科学通报 2016 年 第 61 卷 第 32 期: 3498 ~ 3508
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

调控方式影响跨期选择的神经基础: 内侧前额叶的中介作用

郭逸群[①], 冯廷勇[①②*]

① 西南大学心理学与社会发展研究中心, 重庆 400715;
② 西南大学心理学部认知与人格教育部重点实验室, 重庆 400715
* 联系人, E-mail: fengty0@swu.edu.cn

2016-06-27 收稿, 2016-09-05 修回, 2016-09-08 接受, 2016-09-29 网络版发表
重庆市人文社会科学重点研究基地重点项目(16SKB007)、中央高校基本科研业务费专项(SWU1609321)、国家自然科学基金(31271117, 31571128)和中央高校基本科研业务经费创新团队项目(SWU1509392)资助

摘要 跨期选择(intertemporal choice)是指个体对发生在不同时间点的成本与收益进行权衡, 进而做出的各种判断和选择. 先前的研究表明, 个体在长久生活中所形成的调控方式("评估"和"行动"定向)会对跨期选择产生影响, 然而调控方式影响跨期选择的认知神经机制依然不清楚. 为此, 本研究试图采用功能性磁共振成像(fMRI)技术考察调控方式影响跨期选择的神经基础. 行为结果发现, "评估"定向者比"行动"定向者表现出更小的延迟折扣率; 被试的"评估"定向得分和延迟折扣率成负相关, 而"行动"定向得分和延迟折扣率呈正相关. 脑成像的结果发现, 表征延迟奖赏主观价值的内侧前额叶的激活水平与"评估"定向得分成显著的正相关, 而与"行动"定向得分存在显著的负相关; 进一步的中介分析表明, 表征主观价值的内侧前额叶在调控方式与延迟折扣之间存在显著的部分中介效应. 这些结果说明, 调控方式对跨期选择的影响可能是通过改变延迟奖赏的主观价值来实现的, 而表征主观价值的内侧前额叶则是其神经基础.

关键词 跨期选择, 调控方式, 评估定向, 行动定向, 内侧前额叶, 功能性磁共振成像(fMRI)

跨期选择(intertemporal choice)是指个体对发生在不同时间点的成本与收益进行权衡, 进而做出的各种判断和选择[1]. 亚当·斯密指出跨期选择不仅影响一个人的健康、财富与整体幸福感, 也决定一个国家的经济繁荣的程度[1]. 从个人健康、金融投资, 到国家的可持续发展、全球气候变暖等都包含着很强的跨期因素. 广泛应用于消费、储蓄、投资、经济增长等领域的理论建模与分析, 对于时间管理、薪酬管理、各类成瘾行为(吸烟、吸毒以及赌博)和暴饮暴食症等精神疾病的治疗都具有实际的指导意义[2,3]. 跨期选择研究的一个重要发现是, 与当前或近期的获益(或损失)相比, 人们总是倾向于赋予将来获益(或损失)更小的权重, 这一现象叫做延迟折扣(delay discounting). 延迟折扣是跨期选择的核心指标, 它表征了个体对于及时奖赏或延迟奖赏的偏好程度: 延迟折扣率越高表示个体越倾向于选择及时奖赏, 而延迟折扣率越小则表示越倾向于选择延迟奖赏. 先前的研究表明, 跨期选择会受到一些特质性因素的影响, 例如自我控制能力、时间洞察力、预期想象能力等[4~9]. 同时, 已有研究表明, 自我调控方式作为一种重要的人格特质也会对跨期选择产生影响[10,11].

引用格式: 郭逸群, 冯廷勇. 调控方式影响跨期选择的神经基础: 内侧前额叶的中介作用. 科学通报, 2016, 61: 3498–3508
Guo Y Q, Feng T Y. The neural basis of the effect of regulatory mode on intertemporal choice: the mediating role of mPFC (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3498–3508, doi: 10.1360/N972016-00361

© 2016《中国科学》杂志社

日常生活中, 有些人做出决策时, 会对各种方案进行一一比较, 之后选择最好的一个才开始行动; 而有些人正好相反, 做事情雷厉风行, 行动之前较少去衡量各种方案的优缺点, 这就是两种不同自我调控方式个体的典型表现. 所谓自我调控(self-regulation), 是指个体明确自己的现实状态和目标状态, 以及从现实状态到达目标状态的方法和手段, 然后付诸实际行动. 从这个概念可以看出自我调控的两个基本功能: 一是评估自己想要达到的目标状态以及达到目标状态的手段和方法; 二是个体朝向目标努力. 在人们追求目标的过程中, 几乎都包含“评估”和“行动”这两种最基本的调控方式定向. “评估”定向(assessment orientation)指的是自我调控中比较的方面, 主要关注于对各种目标和方法进行比较, 衡量各种备选方案的优缺点, 然后做出最好的选择[12]; 相反, “行动”定向(locomotion orientation)指的是状态之间的转换, 关注的是怎样尽快地参与到活动中去, 在这一过程中很少出现分心和延迟[12]. 调控方式理论(regulatory mode theory)认为“评估”和“行动”这两个维度是相互独立的, 并且在不同的人身上表现出稳定的个体差异[12~14].

调控方式作为一种重要的人格特质会影响到人们的多种行为, 比如跨期决策、风险决策、反事实思维等[10,11,15~17]. 先前的研究表明, 高“评估”定向者(评估者)为了做出更优的决策, 会遵循严格的评价准则, 对各个选项进行一一比较[13]. 研究者认为, 这种特质会使评估者可能更加重视长远的利益, 也表现为更加“目光远大”. 而高“行动”定向者(行动者)在面临选择时会很快的做出决策, 以便尽早参与到行动中, 对他们来说等待是不可取的, 因此在做决策时可能缺少长远的考虑, 显得“目光短浅”[18]. 已有研究从行为上证实: 在面对跨期选择时, 评估者会更多的选择延迟大奖赏, 表现出更小的延迟折扣率; 而行动者则会更多的选择立即小奖赏, 表现出更大的延迟折扣率[10,11]. 另外, 研究人员使用静息态功能连接的技术发现, 外侧前额叶(lateral prefrontal cortex, lPFC)与内侧前额叶(medial prefrontal cortex, mPFC)的功能连接在调控方式定向与延迟折扣率之间起着显著的中介作用[11]. 但是静息态功能连接的技术并不能深入探讨个体在完成具体任务时大脑的活动模式. 因此, 调控方式影响跨期选择的认知神经机制依然不清楚.

