验证明了这一操纵的有效性。随着研究的不断深入,因果信息的效应也引起了众多争议。如 McNair 和 Feeney (2014) 发现,尽管因果信息表现出一定的促进作用,但其正确率最高也不超过 25%,并未达到 Krynski 和 Tenenbaum (2007) 研究中的 40%。甚至有研究发现,因果信息似乎只能缩小被试答案与标准贝叶斯答案之间的差值,但并不能真正提升被试贝叶斯推理表现 (Hayes, Ngo, Hawkins, & Newell, 2018)。这些研究表明因果信息的作用不够稳健,值得进一步探讨 (史滋福, 李珍贵, 2019)。

此外,继 Tversky 和 Kahneman (1974) 提出不确定性判断下的启发式之后,近来,研究者开始重新关注启发式的作用 (Goodwin, 2015)。如有实验通过口语报告法来挖掘被试使用的启发式,并借助计算机模拟,发现在特定基础比率和似然比率的条件下,使用谬误启发式 (比如,前贝叶斯、代表性、证据) 也能做出正确选择 (Domurat, Kowalczyk, Idzikowska, Borzymowska, & Nowakprzygodzka, 2015)。也有研究者尝试使用无代表性内容的问题 (如经典乳腺癌问题中,证据信息为阳性比证据信息为咳嗽对患病这一结果更具代表性,所以使用咳嗽作为证据信息的贝叶斯推理问题则为无代表性内容的问题) 可以避免或减少个体在进行主观概率判断时采用代表性启发策略 (李章吕, 何向东, 2017; 史滋福等, 2020)。

综上,无论是生态理性观、嵌套集合论,还是因果贝叶斯框架、启发式,研究者均依据各自的实验证据,站在各自坚持的理论立场上理解和改进贝叶斯推理。虽然科学的过程需要理解相互竞争的观点,但其最终目标是融合 (Brase & Hill, 2015)。

3 未来研究展望

3.1 系统整合影响贝叶斯推理的客体因素

众所周知,系统论从整体出发来研究系统以及组成系统各要素之间的相互关系。要把贝叶斯推理的客体因素与主体因素有机结合起来,考察主体因素和客体因素对贝叶斯推理问题解决的共同影响。比如,虽然有研究发现数学能力与自然频数之间不存在交互效应 (Hill & Brase, 2012),但 Johnson 和 Tubau (2015) 发现,对于构造复杂的问题,只有在自然频数形式下,数学能力才造成差异,而概率形式下则不存在差异;而对于构造简单的问题,只有在概率形式下,数学能力高低组之间才存在显著差异。另外,有研究发现,数学能力与空间能力均对视觉辅助有调节作用,具体表现在,视觉辅助对于数学能力低,但是空间能力高的被试促进效应最为明显 (Garcia - Retamero, Galesic, & Gigerenzer, 2011)。Brase 和 Hill (2017) 考察了问题格式和个体差异对贝叶斯推理的影响。结果发现,空间能力与贝叶斯推理成绩总体显著相关。有图形呈现时,空间能力与推理成绩相关性最强;没有图形时,相关性最弱。对于不同空间能力如何与不同类型视觉显示的应用发生关系以及空间能力、计算能力和自然频数的影响之间存在何种关系,还需要得到进一步的探讨。此外,关于因果信息作用条件的研究显示,因果信息只对高数学能力的被试有促进效果 (McNair & Feeney, 2015),而且,批判性思维能力能够强化因果信息的作用 (史滋福等, 2018)。

尽管已有研究在客体因素和主体因素相结合的方面做出了一些探索,但缺乏系统的整合。因此,未来的贝叶斯推理研究不应该以某一个因素为中心,建立和另外一个因素的链接,而应该从系统论出发,既要整合贝叶斯推理的客体因素,也要整合贝叶斯推理的主体因素,不断促进主客融合。

