

* 学术论文 *

情绪控制对奖赏加工的影响：来自 ERP 的证据*

朱湘茹¹ 张慧君¹ 吴婷婷¹ 罗跃嘉^{1,2**}

1. 认知神经科学与学习国家重点实验室(北京师范大学), 北京 100875; 2. 中国科学院心理健康重点实验室, 北京 100101

摘要 对奖赏大小的评估与为了得到该奖赏需要付出努力的大小成反比, 这就是努力打折效应(effort discounting). 在冲突任务中, 不一致的相对一致的试次需要更多的心理努力来控制冲突. 文中利用情绪性面孔一词任务, 通过设置一致性与奖赏大小的关系, 考察了情绪冲突控制影响奖赏加工的时间进程. 结果发现, 高奖赏相对于低奖赏在前部额叶中线位置上诱发了更负的 N1 成分. 冲突控制对奖赏加工的影响体现在: 不一致刺激之后相对于一致刺激之后的高奖赏, 会诱发出更负的 N300-450 成分. 对高奖赏条件下不一致与一致刺激之后的 N300-450 成分的差异波进行偶极子溯源分析表明, 该成分的产生与前扣带回有关. 这个结果表明, 情绪冲突控制的确会影响奖赏加工, 而且前扣带回在其中可能起着重要作用.

关键词 奖赏 情绪冲突 反馈评价 事件相关电位

奖赏一般是指能够强化某种行为的刺激物, 追求奖赏对于人类的生存和发展都有很重要的意义. 动物的奖赏研究发现大脑的多个结构都与奖赏加工有关, 例如单细胞记录研究发现灵长类动物的眶额回(Oorbitofrontal Cortex, OFC)在奖赏加工中具有关键作用^[1,2]. 此外, 一些皮层下的神经核团在奖赏加工中也有重要作用^[3]. 人类的神经成像研究也发现大脑的多个结构都与奖赏加工有关, 主要包括杏仁核(amygdala)、前扣带回(anterior cingulate cortex, ACC)和眶额回等^[4-6]. 人类的奖赏加工机制已经成为近年来一个研究热点.

奖赏加工并不是孤立的或者绝对的, 它会受到参考因素的影响, 是一个相对的过程^[7]. 为了得到某个奖赏需要付出的心理努力, 就是奖赏加工过程中一个很重要的参考因素: 对奖赏价值的评估往往与需要付出的努力的大小有关^[8]. 关于奖赏与心理努力的关系, 生活中最明显一个类比就是工资与辛

劳的关系, 如果工资太低, 与付出的辛劳不成比例, 人们一般都会拒绝这个工资标准. 心理学与经济学领域的一些研究都表明, 对奖赏价值的评估与为了得到该奖赏需要付出努力的大小成反比, 这就是所谓的努力打折效应(effort discounting), 即奖赏的价值要根据付出努力的大小来打折^[9,10]. 这种打折效应在人类被试上主要是用跨期选择(inter-temporal choice)任务来做的^[11,12]. 大部分研究都发现, 人类和动物都偏好那些费力小收益大的选择^[13,14], 不过也有一些例外^[15,16].

关于动物奖赏与努力关系的研究大多是从神经递质和损伤方面着手. 在动物研究中, 多巴胺被认为在奖赏—努力的关系分析中扮演重要角色^[17,18]. 此外, 也有动物研究发现前扣带回在奖赏—努力的关系分析中起着重要作用^[19,20]. 以上这些发现都是来自于动物研究, 以人类为对象的奖赏—努力研究还很少见. 现有的一些以人类对象的

2009-03-16 收稿, 2009-04-27 收修改稿

* 教育部创新团队(批准号: IRT0710)和国家自然科学基金(批准号: 30670698)资助项目

** 通信作者, E-mail: luoyj@bnu.edu.cn

奖赏—努力关系分析主要是来自于脑损伤病人和跨期选择研究。例如腹内侧前额叶(ventral medial prefrontal cortex)损伤(包括前扣带回)病人在决策任务中有冲动行为的倾向^[21],关于跨期选择的fMRI研究发现当被试选择接受一个可以立即得到的小奖赏并拒绝一个在未来得到的大奖赏的情况下,前扣带回被激活^[11]。从目前的研究来看,主要是在决策领域考察奖赏—努力的关系,尚无在传统的认知心理学框架下考察奖赏—努力的关系。

