

《心理科学进展》审稿意见与作者回应

题目：身体还是认知努力的损害？抑郁症努力奖赏动机评估及计算模型应用

作者：温秀娟；马毓璟；谭斯祺；李芸；刘文华

第一轮

审稿人 1 意见：

本文关注抑郁症的动机损害问题，提出有必要从努力类型（身体努力或认知努力）的角度深化理解，同时运用计算模型方法开展精细量化研究的倡议。作者选题具有很好的理论意义和实践价值，但论文写作还存在不少问题，有必要对一些关键问题进一步澄清和梳理。

意见 1：“努力类型”的研究现状如何？这个视角的独特性、必要性和重要性如何？特别是相比其他可能的“竞争”视角。

回应：非常感谢您的问题和帮助我们梳理“努力类型”这一视角的研究价值。

我们已对该问题进行了修订，在小结中新增内容对比了常见的几种研究视角，如奖励期待、消费和学习，强调通过决策努力这一角度研究抑郁症动机损害更偏重对奖赏处理整体过程（而不是分阶段）进行探索；小结中也新增内容强调采用计算模型方法探索该领域问题具有优势和应用价值。

具体修订内容见如下，同时可见正文“6 小结第二段和第三段标红文字”。

“在研究抑郁症快感缺失症状时，既往研究常从奖励期待、消费和学习等奖赏加工的角度去理解抑郁症患者的动机损害行为(Berridge & Robinson, 2003)。然而，Treadway 和 Zald 认为，要充分地理解抑郁症快感缺失潜在的神经生理基础，仅仅关注奖励期待或消费等某一个阶段的奖赏加工过程是不足的，研究需要去关注个体在奖赏加工过程中长时间内连续的行为反应(Treadway & Zald, 2011)；同时，Treadway 和 Zald 进一步指出，无论是期待性还是消费性快感缺失，都可能会导致个体出现决策损害，使得个体高估未来的成本，低估预期收益，或者根本无法整合成本和收益的信息，导致奖赏加工过程中选择行为的异常。从这一角度讲，抑郁症快感缺失现象也可以被视为“努力奖赏决策”过程受损的结果(Treadway & Zald, 2011)。探索抑郁症身体和认知努力特征的研究均基于这一理论框架下进行，这一视角与传统视角不同之处在于更关注奖赏加工的整体过程。至于这两种努力类型在抑郁症患者中是否存在着共

同或者不同的神经生理基础，由于当前研究较少(Tran et al., 2021; Vinckier et al., 2022)，尚不足以得出确定结论。

采用计算模型方法探索个体的努力奖赏动机行为具有重要价值。计算模型方法采用灵活的模型参数，用于关联奖赏有关的认知活动，既能考查一些传统研究常常关注的测量指标如奖励敏感性、价值评估和学习(Chong et al., 2017; Clairis & Pessiglione, 2024)等，也能考查一些传统研究较少关注、然而对个体动机活动也有影响的因素，比如疲劳(Matthews et al., 2023; Müller et al., 2021)，这能极大地丰富和拓展奖赏动机相关的研究领域。同时，采用这种方法与神经影像学、电生理和非侵入脑刺激技术相结合探索临床患者的大脑活动，不仅能帮助理解抑郁症核心症状快感缺失的神经生理基础，对于理解一些相关心理病理学的特征，如认知障碍和精神迟滞，这类极易导致动机损害行为的特征是否存在着不同的神经生理损害模式也是有帮助的(Horne et al., 2021)。”

意见 2： 努力类型划分为身体努力和认知努力的依据是什么？是否完备？

回应： 非常感谢您的问题。对这一问题我们已进行了如下修订：

(1) 对于奖励任务中个体需付出的努力，过往大部分研究是非常直观地、依据努力产生的来源，比如是来自于躯体层面的还是精神认知层面的努力，将其划分为身体努力和认知努力(Steele, 2020)，本文稿所引用文献均基于这种划分。我们对原稿中这种努力划分的文字进一步进行了语言表达上的修订，力求语意清晰。

(2) 另一种方法是将努力划分为主观和客观努力两种类型，经查阅当前共有 9 篇来自不同研究领域的文献采用这种划分标准(Apascaritei et al., 2021; Décombe et al., 2022; Dreisbach & Jurczyk, 2022; Kreis et al., 2020; Picou et al., 2017; Rewitz et al., 2023; M. M. Robinson & Morsella, 2014; Von Helversen et al., 2008; Yeo & Neal, 2008)。由于这种划分方法使用者较少，未在研究界形成一种主流，我们原稿中并未提及这一标准。在修改稿中，我们已补充说明了这种分类标准，以减少读者因缺少对比性的划分标准信息而产生疑问。

(3) 原稿中引用的抑郁症身体努力和认知努力相关研究的参考文献不多，可能会令人产生一种划分依据不完备的印象。修改稿进一步补充了 23 篇主要来自于正常人群的身体努力和认知努力的计算模型研究文献。已增加的更多的文献引用能够帮助说明将努力划分为认知和身体努力两种类型是一种业内较主流的分类标准。新增 23 篇计算模型相关研究内容见对“问题 4”的回应，此处省略掉这些研究的具体介绍。

修订内容见如下（标红文字为修订后增加的文字），同时见正文“1 抑郁症“身体努力”和“认知努力”的实验测量方法”。

“既往实验室评估个体基于努力获得奖励的研究中，大多数研究根据努力产生的来源，比如是来自于躯体层面的还是精神认知层面的努力，将其划分为“身体努力”和“认知努力”两种测量方法(Steele, 2020)。另外，有少量研究将努力划分为主观和客观努力两种类型(Kurzman et al., 2013; Rewitz et al., 2023)，由于这种方法较少被运用，为简略起见本文省略对这种分型的介绍。”

9 篇来自不同研究领域采用“主观和客观努力”这种划分标准文献如下：

- Apascaritei, P., Demel, S., & Radl, J. (2021). The Difference Between Saying and Doing: Comparing Subjective and Objective Measures of Effort Among Fifth Graders. *American Behavioral Scientist*, 65(11), 1457–1479. <https://doi.org/10.1177/0002764221996772>
- Décombe, A., Brinkmann, K., Merenciano, M., Capdevielle, D., Gendolla, G. H. E., & Raffard, S. (2022). Cognitive effort in Schizophrenia: Dissimilar effects on cardiovascular activity and subjective effort. *Current Psychology*. <https://doi.org/10.1007/s12144-022-03145-4>
- Dreisbach, G., & Jurczyk, V. (2022). The role of objective and subjective effort costs in voluntary task choice. *Psychological Research*, 86(5), 1366–1381. <https://doi.org/10.1007/s00426-021-01587-2>
- Kreis, I., Moritz, S., & Pfuhl, G. (2020). Objective Versus Subjective Effort in Schizophrenia. *Frontiers in Psychology*, 11, 1469. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01469>
- Picou, E. M., Moore, T. M., & Ricketts, T. A. (2017). The Effects of Directional Processing on Objective and Subjective Listening Effort. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 60(1), 199–211. https://doi.org/10.1044/2016_JSLHR-H-15-0416
- Rewitz, K., Schindler, S., & Wolff, W. (2023). Examining the Alignment between Subjective Effort and Objective Force Production. <https://doi.org/10.31234/osf.io/vr2gn>
- Robinson, M. M., & Morsella, E. (2014). The subjective effort of everyday mental tasks: Attending, assessing, and choosing. *Motivation and Emotion*, 38(6), 832–843. <https://doi.org/10.1007/s11031-014-9441-2>
- Von Helversen, B., Gendolla, G. H. E., Winkelman, P., & Schmidt, R. E. (2008). Exploring the hardship of ease: Subjective and objective effort in the ease-of-processing paradigm. *Motivation and Emotion*, 32(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s11031-008-9080-6>
- Yeo, G., & Neal, A. (2008). Subjective cognitive effort: A model of states, traits, and time. *Journal of Applied Psychology*, 93(3), 617–631. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.93.3.617>