先前的研究表明在面临决策时, 评估者会优先关注选项的价值而不是选项的可得性, 而行动者却会优先关注选项可得性而不是价值[12,14]. 这些研究表明, 评估者对决策的价值可能更加敏感, 表征价值的网络的神经活动可能更强; 而行动者对决策价值的敏感性不高, 相应的表征价值的网络的神经活动可能更弱. 而关于跨期选择的神经机制, Kable等人[19,20]认为, 大脑中存在一个以双曲线折扣形式编码奖赏的主观价值系统(价值表征网络), 个体通过比较主观价值表征的强弱来决定选择立即奖赏还是延迟奖赏的; 价值表征网络包括内侧前额叶(mPFC)、腹侧纹状体(ventral striatum, VS)和后扣带皮层(posterior cingulate cortex, PCC)等脑区[21~23]. 价值表征网络是从价值加工的过程来解释跨期选择的, 并且这些脑区的活动可以预测个体的延迟折扣率[19]. 后来的研究者通过操纵不同的奖赏数量、不同的研究范式、不同的刺激类型都发现这些脑区表征的是奖赏的主观价值[6,22,23]. 这些证据进一步支持跨期选择中存在一个主观价值表征的网络. 因此, 本研究着重探讨跨期选择中的价值表征网络在调控方式影响跨期决策中的作用. 由于评估者决策时更加偏爱选项的价值, 本研究预期他们在跨期选择中所表现出的较小的延迟折扣率可能是由于他们的价值表征网络(或价值表征网络中的某个脑区)的活动更强造成的; 而行动者决策时较少关注选项的价值, 本研究预期他们在跨期选择中所表现出的较大的延迟折扣率可能是由于他们的价值表征网络(或价值表征网络中的主要脑区)的活动较弱造成的.

本研究试图采用功能性磁共振成像技术(fMRI), 考察调控方式影响跨期选择的神经机制, 尤其是价值表征网络的作用. 首先, 采集被试完成跨期选择任务的脑成像数据. 其次, 根据双曲线折扣算出延迟奖赏的主观价值, 再使用参数调节(parametric modulation)的分析方法定位表征主观价值的脑区; 最后, 使用中介分析的方法考察价值表征网络的活动是否在调控方式影响跨期决策中起中介作用.

1 材料与方法

1.1 被试

共86名国内某大学本科生或研究生参加实验, 其中男生44人, 女生42人, 年龄范围为18~26岁, 平

均年龄20.35岁，标准差为1.87岁．排除了在任务态扫描中头动大于3 mm或3度的被试3人，同时排除了全部选择立即或延迟奖赏的被试2人，最终剩余81人．被试均为右利手，没有生理或心理疾病，自愿参加，实验前均签署了实验知情同意书．为了让被试更认真地参与实验，实验报酬是根据被试的真实选择进行的．实验结束后，让被试随机抽取一个试次，根据被试在该试次上的选择给予报酬．如果被试抽中试次的选择是立即奖赏，则立即支付与奖赏同等数量的报酬；如果抽中试次的选择是延迟奖赏，则被试需要等待相应的延迟时间才能得到与延迟奖赏数量相等的报酬．

1.2 调控方式量表

调控方式量表由Kruglanski等人[12]编制，共有24个题项：“评估”和“行动”维度各12题(如“我花费大量时间来反省我个性中存在的优点和缺点”)，采用六点计分．先前的研究表明，该量表能够较好地测量个体在评估定向和行动定向上的稳定差异，具有较好的信、效度[24,25]．

1.3 跨期选择任务

跨期选择采用经典的跨期选择任务[26]．立即奖赏为10~29￥(平均为20￥的高斯分布)，延迟奖赏是根据立即奖赏的增加比例(10%，15%，20%，25%，35%，50%，70%，95%，125%)来计算的．共有3种延迟时间：一周、半个月、一个月．被试共完成72个试次，分两个run进行，在被试间平衡2个run的先后顺序．跨期选择任务采用E-prime 2.0编程，电脑屏幕的左边呈现立即奖赏，右边呈现延迟奖赏．实验流程见图1.

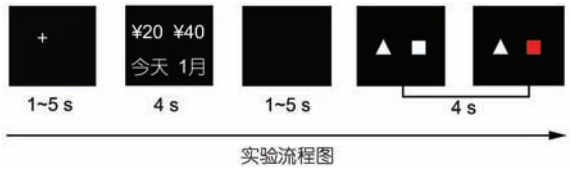


图 1 跨期选择任务实验流程图．在每个试次中，首先在屏幕中央呈现“+”，持续 1~5 s (jitter)；紧接着出现两种奖赏，持续 4 s；奖赏之后出现一个持续 1~5 s (jitter)的空屏；然后出现选择界面(三角和方形分别代表立即奖赏和延迟奖赏，两种条件在被试间平衡)；最后是反馈界面(红色标记的为被试的选择)，选择和反馈阶段共 4 s.

Figure 1 Flow diagram of intertemporal choice task. Flow diagram of intertemporal choice task. On each trial, a fixation, which lasted 1–5 s, was first presented on the center of screen; two rewards were next appeared and lasted 4 s; a blank screen lasting 1–5 s (jitter) was presented after the presentation of rewards; then participants were asked to make a choice between two rewards (triangle and rectangle were respectively represented immediate reward and delayed reward, and this was balanced between participants); feedback phase was finally showed (the red graph was indicated the participants' choice); choice and feedback phase were lasting for 4 s

先前的研究表明，曲线下面积(area under the curve，AUC)能够很好地反映被试的延迟折扣[27~29]，因此本研究采用AUC作为延迟折扣的指标．AUC是不基于任何模型的一个延迟折扣指标，它能更加直接地反映出个体对延迟奖赏的选择偏好，AUC越大越偏爱延迟奖赏，折扣率也就越小．在计算AUC时，首先算出每个延迟时间上的无差别点(选择延迟奖赏的概率为0.5时的延迟奖赏的数量即为无差别点，使用Logistic回归拟合被试的选择，然后求出在0.5时奖赏数量)，将立即奖赏数量除以无差别点的值作为discounting value(DV)．然后将延迟时间除以最大的延迟时间作为延迟参数．最后x轴为延迟参数，y轴为DV，将每个时间点上的DV值依次连接成梯形，梯形面积之和即为AUC，AUC的值在0~1之间．同时，由于在计算延迟奖赏主观价值时需要用到折扣率k，在本研究也采用双曲线公式$SV=A/(1+kd)$拟合了延迟折扣率k (SV为折扣后的主观价值，A为客观的延迟奖赏，d为延迟时间)．双曲线折扣k同样表征的是对不同奖赏的选择偏好，k值越大，越偏好立即奖赏．在计算k值时，同样先计算出DV值，因为在无差别点时，无差别点的主观价值与立即奖赏数量相等，所以公式$SV=A/(1+kd)$，可变为$SV/A=1/(1+kd)$，而SV/A即为DV值，也即$DV=1/(1+kd)$．最后根据$DV=1/(1+kd)$拟合出一个最佳的k值．将k取对数后，相关分析的结果显示AUC和logk存在很强的负相关($r=-0.955$；$P=0.000$)，表明AUC对延迟折扣率具有良好的表征．

