

· 基础、实验与工效 ·

认知控制过程的影响因素：回报与代价*

司双庆 周思宏 袁加锦 杨倩**
(四川师范大学脑与心理科学研究院, 成都, 610066)

摘要 根据控制的预期价值 (expected value of control, EVC) 模型, 回报与代价通过调节动机共同影响认知控制的实施与分配 (即回报-代价权衡)。在 EVC 模型外, 还有许多探究动机相关因素如何影响认知控制的研究。文章首先总结梳理了可被视为回报或代价的因素及相关的实证证据; 其次, 基于回报-代价权衡简要讨论二者如何共同影响认知控制; 最后提出未来研究可以从客观 (优化权衡的计算模型) 与主观 (个体差异) 两个方面更全面地解析回报-代价的权衡过程, 以实现对认知控制的有效调控与精准干预。

关键词 认知控制 EVC 模型 回报 代价 回报-代价权衡

1 引言

认知控制是个体处理信息、执行任务和解决问题所需的重要心理过程 (Miller & Cohen, 2001), 可以帮助个体在不同情境中进行注意和认知资源的分配, 以更好地实现目标。在实验室中, 冲突和错误的出现促使个体动态调整认知控制水平 (张孟可等, 2021; Botvinick et al., 2001; Li et al., 2021)。个体根据不同任务情境的需求分配与调控控制的过程反映了认知控制实施的灵活性与动态性, 也体现了个体动机水平的变化 (Botvinick & Braver, 2015), 说明在认知控制能力外, 个体对于在何种情境下需要实施多少认知控制的判断也与其主观意愿有关。

那么, 个体是如何决定是否、什么时候、以何种方式施加以及施加多强的认知控制的? 对此, Shenhav 等人 (2013) 提出了控制的预期价值模型 (expected value of control, EVC), 并将这一过程视为基于价值的决策。由于认知控制的实施需要努力的投入 (Kool et al., 2010), 在决策过程中, 其价值

不仅来自实现任务目标所带来的积极回报, 还源自认知资源消耗伴随的消极代价 (Westbrook & Braver, 2015)。基于此, EVC 模型使用监测、配置与实施三个成分解释了价值决策如何决定认知控制的实施。其中, 监测成分旨在监测任务情境中与认知控制需求相关的冲突信息、情境信息 (如错误与反馈) 及任务配置等信号的动态变化。这些信号提示了达成预期任务目标需要的控制水平, 配置成分据此指明当前情境所需的控制信号对象及强度。个体在实施阶段完成相应控制的分配与调节, 将控制信号转换为行为输出, 以实现任务目标。在这三个成分相互作用的过程中, 个体通过“预期价值”最大化的计算 (即尽可能以最少的付出获得最多的回报) 来调节控制强度。“预期价值”指投入认知控制可能带来的预期回报与代价间的差值 (即回报-代价)。如图 1 所示, 随着控制强度的增加, 预期回报呈“S”型单调增加 (深灰色曲线), 而预期代价单调递增 (浅灰色曲线)。综合预期回报与代价, 控制的“预期价值”即为二者的差值——EVC 值 (黑色曲线),

* 本研究得到四川省自然科学基金青年项目 (2022NSFSC1691, 2022NSFSC1788) 的资助。

** 通讯作者: 杨倩, E-mail: qianyang_psy@163.com

DOI:10.16719/j.cnki.1671-6981.20240201

最大 EVC 值（如点 a）对应最优的控制强度。

EVC 模型从价值决策视角解析了认知控制实施的动态变化过程，回报与代价作为其中的两个关键因素，通过影响个体的动机水平实现了对认知控制的动态调控。然而，从 EVC 模型提出至今，还有很多探究动机相关因素如何影响认知控制的研究：外在（状态）或内在（特质）动机因素的操纵影响了实施控制所产生的回报与（或）代价，反映了个体通过评估实验任务中的回报与代价调节认知控制的过程。据此，为更好地解析认知控制实施过程中可能存在的回报与代价，从根本上理解认知控制过程的调控因素，本文基于回报 - 代价框架，进一步梳理了存在于认知控制实施过程中的回报与代价因素及相关的实证研究证据，并探讨二者如何共同影响认知控制。

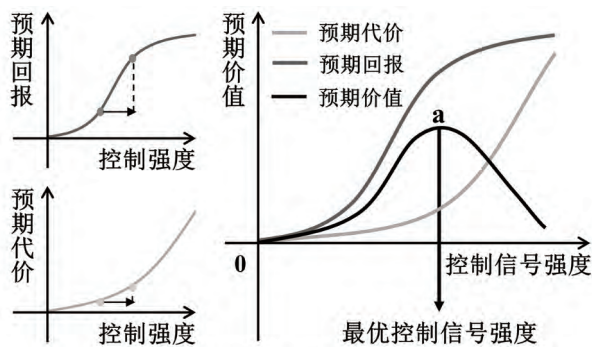


图 1 控制的预期价值计算示意图 Shenhav et al., 2013

2 认知控制实施过程中的回报

任务回报是调控认知控制的一个重要因素，能够提升个体的动机水平、激发个体投入更多的认知资源 (Botvinick & Braver, 2015)，并通过调节感知皮层的活动增强注意的灵活性 (Engelmann et al., 2009; Padmala & Pessoa, 2011)、降低任务转换代价 (Bahlmann et al., 2015)，以此促进任务表现。回报包括外在回报（食水、金钱等）与内在回报（好奇心的满足、自主感、乐趣等）(Morris et al., 2022)。

2.1 外在回报

2.1.1 外在回报对认知控制的促进作用

在以人类为被试的研究中，外在回报多指与当前任务表现相关或无关的金钱奖赏。通过直接操纵金钱奖赏，研究者们比较了不同奖赏条件下个体的任务表现差异，以此探究外在回报对认知控制的影响。大量实证研究表明，与任务表现相关的金钱奖赏在多数情境下可以提升认知控制，表现为任务准