意见 3: 文章第 2 部分“计算模型研究方法”读起来是基础概念的表述，与本文主题的关系比较松散，篇幅也相对过长了。

回应: 非常感谢您的建议。我们已对该部分过长内容进行了简化和删除，以使得介绍更为简练清晰。具体修改见如下，同时可见正文“2 抑郁症动机损害的计算模型研究方法”。

(1) 简化“2.3 净价值与努力成本效益优化模型”部分内容如下：

(简化修改后内容)

效益价值与奖励值（即公式 3 中的 R ）成正比，同时与个体奖励敏感性（即自由参数 K_r ）相关。自由参数 K_r 越大，个体评估的效益价值会越高(Le Bouc et al., 2016; Vinckier et al., 2022)。在该模型中，表征个体努力敏感性的函数参数为自由参数 K_c ，其值越大，说明个体努力敏感性越高。疲劳状态对努力成本的影响权重由自由参数 K_f 进行表征，其值越大，个体疲劳敏感性更高(Le Bouc et al., 2016; Vinckier et al., 2022)。

(简化前内容，即原稿内容)

效益价值与奖励值（即公式 3 中的 R ）成正比，同时与个体奖励敏感性（即自由参数 K_r ）相关。其中，奖励值由研究者在实验前进行设定，指的是在实验中每个试次开始时给被试呈现的完成任务后可能给予的奖励信息（通常是不同金额的奖励数值）；个体奖励敏感性则代表奖励值对目标行为的影响权重。自由参数 K_r 越大，个体评估的效益价值会越高，这也说明个体更在意奖励值，即奖励敏感性更高(Le Bouc et al., 2016; Vinckier et al., 2022)。同时，根据该模型，个体付出的努力越多，可获得的奖励数值也越多，即效益价值也与个体愿意付出努力水平（即公式 3 中的 F_i ）成正比。

在该模型中，表征个体努力敏感性的函数参数为自由参数 K_c （其含义和作用与常规函数模型中表征个体努力敏感性的自由参数 k 一致，详情见 2.2 小节），其值越大，说明个体努力敏感性越高。

此外，疲劳状态对努力成本的影响权重，由自由参数 K_f 进行表征，代表个体的疲劳敏感性。自由参数 K_f 越大，即疲劳敏感性更高，个体评估的努力成本越高(Le Bouc et al., 2016; Vinckier et al., 2022)。在使用该模型的任务中，随着试次的增多（试次数对应公式 3 中的 T ），个体不断付出努力，其自身疲劳程度也随之增加。一般而言，当个体感知到疲劳程度越高时，越不愿意付出努力。

(2) 删除“2.2 常规函数模型”部分内容如下：

个体的主观价值需要通过函数运算得来，可通过两种方式进行求解：一是通过逻辑回归

函数（Logistic Regression Function）计算临界点（Indifference Point，见图 1A,B）求得，二是通过 Softmax 函数计算出特定参数（见公式 2）的方法而求得。如下对这两种求解主观价值的方法进行简略介绍，更详细的函数运算方法介绍见该篇文献(Pessiglione et al., 2018)。

Softmax 函数：
$$P(i) = \frac{e^{\beta \cdot SV(i)}}{e^{\beta} + e^{\beta \cdot SV(i)}}$$

公式 2

注：在公式 2 的 Softmax 函数中，i 代表选择“高努力高奖励”的选项，P(i) 代表选择“高努力高奖励”选项的概率，β 参数为自由参数，SV_(i) 为选择“高努力高奖励”选项的主观价值。

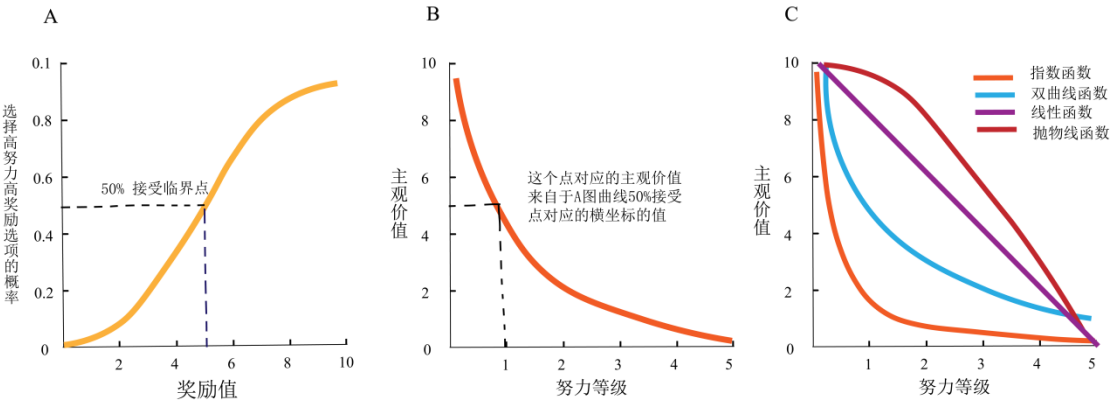


图 1 常用的函数模型。A.确定临界点。采用逻辑回归函数对在努力等级为 1 时的选择行为数据进行拟合，计算出 50%的接受临界点；B.努力折扣曲线。纵坐标的值（即主观价值）对应 A 图临界点下横坐标的提取值；C.常规函数模型的拟合曲线示意图。

计算个体主观价值的方法一是通过逻辑回归函数拟合个体选择行为数据，得到个体转变行为的临界点。通常采用个体选择接受行为的概率分布位于 50%的数值作为临界点，这一数值指的是个体在面对两种不同选择（如接受和拒绝）时，最有可能做出改变行为、倾向于选择接受行为时的转折点。这一临界点也被称为接受临界点（Acceptance Indifference Point，见图 1A, B），代表了在该努力等级上个体认为值得付出努力去获得奖励，从而愿意接受任务行为。同时，在该努力等级上，个体认为值得付出努力去获得的奖励值即为个体的主观价值变量（如图 1B 所示的临界点对应的 y 轴数值）。这种方法的示例性应用可参考 Westbrook 等人的研究(Westbrook et al., 2013, 2022)。

另外一种方法是通过 softmax 函数计算出特定参数。在使用 softmax 函数（见公式 2）计算个体主观价值的过程中，会根据价值最大化原则（value maximization principle）建立主观价值与个体选择行为之间的函数关系，评估个体在决策过程中，对实验设置的多种决策选

项中（如高低努力和高低奖励所形成的不同组合），倾向于选择哪一类选项并完成任务，由此产生参数 β 来表征对“高努力高奖励”选项的倾向性(Pessiglione et al., 2018)。参数 β 取值范围在 $[0, +\infty)$ ，其值越接近 0，说明被试对“高努力高奖励”选项的选择越具有随机性；其值越大，说明被试对“高努力高奖励选项”的选择越具有倾向性。这种方法的示例性应用可参考 Ang 等人的研究(Ang et al., 2022)。

在已知奖励值、努力等级和主观价值的基础上，将这些变量带入研究人员选定的函数模型中求得参数 k ，即努力敏感性，供进一步探讨个体的努力对目标行为的影响。研究人员在选定函数模型之前，通常会在一些常规模型（如线性模型、双曲线模型、抛物线模型和指数模型等）之间进行比较(Portet, 2020)，以帮助研究采纳最优的模型供数据分析使用。

（3）删除“2.3 净价值与努力成本效益优化模型”部分内容如下：

研究常使用极大似然估计方法来调整该模型中的自由参数，以使模型更符合实际观察的数据，该方法的示例性应用可进一步参考 Pessiglione 等人和 Vinckier 等人的研究(Pessiglione et al., 2018; Vinckier et al., 2022)。