1.4 fMRI数据收集与分析

(ⅰ) 数据收集． 本研究中的脑成像数据是在一台Siemens Trio 3T的磁共振仪器上收集的．功能像的扫描序列为EPI(echo-planar imaging)，扫描参数：echo time=30 ms; repetition time=2 s; field of view=200 mm×200 mm, matrix=64×64; voxel size=3.1×3.1×3; 扫描层数为33; 层厚为3 mm. 对应的3D结构像的扫描序列为梯度回波脉冲序列(DPGR)，扫描参数：repetition time=2530 ms; echo time=3.39 ms; flip angle=9°; field of view=256 mm×256 mm; voxel size=1.3×1.0× 1.3 mm^3; 层数为128，层厚为1.3 mm.

(ⅱ) 预处理． fMRI数据预处理使用的软件为

DPARSF[30], 该软件基于REST[31]和SPM8 (Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, London, UK). 为了排除刚开始扫描时所造成的被试的不适应, 我们剔除了前三个时间点的数据, 以使数据更加稳定. 功能像数据预处理包括时间校正, 头动校正(以第一个volume为基准), 再将头动校正后的图像与其相对应的高分辨率的结构像进行配准, 其次将结构像分割成灰质、白质和脑脊液, 然后根据分割的信息将功能像做空间标准化(MNI空间). 为了进一步排除核磁扫描时所产生的飘移信号, 进行了去线形漂移. 最后对空间标准化后的数据进行平滑(FWHM=8 mm). 将平滑后的数据用于接下来的分析. 接下来的数据分析使用的软件均为SPM8(Wellcome Trust Centre for Neuroimaging, London, UK).

(ⅲ) 参数调节分析. 参数调节分析是在为了定位表征主观价值的脑区, 我们进行了参数调节分析(parametric modulation). 首先根据双曲线折扣函数计算了每个延迟奖赏的主观价值(subjective value, SV; $SV=A/(1+kd)$). 在建立GLM (general linear model)模型时, 我们将每一个阶段作为一个条件纳入到模型中, 共5个, 并且在奖赏呈现阶段加入双曲线公式计算出的每个延迟奖赏的主观价值(*SV*), 并把其作为主观价值的调节参数; 又将6个方向的头动参数纳入到模型中, 以进一步排除头动的影响. 建立模型后, 对每个事件进行参数估计. 在组分析中, 使用单样本*T*检验定位出表征主观价值的脑区, 取$P<0.05$, FWE全脑矫正. 最后, 为了进一步考察表征主观价值的脑区是否是调控方式影响跨期选择的神经基础, 使用ROIs (regions of interest)分析的方法进行验证. 将参数分析中激活的内侧前额叶(peak MNI coordinate: 0 39 −3)、腹侧纹状体(peak MNI coordinate: −9 12 0)、丘脑(peak MNI coordinate: −15 −24 9)和后扣带回(peak MNI coordinate: −3 −33 30)这些脑区的团块作为ROIs. 在接下来的ROIs分析中, 先提取出了ROIs表征主观价值的Beta值, 然后将其作为中介变量, 以检验表征主观价值的脑区是否在调控方式和跨期选择之间起着中介作用.

(ⅳ) 中介分析. 为了进一步检验调控方式影响跨期选择的神经基础, 作者假设感兴趣区的神经活动可能会在调控方式与跨期选择之间起着中介的作用. 因此, 将感兴趣区的神经活动作为中介变量, 进行中介分析. 中介分析使用SPSS中的间接效应检验[32~34]. 该方法首先估计出自变量对因变量的总效应、直接效应和间接效应. 然后使用bootstrap的方法对间接效应进行检验, 给出一个置信区间, 如果该置信区间包含0, 则间接效应不显著, 说明自变量不是通过中介变量来影响因变量的; 而如果该置信区间不包含0, 则间接效应显著, 说明自变量是通过或部分通过中介变量来影响因变量的. 如果排除中介变量的间接效应后, 自变量对因变量的效应依然显著, 则为部分中介; 而如果排除间接效应后, 自变量对因变量的效应不显著, 则为完全中介效应.

(ⅴ) 验证性分析. 上述分析的结果发现, 表征主观价值的内侧前额叶的活动在调控方式与跨期选择之间起着部分的中介作用. 但是以上的数据分析, 根据组分析结果定ROI, 再进行ROI分析, 可能会产生“依赖性”的问题[35,36], 从而高估了单个被试的效应值. 为了排除“依赖性”, 使结果更加可靠, 本研究进行了验证性分析. 由于本研究的样本量较大(共81人), 在验证性分析中使用了分半的方法, 将前一半被试(40人; 男29, 女11; 年龄为17~24岁, 平均为22.2岁)用于定位分析, 将后一半被试(41人; 男12, 女29; 年龄为18~25岁, 平均为20.5岁)用于ROI分析. 在定位分析中, 同样建上述参数分析的GLM, 定位出表征主观价值的脑区. 在ROI分析中, 通过提取定位分析中激活的脑区的Beta值, 将其作为中介变量, 进行中介分析, 以验证表征主观价值的脑区的活动是否为调控方式影响跨期选择的神经基础.

2 实验结果

2.1 行为结果

首先, 为了排除两种调控方式定向可能对跨期选择产生的交互影响, 使用相关的方法考察了“评估”定向和“行动”定向之间的关系. 结果表明, “评估”得分和“行动”得分之间的相关不显著($r=-0.010$; $P=0.927$), 表明二者相互独立. 其次, 为排除调控方式与跨期选择之间可能存在的混淆变量(例如性别、年龄), 本研究考察了“评估”得分、“行动”得分、AUC与年龄、性别之间的关系. 结果表明, 年龄与“评估”得分、“行动”得分以及AUC的相关都不显著($P>0.05$); “评估”得分、“行动”得分以及AUC这3个变量分别在性别上的差异也均不显著($P>0.05$). 这些结果说明, 年龄和性别因素不会影响到调控方式与跨期选择之

间的关系.