3.2 多角度分析影响贝叶斯推理的主体因素

人是完整的、发展中的人。关于人类解决贝叶斯推理问题的能力,以往的结果不尽相同。个体差异问题被越来越多研究者关注。有研究表明,人们在贝叶斯推理任务中的表现不仅取决于任务的呈现方式,还取决于一般能力的个体差异 (Brase & Hill, 2017)。未来的研究应当深入探讨用以区分“良好”和“不良”贝叶斯推理的思维过程中个体差异的表现。

人类同时具备自主心智、算法心智以及反省心

智,个体流体智力的差异源主要是心智加工效率的个体差异,而思维倾向的差别反应的则是反省心智的个体差异(斯坦诺维奇,2015)。这三种心智构成了三重加工心智模型的主体(Stanovich, West, & Toplak, 2011)。决策策略的选择受到反省心智和自主心智的共同影响(黄琳妍,李虹,徐继红,2013)。扣带回皮层、后扣带回的初级反应区域体现了三重加工心智模型中自主心智的脑活动,而额叶眶回、纹状体、腹内侧前额叶等次级反应区域体现了反省心智的脑活动(周丽清,2016)。此外,斯坦诺维奇(2015)认为,被试在执行操作的过程中,这三种心智都必须以获取知识为前提,个体从记忆中提取并用以辅助决策判断和问题解决的规则、知识、程序以及策略,被称为心智程序。如果心智程序存在缺陷,就可能导致推理任务中出现错误(Stanovich, 2018)。Stanovich, Toplak 和 West (2008)对思维谬误进行了分类,包括认知吝啬、心智程序缺陷以及污化的心智程序等。此后,Chiesi 和 Primi (2014)检验了该分类模型,并认为心智程序在概率推理中的重要作用与年龄无关,只有当个体拥有规范规则所必需的知识时,认知能力才能提高被试的推理成绩。

人类是认知吝啬鬼,因为它们的基本倾向是默认低计算成本的处理机制(Stanovich, 2018)。其实,人们既需要直觉,也需要理性。在对贝叶斯问题解决的过程中,人们也常常通过直觉做出反应,而缺乏理性地思考,比如表现为忽视基础比率的现象。如果说直觉对应于三重加工心智模型中的自主心智,那么理性则对应于反省心智。尽管自主心智下的反应也可能是正确的,但认知吝啬鬼常常致使我们深陷不理性的泥潭,严重阻碍我们实现目标与理想(斯坦诺维奇,2015)。为此,未来的研究应该以整体观整全贝叶斯推理的主体因素,在主客融合的视野下探讨如何提高推理者的理性思维以及在这个过程中如何更好地解决贝叶斯推理问题。

3.3 尝试以三重加工心智模型解释人类贝叶斯推理表现

三重加工心智模型有助于研究者探讨人类思维过程中出现推理偏差的原因和发生机制。未来研究可以尝试采用该理论来重新解释贝叶斯推理表现。如在对自然频数的分析处理中,自主心智发挥了重要作用。它激发了人类在推理过程中进化了的规则系统。而对于理解嵌套集合论,集合嵌套关系改善了贝叶斯推理。通过算法心智的抽象化,反省心智

进行模拟,并对算法心智发出指令。因果关系框架则由于因果信息的给予不仅体现了自主心智的作用,也反映了反省心智的参与。而且,因果信息作用大小的差异性和反省心智中个体差异有关。因此,在促进和整合贝叶斯推理研究过程中,可以尝试采用三重加工心智模型来完成。