（4）删除“2.4 漂移扩散模型”部分内容如下：

值得注意的是，研究也使用参数估计的方法来估计出两个自由参数 β_{eff} 和 β_{rew} ，该方法的示例性应用可进一步参考 Berwian 等人的研究(Berwian et al., 2020)。

意见 4：文章第 3 部分列举了一些新兴计算模型研究，但这些研究本身仅关注身体努力和认知努力的其中一个方面。本文提出的努力类型划分似乎还没有被学界接受？同时，这些文章比较新且比较少，这个方向是否有必要现阶段进行综述？

回应：非常感谢您的问题，并给予我们进一步澄清关键问题即努力类型划分的机会。我们进行了如下修订：

（1）在原稿中我们仅综述了计算模型方法在抑郁症人群身体努力和认知努力相关的研究，当前文章既少也新，我们非常同意您的观点，文献太少对于说明计算模型方法在该领域的应用性是不充分的。这个问题也被另一位评委专家指出，并建议我们补充来自正常人群样本的、采用计算模型方法探索“身体”“认知”努力的认知神经研究。我们在修改稿中已补充了 23 篇主要为 2017 年之后发表探索正常人群身体努力和认知努力的计算模型研究文献，相信这能丰富对该领域研究现状的认识，帮助解决原文稿中文献引用较少的问题。具体内容

见后附。

(2) 我们在文稿“5 当前研究存在的一些问题”中，增加了对“身体努力和认知努力”现存研究问题的讨论。的确如评委专家指出，大量研究仅测量身体努力和认知努力其中一个方面是不够的，未来研究应注重比较这两者的差异；同时，我们在“6 小结”中新增内容指出，当前对身体努力和认知努力的差异性比较研究较少，不足以得出确定结论；同时修订了“6 小结”原文内容中较武断的评论。具体内容见后附。

对于努力分型问题，我们补充解释一下：除本稿引用的对比个体身体努力和认知努力的差异性研究之外(Chong et al., 2017; Clairis & Pessiglione, 2024; Matthews et al., 2023; Tran et al., 2021; Vinckier et al., 2022)，也有一些来自其它领域研究身体努力和认知努力差异表现的研究(Atkins et al., 2020; Białaszek et al., 2017; Chong et al., 2018; Culbreth et al., 2023; Jiang & Zheng, 2023; Schmidt et al., 2012; van As et al., 2021; Wolff et al., 2023)。但由于这些研究超出本文稿主题范围，因此未加引用。另外，2021 年已有一篇国外综述文章专题介绍抑郁症身体努力和认知努力分型研究（已引用）(Horne et al., 2021)，虽然这篇综述并未探讨计算模型在本领域的应用，但是令我们产生紧迫意识应尽早在国内刊物上介绍这一领域进展。

结合上述前人的工作基础来看，过度讨论努力分型可能欠成熟，但是介绍最新进展用以启发未来研究是值得尝试的。我们期待着以这种抛砖引玉的方式，看到国内同行们产生更多突破性的成绩以及对我们工作的不足之处进行批评指正。

新增 19 篇计算模型方法探索个体身体努力和认知努力方面的认知神经研究内容见如下；同时可见正文“4.2 计算模型结合影像学技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究”。

“4.2 计算模型结合影像学等技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究

将计算模型和影像学等技术结合起来评估个体身体努力和认知努力相关的大脑活动主要见于正常人群样本的研究中。

一些研究运用了基于函数模型理论的计算模型方法探究正常人群身体和认知努力潜在的认知神经基础。Arulpragasam 等人(Arulpragasam et al., 2018)采用身体努力任务和 Westbrook 等人(Westbrook et al., 2019)采用认知努力任务，两项研究均发现腹内侧前额叶(ventromedial prefrontal cortex)参与整合努力成本的加工过程，编码了努力成本有关的主观价值。另一些研究探索了正常人群执行身体努力任务时的大脑活动，发现前扣带回、腹侧纹状体(ventral striatum)和背内侧前额叶(dorsal medial prefrontal cortex)等脑区也参与了努力相关的主观价值编码过程(Aridan et al., 2019; Bernacer et al., 2019a; Goh et al., 2021;

Hogan et al., 2019; Lockwood et al., 2022; Suzuki et al., 2021; Yao et al., 2023)。同时, 还有一项研究对比了正常人群在执行身体努力和认知努力两个任务时大脑相关的活动, 发现两个任务都激活了一些相同的脑区, 包括背内侧和背外侧前额叶皮层、顶叶内沟 (intraparietal sulcus) 和前脑岛 (anterior insula), 这些脑区活动与个体的奖励敏感性和努力敏感性有显著的联系; 同时研究发现, 杏仁核 (amygdala) 脑区活动仅仅与个体在认知努力任务中的奖励敏感性相关, 而与个体在身体努力任务中的奖励敏感性无关, 这表明杏仁核可能对认知奖励活动有独特的作用(Chong et al., 2017)。

一些研究运用了基于强化学习模型理论的计算模型方法探究正常人群身体努力和认知努力潜在的认知神经基础。Skvortsova 等人的研究采用了身体努力任务, 发现正常人群在执行任务时腹内侧前额叶和前脑岛的活动, 分别与个体的奖励预测误差和努力预测误差正相关 (Skvortsova et al., 2014)。Sayali 和 Badre 的研究采用认知努力任务, 发现正常人群的前额-顶叶网络参与了个体在执行任务时的努力预测误差编码过程(Sayali & Badre, 2021)。此外, 另一项最近发表研究同时采用了身体努力和认知努力两个任务, 发现正常人群在执行这两个任务时的大脑腹内侧前额叶和背内侧前额叶脑区表现出相似的激活模式(Clairis & Pessiglione, 2024)。

此外, 还有研究使用计算模型方法探讨疲劳状态是否影响正常人群身体努力行为及其潜在的神经基础。Hogan 等人(Hogan et al., 2020)采用了基于函数模型的计算模型方法, 发现正常人群的大脑运动皮层和躯体感觉皮层参与了个体在疲劳状态下对身体努力成本的估值过程(Hogan et al., 2020)。Müller 等人(Müller et al., 2021)采用基于强化学习结合函数模型理论的计算模型方法, 发现正常人群的大脑额中回和扣带回活动也与个体在疲劳状态下对身体努力成本的估值有显著的联系(Müller et al., 2021)。

近几年来出现了一些非常值得关注的研究。这些研究采用非侵入脑刺激技术 (如经颅磁刺激、经颅交流电刺激等) 干预个体的脑区活动, 同时采纳计算模型方法评估个体大脑活动改变对其身体努力和认知努力行为的影响。

其中, Soutschek 和 Tobler 采用经颅磁刺激技术 (transcranial magnetic stimulation) 和基于函数模型理论的计算模型方法, 研究正常人群执行一项认知努力任务时的大脑活动, 发现当个体的大脑背外侧前额叶活动受到经颅磁刺激抑制而减弱时, 个体的努力敏感性增强。同时, 该研究还发现个体的大脑背外侧前额叶活动与其疲劳状态相关, 随着背外侧前额叶活动的减弱, 个体在付出认知努力后的疲劳水平下降(Soutschek & Tobler, 2020)。同时, Soutschek 等人的另外一项研究采用经颅交流电刺激 (transcranial alternating current stimulation, tACS)

技术和基于贝叶斯漂移扩散模型的计算模型方法,研究正常人群执行一项认知努力任务时的大脑活动,发现在 θ 波 tACS 刺激背内侧前额叶脑区时,健康人群更偏向高奖励-高努力选项,这表明 θ 波 tACS 刺激背内侧前额叶脑区能够增强健康个体为了奖励而付出认知努力的意愿(Soutschek et al., 2022)。