为了考察两种调控方式定向对跨期选择产生的影响, 本研究采用两种不同的方法来分析调控方式与跨期选择之间的关系[4,11]. 第一种方法将被试的两种调控方式定向作为连续变量, 分别与AUC进行相关分析. 结果表明, “评估”得分和AUC存在显著的正相关(r=0.304; P=0.006. 如图2(a)); 而“行动”得分和AUC存在显著的负相关(r=–0.332; P=0.002. 如图2(b)). 为进一步检验调控方式定向对跨期选择的影响, 使用回归分析的方法, 将折扣率指标AUC作为因变量, 将“评估”定向得分和“行动”定向得分作为自变量同时进入回归方程中. 回归分析结果发现, 评估定向得分和行动定向得分均能显著的预测折扣率(评估定向: b=0.301, t(78)=2.971, P=0.004; 行动定向: b=–0.329, t(78)=3.148, P=0.002). 第二种方法采用分类比较的方法, 将被试按照其在“评估”和“行动”得分上的相对高低, 先将“评估”和“行动”得分转化成Z分数, 把“评估”得分高于“行动”得分的被试作为评估者(43人), 反之, 把“行动”得分高于“评估”得分的被试作为行动者(38人). 双样本T检验的结果表明, 评估者的AUC显著的高于行动者(t=2.990, df=79, P=0.004. 如图2(c)). 行为结果表明, “评估”定向越强的个体, 其AUC值越大, 折扣率越小; 而“行动”定向越强的个体, AUC值越小, 折扣率越大.

2.2 脑成像结果

为了定位表征主观价值的脑区, 将延迟奖赏的主观价值作为一个参数, 进行参数调节分析. 结果发现, 内侧前额叶(mPFC), 腹侧纹状体(VS), 丘脑(thalamus)和后扣带皮层(PCC)存在显著的正激活(图3及表1). 这些结果表明这些脑区在跨期选择中表征了延迟奖赏的主观价值, 并且表明个体对延迟奖赏的主观价值表征越大, 这些脑区的活动就越强[19,20]. 为进一步考察调控方式定向与主观价值表征网络之间的关系, 进行了ROI分析. 在ROI分析时, 由于丘脑和纹状体是在同一个cluster中, 所以我们选取了一篇做主观价值表征元分析的腹侧纹状体的mask[37]和AAL模板中丘脑的mask, 分别用这两个mask与该cluster取交集, 从而得到纹状体和丘脑的ROI. 分别提取以上激活脑区的Beta值, 其表示的是这些脑区表征主观价值的强弱, 接下来将其与两种调控方式定向分别进行相关分析. 结果发现: 表征主观价值的内侧前额叶的激活水平与“评估”得分呈显著的正相关(r=0.322; P=0.003; Bonferroni校正, 取P小于0.05/4为显著性水平, 下同), 而与“行动”定向得分存在显著的负相关(r=–0.294; P=0.008). 此外, 表征主观价值的其他脑区活动与“评估”得分或“行动”得分的相关均未达到显著水平(表2). 以上结果表明, 调控方式定向与跨期选择中主观价值加工网络之间存在紧密的联系, 且主要表现在表征主观价值的内侧前额叶的活动上.

为进一步验证主观价值表征是否是调控方式影响跨期选择的神经基础, 本研究进行了中介分析. 中介分析使用SPSS中的间接效应检验, 该方法需要估计出总效应、直接效应和间接效应[32~34]. 在中介分析时, 把表征主观价值的内侧前额叶的活动作为中介变量, 以考察调控方式对跨期选择的影响是否通过该中介变量实现的. 通过对间接效应的检验发现, 在

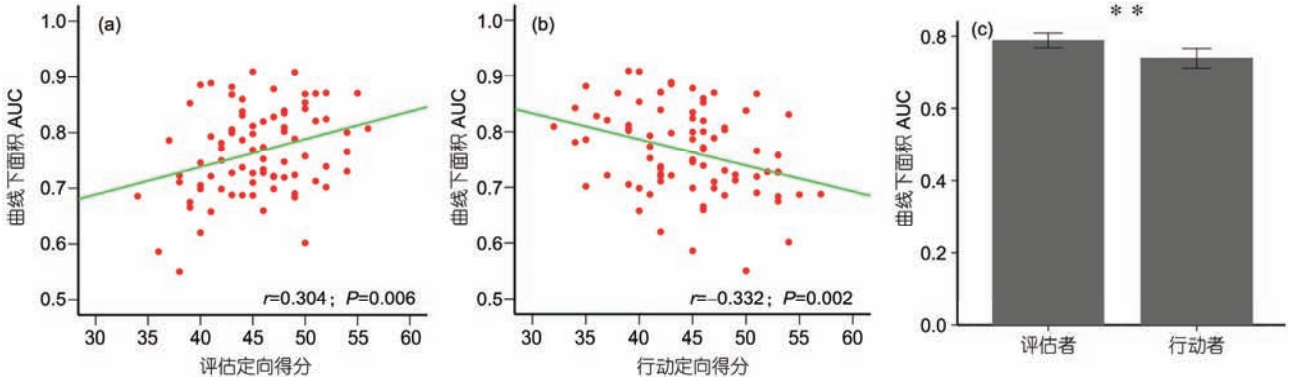


图 2 行为结果. (a) 为评估定向与AUC的相关图; (b) 行动定向得分与AUC的相关图; (c) 为评估者和行动者在AUC上的差异图(**, P<0.01)

Figure 2 Behavioral results. (a) Positive correlation between AUC and assessment orientation; (b) negative correlation between AUC and locomotion orientation; (c) locomotors showed a significantly lower AUC than assessors (**, P<0.01)

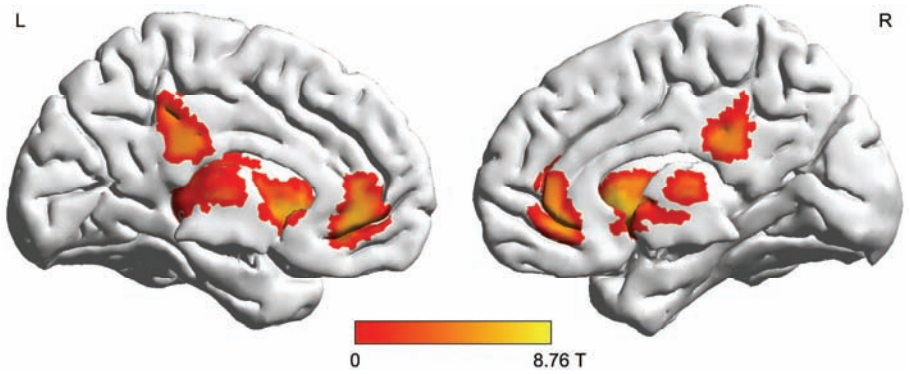


图 3 表征延迟奖赏主观价值的激活脑区(P<0.05, FWE全脑矫正, cluster size>10)

Figure 3 Brain regions that significantly represented the subjective value of delayed reward (P<0.05, FEW corrected, cluster size >10)

表 1 主观价值表征的激活脑区[a)]