三重加工心智模型非常强调过程研究,非常突出模拟功能和在模拟过程中获取理性反应计算所需的心智程序。然而,以往的贝叶斯推理研究多数是从结果来反观过程,而较少从过程本身展开研究(史滋福等,2015)。虽然早期有研究使用了口语报告法和笔记报告法,此后部分研究也有使用(史滋福,张庆林,2009;史滋福,张庆林,2011;Hoffrage, Krauss, Martignon, & Gigerenzer, 2015),但并没有进一步推广。有研究者开始关注正确的贝叶斯推理可以通过达到规范性解决方案所需的心理步骤数量以及所提出的数据框架与提出问题的框架之间的兼容性来预测(Ayal & Beythmarom, 2014)。特定的认知能力如何与贝叶斯推理过程中的每个组成部分“步骤”相关联,同时注意指定每个阶段产生的错误类型,并通过做更多的工作以区分良好的推理和不良的推理(McNair, 2015)。

为了进一步探索过程,近来研究者开始用眼动仪研究被试推理过程中与注视兴趣相关的信息。Cohen 和 Staub (2015)研究发现,推理者对信息的注视时间可以反映对信息的重视程度和使用情况,确认了利用眼动信息推测被试推理过程的可能。同时,有关视觉辅助对贝叶斯推理促进效应的研究也表明,眼动信息与被试推理中使用信息具有一致性(Reani et al., 2018)。基于眼动信息可以反映被试推理过程的假设,史滋福等(2015)通过操纵基础比率水平,考察了不同认知风格被试在贝叶斯推理过程中的眼动信息。显然,眼动技术的应用深化了对贝叶斯推理过程的探究,有助于人们了解这一复杂的认知过程。

此外,脑成像技术的进步也推动了过程研究。在ERP技术的应用中,有研究发现在贝叶斯推理中不同操作下引发的惊讶与不同的ERP模式相关(Seer, Lange, Boos, Dengler, & Kopp, 2016);也有研究通过对不同先验概率与可能性条件下个体的ERP反应的探讨,发现P3a与先验确定程度(the degree of prior certainty)有关,而P3b与可能性确定程度(the degree of likelihood certainty)有关(Kopp et

al., 2016); 还有研究发现, 与高击中率任务相比, 低击中率任务引发的 N1 和 N300 更为显著 (Shi, Yin, Dong, Ma, & Li, 2019)。此外, 在功能性核磁共振技术的应用中, 有研究鉴别了前额叶皮层中两条并行的推理路径: 一条就当前行为策略的可靠性进行概率推理, 另一条就两三种可能策略的可靠性进行概率推理 (Donoso, Collins, & Koechlin, 2014)。

综上, 无论是口语报告法、眼动追踪法, 还是脑成像技术, 都凸显了贝叶斯推理过程研究的重要性和可行性。因此, 未来的研究应该更加细致地关注过程, 从而开发更多具体的过程导向模型 (Johnson & Tubau, 2015)。比如可以应用过程追踪法, 尤其是利用脑成像技术, 将不同心理现象从行为层面回归到大脑层面, 建立起概率推理与其它心理机制的联系 (比如, 在信息表征或物理操作上, 既可以探究长时记忆对推理的影响, 也可以考察短时记忆是否参与以及如何参与概率推理过程), 还可以融合促进因素、计算模型等方面的考量, 构建新的理论, 以清晰、完整地揭示贝叶斯推理的过程。此外, 可以尝试应用三重加工心智模型指导未来的贝叶斯推理研究, 从反省心智、算法心智以及自主心智各自的方向以及彼此交汇的方向建立模型, 并融合已有的贝叶斯推理理论, 进一步对贝叶斯推理研究的生态效度进行考量, 深入推动范式变革, 系统地、多元地、全面地考查贝叶斯推理这样一个人类复杂的认知加工过程。这不仅符合贝叶斯推理研究的发展方向, 也符合思维研究的大趋势。当然, 促进贝叶斯推理研究的出路可以有多种选择, 但或许采用三重加工心智模型对人类贝叶斯推理的行为表现进行解释, 不仅可以进一步指导未来研究, 还可以引发人们对概率推理问题的深层思考, 达到提升人类理性思维和决策质量的目的。