另外, Bi 等人(Bi et al., 2024)采用经颅磁刺激技术、脑电技术和基于函数模型理论的计算模型方法,研究抑郁症患者执行一项身体努力任务时的大脑活动,发现患者的大脑左侧背外侧前额叶活动受经颅磁刺激激活而增强时,患者对努力的敏感性减弱;同时患者还表现出脑电 P300 波(与个体注意力分配有关)、关联性负变波(Contingent-negative Variation, CNV, 与个体运动准备有关)和 SPN 波(与个体对奖励的期待有关)的波幅增大,这可能表明抑郁症患者大脑左侧背外侧前额叶活动的增强能帮助患者提高自身对努力和奖励信息的注意力、为付出身体努力做出更充分的准备以及增强自身对高奖励结果的期待程度(Bi et al., 2024)。

由上可见,采用计算模型方法探索努力奖赏动机相关神经基础的研究主要集中在正常人群中,仅有少量研究探索了抑郁症患者异常的大脑活动(Bi et al., 2024)。由于计算模型方法能够采用灵活的模型参数去关联奖赏有关的认知过程,这种范式运用在临床抑郁症患者人群中,能帮助区分奖赏动机子成分相关的脑区活动,达成对动机损害这一抑郁症核心症状的神经基础更全面的认识。同时,非侵入脑刺激技术不仅是一种研究方法,也是临床上治疗抑郁症的重要干预手段。未来研究可以将非侵入脑刺激技术、神经影像学、电生理技术和计算模型方法相结合,探讨干预前后抑郁症患者的脑区活动变化,这对促进患者的临床治疗也具有作用。

表 2 计算模型结合影像学等技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究

作者(年)	样本	实验范式	努力类型	主要的模型指标	研究结果
Arulpragasam et al., 2018	正常人群31人	身体努力任务	身体努力	常规函数模型的主观价值、努力折扣参数	正常人群的腹内侧前额叶皮层参与了主观价值的编码过程,而背侧前扣带回和前岛叶的活动与努力折扣有关。
Westbrook et al., 2019	正常人群21人	N-back认知努力任务	认知努力	常规函数模型的努力成本主观价值、努力折扣参数	正常人群的腹内侧前额叶、纹状体等脑区参与了认知努力成本主观价值的编码过程。
Aridan et al., 2019	正常人群 46 人	简单的握力计任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的腹内侧前额叶、腹侧纹状体和感觉运动皮层等脑区活动与主观价值有关。

作者（年）	样本	实验范式	努力类型	主要的模型指标	研究结果
Bernacer et al., 2019a	正常人群24人	身体努力任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群大脑后扣带回的活动与主观价值相关。
Goh et al., 2021	正常人群20人	身体努力任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的大脑前扣带回参与了主观价值的编码过程。
Hogan et al., 2019	正常人群42人	评估奖励决策的握力计任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的腹内侧前额叶皮层活动与预期努力的主观价值有关。
Lockwood et al., 2022	正常人群41人	身体努力任务	身体努力	常规函数模型的努力折扣参数	正常人群前扣带回活动与努力折扣有关。
Suzuki et al., 2021	正常人群30人	评估奖励决策的握力计任务	身体努力	常规函数模型的努力折扣参数	正常人群大脑腹侧纹状体的活动与努力折扣有关。
Yao et al., 2023	正常人群30人	评估奖励决策的握力计任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的背内侧前额叶皮层参与了主观价值的编码过程。
Chong et al., 2017	正常人群38人	认知努力任务, 身体努力任务	身体努力和认知努力	常规函数模型的努力折扣参数	正常人群的大脑背内侧和背外侧前额叶、顶叶内沟和前脑岛活动与努力敏感性呈正相关, 与奖励敏感性呈负相关。
Skvortsova et al., 2014	正常人群20人	身体努力任务	身体努力	强化学习模型的预测误差参数	正常人群在执行任务时腹内侧前额叶和前脑岛的活动, 分别与个体的奖励预测误差和努力预测误差呈正相关。
Sayali & Badre, 2021	正常人群20人	认知努力任务	认知努力	强化学习模型的预测误差参数	前额-顶叶网络参与了正常个体在执行任务时的努力预测误差编码过程。
Clairis & Pessiglione, 2024	正常人群24人	身体努力任务和认知努力任务	身体努力和认知努力	强化学习模型的学习率参数	正常人群的腹内侧前额叶的活动与选项价值估计和选择信心有关, 而背内侧前额叶的活动与认知控制和努力行为的执行控制有关。
Hogan et al., 2020	正常人群30人	基于按键任务的努力奖励任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的大脑运动皮层和躯体感觉皮层的激活, 与个体在身体疲劳状态下对努力成本的主观价值增大相关。
Müller et al., 2021	正常人群39人	评估奖励决策的握力计任务	身体努力	结合函数理论的强化学习模型的主观价值参数	正常人群的大脑额中回和扣带回活动与个体在疲劳状态下对身体努力成本的估值有关。
Soutschek & Tobler, 2020	正常人群60人	N-back认知努力任务	认知努力	常规函数模型的努力折扣、主观价值参数	正常人群的大脑背外侧前额叶活动受到经颅磁刺激干预而减弱时, 个体的努力敏感性增强, 同时个体在付出认知努

作者（年）	样本	实验范式	努力类型	主要的模型指标	研究结果
					力后的疲劳水平下降。
Soutschek et al., 2022	正常人群35人	认知努力任务	认知努力	贝叶斯漂移扩散模型的边界阈值参数	在经0波经颅交流电刺激干预大脑背内侧前额叶的活动后，正常个体表现出增强的付出努力获得奖励的意愿。
Bi et al., 2024	抑郁症患者50人	基于按键任务的奖励任务	身体努力	常规函数模型的努力折扣参数	抑郁症患者大脑左侧背外侧前额叶的活动受经颅磁刺激术激活时，患者对努力的敏感性减弱；同时患者还表现出脑电P300、CNV和SPN波的波幅增大。

新增 4 篇计算模型应用性研究，同时见正文“3 计算模型在抑郁症“身体努力”和“认知努力”研究中的应用”。

值得注意的是，上述抑郁症努力奖赏决策的计算模型研究主要关注个体水平的参数，较少关注试次水平（trial-to-trial）的自由参数。但是，有一些基于正常人群样本的，采用强化学习模型方法分析个体进行奖赏活动时逐试次动机变化的研究，这些研究可以作为抑郁症努力奖赏领域未来研究拓展的方向。比如，两项研究采用强化学习模型方法，探索正常人群在执行身体努力任务中的表现，发现当预测误差为正时，个体的学习率会提高，当预测误差为负时，个体的学习率会降低(Jarvis et al., 2022)；同时，个体对奖励信息的学习速率比对努力信息的学习速率更快，这表明正常个体对奖励信息可能更敏感(Skvortsova et al., 2014)。此外，还有研究探索正常人群在执行认知努力任务时的表现，发现个体会通过调整预测误差和学习率来影响认知努力成本预期的更新速度，从而影响对认知努力信息的学习过程(Sayalı & Badre, 2021; Silva et al., 2023)。

在正文“5 当前研究存在的一些问题”中，新增加了对“身体努力和认知努力”现存研究问题的讨论内容，见如下：

“其次，在当前努力奖赏动机相关研究中，大多数研究只针对身体努力和认知努力其中一个方面进行探讨，仅少量研究同时测评个体的身体和认知努力状况(Chong et al., 2017; Clairis & Pessiglione, 2024; Matthews et al., 2023; Tran et al., 2021; Vinckier et al., 2022)。然而，个体不愿意付出身体和认知努力这两者可能相互作用，其影响可能贯穿在整个奖赏动机相关活动中。未来研究应考虑尽量在同一批被试样本中评估身体和认知这两类努力水平，并利用

计算模型方法的优势去量化测量实验中努力相关的变量,这将有利于区分评估不同类型的努力因素是否对疾病具有相似或者不同的影响。”

在正文“6 小结”中修订了较武断的文字表达,见如下:

(修订后内容)

“研究结果显示,相比健康人群,抑郁症患者表现出身体和认知努力两种类型的损害。”