确性提升和反应时缩短：在转换任务中，金钱奖赏降低了任务转换代价 (Bahlmann et al., 2015)，体现了认知灵活性的增强；在反应抑制相关任务中，金钱奖赏降低了冲突任务中的一致性效应 (Aarts et al., 2014; Padmala & Pessoa, 2011)，也降低了 Go/NoGo 与 Stop-Signal 任务中的犯错率 (Boehler et al., 2012; Dixon & Christoff, 2012)，表明抑制控制的提升；在 AX-CPT 任务中，金钱奖赏强化了个体对目标线索的反应，反映了主动性控制的增强 (Locke & Braver, 2008)。除了金钱奖赏，另有一些研究探究了其他形式的外在回报对认知控制的影响。例如，果汁可以进一步强化金钱奖赏对认知控制的促进作用 (Yee et al., 2016)，与任务表现相关的社会性或情绪性奖赏可以提升个体的认知控制投入水平 (Prével et al., 2021; Sharp et al., 2022)，且这种促进在不同类型的外在回报间(果汁、社会/情绪性奖赏)具有叠加效应。

根据 EVC 模型的回报 - 代价权衡框架 (Shenhav et al., 2013)，若不考虑认知代价 (如图 2 中的浅灰色曲线) 的影响，上述外在回报因素主要通过回报曲线影响“预期价值”，进而促进认知控制过程 (如图 2)：随着外在回报的增加，回报曲线上移 (深灰色虚线→深灰色实线)，“预期价值”随之增大 (垂直黑色虚线→垂直黑色实线)，控制水平增强 (a→b)，任务表现得以提升。

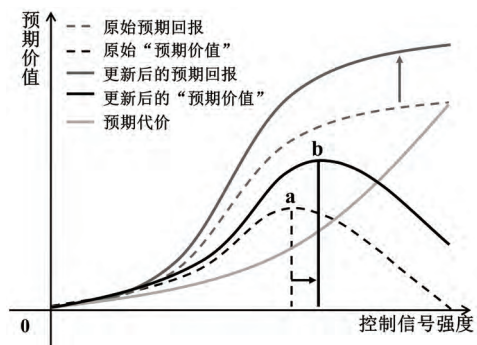


图 2 外在回报通过回报曲线影响控制实施 Shenhav et al., 2013

2.1.2 影响外在回报对认知控制调控效果的其他因素

外在回报对认知控制的促进作用并非无条件的，还有其他因素调节了这一过程，这些调节因素的存在也对 EVC 模型提出了新的挑战。

(1) 任务情境。在不同的任务情境中，相同价值的外在回报对认知控制的促进程度不同 (Leng et al., 2021; Otto & Vassena, 2021)，这可能是由于任务情境中的奖赏丰富性影响了个体对外在回报相对价值的感知 (Hassall et al., 2022)。相较奖赏机会更多(奖

赏丰富)的任务情境,在奖赏机会更少(奖赏匮乏)的任务情境中,等量的金钱奖赏激活了更大的奖赏正波(reward positivity, RewP),表明其相对价值更高,因此可以更好地提升认知控制、降低任务转换代价(Otto & Vassena, 2021)。此外,不同任务情境还可以激发个体不同的反应模式。与奖赏类似,惩罚是影响个体任务回报的另一种外在因素,它也可以提升认知控制(Stürmer, 2011)。然而,个体在奖赏与惩罚情境下提升认知控制的方式不同:奖赏情境下,为增加金钱收益,个体会投入更多认知资源;而惩罚情境下,为避免金钱损失,个体的反应更加谨慎(Leng et al., 2021)。在脑活动层面,相比于惩罚,在奖赏调节认知控制的过程中,与“预期价值”计算密切相关的前侧扣带回也有更强的激活(Cubillo et al., 2019),说明奖赏与惩罚可能以不同的方式影响个体对“预期价值”的评估。

(2)任务表现相关性。van Steenbergen等人(2012)发现,冲突任务中呈现的随机奖赏提升了被试的积极情绪,进而阻碍冲突在试次间的动态调控,降低冲突适应。因此,与任务表现无关的金钱奖赏更多地诱发了被试的积极情绪,而非激活更强的动机水平(Notebaert & Braem, 2015)。当情绪性刺激与任务表现相关时,其可被视为一种奖赏信息,通过影响动机系统增强认知控制(Grahek et al., 2020; Prével et al., 2021);当其于任务表现无关时,则主要通过情绪加工系统影响认知控制(杨倩, 2022; Dignath et al., 2020)。因此,外在回报和任务表现间的相关性可能通过动机系统(回报与任务表现相关)或情绪系统(回报与任务表现无关)对控制的实施过程施加影响(Chiew, 2021)。

(3)奖赏敏感性的个体差异。奖赏敏感性反映了不同个体对渴求目标的持续性追求程度的高低,其大小可以通过行为激活系统量表(BAS, Carver & White, 1994)中的驱动性子量表测量。相关研究发现,其得分与外在奖赏对认知控制的提升效应呈显著正相关(Engelmann et al., 2009; Padmala & Pessoa, 2011),说明外在奖赏的提升效应与个体的奖赏敏感性有关。此外,奖赏敏感性得分还与反映个体动机的多巴胺水平呈显著正相关(Davis et al., 2008)。其中,多巴胺的合成能力决定了认知控制在多大程度上受到外在奖赏的调节:当个体的多巴胺合成能力更高时,外在奖赏可以更好地促进个体在冲突任务中的认知控制投入,从而降低冲突效应

(Aarts et al., 2014)。上述结果共同表明,外在奖赏对认知控制的促进作用受到个体奖赏敏感性的调节,反映了个体在多大程度上可以将外在奖赏视为一个动力因子。