参考文献

- 黄琳妍, 李虹, 徐继红. (2013). 直觉性和分析性决策策略偏好的情境效应. *心理与行为研究*, 11(6), 739-745.
- 李章吕, 何向东. (2017). 贝叶斯推理的认知困境及其消解. *科学技术哲学研究*, 34(6), 13-18.
- 斯坦诺维奇. (2015). *超越智商: 为什么聪明人也会做蠢事* (张斌译). 北京: 机械工业出版社.
- 史滋福, 李波, 龙超钥. (2018). 明晰因果关系对贝叶斯推理的影响: 批判性思维能力与数学能力的作用. *教育研究与实验*, (1), 88-91.
- 史滋福, 李珍贵, 李波, 王诗宇. (2019). 因果信息和提示导语对大学生贝叶斯推理的影响. *心理科学*, 42(5), 1245-1250.
- 史滋福, 廖紫祥, 刘妹. (2015). 基础比率和认知风格对贝叶斯推理影响的眼动研究. *心理科学*, 38(5), 1045-1050.
- 史滋福, 刘妹, 周禹希. (2012). 大学生学习风格对贝叶斯推理成绩的影响. *教育研究与实验*, (1), 94-96.
- 史滋福, 龙超钥, 谢贝. (2017). 因果信息在贝叶斯推理中的作用: 问题情境的调节. *心理学探新*, 37(3), 204-207.
- 史滋福, 王诗宇, 李波, 李珍贵. (2020). 证据信息和自我关联对贝叶斯推理的影响: 基于等概率假设的视角. *心理科学*, 43(4), 984-989.
- 史滋福, 王香香, 陈姣, 张庆林. (2010). 贝叶斯推理研究的三个层次. *心理科学进展*, 18(2), 230-236.
- 史滋福, 张庆林. (2009). *贝叶斯推理的心理学研究*. 长春: 吉林大学出版社.
- 史滋福, 张庆林. (2011). “直觉调整误差”偏向对贝叶斯推理成绩的影响. *心理科学*, 34(4), 970-973.
- 史滋福, 周禹希, 刘妹. (2012). 问题类型和情绪状态对贝叶斯推理的影响. *心理科学*, 35(4), 988-992.
- 唐源鸿, 史滋福. (2011). 贝叶斯推理中的“自击中率参照抑制”. *心理科学*, 34(1), 220-224.
- 杨莉, 胡竹菁. (2010). 贝叶斯推理中的情感启发式. *心理学探新*, 30(3), 18-21.
- 周丽清. (2016). *成人期后形式思维的发展与机制* (博士学位论文). 华东师范大学, 上海.
- Afonso, J. C., Fullea, J., Griffin, W. L., Yang, Y., Jones, A. G., Connolly, J. A. D., et al. (2013). 3D multiobservable probabilistic inversion for the compositional and thermal structure of the lithosphere and upper mantle. I: A priori petrological information and geophysical observables. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(5), 2586-2617.
- Asakura, N., & Inui, T. (2016). A Bayesian framework for false belief reasoning in children: A rational integration of theory - theory and simulation theory. *Frontiers in Psychology*, 7, 2019.
- Ayal, S., & Beythmarom, R. (2014). The effects of mental steps and compatibility on Bayesian reasoning. *Judgment and Decision Making*, 9(3), 226-242.
- Barash, J., Brocas, I., Carrillo, J. D., & Kodaverdian, N. (2018). Heuristic to Bayesian: The evolution of reasoning from childhood to adulthood. *Journal of Economic Behavior and Organization*, (5), 1-18.
- Brase, G. L. (2007). The (In) flexibility of evolved frequency representations for statistical reasoning: Cognitive styles and brief prompts do not influence Bayesian inference. *Acta Psychologica Sinica*, 39(3), 398-405.
- Brase, G. L., & Hill, W. T. (2015). Good fences make for good neighbors but bad science: A review of what improves Bayesian