Table 1 Activated region that represented the subjective value

脑区	布鲁德曼分区	体素个数	激活最强点T值	x	y	z
双侧前扣带回/额内回	32/10	170	6.535	0	39	–3
双侧尾状核/丘脑		737	8.762	–15	–24	9
双侧后扣带回	23/31	153	5.301	–3	–33	30

a) x, y, z为MNI坐标

表 2 表征主观价值脑区与两种调控方式定向的相关[a)]

Table 2 Correlations between regions that represented the subjective value and regulatory mode orientations

	表征主观价值的脑区			
	内侧前额叶	腹侧纹状体	丘脑	后扣带皮层
“评估”定向	0.322*	–0.015	–0.143	0.089
“行动”定向	–0.294*	–0.119	–0.122	–0.225

a) 数字表示相关系数; * 表示显著性水平P<0.0125 (Bonferroni校正, 0.05/4为显著性水平)

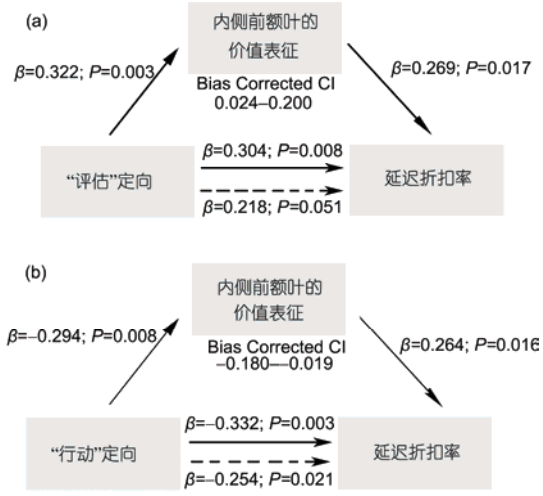


图 4 中介分析结果. (a) 为评估定向对跨期选择影响的中介模型; (b) 为行动定向对跨期选择影响的中介模型

Figure 4 Mediation results. (a) The link between assessment mode and delay discounting was mediated by mPFC which scaled the subjective value; (b) the link between locomotion mode and delay discounting was also mediated by activity of mPFC

“评估”定向对跨期选择的影响中, 表征主观价值的内侧前额叶的间接效应显著(bootstrap=5000, point estimate=0.086, 95% percentile bias corrected CI为0.024~0.200; 如图4(a)). 同样地, 在“行动”定向对跨期选择的影响中, 表征主观价值的内侧前额叶也存在显著的间接效应(bootstrap=5000, point estimate=0.078, 95% percentile bias corrected CI为–0.180–0.019; 如图4(b)). 中介分析的结果表明, 调控方式对跨期选择的影响可能是通过表征主观价值的内侧前额叶的活动实现的.

为验证结果的有效性和可靠性, 采用分半的方法(前半被试用于定位分析, 后半部分被试用于ROI分析)进行验证性分析. 在定位分析中, 同样发现内侧前额叶, 腹侧纹状体, 丘脑和后扣带皮层脑区显著的表征延迟奖赏的主观价值(P<0.01; FDR校正; 见图5及表3). 在ROI分析中, 将表征主观价值的内侧前额叶作为ROI, 将其作为中介变量, 进行中介分析.

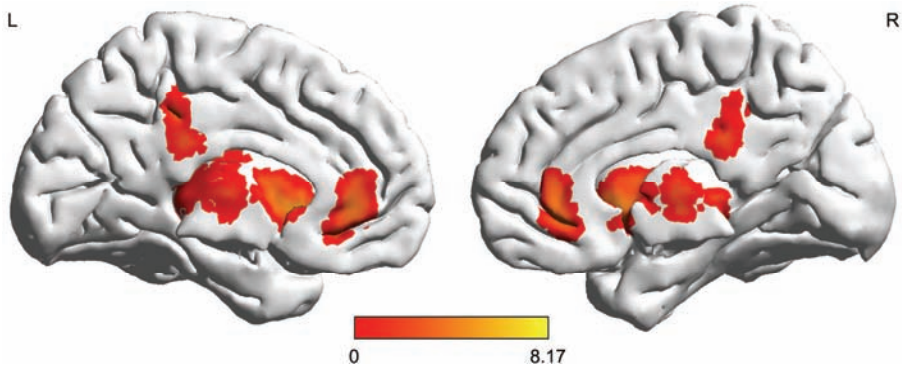


图 5 验证性分析中表征延迟奖赏主观价值的激活脑区(P<0.01, FDR全脑矫正, cluster size > 10)

Figure 5 Brain regions that represented the subjective value of delayed reward in confirmatory analysis (P < 0.05, FEW corrected, cluster size > 10)

表 3 验证性分析中主观价值表征的激活脑区[a)]

Table 3 Activated region that represented the subjective value in confirmatory analysis

脑区	布鲁德曼分区	体素个数	激活最强点T值	x	y	z
双侧前扣带回/额内回	32/24	138	4.368	9	33	–9
双侧尾状核/丘脑		868	8.168	–9	12	0
双侧后扣带回/楔前叶	23/31	119	3.524	–6	–33	33

a) x, y, z为MNI坐标

中介分析同样发现: 在“评估”定向对跨期选择的影响中, 表征主观价值的内侧前额叶的间接效应显著(bootstrap=5000, point estimate=0.086, 95% percentile bias corrected CI为0.016~0.268); 在“行动”定向对跨期选择的影响中, 表征主观价值的内侧前额叶也存在显著的间接效应(bootstrap=5000, point estimate=0.078, 95% percentile bias corrected CI为–0.326~0.011). 验证性分析的结果表明表征主观价值的内侧前额叶的活动可能是调控方式影响跨期选择的神经基础.

3 讨论

本研究使用功能性磁共振成像技术来考察调控方式影响跨期选择的神经基础. 在行为上发现, “评估”定向者比“行动”定向者表现出更小的延迟折扣率; 被试的“评估”定向得分和AUC成正相关, 而“行动”定向得分和AUC成负相关. 行为结果和先前的研究相一致, 表明个体在长久的生活中所形成的调控方式定向能够预测其延迟折扣率的大小. 脑成像结果发现, 表征主观价值的内侧前额叶的活动与“评估”定向得分成显著的正相关, 而与“行动”定向得分成显著的负相关. 更进一步的中介分析表明, 内侧前额叶的主观价值表征在调控方式与跨期选择之间存在显著的部分中介效应. 这些结果说明, 调控方式对跨期选择的影响可能是通过改变延迟奖赏的主观价值来实现的, 而表征主观价值的内侧前额叶则是其神经基础.