2.2 内在回报

在另一些情境中,即便没有外在回报,个体仍然积极地参与任务、持续地付出努力并实施控制。例如,个体会主动地探索所处的环境、自发进行游戏等活动(Berlyne, 1966),以满足自身需要(好奇、兴趣、自主性、成就感等; Chew et al., 2021),并得到来自完成任务本身的回报——内在回报(Cromwell et al., 2020; Kruglanski et al., 2018)。不同于外在回报的直接操纵,内在回报的操纵与测量方式更为间接(Morris et al., 2022)。相关研究表明,个体会在自由选择时表现出满足好奇心(选择探索任务情境和获取任务信息的选项; Charpentier et al., 2018)或满足自主感(选择结果由自己而非电脑算法决定的任务; Wang & Delgado, 2019)的倾向和偏好。在上述过程中,奖赏加工和主观价值表征的相关脑区活动增强(Huskey et al., 2018; Wang & Delgado, 2019),说明内在回报具有奖赏性质(Chew et al., 2021; Morris et al., 2022)。因此,类似于外在回报,内在回报同样可以通过评估“预期价值”来影响认知控制的实施。

个体在追求内在回报时会产生积极的主观情绪体验(Huskey et al., 2018)。据此,研究者们通过考察个体在无外在奖赏情境下,完成不同认知负荷水平任务所产生的积极情绪等主观感受的差异来探究内在回报对认知控制的影响及作用机制(Otto et al., 2022; Sandra & Otto, 2018)。相关研究发现,在冲突任务中,相比于一致试次,被试在成功解决任务难度更高的不一致试次(冲突)后报告了更多的积极情绪(Schouppe et al., 2015),表明被试在此条件下获得了更多的内在回报。类似地,认知需求(need for cognition, NFC)描述了个体完成高难度认知任务时所付出的努力及从中获得的满足感,反映了认知任务中个体间动机水平的特质性差异(Cacioppo et al., 1996; Fleischhauer et al., 2010),可被视为一种内在回报。据此,研究者们通过比较高/低NFC个体的任务表现来探究内在回报对认知控制的影响。相关结果发现认知需求可以调节个体在不同认知负荷/难度任务中的控制水平:在认知努力折扣范式中,相较于低NFC个体,高NFC个体更不易受任务难度

的影响，并会更多地主动选择记忆量更大的 N-back 任务 (Westbrook et al., 2013)；在语音理解任务中，高 NFC 个体投入了更多的认知努力，且更少地受到外在回报的调节 (Zhang et al., 2022)。由此说明，内在回报 (NFC) 可以提升认知控制。

3 认知控制实施过程中的代价

认知控制的实施与“预期价值”有关，而“预期价值”是实施控制所获得的预期回报与其产生的代价（即认知控制代价）相权衡的产物。认知控制代价在不同任务情境中的表现形式不同，包括与放弃其他认知任务所能获得的回报有关的机会成本 (Kurzban et al., 2013)、与控制模式在不同状态及分配水平间进行调整有关的调整代价 (Grahek et al., 2023)、与实施控制所投入的认知努力有关的努力代价 (Shenhav et al., 2013, 2017) 等。其中，努力代价可能是导致个体减少认知控制投入的根本原因 (André et al., 2019)，主要表现为个体对高控制需求任务的回避及对“预期价值”主观评估的降低。

3.1 努力代价导致认知回避

早期经济学领域的研究指出，由于认知活动（如思考）具有高昂的 (costly) 代价，个体往往通过减少认知付出来降低代价 (Camerer & Hogarth, 1999)。类似地，心理学领域的研究者提出了“最少心理努力原则”：在其他条件相等的情况下，个体倾向于选择那些能够最大程度减少认知努力付出的任务 (Botvinick, 2007)。例如，在一系列需求选择任务中，当其他条件保持相等时，被试倾向于选择低认知需求任务而回避高认知需求任务 (Kool & Botvinick, 2018)。在面对高低冲突水平 (80% 不一致 vs. 20% 不一致) 的 Stroop 任务时，被试会更多地选择低冲突水平条件 (Schoupe et al., 2014)。在转换任务中，被试倾向于选择“重复”而非“转换”任务 (Arrington & Logan, 2004; Vermeulen et al., 2022)；在高频或低频的转换任务间做选择时，他们也更偏好低频的任务转换 (Kool et al., 2010)，因为相较“重复”与“低频转换”任务，“转换”与“高频转换”任务需要启动更高水平的认知控制，付出更多的努力。上述与努力回避有关的现象均反映了努力代价的存在。根据脑成像的结果，随着控制需求水平的提升，额顶控制网络的活动增加，由此导致的努力回避降低了奖赏加工脑区的活动；相应地，与任务“负激活”相关的默认模式网络的活动预测

了努力回避行为的变化 (Sayali & Badre, 2019)。由此说明，努力代价削弱了外在回报价值，使得个体更少地投入认知任务。

3.2 努力代价降低“预期价值”

努力投入通常伴随负性情绪（如厌恶）的产生 (Kurzban, 2016; Saunders et al., 2017)，皱眉肌作为负性情绪的敏感性指标，其活动可以间接表征努力投入所产生的代价 (Dreisbach & Fischer, 2012)。因此，在认知控制的实施过程中，努力代价可能体现在与施加认知控制相关的主观努力的体验中 (Botvinick & Braver, 2015; Shenhav et al., 2017)，反映个体对努力代价的主观价值的评估。据此，Westbrook 等人 (2013) 设计了认知努力折扣范式来量化努力代价，以更好地探究其对认知控制的影响。具体而言，被试需在预期价值不断变化的“高奖赏 - 困难任务”和“低奖赏 - 简单任务”之间进行选择，努力的主观代价可以通过计算奖赏折扣的主观价值来量化。结果发现，被试更多地选择了“低奖赏 - 简单任务”，而“高奖赏 - 困难任务”的主观价值随所需努力投入的增加而降低，表明被试倾向于降低外在回报来回避努力投入，因为他们主观夸大了努力的代价，从而产生了努力折扣 (易伟等, 2019; Westbrook & Braver, 2015)。当进一步考察调控这一过程的因素时发现，与认知控制决策有关的神经介质（如多巴胺、去甲肾上腺素和肾上腺素等）可以增加个体对认知努力回报和代价的敏感性，放大回报相对于代价在决策早期的影响 (或权重)，进而通过增强认知努力动机提升认知控制 (Westbrook et al., 2020, 2021)。