本研究的目的是采用利用脑电技术,考察情绪冲突控制任务中的心理努力影响奖赏加工的时间进程。我们利用情绪性的面孔—词 Stroop 范式来考察情绪冲突。该任务在国内外已经得到了广泛的使用^[22,23],主要的研究结果发现背侧前扣带回(dorsal ACC)负责情绪冲突的监测,而腹侧前扣带回(rostral ACC)负责情绪冲突的控制。这里的控制是指在一个不一致的试次之后,被试会提高控制水平,从而减少下一个不一致试次中的干扰,腹侧前扣带回参与了这个控制过程。先前的研究已经公认^[24,27],Stroop 任务中不一致的条件下任务更难,被试需要克服无关信息的干扰,并且这种干扰主要是反应水平上的,所以被试需要投入更多的控制资源,需要付出更多的心理努力。所以,利用情绪冲突控制任务来考察奖赏—努力的关系得到两个方面的支持:首先,在奖赏—努力分析中有重要作用的前扣带回在冲突控制任务中也起着非常重要的作用;其次,前扣带回不仅与控制过程密切相关,它与主观努力的体验也密切相关^[28]。

在本研究中我们利用反馈相关负波(FRN)作为奖赏加工的标记^[29]。一般认为,反馈负波是在被试看到没有预期到的负性结果时出现的,它反映了对奖赏早期的自动加工过程。虽然关于反馈相关负波的心理机制尚存在争论^[30-33],但是它已经成为奖赏研究中使用最为广泛的脑电指标。反馈负波的脑电溯源结果一般表明它与前扣带回的功能密切相关^[34]。从这里可以看出,对反馈奖赏的加工与冲突的控制都与前扣带回密切相关,所以情绪冲突的控制很可能对奖赏加工产生一定的影响。本研究中,我们通过设置一致试次和不一致试次与不同大小奖赏的关系来考察情绪冲突的控制对奖赏加工的影响。

1 材料和方法

1.1 被试

被试为大学生16名(男性8人,女性8人),年龄在19—25岁之间,平均年龄21.6岁;均为右利手,双眼视力或矫正视力正常,均未参加过类似实验。无生理或心理方面的疾病,适合参加脑电实验。实验后给予适当报酬,报酬为被试在实验中得到的奖赏总量(不打折)加上一定的基数。

1.2 刺激

刺激采用中国情绪图片库中愉快和恐惧图片各10张,每种表情图片中男女各半^[35]。一个红色的情绪词“恐惧”或者“愉快”写在情绪面孔上。情绪词的含义与面孔的表情可能是相符的也可能是相反的,相符的为一致性试次,相反的为不一致试次,表示了情绪系统内部的冲突。图片的大小为5cm×7cm,情绪字的大小约为1.5cm×1.5cm。奖励的图片有两种,一种是一分硬币,一种是一角硬币。

1.3 实验程序

要求被试根据面孔的表情进行判断,如果是愉快表情就用右手食指按B键,如果是恐惧表情就用右手中指按N键。刺激的呈现顺序在反应键之间做了平衡,在一致与不一致的试次之间也做了平衡。

每个正确反应都会有一个奖励,错误的反应不给奖励。实验分为两个Block。在第一个Block里,每对一个一致试次反应正确,那么在反应之后呈现一个一分硬币的图片,每对一个不一致的试次反应正确,那么在反应之后呈现一个一角硬币的图片。在第二个Block里,奖励与一致性的关系是反转过来的,即每对一个一致试次反应正确,那么在反应之后呈现一个一角硬币的图片,每对一个不一致的试次反应正确,那么在反应之后呈现一个一分硬币的图片。每个Block开始前向被试说明该Block的奖励关系,强调在做情绪判断任务的时候不要去关心奖赏,但是在做完反应之后,一定要去注意屏幕上的奖赏图片,要去关心自己刚才的反应得到的奖励。

如图1所示,每个试次先呈现一个注视点500ms,间隔400—600ms之后呈现表情图片,呈现时间为1s,被试按键反应后间隔400—600ms后,硬币图片会呈现500ms,之后1800—2300ms后开始下一

个试次. 每个 Block 内有 148 个试次, 一致和不一致的各半. 两个 Block 的顺序在被试间进行平衡.