- reasoning and why. *Frontiers in Psychology*, 6, 340.
- Brase, G. L., & Hill, W. T. (2017). Adding up to good Bayesian reasoning: Problem format manipulations and individual skill differences. *Journal of Experimental Psychology General*, 146(4), 577 – 591.
- Chiesi, F., & Primi, C. (2014). The interplay among knowledge, cognitive abilities and thinking styles in probabilistic reasoning: A test of a model. In E. Chernoff & B. Sriraman (Eds.), *Probabilistic thinking* (pp. 195 – 214). Berlin, Germany: Springer.
- Cohen, A. L., Sidlowski, S., & Staub, A. (2017). Beliefs and Bayesian reasoning. *Psychonomic Bulletin and Review*, 24, 972 – 978.
- Cohen, A. L., & Staub, A. (2015). Within – subject consistency and between – subject variability in Bayesian reasoning strategies. *Cognitive Psychology*, 81, 26 – 47.
- Cruz, N., Baratgin, J., Oaksford, M., & Over, D. E. (2015). Bayesian reasoning with ifs and ands and ors. *Frontiers in Psychology*, 6, 192.
- Domurat, A., Kowalczyk, O., Idzikowska, K., Borzymowska, Z., & Nowakprzygodzka, M. (2015). Bayesian probability estimates are not necessary to make choices satisfying Bayes' rule in elementary situations. *Frontiers in Psychology*, 6, 1194.
- Donoso, M., Collins, A. G., & Koehlin, E. (2014). Foundations of human reasoning in the prefrontal cortex. *Science*, 344, 1481 – 1486.
- Garcia – Retamero, R., Galesic, M., & Gigerenzer, G. (2011). Improving comprehension and communication of risks about health. *Psicothema*, 23(4), 599 – 605.
- Garcia – Retamero, R., & Hoffrage, U. (2013). Visual representation of statistical information improves diagnostic inferences in doctors and their patients. *Social Science and Medicine*, 83(1), 27 – 33.
- Goodwin, P. (2015). When simple alternatives to Bayes formula work well: Reducing the cognitive load when updating probability forecasts. *Journal of Business Research*, 68(8), 1686 – 1691.
- Hayes, B. K., Ngo, J., Hawkins, G. E., & Newell, B. R. (2018). Causal explanation improves judgment under uncertainty, but rarely in a Bayesian way. *Memory and Cognition*, 46, 112 – 131.
- Hill, W. T., & Brase, G. L. (2012). When and for whom do frequencies facilitate performance? On the role of numerical literacy. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65(12), 2343 – 2368.
- Hoffrage, U., Krauss, S., Martignon, L., & Gigerenzer, G. (2015). Natural frequencies improve Bayesian reasoning in simple and complex inference tasks. *Frontiers in Psychology*, 6, 1473.
- Johnson, E. D., & Tubau, E. (2015). Comprehension and computation in Bayesian problem solving. *Frontiers in Psychology*, 6, 938.
- Kopp, B., Seer, C., Lange, F., Kluytmans, A., Kolossa, A., Fingscheidt, T., et al. (2016). P300 amplitude variations, prior probabilities, and likelihoods: A Bayesian ERP study. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 16(5), 911 – 928.
- Krynski, T. R., & Tenenbaum, J. B. (2007). The role of causality in judgment under uncertainty. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(3), 430 – 450.
- Lesage, E., Navarrete, G., & De Neys, W. (2013). Evolutionary modules and Bayesian facilitation: The role of general cognitive resources. *Thinking and Reasoning*, 19(1), 27 – 53.
- McNair, S. J. (2015). Beyond the status – quo: Research on Bayesian reasoning must develop in both theory and method. *Frontiers in Psychology*, 6, 97.
- McNair, S. J., & Feeney, A. (2014). When does information about causal structure improve statistical reasoning? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(4), 625 – 645.
- McNair, S. J., & Feeney, A. (2015). Whose statistical reasoning is facilitated by a causal structure intervention. *Psychonomic Bulletin and Review*, 22(1), 258 – 264.
- Navarrete, G., Correia, R., Sirota, M., Juanchich, M., & Huepe, D. (2015). Doctor, what does my positive test mean from Bayesian textbook tasks to personalized risk communication. *Frontiers in Psychology*, 6, 1327.
- Ottley, A., Peck, E., Harrison, L., Afergan, D., Ziemkiewicz, C., Taylor, H., et al. (2016). Improving Bayesian reasoning the effects of phrasing, visualization, and spatial ability. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 22(1), 529 – 538.
- Reani, M., Davies, A., Peek, N., & Jay, C. (2018). How do people use information presentation to make decisions in Bayesian reasoning tasks? *International Journal of Human – Computer Studies*, 111, 62 – 77.
- Seer, C., Lange, F., Boos, M., Dengler, R., & Kopp, B. (2016). Prior probabilities modulate cortical surprise responses: A study of event – related potentials. *Brain and Cognition*, 106, 78 – 89.
- Shi, Z. F., Yin, L., Dong, J., Ma, X., & Li, B. (2019). Effect of probability information on Bayesian reasoning: A study of event – related potentials. *Frontiers in Psychology*, 10, 1106.
- Sirota, M., Kostovičová, L., & Juanchich, M. (2014). The effect of iconicity of visual displays on statistical reasoning: Evidence in favor of the null hypothesis. *Psychonomic Bulletin*