4 “回报 - 代价”权衡影响认知控制过程的可能机制

回报与代价对认知控制的影响并非独立，而是通过“回报 - 代价”权衡的方式共同调节认知控制过程。例如，在算术任务中，表征努力代价的皱眉肌活动在预期要解决更复杂的算术问题时增强；而当解决这些问题可以获得更高的奖赏时，皱眉肌活动又显著降低 (Devine et al., 2023)。在自由选择转换任务中，当无外在奖赏时，被试更多地选择简单的“重复”任务；而当完成困难任务有外在奖赏时，被试对需要认知控制参与的“转换”任务的选择概率提升 (Fröber & Dreisbach, 2016)。在多阶段强化学习中，个体可以通过两种基于奖赏的决策策略来进行强化学习。其中，基于模型的策略是一种目标

导向的计划决策：个体会根据先前选择所获得的奖赏金额及概率综合做出当前决策选择，以提升获得奖赏的可能性及奖赏金额，即个体需要将更多的努力投入认知计算（认知代价高）。无模型的策略是一种依赖于习惯或直接经验的决策：个体会直接重复先前获得奖赏的选择而忽视获得奖赏概率的大小，需要较少的认知计算（认知代价低）。相关研究发现，认知努力代价较高的个体倾向于使用无模型策略；而当奖赏进一步增加时，行为选择表现出更多的基于模型的策略控制（Kool & Botvinick, 2018; Kool et al., 2017），说明回报与代价以整合的方式影响了个体的策略选择。

综上，代价在一定程度上削弱了努力投入，降低了认知控制。在此基础上进一步增加回报时，个体更愿意投入到需要付出更多努力的控制任务中，说明回报可以削弱（甚至抵消）代价对认知控制实施所产生的消极影响，反映了个体在实施认知控制过程中对预期回报和代价所做出的综合评估。因此，基于回报-代价的权衡是一个持续的动态过程，并且受到个体主观因素的影响（Inzlicht & Schmeichel, 2012）；相应地，认知控制的实施与调控也是一个动态更迭的过程，需要同时考虑主体状态、环境和动机等因素在此过程中的作用（Bustamante, 2022）。

4.1 基于主观“回报-代价”权衡的努力价值计算

认知控制实施过程中的回报-代价权衡之所以受到主体因素的影响，主要缘于努力投入的两面性：一方面，在努力投入前，代价会削弱努力投入可能获得回报的预期价值；另一方面，努力本身具有价值，而且在努力投入后，个体往往赋予努力回报更多的价值（曹思琪等, 2022）。因此，个体对努力结果的评价受到个体对努力投入的主观偏好的综合影响，即更看重努力产生的代价（负性评价）还是更看重努力带来的回报（正性评价）（Inzlicht et al., 2018; Kool & Botvinick, 2018），这一过程受到个体对回报与代价敏感度（Westbrook et al., 2020）及冲动水平（Froböse et al., 2020）的调节。

DPOWER 模型（dual-system power model）结合实验数据构建了关于努力投入与努力结果的主观价值的函数关系。如图 3A，二者既可能存在单调的函数关系：当个体对努力投入呈正性评价时，主观价值随努力投入的增加而增加（深灰色虚线）；当个体对努力投入呈负性评价时，主观价值随努力投入的增加而降低（浅灰色虚线）。由于个体对努力结果的偏

好可能会因努力需求而改变，函数关系也可能因个人能力的限制而出现反转：若个体最初对努力呈负性评价，当努力值达到一定水平后，随着努力投入的持续增加，他们对努力的偏好逐渐由代价变为回报，评价随之由负性转为正性，价值函数相应地由单减转为单增（浅灰色点线）；反之，若个体最初对努力呈正性评价，当努力值达到阈限后，随着努力投入的持续增加，他们对努力的偏好逐渐由回报变为代价，评价随之由正性转为负性，价值函数由单增转为单减（深灰色点线）（Marcowski et al., 2023）。

因此，在认知控制的实施过程中，基于预期价值的评估在一定程度上反映了个体愿意投入多少努力（Inzlicht & Schmeichel, 2012）。如图 3B，若用努力投入水平表征控制信号强度，代价和回报对认知控制的影响可以通过衡量努力投入的主观回报与主观代价值之差——主观预期价值（即主观 EVC）来实现。其大小在一定范围内代表努力水平的高低（如阴影部分）：当“主观回报值”（深灰色曲线）大于“主观代价值”（浅灰色曲线）时，“主观 EVC”（黑色曲线）大于 0，个体愿意付出努力（实施认知控制）；当主观回报值与主观代价值的差值最大，即“主观 EVC”最大时（黑色曲线最高点 a），对应的努力水平为当前情境下个体可以投入的最优控制强度；当“主观回报值”等于“主观代价值”，即“主观 EVC”等于 0 时（深灰色曲线与浅灰色曲线交点 b），对应的努力水平为当前情境下个体可能付出的最大努力。在此之后，“主观代价值”大于“主观回报值”，即“主观 EVC”小于 0 时，个体将不再愿意付出努力。

4.2 “回报-代价”权衡在控制过程中的动态更迭

回报与代价的权衡是一个动态调整的过程。在需要认知控制参与的任务中，个体在每次实施控制后，会根据任务表现的相关因素（反馈、任务转换率、反应时和错误率等）更新对于回报与代价预期价值的评估，进而优化控制的配置（Musslick et al., 2015; Sayali & Badre, 2021）。依此逻辑，研究者指出个体能力与任务情境等因素可以作为动态调整依据，分别在特定任务中与不同任务情境间动态调节个体的控制配置。

在特定任务中，回报与代价权衡的动态调整与个人能力有关。Masís 等人（2021）指出，能力的高低在一定程度上反映了个体在多大程度上可以自动化地完成当下的任务（又称“自动性”），并提