行为结果发现“评估”得分与AUC成正相关, 而“行动”得分和AUC成负相关, “评估”定向者比“行动”定向者表现出更小的延迟折扣率, 这与前人的发现相一致. Mannetti等人[10] 通过诱导被试产生特定的调控方式定向, 发现当“评估”定向高于“行动”定向时被试更多的选择具有长远价值的选项, 而当“行动”定向强于“评估”定向时被试更多的选择“短视”的选项. 而新近一项研究使用调控方式问卷测量了被试特质性的调控方式定向, 结果同样发现“评估”定向越强者, 延迟折扣率越小, 而“行动”定向越强者, 延迟折扣率越大[11]. 这些研究都表明“评估”定向者会比“行动”定向者表现出更小的延迟折扣率, 这可能是由于他们对延迟奖赏的价值表征不同所造成的.

本研究的脑成像结果发现, 延迟奖赏主观价值表征的脑区位于内侧前额叶、腹侧纹状体、后扣带回等脑区. 先前的研究表明这些脑区以双曲线的形式编码延迟奖赏的主观价值, 它们的激活量随着延迟奖赏数量的增加而增长, 而随着延迟时间的增加而下降[19,38]. 个体通过比较主观价值的强弱来决定选择立即奖赏还是延迟奖赏的. 此外, 虽然内侧前额叶、腹侧纹状体、丘脑和后扣带皮层这些脑区在跨期选择中起着表征主观价值的作用, 但是有研究表明

它们可能是表征不同属性的主观价值. 不同领域(包括跨期选择、风险决策、模糊决策等)的研究共同表明, 内侧前额叶是整合选项的主观价值神经中枢[19,39~41]. 而腹侧纹状体和丘脑作为皮层下重要的核团, 它们在跨期决策中可能只是加工刺激的奖赏属性, 这2个脑区的活动与冲动性存在紧密的联系[27,42,43]. 虽然后扣带皮层在跨期决策中的作用不清楚, 但是有些研究表明该脑区可能跟自传体记忆有关[44,45]. 因此, 后扣带皮层可能表征的是跟自我相关的价值属性. 同时, 本研究发现, 表征主观价值的内侧前额叶的活动与“评估”得分呈正相关, 而与“行动”得分呈负相关. 先前的研究表明, 高“评估”定向者在做出决策时, 会权衡选项各种属性的价值, 进而做出最优的决策; 而高“行动”定向者只是关注行动的价值, 缺少对不同价值的权衡[12,18]. 这些发现是跟内侧前额叶的价值表征的中枢作用相一致的.

本研究中介分析结果发现, 表征主观价值的内侧前额叶在调控方式与跨期选择之间存在显著的部分中介作用. 内侧前额叶是跨期选择中价值表征网络的核心脑区[19,20]. 而内侧前额叶损伤的研究发现, 受损个体在跨期选择中比正常人表现出更大的延迟折扣率, 这表明该脑区受损会影响到了对延迟奖赏主观价值的表征, 从而做出更多的冲动选择[46]. 此外, 跨领域的研究表明内侧前额叶在决策过程中的作用主要表现在计算各种奖赏或刺激的主观价值, 整合收益与损失[47~53]. 另一方面, 先前的研究已经表明, 两种不同的调控方式在价值表征上存在差异. 当面临选择时, “评估”定向者会优先关注选项的价值而不是选项的可得性, 而”行动”定向者却会优先关注选项可得性而不是价值[12,14]. 这表明“评估”定向者在决策时更加看重事物的价值, 这也符合他们“追求价值最大化”的原则, 即“do the best”; 而“行动”定向者更加看重怎样才能参与到行动中去, 即“Just do it”. 因此, “评估”定向者可能比”行动”定向者更擅长价值加工, 对选项的价值更加敏感, 特别是延迟价值的表征能力更强. 中介分析的结果说明, “评估”定向者和”行动”定向者在跨期选择上的差异可能是由于表征主观价值的内侧前额叶活动上的差异. 也就是说, “评估”定向者对延迟奖赏的主观价值表征更强, 所以更倾向于选择延迟大奖赏; 而”行动”定向者对延迟奖赏的主观价值表征较弱, 因而更多选择及时小奖赏. 因此, 表征主观价值的内侧前额叶可能是调控方式影响跨期选择的神经基础.

另外, 除了价值表征的加工过程外, 跨期决策还涉及到认知控制的加工. Figner等人[54]使用经颅磁刺激(Transcranial Magnetic Stimulation, TMS)技术发现, 当左侧背外侧前额叶(dorsolateral prefrontal cortex, DLPFC)的功能暂时抑制时, 被试会更多地选择立即奖赏, 但却不影响被试对奖赏价值的评估. 该研究表明背外侧前额叶在跨期选择中发挥了认知控制的作用. 另有一些研究表明背外侧前额叶与内侧前额叶之间的功能耦合可能是跨期选择认知控制加工的神经基础[39,49,55]. 也有研究者认为背外侧前额叶参与了跨期选择中决策冲突的过程, 只有在面临选择困难(延迟奖赏数量在无差别点附近)时才发挥认知调控的作用[26,56]. 还有研究表明跨期选择涉及到评估和选择两个阶段, 背外侧前额叶只在选择阶段发挥认知控制的作用[57,58]. 综合来看, 虽然这些研究都表明背外侧前额叶参与了跨期决策中认知控制的加工过程, 但是背外侧前额叶是如何发挥认知控制作用的仍然存在很大的争议. 本研究只探讨了价值表征的加工在调控方式与跨期选择之间的作用, 并没有涉及认知控制的加工. 因此, 将来的研究者可以进一步探讨评估者和行动者在跨期决策中认知控制的加工上是否存在差异.

总之, 本研究使用fMRI技术发现, 调控方式对跨期选择的影响可能是通过改变延迟奖赏的主观价值来实现的, 而表征主观价值的内侧前额叶则是其神经基础. 本研究将人格特质中的调控方式和跨期选择联系起来, 并提出了一种调控方式影响跨期决策的神经解释, 这对于从特质性角度理解跨期选择的认知神经机制具有重要的科学价值. 同时, 本研究对于延迟折扣的可塑性也具有重要的启示作用, 具有相当重要的实践意义. 有研究表明可以通过行为诱导个体产生特定的调控方式定向[17,59]. 比如, 有研究者让被试想像个体所经历的典型的高“评估”定向的行为或高“行动”定向的行为, 发现可以通过这种方式诱导被试产生高“评估”定向或高“行动”定向. 由于高“评估”定向者在做出决策时会“三思而后行”, 对延迟奖赏的价值表征更强, 而高“行动”定向者因缺乏衡量各选项的优劣而会做出一些冲动的选择. 因此, 将来的研究者可以通过训练个体产生较高的“评估”定向, 增强对延迟奖赏的价值表征, 从而使其更加“目光远大”.