- and Review*, 21(4), 961 – 968.
- Stanovich, K. E. (2018). Miserliness in human cognition: The interaction of detection, override, and mindware. *Thinking and Reasoning*, 24(4), 423 – 444.
- Stanoich, K. E., Toplak, M. E., & West, R. F. (2008). The development of rational thought: A taxonomy of heuristics and biases. *Advances in Child Development and Behavior*, 36, 251 – 285.
- Stanovich, K. E., West, R. F., & Toplak, M. E. (2011). The complexity of developmental predictions from dual process models. *Developmental Review*, 31, 103 – 118.
- Stock, R., Fisk, J. E., & Montgomery, C. (2016). Measures of Bayesian reasoning performance on ‘normal’ and ‘natural’ frequency tasks. *The Journal of General Psychology*, 143(3), 185 – 214.
- Tappin, B. M., & Gadsby, S. (2019). Biased belief in the Bayesian brain: A deeper look at the evidence. *Consciousness and Cognition*, 68, 107 – 114.
- Tversky, A., & Kahneman, D. J. (1974). Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. *Science*, 185, 1124 – 1131.
- Vilares, I., & Kording, K. (2011). Bayesian models: The structure of the world, uncertainty, behavior, and the brain. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1224(1), 22 – 39.
- Yin, L., Shi, Z., Liao, Z., Tang, T., Xie, Y., & Peng, S. (2020). The effects of working memory and probability format on Bayesian reasoning. *Frontiers in Psychology*, 11, 863.

Tripartite Model of Mind on Bayesian Reasoning

Xie Yuntian^{1,2}, Shi Zifu¹

(1. Department of Psychology, Hunan Normal University, Cognition and Human Behavior Key Laboratory of Hunan Province, Changsha 410081; 2. Department of Applied Psychology, Changsha Normal University, Changsha 410100)

Abstract: Since Edwards first used experiments to study whether human reasoning followed Bayesian rules in the 1960s, research on Bayesian reasoning has made great progress at home and abroad. However, there are some dilemmas. For example, there is no systematic research on the object factors and the subject factors that affect Bayesian reasoning, and there is no agreement on the interpretation theory. In order to better reveal the nature of human’s uncertain decision making, future research should re-examine the relationship between object factors and subject factors, analysis the influential factors from multiple perspectives, try to explain human Bayesian reasoning in terms of Tripartite Model of Mind, integrate explanatory theories.

Key words: Bayesian reasoning; object factors; subject factors; Tripartite Model of Mind