出 LEVC (learning expected value of control) 模型。完成任务的“自动性”(通过学习或训练)可以提升个体对伴随任务完成所产生的回报价值评估,进而改变对“预期价值(即 EVC)”的评估,调节认知控制的分配。如图 3C,随着“自动性”的提高,获得相等甚至更高水平的预期价值(纵坐标)需要的控制强度(横坐标)更低。这解释了在没有外在回报的情境下,个体为什么依然选择实施认知控制,或为了能在未来获得更大的回报而在当下选择需要更多努力投入而回报更少的任务(Inzlicht et al., 2018; Masís et al., 2021)。在不同任务情境下,

LVOC (learned value of control) 模型提出,个体可以根据任务情境的特征来学习和评估预期价值并实施相应的控制(Lieder et al., 2018)。若任务中的某个刺激特征与奖赏相关,那么个体会赋予那些与该刺激具有相似特征的任务情境更多的回报价值。这一过程体现了基于实施控制的预期价值评估在具有相同或相似特征的情境间的迁移,以此更新新情境下产生的预期价值(Bustamante et al., 2021)。因此,个体可以根据以往任务的经验,在类似的任务情境中动态配置最优的控制,实现了认知控制在不同任务情境下的动态迁移与调整。

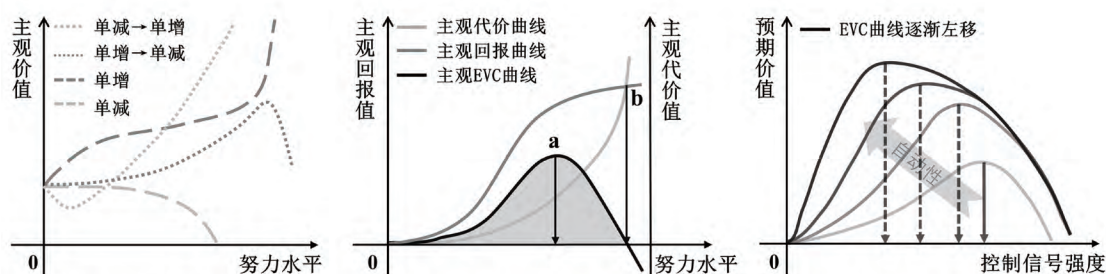


图 3

注: A: DPOWER 模型(Marcowski et al., 2023): 努力投入与基于努力结果的主观价值的四种函数关系。B: 主观 EVC 模型: 努力水平与主观回报值及主观代价值的关系。其中,点 a 对应最优努力投入水平,点 b 对应最大努力投入水平。C: LEVC 模型(Masís et al., 2021): 自动化程度对 EVC 曲线的影响。随着自动化水平的提升, EVC 曲线逐渐左移(灰色曲线逐渐左移为黑色曲线),最大 EVC 值对应的控制信号强度逐渐降低(黑色箭头实线逐渐左移为黑色箭头虚线)。

5 总结与展望

根据 EVC 模型,回报与代价是影响认知控制实施与动态调控的关键因素,个体对于回报-代价的权衡影响了他们实施认知控制的动机水平。据此,本文梳理了可被视为回报或代价的因素及相关的实证研究证据。在此基础上,分别从回报-代价权衡过程的主观性与动态性两个方面探讨了二者对认知控制的共同影响。由于回报-代价的权衡过程较为复杂且在很大程度上受到个体因素的影响,为更深入地理解这一权衡过程、更好地实现对认知控制的有效调控和精准干预,未来的研究可以考虑从客观与主观两个方面进一步解析回报-代价权衡的过程。

客观方面,完善“回报-代价”权衡的计算模型。研究者们已基于权衡的更迭构建了相关模型,但大多侧重于回报价值的变化(如 LEVC 模型、LVOC 模型)而忽略了代价的更迭。实际上,代价价值也是不断变化的,如调整代价的动态模型指出,代价会随控制调整可用时间的减少、调整频率的增加而

变大(Grahek et al., 2023)。并且,回报与代价的更迭可能是同时进行的,例如,需要认知控制参与的学习过程既可以提升(外在及/或内在)回报,又因自动化水平的提升而降低代价。因此,未来的研究可以以更加整合的方式,同时考虑任务情境(或目标)、任务难度、任务表现等因素对回报与代价的共同影响,构建更加完善的权衡模型。

主观方面,纳入个体差异因素考察“回报-代价”权衡。如前所述,与外在回报相关的奖赏敏感性、与内在回报相关的内在动机及认知需求水平、与代价相关的机会成本等因素在不同个体间有很大的差异(Aarts et al., 2014; Kurzban et al., 2013; Sandra & Otto, 2018),反映了个体赋予回报与代价不同的权重。那么,当不同个体面对相同的任务目标时,除认知控制能力差异外,上述个体差异(奖赏敏感性、认知需求、内在动机、机会成本)在多大程度上可以解释基于认知控制的任务表现差异?未来的研究可以就此问题深入探究,并从动机视角进一步明确