参考文献

1 Frederick S, Loewenstein G, O'donoghue T. Time discounting and time preference: A critical review. J Econ Lit, 2002, 40: 351–401
2 Yi R, Gatchalian K M, Bickel W K. Discounting of past outcomes. Exp Clin Psychopharmacol, 2006, 14: 311–317
3 Baumeister R F, Heatherton T F. Self-regulation failure: An overview. Psychol Inq, 1996, 7: 1–15
4 Kim B K, Zauberman G. Perception of anticipatory time in temporal discounting. J Neurosci Psychol Econ, 2009, 2: 91–101
5 Shamosh N A, Gray J R. Delay discounting and intelligence: A meta-analysis. Intell, 2008, 36: 289–305
6 Peters J, Büchel C. Episodic future thinking reduces reward delay discounting through an enhancement of prefrontal-mediotemporal interactions. Neuron, 2010, 66: 138–148
7 Kirby K N. One-year temporal stability of delay-discount rates. Psychon Bull Rev, 2009, 16: 457–462
8 Ohmura Y, Takahashi T, Kitamura N, et al. Three-month stability of delay and probability discounting measures. Exp Clin Psychopharmacol, 2006, 14: 318
9 Anokhin A P, Golosheykin S, Grant J D, et al. Heritability of delay discounting in adolescence: A longitudinal twin study. Behav Genet, 2011, 41: 175–183
10 Mannetti L, Leder S, Insalata L, et al. Priming the ant or the grasshopper in people's mind: How regulatory mode affects inter-temporal choices. Eur J Soc Psychol, 2009, 39: 1120–1125
11 Mischel W, Shoda Y, Rodriguez M L. Delay of gratification in children. Science, 1989, 244: 933–938
12 Kruglanski A W, Tompson E P, Higgins E T, et al. To "do the right thing" or to "just do it": Locomotion and assessment as distinct self-regulatory imperatives. J Pers Soc Psychol, 2000, 79: 793
13 Higgins E T, Kruglanski A W, Pierro A. Regulatory mode: Locomotion and assessment as distinct orientations. Adv Exp Soc Psychol, 2003, 35: 293–344
14 Kruglanski A W, Orehek E, Higgins E T, et al. Assessment and Locomotion as Independent Determinants in Goal Pursuit. Handbook of Personality and Self-regulation. London: Wiley-Blackwell Press, 2009. 375–402
15 Florack A, Keller J, Palcu J. Regulatory focus in economic contexts. J Econ Psychol, 2013, 38: 127–137
16 Panno A, Pierro A, Lauriola M. Self-regulation predicts risk-taking through people's time horizon. Int J Psychol, 2014, 49: 211–215
17 Pierro A, Leder S, Mannetti L, et al. Regulatory mode effects on counterfactual thinking and regret. J Exp Soc Psychol, 2008, 44: 321–329
18 Avnet T, Higgins E T. Locomotion, assessment, and regulatory fit: Value transfer from "how" to "what". J Exp Soc Psychol, 2003, 39: 525–530
19 Kable J W, Glimcher P W. The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. Nat Neurosci, 2007, 10: 1625–1633
20 Kable J W, Glimcher P W. An "as soon as possible" effect in human intertemporal decision making: Behavioral evidence and neural mechanisms. J Neurophysiol, 2010, 103: 2513–2531
21 Ballard K, Knutson B. Dissociable neural representations of future reward magnitude and delay during temporal discounting. NeuroImage, 2009, 45: 143–150
22 Luo S, Ainslie G, Pollini D, et al. Moderators of the association between brain activation and farsighted choice. NeuroImage, 2012. 59: 1469–1477
23 Sripada C S, Gonzalez R, Phan K L, et al. The neural correlates of intertemporal decision-making: Contributions of subjective value, stimulus type, and trait impulsivity. Hum Brain Mapp, 2011, 32: 1637–1648
24 Yue L Y, Feng T Y, Li S S, et al. The differences of individuals having different regulatory modes on counterfactual thinking: Evidence from an ERP study (in Chinese). Acta Psychol Sin, 2011. 43: 274–282 [岳玲云, 冯廷勇, 李森森, 等. 不同调控方式个体反事实思维上的差异: 来自 ERP 的证据. 心理学报, 2011, 43: 274–282]
25 Bornovalova M A, Fishman S, Strong D R, et al. Borderline personality disorder in the context of self-regulation: Understanding symptoms and hallmark features as deficits in locomotion and assessment. Pers Individ Dif, 2008, 44: 22–31
26 McClure S M, Laibson D I, Loewenstein G, et al. Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. Science, 2004, 306: 503–507
27 Jimura K, Chushak M S, Braver T S. Impulsivity and self-control during intertemporal decision making linked to the neural dynamics of reward value representation. J Neurosci, 2013, 33: 344–357
28 Myerson J, Green L, Warusawitharana M. Area under the curve as a measure of discounting. J Exp Anal Behav, 2001, 76: 235–243
29 Shamosh N A, DeYoung C G, Green A E, et al. Individual differences in delay discounting relation to intelligence, working memory, and anterior prefrontal cortex. Psychol Sci, 2008, 19: 904–911
30 Yan C G, Zang Y F. DPARSF: a MATLAB toolbox for "pipeline" data analysis of resting-state fMRI. Front Syst Neurosci, 2010, 4: 13

31 Song X W, Dong Z Y, Long X Y, et al. REST: A toolkit for resting-state functional magnetic resonance imaging data processing. PLoS One, 2011, 6: e25031

32 Hayes A F. Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis: A Regression-based Approach. New York: Guilford Publications, 2013

33 Hayes A F. Beyond Baron and Kenny: Statistical mediation analysis in the new millennium. Commun Monogr, 2009, 76: 408–420

34 Preacher K J, Hayes A F. Asymptotic and resampling strategies for assessing and comparing indirect effects in multiple mediator models. Behav Res Methods, 2008, 40: 879–891

35 Vul E, Harris C, Winkielman P, et al. Puzzlingly high correlations in fMRI studies of emotion, personality, and social cognition. Perspect Psychol Sci, 2009, 4: 274–290

36 Kriegeskorte N, Simmons W K, Bellgowan P S, et al. Circular analysis in systems neuroscience: the dangers of double dipping. Nat Neurosci, 2009, 12: 535–540

37 Bartra O, McGuire J T, Kable J W. The valuation system: A coordinate-based meta-analysis of BOLD fMRI experiments examining neural correlates of subjective value. NeuroImage, 2013, 76: 412–427

38 Peters J, Büchel C. The neural mechanisms of inter-temporal decision-making: Understanding variability. Trends Cogn Sci, 2011, 15: 227–239