(修订前内容)

“研究结果显示,相比健康人群,抑郁症患者表现出身体和认知努力两种类型的损害,其中,患者的身体努力损害表现更为普遍一些。”

一些来自于其他领域研究身体努力和认知努力差异表现的文献如下(未在本文稿中引用):

- Atkins, K. J., Andrews, S. C., Stout, J. C., & Chong, T. T.-J. (2020). Dissociable Motivational Deficits in Pre-manifest Huntington's Disease. *Cell Reports Medicine*, 1(9), 100152. <https://doi.org/10.1016/j.xcrm.2020.100152>
- Białaszek, W., Marcowski, P., & Ostaszewski, P. (2017). Physical and cognitive effort discounting across different reward magnitudes: Tests of discounting models. *PLOS ONE*, 12(7), e0182353. <https://doi.org/10/gbqc8t>
- Chong, T. T.-J., Apps, M. A. J., Giehl, K., Hall, S., Clifton, C. H., & Husain, M. (2018). Computational modelling reveals distinct patterns of cognitive and physical motivation in elite athletes. *Scientific Reports*, 8(1), 11888. <https://doi.org/10/gd3q4b>
- Culbreth, A. J., Dershwitz, S. D., Barch, D. M., & Moran, E. K. (2023). Associations Between Cognitive and Physical Effort-Based Decision Making in People With Schizophrenia and Healthy Control Subjects. *Biological Psychiatry: Cognitive Neuroscience and Neuroimaging*, 8(7), 695–702. <https://doi.org/10.1016/j.bpsc.2023.02.003>
- Jiang, H., & Zheng, Y. (2023). Dissociable neural after-effects of cognitive and physical effort expenditure during reward evaluation. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*. <https://doi.org/10.3758/s13415-023-01131-2>
- Schmidt, L., Lebreton, M., Cléry-Melin, M.-L., Daunizeau, J., & Pessiglione, M. (2012). Neural Mechanisms Underlying Motivation of Mental Versus Physical Effort. *PLoS Biology*, 10(2), e1001266. <https://doi.org/10/gj5ts4>
- van As, S., Beckers, D. G. J., Geurts, S. A. E., Kompier, M. A. J., Husain, M., & Veling, H. (2021). The Impact of Cognitive and Physical Effort Exertion on Physical Effort Decisions: A Pilot Experiment. *Frontiers in Psychology*, 12, 645037. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.645037>
- Wolff, W., Stähler, J., Schüler, J., & Bieleke, M. (2023). On the specifics of valuing effort: A developmental and a formalized perspective on preferences for cognitive and physical effort. <https://doi.org/10.31234/osf.io/ycvxxw>

意见 5: 文章第 4 部分似乎偏离了本文的计算模型主题。

回应: 非常感谢您指出我们的问题。我们对第 4 部分的小节主题和内容进行了调整,见如下:

(1) 在修订稿中,我们补充增加了一节与计算模型关联密切的内容,这使得第 4 部分

更符合本文的计算模型主题。增加内容可见上文“问题 4”回应部分，同时也可见正文“4.2 计算模型结合影像学等技术评估身体努力和认知努力的研究”。

(2) 原文稿中“4.1 认知行为研究”，这部分内容偏离了计算模型的主题内容，我们将其内容简化，并按照另一位评委专家意见将其移到正文“1.3 相关行为研究”处。

(3) 原文稿中“4.2 神经活动研究”与该节主题联系密切，原内容保留，但调整小节主题为“4.1 抑郁症“身体努力”和“认知努力”神经活动研究”。

意见 6: 现有研究的问题总结得比较泛泛，建议更聚焦针对本文主题展开，给出切实可行的未来工作方向。

回应: 非常感谢您的建议。我们已对该问题进行了修订。在原稿“5 当前研究存在的一些问题”中，增加内容探讨本文主题“身体努力”和“认知努力”现存问题以及未来可能的研究方向。

增加内容见如下，同时见正文“5 当前研究存在的一些问题”。

“其次，在当前努力奖赏动机相关研究中，大多数研究只针对身体努力和认知努力其中一个方面进行探讨，仅少量研究同时测评个体的身体和认知努力状况(Chong et al., 2017; Clairis & Pessiglione, 2024; Matthews et al., 2023; Tran et al., 2021; Vinckier et al., 2022)。然而，个体不愿意付出身体和认知努力这两者可能相互作用，其影响可能贯穿在整个奖赏动机相关活动中。未来研究应考虑尽量在同一批被试样本中评估身体和认知这两类努力水平，并利用计算模型方法的优势去量化测量实验中努力相关的变量，这将有利于区分评估不同类型的努力因素是否对疾病具有相似或者不同的影响。”

.....

审稿人 2 意见:

该文围绕抑郁症努力奖赏动机的评估，系统归纳了“身体努力”和“认知努力”的评估范式，并着重介绍了计算模型在该研究领域的应用。整体而言，研究选题有新意，论述条理清晰，文献收集较全面，也能提出一些自己的观点。具体修改意见和建议如下：

意见 1: 一般将”major depressive disorder”翻译为“抑郁症”即可，抑郁症本身有程度轻重之分，用“重症抑郁症”不妥。

回应: 非常感谢您的建议。文中一共出现了 4 次“重症抑郁症”，我们已在文中将其修改为“抑郁症”。

意见 2: 作者在 4.1 认知行为研究部分归纳了既往采用传统分析方法研究抑郁症“身体努力”和“认知努力”，这些研究得到的结论是抑郁症患者愿意付出身体努力或认知努力以获取奖励的意愿降低，这些研究发现和前文所述的基于计算模型所得到的结果一致，而采用计算模型的数据分析方法，更加复杂。这就带来一个问题，即采用计算模型的分析方法和传统分析方法相比，有哪些优势？

回应: 非常感谢您提出的问题。我们已修订该问题。在第 2 部分“2 抑郁症动机损害的计算模型研究方法”中，我们新增内容更详细地介绍了计算模型方法相较于传统分析方法的优势。

具体修订见如下内容，同时请见正文“2 抑郁症动机损害的计算模型研究方法”第一段标红的文字：

“这种方法对于理解奖励和动机等复杂的认知心理结构具有优势，近年来被逐步使用在抑郁症相关的研究中(Huys et al., 2021)。其优势表现在，首先，相比传统的实验数据分析方法通过计算反应时或者正确率的均值作为个体的行为测量指标，计算模型方法能以自由参数的形式权衡逐试次（trial-by-trial）的变化对于个体行为结果的影响(Adams et al., 2015)，同时也能够量化个体行为在试次间（trial-to-trial）的变化，动态地捕捉个体在执行任务期间的行为调整(Clairis & Pessiglione, 2024)；其次，计算模型方法能从更全面的角度理解个体行为特征(O. J. Robinson & Chase, 2017)。相比传统的实验分析方法只能单独分析某一维度数据指标（如反应时或者选择行为等），计算模型方法，比如漂移扩散模型能整合选择行为和反应时的数据，通过这种整合多维度的数据对个体行为特征达成更深认识(Ratcliff et al., 2016)。另外，将计算模型方法与神经活动测量技术相结合，能够促进理解个体行为变化的潜在认知神经基础(Husain & Roiser, 2018)。传统分析方法只能在个体水平上将神经生理指标与行为指标相关联，计算模型方法可以将表征个体不同认知过程的模型参数与神经生理指标在个体水平或个体内逐试次水平上进行关联，进而解释个体认知神经活动的动态变化。该方法的更多优势可以进一步查阅相关文献(Adams et al., 2015; Husain & Roiser, 2018; Huys et al., 2021)。”

意见 3: 建议作者明确写出传统分析方法中所采用的指标。另外，将 4.1 认知行为部分放在“认知神经研究”这一标题下，不妥。认知神经研究，还是专指基于神经影像技术开展的研究为好。“认知行为”研究可单独作为一部分放在介绍完实验范式之后。