影响回报 - 代价权衡的其他个体差异因素。这同时提示, 未来的相关研究在考察状态性情境因素对认知控制的影响时, 需要控制回报与代价相关的个体差异因素的影响。

参考文献

- 曹思琪, 汤晨晨, 伍海燕, 刘勋. (2022). 价值计算决定何时与如何努力. *心理科学进展*, 30(4), 877-887.
- 杨倩. (2022). 负性情绪在冲突适应中的作用机制: 分离与整合视角. *心理科学进展*, 30(8), 1844-1855.
- 易伟, 梅淑婷, 郑亚. (2019). 努力: 成本还是奖赏? *心理科学进展*, 27(8), 1439-1450.
- 张孟可, 李晴, 尹首航, 陈安涛. (2021). 冲突水平的变化诱发冲突适应. *心理学报*, 53(2), 128-138.
- Aarts, E., Wallace, D. L., Dang, L. C., Jagust, W. J., Cools, R., & D' Esposito, M. (2014). Dopamine and the cognitive downside of a promised bonus. *Psychological Science*, 25(4), 1003-1009.
- André, N., Audiffren, M., & Baumeister, R. F. (2019). An integrative model of effortful control. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 13, Article 79.
- Arrington, C. M., & Logan, G. D. (2004). The cost of a voluntary task switch. *Psychological Science*, 15(9), 610-615.
- Bahlmann, J., Aarts, E., & D' Esposito, M. (2015). Influence of motivation on control hierarchy in the human frontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 35(7), 3207-3217.
- Berlyne, D. E. (1966). Curiosity and exploration: Animals spend much of their time seeking stimuli whose significance raises problems for psychology. *Science*, 153(3731), 25-33.
- Boehler, C. N., Hopf, J. M., Stoppel, C. M., & Krebs, R. M. (2012). Motivating inhibition - reward prospect speeds up response cancellation. *Cognition*, 125(3), 498-503.
- Botvinick, M., & Braver, T. (2015). Motivation and cognitive control: From behavior to neural mechanism. *Annual Review of Psychology*, 66(1), 83-113.
- Botvinick, M. M. (2007). Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 7(4), 356-366.
- Botvinick, M. M., Braver, T. S., Barch, D. M., Carter, C. S., & Cohen, J. D. (2001). Conflict monitoring and cognitive control. *Psychological Review*, 108(3), 624-652.
- Bustamante, L., Lieder, F., Musslick, S., Shenhav, A., & Cohen, J. (2021). Learning to overexert cognitive control in a Stroop task. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 21(3), 453-471.
- Bustamante, L. A. (2022). *Quantifying individual differences in the cost of cognitive and physical effort in humans* (Unpublished doctoral dissertation). Princeton University.
- Bialaszek, W., & Winkelman, P. (2023). Modeling the Effort Paradox: Effort can have positive and negative impact on outcome value within an individual, across individuals, and across choice contexts (preprint)
- Cacioppo, J. T., Petty, R. E., Feinstein, J. A., & Jarvis, W. B. G. (1996). Dispositional differences in cognitive motivation: The life and times of individuals varying in need for cognition. *Psychological Bulletin*, 119(2), 197-253.
- Camerer, C. F., & Hogarth, R. M. (1999). The effects of financial incentives in experiments: A review and capital-labor-production framework. *Journal of Risk and Uncertainty*, 19(1), 7-42.
- Carver, C. S., & White, T. L. (1994). Behavioral inhibition, behavioral activation, and affective responses to impending reward and punishment: The BIS/BAS scales. *Journal of Personality and Social Psychology*, 67(2), 319-333.
- Charpentier, C. J., Bromberg-Martin, E. S., & Sharot, T. (2018). Valuation of knowledge and ignorance in mesolimbic reward circuitry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(31), E7255-E7264.
- Chew, B., Blain, B., Dolan, R. J., & Rutledge, R. B. (2021). A neurocomputational model for intrinsic reward. *The Journal of Neuroscience*, 41(43), 8963-8971.
- Chiew, K. S. (2021). Revisiting positive affect and reward influences on cognitive control. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 39, 27-33.
- Cromwell, H. C., Abe, N., Barrett, K. C., Caldwell-Harris, C., Gendolla, G. H. E., Koncz, R., & Sachdev, P. S. (2020). Mapping the interconnected neural systems underlying motivation and emotion: A key step toward understanding the human affectome. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 113, 204-226.
- Cubillo, A., Makwana, A. B., & Hare, T. A. (2019). Differential modulation of cognitive control networks by monetary reward and punishment. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 14(3), 305-317.
- Davis, C., Levitan, R. D., Kaplan, A. S., Carter, J., Reid, C., Curtis, C., & Kennedy, J. L. (2008). Reward sensitivity and the D2 dopamine receptor gene: A case-control study of binge eating disorder. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 32(3), 620-628.
- Devine, S., Vassena, E., & Otto, A. R. (2023). More than a feeling: Physiological measures of affect index the integration of effort costs and rewards during anticipatory effort evaluation. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 23(4), 1129-1140.
- Dignath, D., Eder, A. B., Steinhauser, M., & Kiesel, A. (2020). Conflict monitoring and the affective-signaling hypothesis—An integrative review. *Psychonomic Bulletin and Review*, 27(2), 193-216.
- Dixon, M. L., & Christoff, K. (2012). The decision to engage cognitive control is driven by expected reward-value: Neural and behavioral evidence. *PLoS ONE*, 7(12), Article e51637.
- Dreisbach, G., & Fischer, R. (2012). Conflicts as aversive signals. *Brain and Cognition*, 78(2), 94-98.
- Engelmann, J. B., Damaraju, E., Padmala, S., & Pessoa, L. (2009). Combined effects of attention and motivation on visual task performance: Transient and sustained motivational effects. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3, Article 4.
- Fleischhauer, M., Enge, S., Brocke, B., Ullrich, J., Strobel, A., & Strobel, A. (2010). Same or different? Clarifying the relationship of need for cognition to personality and intelligence. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 36(1), 82-96.
- Fröber, K., & Dreisbach, G. (2016). How sequential changes in reward magnitude modulate cognitive flexibility: Evidence from voluntary task switching. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 42(2), 285-295.
- Froböse, M. I., Westbrook, A., Bloemendaal, M., Aarts, E., & Cools, R. (2020). Catecholaminergic modulation of the cost of cognitive control in healthy older adults. *PLoS ONE*, 15(2), Article e0229294.