39 Hare T A, Hakimi S, Rangel A. Activity in dlPFC and its effective connectivity to vmPFC are associated with temporal discounting. Front Neurosci, 2014, 8: 50

40 Pine A, Seymour B, Roiser J P, et al. Encoding of marginal utility across time in the human brain. J Neurosci, 2009, 29: 9575–9581

41 Botvinick M M. Conflict monitoring and decision making: Reconciling two perspectives on anterior cingulate function. Cogn Affect Behav Neurosci, 2007, 7: 356–366

42 Kirby K N, Petry N M. Heroin and cocaine abusers have higher discount rates for delayed rewards than alcoholics or non-drug-using controls. Addiction, 2004, 99: 461–471

43 Hoffman W F, Moore M, Templin R, et al. Neuropsychological function and delay discounting in methamphetamine-dependent individuals. Psychopharmacology, 2006, 188: 162–170

44 Petry N M. Delay discounting of money and alcohol in actively using alcoholics, currently abstinent alcoholics, and controls. Psychopharmacology, 2001, 154: 243–250

45 Monterosso J, Ainslie G. Beyond discounting: Possible experimental models of impulse control. Psychopharmacology, 1999, 146: 339–347

46 Sellitto M, Ciaramelli E, Di P G. Myopic discounting of future rewards after medial orbitofrontal damage in humans. J Neurosci, 2010, 30: 16429–16436

47 Basten U, Biele G, Heekeren H R, et al. How the brain integrates costs and benefits during decision making. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 21767–21772

48 Clithero J A, Smith D V, Carter R M, et al. Within-and cross-participant classifiers reveal different neural coding of information. NeuroImage, 2011, 56: 699–708

49 Hare T A, Camerer C F, Rangel A. Self-control in decision-making involves modulation of the vmPFC valuation system. Science, 2009, 324: 646–648

50 Park S Q, Kahnt T, Rieskamp J, et al. Neurobiology of value integration: When value impacts valuation. J Neurosci, 2011, 31: 9307–9314

51 Boorman E D, Behrens T E, Woolrich M W, et al. How green is the grass on the other side? Frontopolar cortex and the evidence in favor of alternative courses of action. Neuron, 2009, 62: 733–743

52 Tom S M, Fox C R, Trepel C, et al. The neural basis of loss aversion in decision-making under risk. Science, 2007, 315: 515–518

53 Wang Q, Luo S, Monterosso J, et al. Distributed value representation in the medial prefrontal cortex during intertemporal choices. J Neurosci, 2014, 34: 7522–7530

54 Figner B, Knoch D, Johnson E J, et al. Lateral prefrontal cortex and self-control in intertemporal choice. Nat Neurosci, 2010, 13: 538–539

55 Steinbeis N, Haushofer J, Fehr E, et al. Development of behavioral control and associated vmPFC–DLPFC connectivity explains children's increased resistance to temptation in intertemporal choice. Cereb Cortex, 2014, 26: 32–42

56 Li N, Ma N, Liu Y, et al. Resting-state functional connectivity predicts impulsivity in economic decision-making. J Neurosci, 2013, 33: 4886–4895

57 Liu L, Feng T, Wang J, et al. The neural dissociation of subjective valuation from choice processes in intertemporal choice. Behav Brain Res, 2012, 231: 40–47

58 Luo S, Ainslie G, Giragosian L, et al. Behavioral and neural evidence of incentive bias for immediate rewards relative to preference-matched delayed rewards. J Neurosci, 2009, 29: 14820–14827

59 Panno A, Lauriola M, Pierro A. Regulatory mode and risk-taking: The mediating role of anticipated regret. PLoS One, 2015, 10: e0143147

The neural basis of the effect of regulatory mode on intertemporal choice: the mediating role of mPFC

GUO YiQun[1] & FENG TingYong[1,2]

[1] *Research Center of Psychology and Social Development, Faculty of Psychology, Southwest University, Chongqing 400715, China;*
[2] *Key Laboratory of Cognition and Personality of Ministry of Education, Southwest University, Chongqing 400715, China*

Decisions that involve tradeoffs between outcomes that occur at different points in time are called intertemporal choice. A consistent finding regarding intertemporal choice is that delayed outcomes are discounted relative to immediate ones. The extent of preference for delayed rewards is captured by delay discounting rate, which expresses that the subjective value of a delayed reward declines as a function of delay. It is generally thought that people are fairly stable in their intertemporal preference, and it has been suggested that they may have a genetic component. Previous studies have shown that the chronic regulatory mode orientation can affect intertemporal choice. Steeper delay discounting is related to lower assessment orientation, while related to higher locomotion orientation. However, the cognitive and neural mechanism of the effect of regulatory mode on intertemporal choice is still unclear. Recent neuroimaging studies have identified a valuation network (such as ventral striatum, posterior cingulate cortex, and medial prefrontal cortex) in delay discounting, which is the neural computation and representation of the subjective values of rewards. Thus, we investigated the role of the valuation network in the relation between regulatory mode and delay discounting.

In the present study, we used functional magnetic resonance imaging (fMRI) to investigate the neural basis of this effect. We used two different approaches to examine the link between regulatory mode and delay discounting. First, we split participants into two groups of assessors and locomotors according to relative strength of regulatory orientations, and compared the difference between the two groups. We found that locomotors showed a steeper delay discounting than assessors. Our second approach examined this effect in a continuous rather than a categorical manner. Correlation results showed that delay discounting was negatively correlated with assessment scores, but positively correlated with locomotion scores. These behavioral findings suggest that individual differences in regulatory mode could predict delay discounting, and are consistent with previous studies.

Our neuroimaging results first indicated that neural activity in medial prefrontal cortex (mPFC), ventral striatum (VS), thalamus, and posterior cingulate cortex (PCC) tracks the subjective value of delayed rewards. We next computed the correlations between neural activity in these regions and regulatory mode. Correlation results showed that only the activity in mPFC which scales the subjective value was positively correlated with assessment scores, but negatively correlated with locomotion scores. Furthermore, mediation analysis showed that neural activity in mPFC partially mediated the link between regulatory mode and delay discounting. These results suggested that regulatory mode is associated with intertemporal choice in part because of processes instantiated in mPFC, a region known to represent the subjective value.

In short, we found that the effect of two distinct regulatory modes on delay discounting have different patterns, and were mediated by neural activity in mPFC which represents subjective value of delayed reward. The present study indicated that mPFC is a neural locus for determining individual differences in delay discounting, and provides neural basis for explaining the association between regulatory mode and delay discounting.

intertemporal choice, regulatory mode, assessment mode, locomotion mode, medial prefrontal cortex (mPFC), functional magnetic resonance imaging (fMRI)

doi: 10.1360/N972016-00361