回应: 非常感谢您的建议。根据您的建议，我们将原“4.1 认知行为研究”这部分内容单独作为一部分放在实验范式介绍之后，成为独立小节“1.3 相关行为研究”，这使得文稿结构更为清晰。同时，我们略简化这一部分的介绍，并在这部分内容中明确指出传统分析方法中

所采用的评估指标。

具体修订见如下，同时可见正文“1.3 相关行为研究”部分。

“1.3 相关行为研究

一些研究采用了身体努力任务，并以**个体选择“高奖励高努力”选项的概率作为测量指标**评估抑郁症（major depression disorder）患者付出身体努力获得奖励的行为表现。两项研究采用 EEfRT 任务，结果发现抑郁症患者比健康人群更不愿意付出身体努力去获得奖励 (Treadway et al., 2009; Yang et al., 2014)。Vinckier 等人采用简单的握力计任务也有类似的研究发现(Vinckier et al., 2022)。然而，采用其它身体努力范式（如努力-奖励图片任务、按键-渐进式任务等）的研究并没有发现抑郁症患者(Klawohn et al., 2022; Sherdell et al., 2012; Cléry-Melin et al., 2011)、康复期病人(Yang et al., 2014)以及抑郁症状程度较高的大学生(Bi et al., 2022)在付出身体努力的表现上与健康人群存在差异。

一些研究采用认知努力任务，并以**个体选择高努力认知活动的选择反应作为测量指标**评估抑郁症患者付出认知努力获得奖励的行为表现。Hershenberg 等人(Hershenberg et al., 2016)采用认知-渐进式任务和 Wood-Ross 等人(Wood-Ross et al., 2021)采用计算机认知任务，两项研究都发现健康人群乐意尝试认知难度高的任务，抑郁症患者更倾向选择认知难度较低的任务，这表明抑郁症患者付出认知努力获得奖励的意愿降低(Hammar et al., 2011; Wood-Ross et al., 2021)。然而，采用了其他认知努力任务的两项研究并未显示出类似结果(Barch et al., 2023; Hershenberg et al., 2016)。值得注意的是，常规的认知努力评估任务（如 N-back 任务，计算机认知任务）主要评估个体的记忆能力，而 Hammar 等人采用的任务评估个体的执行功能，Barch 等人采用的任务评估个体的反应能力，这些范式的差异对研究结果也可能产生影响。

此外，还有一些研究同时采用了身体和认知努力任务，探讨抑郁症患者付出努力获得奖励的意愿与疾病症状的关联(Tran et al., 2021; Vinckier et al., 2022)。研究显示，抑郁症患者的快感缺失症状严重程度越高，患者完成体力活动的动机就越低，但研究并未发现患者完成认知活动的动机与其快感缺失症状存在关联(Tran et al., 2021)。同时，相较于健康人群，抑郁症患者对身体努力的敏感性明显大于对认知努力的敏感性，这说明抑郁症患者更不愿意付出身体努力以获得奖励(Vinckier et al., 2022)。”

意见 4：作者所归纳的这些计算模型获得的自由参都是个体水平上的参数，如净价值与努力

成本效益优化模型中的 k_c ，漂移扩散模型中的 β_{eff} 等等，即每名被试只可以得到一个参数。未来结合计算模型和神经影像技术，也只能在组水平上做关联分析。建议作者关注 **trial-to-trial** 的自由参数。

回应：非常感谢您的建议。我们已对该问题进行了如下的修订：

1) 我们已在文中新增介绍了一些采用 **trial-to-trial** 自由参数的正常人群研究(Jarvis et al., 2022; Sayalı & Badre, 2021; Silva et al., 2023; Skvortsova et al., 2014)，希望能够为未来抑郁症努力奖赏决策研究进一步运用与 **trial-to-trial** 自由参数相关的模型（如强化学习模型）提供参考。

2) 此外，我们还在文中第 2 部分“2 抑郁症动机损害的计算模型研究方法”相应地补充介绍了强化学习模型，以帮助读者更好地理解常用的 **trial-to-trial** 自由参数。

补充介绍采用 **trial-to-trial** 自由参数的正常人群研究内容见如下；同时可见正文“3 计算模型在抑郁症“身体努力”和“认知努力”研究中的应用”标红的内容。

“值得注意的是，上述抑郁症努力奖赏决策的计算模型研究主要关注个体水平的参数，较少关注试次水平（**trial-to-trial**）的自由参数。但是，有一些基于正常人群样本的，采用强化学习模型方法分析个体进行奖赏活动时逐试次动机变化的研究，这些研究可以作为抑郁症努力奖赏领域未来研究拓展的方向。比如，两项研究采用强化学习模型方法，探索正常人群在执行身体努力任务中的表现，发现当预测误差为正时，个体的学习率会提高，当预测误差为负时，个体的学习率会降低(Jarvis et al., 2022)；同时，个体对奖励信息的学习速率比对努力信息的学习速率更快，这表明正常个体对奖励信息可能更敏感(Skvortsova et al., 2014)。此外，还有研究探索正常人群在执行认知努力任务时的表现，发现个体会通过调整预测误差和学习率来影响认知努力成本预期的更新速度，从而影响对认知努力信息的学习过程(Sayalı & Badre, 2021; Silva et al., 2023)。”

补充强化学习模型介绍见如下，同时可见正文“2.5 强化学习模型”部分。

“2.5 强化学习模型

相比前面介绍的模型关注个体水平的参数，强化学习模型考虑了个体试次间变异对于结果的影响，能更灵活地描述个体如何从过去的反馈中学习以及计划未来的行动。该模型主要包含预测误差（prediction error, PE）和学习率（learning rate）等重要的参数。预测误差反映了个体当前接收到的信息（如奖励或者努力程度的信息）是比预期的更好还是更差(Chen et

al., 2015)。学习率反映了个体利用预测误差更新价值函数时的调整幅度。

强化学习模型中最常用的方法是无模型的强化学习模型(Pike & Robinson, 2022)。其中，无模型的强化学习模型中最常使用的子模型是 Rescorla-Wagner 模型。该模型假定，大脑对当前试次的价值由前一个试次的价值与学习率和预测误差的乘积之和决定(如公式 5 所示)。其中，预测误差由上一个试次获得的奖励与期望奖励之间的差值决定(如公式 6 所示)。关于强化学习模型的更多介绍，可以参考 Sutton 和 Barto (Sutton & Barto, 2018)的介绍。

$$V_t = V_{t-1} + \alpha \cdot PE_{t-1} \quad \text{公式 5}$$

$$PE = R_{(t-1)} - V_{(t-1)} \quad \text{公式 6}$$

注：公式 5 中， V_t 表示的是当前试次的奖励， $t-1$ 指的是上一个试次； V_{t-1} 指的是上个试次的奖励， α 是学习率参数，PE 指的是预测误差。公式 6 中，PE 指的是预测误差， $R_{(t-1)}$ 表示上一个试次获得的奖励， $V_{(t-1)}$ 表示的是上一个试次预期获得的奖励。”

意见 5: 尽管作者没有发现结合计算模型和神经影像技术研究抑郁症患者“身体努力”或“认知努力”的研究，但目前已有对正常人的研究，建议补充这部分内容。此外，非侵入性脑刺激技术也已被应用于正常人的研究中，这些研究也能对“身体努力”或“认知努力”的神经基础带来一些提示，也可以考虑补充。

回应: 非常感谢您的建议。我们已根据您的建议，在正文“4 抑郁症“身体努力”和“认知努力”的认知神经研究”补充了结合计算模型和神经影像等技术探讨正常人身体和认知努力的神经机制研究，以及探究个体特定脑区活动对其身体和认知努力行为影响的非侵入性脑刺激相关研究，希望能够对未来抑郁症“身体努力”和“认知努力”的神经机制研究带来一些启发。