- Grahek, I., Leng, X., Musslick, S., & Shenhav, A. (2023). *The cost of adjusting cognitive control: A dynamical systems approach*. Paper presented at the 2023 Conference on Cognitive Computational Neuroscience.
- Grahek, I., Musslick, S., & Shenhav, A. (2020). A computational perspective on the roles of affect in cognitive control. *International Journal of Psychophysiology*, *151*, 25–34.
- Hassall, C. D., Hunt, L. T., & Holroyd, C. B. (2022). Task-level value affects trial-level reward processing. *NeuroImage*, *260*, Article 119456.
- Huskey, R., Craighead, B., Miller, M. B., & Weber, R. (2018). Does intrinsic reward motivate cognitive control? A naturalistic-fMRI study based on the synchronization theory of flow. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, *18*(5), 902–924.
- Inzlicht, M., & Schmeichel, B. J. (2012). What is ego depletion? Toward a mechanistic revision of the resource model of self-control. *Perspectives on Psychological Science*, *7*(5), 450–463.
- Inzlicht, M., Shenhav, A., & Olivola, C. Y. (2018). The effort paradox: Effort is both costly and valued. *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(4), 337–349.
- Kool, W., & Botvinick, M. (2018). Mental labour. *Nature Human Behaviour*, *2*(12), 899–908.
- Kool, W., McGuire, J. T., Rosen, Z. B., & Botvinick, M. M. (2010). Decision making and the avoidance of cognitive demand. *Journal of Experimental Psychology: General*, *139*(4), 665–682.
- Kool, W., Shenhav, A., & Botvinick, M. M. (2017). Cognitive control as cost-benefit decision making. In T. Egner (Ed.), *The Wiley handbook of cognitive control* (pp. 167–189). Wiley Blackwell.
- Kruglanski, A. W., Fishbach, A., Woolley, K., Bélanger, J. J., Chernikova, M., Molinaro, E., & Pierro, A. (2018). A structural model of intrinsic motivation: On the psychology of means-ends fusion. *Psychological Review*, *125*(2), 165–182.
- Kurzban, R. (2016). The sense of effort. *Current Opinion in Psychology*, *7*, 67–70.
- Kurzban, R., Duckworth, A., Kable, J. W., & Myers, J. (2013). An opportunity cost model of subjective effort and task performance. *Behavioral and Brain Sciences*, *36*(6), 661–679.
- Leng, X. M., Yee, D., Ritz, H., & Shenhav, A. (2021). Dissociable influences of reward and punishment on adaptive cognitive control. *PLoS Computational Biology*, *17*(12), Article e1009737.
- Li, Q., Hu, N., Li, Y. L., Long, Q. S., Gu, Y., Tang, Y. C., & Chen, A. T. (2021). Error-induced adaptability: Behavioral and neural dynamics of response-stimulus interval modulations on posterror slowing. *Journal of Experimental Psychology: General*, *150*(5), 851–863.
- Lieder, F., Shenhav, A., Musslick, S., & Griffiths, T. L. (2018). Rational metareasoning and the plasticity of cognitive control. *PLoS Computational Biology*, *14*(4), Article e1006043.
- Locke, H. S., & Braver, T. S. (2008). Motivational influences on cognitive control: Behavior, brain activation, and individual differences. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, *8*(1), 99–112.
- Marcowski, P., Winkielman, P., & Białaszek, W. (2023). Effort can have positive and negative impact on outcome value within an individual, across individuals, and across choice contexts. *PsyArXiv* (preprint).
- Masís, J. A., Musslick, S., & Cohen, J. D. (2021). *The value of learning and cognitive control allocation*. Paper presented at the 43rd Annual Meeting of the Cognitive Science Society: Animal Minds, Virtual, Online, Austria.
- Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, *24*(1), 167–202.
- Morris, L. S., Grehl, M. M., Rutter, S. B., Mehta, M., & Westwater, M. L. (2022). On what motivates us: A detailed review of intrinsic vs. extrinsic motivation. *Psychological Medicine*, *52*(10), 1801–1816.
- Notebaert, W., & Braem, S. (2015). Parsing the effects of reward on cognitive control. In T. S. Braver (Ed.), *Motivation and cognitive control* (pp. 105–122). Routledge.
- Otto, A. R., Braem, S., Silvetti, M., & Vassena, E. (2022). Is the juice worth the squeeze? Learning the marginal value of mental effort over time. *Journal of Experimental Psychology: General*, *151*(10), 2324–2341.
- Otto, A. R., & Vassena, E. (2021). It's all relative: Reward-induced cognitive control modulation depends on context. *Journal of Experimental Psychology: General*, *150*(2), 306–313.
- Padmala, S., & Pessoa, L. (2011). Reward reduces conflict by enhancing attentional control and biasing visual cortical processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(11), 3419–3432.
- Prével, A., Hoofs, V., & Krebs, R. M. (2021). Effect of non-instructed instrumental contingency of monetary reward and positive affect in a cognitive control task. *Royal Society Open Science*, *8*(8), Article 202002.
- Sandra, D. A., & Otto, A. R. (2018). Cognitive capacity limitations and Need for Cognition differentially predict reward-induced cognitive effort expenditure. *Cognition*, *172*, 101–106.
- Saunders, B., Lin, H., Milyavskaya, M., & Inzlicht, M. (2017). The emotive nature of conflict monitoring in the medial prefrontal cortex. *International Journal of Psychophysiology*, *119*, 31–40.
- Sayali, C., & Badre, D. (2019). Neural systems of cognitive demand avoidance. *Neuropsychologia*, *123*, 41–54.
- Sayali, C., & Badre, D. (2021). Neural systems underlying the learning of cognitive effort costs. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, *21*(4), 698–716.
- Schouppe, N., Braem, S., De Houwer, J., Silvetti, M., Verguts, T., Ridderinkhof, K. R., & Notebaert, W. (2015). No pain, no gain: The affective valence of congruency conditions changes following a successful response. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, *15*(1), 251–261.
- Schouppe, N., Demanet, J., Boehler, C. N., Ridderinkhof, K. R., & Notebaert, W. (2014). The role of the striatum in effort-based decision-making in the absence of reward. *Journal of Neuroscience*, *34*(6), 2148–2154.
- Sharp, P. B., Do, K. T., Lindquist, K. A., Prinstein, M. J., & Telzer, E. H. (2022). Cognitive control deployment is flexibly modulated by social value in early adolescence. *Developmental Science*, *25*(1), Article e13140.
- Shenhav, A., Botvinick, M. M., & Cohen, J. D. (2013). The expected value of control: An integrative theory of anterior cingulate cortex function. *Neuron*, *79*(2), 217–240.
- Shenhav, A., Musslick, S., Lieder, F., Kool, W., Griffiths, T. L., Cohen, J. D., & Botvinick, M. M. (2017). Toward a rational and mechanistic account of mental effort. *Annual Review of Neuroscience*, *40*, 99–124.
- Stürmer, B. (2011). Reward and punishment effects on error processing and conflict control. *Frontiers in Psychology*, *2*, Article 335.
- van Steenbergen, H., Band, G. P. H., & Hommel, B. (2012). Reward valence modulates conflict-driven attentional adaptation: Electrophysiological evidence. *Biological Psychology*, *90*(3), 234–241.