补充内容见如下，同时可见正文“4.2 计算模型结合影像学技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究”部分。

“4.2 计算模型结合影像学等技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究

将计算模型和影像学等技术结合起来评估个体身体努力和认知努力相关的大脑活动主要见于正常人群样本的研究中。

一些研究运用了基于函数模型理论的计算模型方法探究正常人群身体和认知努力潜在的认知神经基础。Arulpragasam 等人(Arulpragasam et al., 2018)采用身体努力任务和 Westbrook 等人(Westbrook et al., 2019)采用认知努力任务，两项研究均发现腹内侧前额叶

(ventromedial prefrontal cortex) 参与整合努力成本的加工过程, 编码了努力成本有关的主观价值。另一些研究探索了正常人群执行身体努力任务时的大脑活动, 发现前扣带回、腹侧纹状体 (ventral striatum) 和背内侧前额叶 (dorsal medial prefrontal cortex) 等脑区也参与了努力相关的主观价值编码过程(Aridan et al., 2019; Bernacer et al., 2019a; Goh et al., 2021; Hogan et al., 2019; Lockwood et al., 2022; Suzuki et al., 2021; Yao et al., 2023)。同时, 还有一项研究对比了正常人群在执行身体努力和认知努力两个任务时大脑相关的活动, 发现两个任务都激活了一些相同的脑区, 包括背内侧和背外侧前额叶皮层、顶叶内沟 (intraparietal sulcus) 和前脑岛 (anterior insula), 这些脑区活动与个体的奖励敏感性和努力敏感性有显著的联系; 同时研究发现, 杏仁核 (amygdala) 脑区活动仅仅与个体在认知努力任务中的奖励敏感性相关, 而与个体在身体努力任务中的奖励敏感性无关, 这表明杏仁核可能对认知奖励活动有独特的作用(Chong et al., 2017)。

一些研究运用了基于强化学习模型理论的计算模型方法探究正常人群身体努力和认知努力潜在的认知神经基础。Skvortsova 等人的研究采用了身体努力任务, 发现正常人群在执行任务时腹内侧前额叶和前脑岛的活动, 分别与个体的奖励预测误差和努力预测误差正相关(Skvortsova et al., 2014)。Sayalı 和 Badre 的研究采用认知努力任务, 发现正常人群的前额-顶叶网络参与了个体在执行任务时的努力预测误差编码过程(Sayalı & Badre, 2021)。此外, 另一项最近发表研究同时采用了身体努力和认知努力两个任务, 发现正常人群在执行这两个任务时的大脑腹内侧前额叶和背内侧前额叶脑区表现出相似的激活模式(Clairis & Pessiglione, 2024)。

此外, 还有研究使用计算模型方法探讨疲劳状态是否影响正常人群身体努力行为及其潜在的神经基础。Hogan 等人(Hogan et al., 2020)采用了基于函数模型的计算模型方法, 发现正常人群的大脑运动皮层和躯体感觉皮层参与了个体在疲劳状态下对身体努力成本的估值过程(Hogan et al., 2020)。Müller 等人(Müller et al., 2021)采用基于强化学习结合函数模型理论的计算模型方法, 发现正常人群的大脑额中回和扣带回活动也与个体在疲劳状态下对身体努力成本的估值有显著的联系(Müller et al., 2021)。

近几年来出现了一些非常值得关注的研究。这些研究采用非侵入脑刺激技术 (如经颅磁刺激、经颅交流电刺激等) 干预个体的脑区活动, 同时采纳计算模型方法评估个体大脑活动改变对其身体努力和认知努力行为的影响。

其中, Soutschek 和 Tobler 采用经颅磁刺激技术 (transcranial magnetic stimulation) 和基于函数模型理论的计算模型方法, 研究正常人群执行一项认知努力任务时的大脑活动, 发现

当个体的大脑背外侧前额叶活动受到经颅磁刺激抑制而减弱时，个体的努力敏感性增强。同时，该研究还发现个体的大脑背外侧前额叶活动与其疲劳状态相关，随着背外侧前额叶活动的减弱，个体在付出认知努力后的疲劳水平下降(Soutschek& Tobler, 2020)。同时，Soutschek等人的另外一项研究采用经颅交流电刺激（transcranial alternating current stimulation, tACS）技术和基于贝叶斯漂移扩散模型的计算模型方法，研究正常人群执行一项认知努力任务时的大脑活动，发现在 θ 波 tACS 刺激背内侧前额叶脑区时，健康人群更偏向高奖励-高努力选项，这表明 θ 波 tACS 刺激背内侧前额叶脑区能够增强健康个体为了奖励而付出认知努力的意愿(Soutschek et al., 2022)。

另外，Bi 等人(Bi et al., 2024)采用经颅磁刺激技术、脑电技术和基于函数模型理论的计算模型方法，研究抑郁症患者执行一项身体努力任务时的大脑活动，发现患者的大脑左侧背外侧前额叶活动受经颅磁刺激激活而增强时，患者对努力的敏感性减弱；同时患者还表现出脑电 P300 波（与个体注意力分配有关）、关联性负变波（Contingent-negative Variation, CNV，与个体运动准备有关）和 SPN 波（与个体对奖励的期待有关）的波幅增大，这可能表明抑郁症患者大脑左侧背外侧前额叶活动的增强能帮助患者提高自身对努力和奖励信息的注意力、为付出身体努力做出更充分的准备以及增强自身对高奖励结果的期待程度(Bi et al., 2024)。

由上可见，采用计算模型方法探索努力奖赏动机相关神经基础的研究主要集中在正常人群中，仅有少量研究探索了抑郁症患者异常的大脑活动(Bi et al., 2024)。由于计算模型方法能够采用灵活的模型参数去关联奖赏有关的认知过程，这种范式运用在临床抑郁症患者人群中，能帮助区分奖赏动机子成分相关的脑区活动，达成对动机损害这一抑郁症核心症状的神经基础更全面的认识。同时，非侵入脑刺激技术不仅是一种研究方法，也是临床上治疗抑郁症的重要干预手段。未来研究可以将非侵入脑刺激技术、神经影像学、电生理技术和计算模型方法相结合，探讨干预前后抑郁症患者的脑区活动变化，这对促进患者的临床治疗也具有作用。

表 2 计算模型结合影像学等技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究

作者（年）	样本	实验范式	努力类型	主要的模型指标	研究结果
Arulpragasam et al., 2018	正常人群31人	身体努力任务	身体努力	常规函数模型的主观价值、努力折扣参数	正常人群的腹内侧前额叶皮层参与了主观价值的编码过程，而背侧前扣带回和前岛叶的活动与努力折扣有关。

作者（年）	样本	实验范式	努力类型	主要的模型指标	研究结果
Westbrook et al., 2019	正常人群21人	N-back认知努力任务	认知努力	常规函数模型的努力成本主观价值、努力折扣参数	正常人群的腹内侧前额叶、纹状体等脑区参与了认知努力成本主观价值的编码过程。
Aridan et al., 2019	正常人群 46 人	简单的握力计任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的腹内侧前额叶、腹侧纹状体和感觉运动皮层等脑区活动与主观价值有关。
Bernacer et al., 2019a	正常人群24人	身体努力任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群大脑后扣带回的活动与主观价值相关。
Goh et al., 2021	正常人群20人	身体努力任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的大脑前扣带回参与了主观价值的编码过程。
Hogan et al., 2019	正常人群42人	评估奖励决策的握力计任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的腹内侧前额叶皮层活动与预期努力的主观价值有关。
Lockwood et al., 2022	正常人群41人	身体努力任务	身体努力	常规函数模型的努力折扣参数	正常人群前扣带回活动与努力折扣有关。
Suzuki et al., 2021	正常人群30人	评估奖励决策的握力计任务	身体努力	常规函数模型的努力折扣参数	正常人群大脑腹侧纹状体的活动与努力折扣有关。
Yao et al., 2023	正常人群30人	评估奖励决策的握力计任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的背内侧前额叶皮层参与了主观价值的编码过程。
Chong et al., 2017	正常人群38人	认知努力任务, 身体努力任务	身体努力和认知努力	常规函数模型的努力折扣参数	正常人群的大脑背内侧和背外侧前额叶、顶叶内沟和前脑岛活动与努力敏感性呈正相关, 与奖励敏感性呈负相关。
Skvortsova et al., 2014	正常人群20人	身体努力任务	身体努力	强化学习模型的预测误差参数	正常人群在执行任务时腹内侧前额叶和前脑岛的活动, 分别与个体的奖励预测误差和努力预测误差呈正相关。
Sayali & Badre, 2021	正常人群20人	认知努力任务	认知努力	强化学习模型的预测误差参数	前额-顶叶网络参与了正常个体在执行任务时的努力预测误差编码过程。
Clairis & Pessiglione, 2024	正常人群24人	身体努力任务 认知努力任务	身体努力和认知努力	强化学习模型的学习率参数	正常人群的腹内侧前额叶的活动与选项价值估计和选择信心有关, 而背内侧前额叶的活动与认知控制和努力行为的执行控制有关。
Hogan et al., 2020	正常人群30人	基于按键任务的努力奖励任务	身体努力	常规函数模型的主观价值参数	正常人群的大脑运动皮层和躯体感觉皮层的激活, 与个体在身体疲劳状态下对努力成本的主观价值增大相关。

作者（年）	样本	实验范式	努力类型	主要的模型指标	研究结果
Müller et al., 2021	正常人群39人	评估奖励决策的握力计任务	身体努力	结合函数理论的强化学习模型的主观价值参数	正常人群的大脑额中回和扣带回活动与个体在疲劳状态下对身体努力成本的估值有关。
Soutschek & Tobler, 2020	正常人群60人	N-back认知努力任务	认知努力	常规函数模型的努力折扣、主观价值参数	正常人群的大脑背外侧前额叶活动受到经颅磁刺激干预而减弱时，个体的努力敏感性增强，同时个体在付出认知努力后的疲劳水平下降。
Soutschek et al., 2022	正常人群35人	认知努力任务	认知努力	贝叶斯漂移扩散模型的边界阈值参数	在经 θ 波经颅交流电刺激干预大脑背内侧前额叶的活动后，正常个体表现出增强的付出努力获得奖励的意愿。
Bi et al., 2024	抑郁症患者50人	基于按键任务的奖励任务	身体努力	常规函数模型的努力折扣参数	抑郁症患者大脑左侧背外侧前额叶的活动受经颅磁刺激术激活时，患者对努力的敏感性减弱；同时患者还表现出脑电P300、CNV和SPN波的波幅增大。

”

第二轮

审稿人 1 意见：

作者对前述问题做出了较好的回复，针对修改的内容，还有几个小问题：

意见 1：作者增加了“2.5 强化学习模型”这一部分，在前文应有所铺垫，否则很突兀。另外，这一类模型是否已经应用到了抑郁症努力奖赏动机研究领域或理论上是否能够应用，应在此部分明确说明。

回应：非常感谢您指出这一问题！根据您的建议，我们在前文第 2.1 部分“2.1 计算模型的理论基础”增加了“强化学习模型”铺垫性介绍，同时也在这部分对强化学习模型在抑郁症努力奖赏动机研究中的适用情况进行了补充说明。具体添加的内容可见下文中标绿的部分，同时可见文章第 2.1 部分“2.1 计算模型的理论基础”标绿的内容：

“评估抑郁症患者动机损害行为的模型有常规函数模型（包括线性模型、双曲线模型、抛物线模型、指数模型等）、净价值与努力成本效益优化模型、漂移扩散模型和**强化学习模型**等。函数模型和净价值与努力成本效益优化模型的理论基础主要是成本-效益（cost-benefit）框架理论。在这个框架理论中，个体行为的目标是获得奖励（即效益），而达到目标需要付出努力（即成本），最后个体能获得的价值是奖励与努力成本之差(Pessiglione

et al., 2018)。漂移扩散模型理论认为个体在进行决策时会收集信息，当收集的信息超过了某个阈值时，会促成决策的形成(Ratcliff et al., 2016)。强化学习模型理论认为个体可以从环境反馈中学习经验，并根据这些反馈不断地调整自身的行为，以获得最大化的奖励(Chen et al., 2015; Pike & Robinson, 2022)。

对比上述模型，函数模型的研究运用相对广泛，上文测量身体和认知努力的实验任务大部分都可以使用；净价值与努力成本效益优化模型适用范围较窄，当前仅在少数探讨身体努力的抑郁症相关研究中被使用，比如 Vinckier 等人的研究中使用该模型解释个体的身体努力相关行为(Vinckier et al., 2022)。漂移扩散模型应用有较大的灵活性，常被使用于探索认知决策活动的实验研究中。强化学习模型可以应用于上文介绍的大部分测量身体和认知努力的研究任务，以探讨过往的反馈结果对个体奖励学习的影响。由于这些模型各有特点，能够方便研究者从不同的视角去探究抑郁症患者努力奖赏相关的动机活动，促进对努力奖赏相关认知过程更全面的理解。”

意见 2：“计算模型结合影像学等技术”可改为“计算模型结合认知神经科学技术”。

回应：非常感谢您的建议！在原文稿中共出现了 4 处“计算模型结合影像学等技术”或类似的表述，我们现在已经根据您的建议对这些表述进行了修改。具体修改内容见下方标绿文字，同时可见文章第 4 部分“4 抑郁症“身体努力”和“认知努力”的认知神经研究”标绿的内容。

(1) 修改后：4.2 计算模型结合认知神经科学技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究

(2) 修改后：表 2 计算模型结合认知神经科学技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究

(3) 将原文内容：“计算模型和影像学等技术结合起来评估个体……”修改为“将计算模型和认知神经科学技术结合起来评估个体……”

(4) 将原文内容：“……计算模型结合影像学等技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究……”修改为“计算模型结合认知神经科学技术评估“身体努力”和“认知努力”的研究……”

意见 3：有些句子表意不清晰，需要进一步修改，比如“然而当前缺少研究探讨，一些测评动机的方法学的特征，比如努力类型（付出身体或认知努力）或任务指示（要求个体如何去完成任务），这些因素可能对研究结论存在潜在的影响。”

回应：非常感谢您宝贵和细致的建议！我们已对上述句子句意进行了修订。同时，我们对全文进行了进一步核查，并对有类似问题的地方也进行了修改。具体修改的内容见下方，同时可见文章引言部分标绿的部分。

（1）将原文“然而当前缺少研究探讨，一些测评动机的方法学的特征，比如努力类型（付出身体或认知努力）或任务指示（要求个体如何去完成任务），这些因素可能对研究结论存在潜在的影响。”修改为“然而，当前很少研究探讨测量方法上的特征对研究结论可能存在的影响，比如不同的努力类型（付出身体或认知努力）或不同的任务指示（要求个体如何去完成任务）都有可能影响研究结果。”

（2）将原文：“……有必要评估计算模型常见方法的特点和应用的局限性，以促进这一新方法在抑郁症奖赏动机相关的研究中得到更广泛的运用。”修改为：“……有必要评估常见计算模型方法的特点和应用局限性，以促进这一方法在抑郁症奖赏动机相关研究中得到更广泛运用。”

审稿人 2 意见：作者很好地回复了我的意见，文稿质量有大幅度的提升，审稿人没有更进一步意见，推荐发表。

回应：非常感谢您对我们上一轮修改的认可，也再次感谢您提出的极具建设性和启发性的修改建议！

第三轮

编委 1 意见：同意发表。

编委 2 意见：该稿件整体不错，已达到发表的水平。

主编意见：同意发表。