- Vermeulen, L., Braem, S., Notebaert, W., & Ruitenberg, M. F. L. (2022). The subjective evaluation of task switch cues is related to voluntary task switching. *Cognition*, *224*, Article 105063.
- Wang, K. S., & Delgado, M. R. (2019). Corticostriatal circuits encode the subjective value of perceived control. *Cerebral Cortex*, *29*(12), 5049–5060.
- Westbrook, A., & Braver, T. S. (2015). Cognitive effort: A neuroeconomic approach. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, *15*(2), 395–415.
- Westbrook, A., Frank, M. J., & Cools, R. (2021). A mosaic of cost–benefit control over cortico–striatal circuitry. *Trends in Cognitive Sciences*, *25*(8), 710–721.
- Westbrook, A., Kester, D., & Braver, T. S. (2013). What is the subjective cost of cognitive effort? Load, trait, and aging effects revealed by economic preference. *PLoS ONE*, *8*(7), Article e68210.
- Westbrook, A., Van Den Bosch, R., Määttä, J. I., Hofmans, L., Papadopetaki, D., Cools, R., & Frank, M. J. (2020). Dopamine promotes cognitive effort by biasing the benefits versus costs of cognitive work. *Science*, *367*(6484), 1362–1366.
- Yee, D. M., Krug, M. K., Allen, A. Z., & Braver, T. S. (2016). Humans integrate monetary and liquid incentives to motivate cognitive task performance. *Frontiers in Psychology*, *6*, Article 2037.
- Zhang, M., Palmer, C. V., Pratt, S. R., McNeil, M. R., & Siegle, G. J. (2022). Need for cognition is associated with the interaction of reward and task–load on effort: A verification and extension study. *International Journal of Psychophysiology*, *180*, 60–67.

Influencing Factors in the Allocation of Cognitive Control: Rewards and Costs

Si Shuangqing, Zhou Sihong, Yuan Jiabin, Yang Qian

(Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu, 610066)

Abstract Cognitive control refers to people’s ability to adaptively employ cognitive resources and adjust cognitive processes in pursuit of goal-directed behavior. Since naturally occurring behavioral situations are constantly changing, people would mobilize their control adaptively. According to the Expected Value of Control (EVC) model, the dynamic adjustment of control can be thought of as value-based decision making, centered on the integration of rewards and costs that can be expected from a control-demanding task. Hence, reward and cost are two key factors jointly modulating people’s motivation and determining the allocation of control. Following this framework but going beyond the EVC model, the current review elucidated the role of various motivation-related factors that can act as rewards or costs in the implementation of cognitive control, and discussed how they collectively adjust cognitive control.

More specifically, money, juice, or emotional/social stimuli are extrinsic rewards that can drive cognitive control and improve task performance, albeit with a few exceptions. Considering this complexity, other factors can further modulate the beneficial effects (e.g., reward-poor vs. reward-rich task conditions, the congruity of reward and task performance, and individual reward sensitivity). Besides, in contrast to extrinsic rewards that are manipulated externally, intrinsic rewards are highly integrated into control-related tasks. It can be reflected in people’s autonomic engagement with certain tasks and the positive emotions they generated. In this sense, the investigation of the influence of intrinsic rewards on cognitive control is relatively indirect, which can be achieved by adjusting effort levels and positive emotions. Relatedly, individual differences in intrinsic motivation, as reflected by the need for cognition (NFC), are also closely tied to intrinsic rewards in driving control. That is, individuals high in need for cognition are more inclined to be involved in control demanding tasks and to persist in difficult or unprofitable cognitive tasks.

Meanwhile, due to the presence of cognitive costs associated with exerting cognitive control, individuals typically show a bias toward opting for “low-effort” tasks, while decreasing the subjective value of the expected value. When discussing the impact of costs on cognitive control, it is necessary to consider the trade-off between rewards and costs. Previous studies have demonstrated that this trade-off process may vary among individuals based on their willingness to invest effort and their capacity to exert effort, depending on whether they place a higher value on rewards or costs. Consequently, we have further delineated the control signal intensity to effort levels and introduced the concept of “Subjective Expected Value of Control”, which is determined by the difference between the Subjective Value of Reward and the Subjective Value of Cost. Furthermore, the reward-cost trade-off is inherently dynamic, with individuals adapting their cognitive control with the automaticity of task performance in a given task, or in response to feature transfer across different task situations.

Nonetheless, some unanswered questions need to be further investigated. Firstly, the mechanism underlying the reward-cost trade-off requires refinement. As individuals persistently allocate control, their instantaneous subjective evaluation of the rewards and costs expected from the current task may change dynamically. Although several theories have introduced dynamic elements to the EVC model in various ways, a fully dynamic representation of the reward-costs trade-off remains a topic of ongoing exploration. Secondly, the subjective trade-off between rewards and costs can be further modulated by additional individual factors closely related to external and internal motivations. Consequently, it is intriguing to explore how individual differences in reward sensitivity, cognitive need, intrinsic motivation, and opportunity costs may dynamically impact subjective evaluation of the rewards and costs of investing cognitive effort.

Key words cognitive control, EVC, reward, cost, reward-cost trade-off