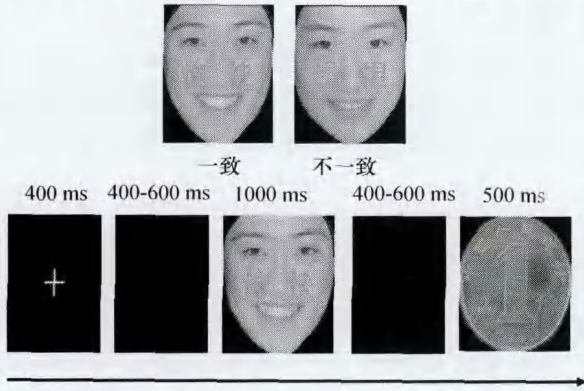


图1 刺激图片示例及实验流程图

1.4 脑电记录

使用美国 Neuroscan 公司生产的的 ERPs 记录与分析系统, 按国际 10—20 系统扩展的 64 导电极帽记录 EEG, 接地点位于在 FPz 和 Fz 连线的中点上, 双眼外侧安置电极记录水平眼电 (HEOG), 左眼上下安置电极记录垂直眼电 (VEOG). 以右耳乳突为参考电极点, 闲置原有的另一只参考电极, 取 AF3 电极连于右乳突, 形成单极导联. 在离线数据处理时以左右两耳乳突的平均电位为参考. 每个电极处的头皮电阻保持在 5 k Ω 以下. 连续记录时滤波带通为 0.05—100 Hz, 采样频率为 500 Hz/导. 对 EEG 数据进行离线处理时, 根据被试眼动的大小, 校正 VEOG 和 HEOG, 并充分排除其他伪迹, 离线滤波的低通为 30 Hz (24 dB/oct). 而波幅大于 $\pm 50 \mu\text{V}$ 者被视为伪迹自动剔除. 根据文献普遍采用的标准以及本实验中被试反应的情况, 选择反馈刺激出现后 1000 ms 为分析时程 (epoch), 刺激出现前 200 ms 作为基线.

根据已有的研究结果, 本研究主要分析的成分为 FRN. 参照所有被试多次叠加后的波形图发现, FRN 主要出现在 300 ms 至 450 ms 之间, 出现在额部中线位置. 因此, 决定取 300—450 ms 时间窗口内的平均波幅作为 FRN 的波幅, 共有两个点 (Fz, FCz) 进入统计分析, 分别使用 SPSS 16.0 统计软件包对 FRN 的波幅做 2 (一致性: 一致和不一致) \times 2 (奖励因素: 一分和一角) \times 3 (电极因素: Fz 和 FCz) 三因素重复测量分析, 方差分析中的自由度采用 Greenhouse Geisse 法进行校正.

使用 BESA 5.1.2 (德国 MEGIS Software GmbH) 软件, 采用偶极子拟合的方法在四壳球模型中, 将不一致得一角的情况下一角硬币诱发的 ERP 减去一致得一角情况下一角硬币诱发的 ERP, 对得到的差异波进行源定位分析. 偶极子位置的三维坐标以 Talarich 坐标系作为参考.

2 结果

2.1 行为结果

反应时分析发现, 冲突的主效应非常显著 ($F(1, 15) = 58.87, p < 0.001$), 奖励的主效应不显著 ($F(1, 15) = 0.23, p = 0.64$), 冲突与奖励的交互作用显著 ($F(1, 15) = 6.58, p = 0.02$). 对于一致的试次, 奖励为一角时的反应快于奖励为一分时的反应 ($F(1, 15) = 7.40, p = 0.02$), 分别为 587 ms 和 616 ms. 对于不一致的试次, 奖励为一角时的反应慢于奖励为一分时的反应 ($F(1, 15) = 6.55, p = 0.02$), 分别为 657 ms 和 625 ms. 对错误率的分析发现, 冲突的主效应非常显著 ($F(1, 15) = 121.35, p < 0.001$). 在一致试次得一分和不一致试次得一角的条件下, 一致试次和不一致试次的正确率分别为 94.8% 和 91.7%; 在一致试次得一角和不一致试次得一分的条件下, 一致试次和不一致试次的正确率分别为 95.9% 和 92.5%. 奖励的主效应不显著 ($F(1, 15) = 0.15, p = 0.70$), 冲突与奖励的交互作用不显著 ($F(1, 15) = 2.12, p = 0.17$). 干扰效应的大小在两个奖赏 Block 里面没有显著差异.

2.2 脑电结果

根据总平均图结果, 两个条件均诱发了明显的 N1 和 N300-450 成分 (图 2), 下面对这两个主要成分做统计检验.

2.2.1 N1 成分的波幅和潜伏期 N1 成分的波幅: 三因素的重复测量方差分析结果表现为, 冲突的主效应不显著 ($F(1, 15) = 0.23, p = 0.64$), 奖励的主效应显著 ($F(1, 15) = 9.35, p = 0.008$), 低奖赏条件下 N1 的波幅显著大于高奖赏条件. 电极的主效应不显著 ($F(5, 75) = 0.40, p = 0.54$). 冲突与奖励的主效应不显著 ($F(1, 15) = 0.63, p = 0.44$). 冲突与电极之间的交互作用不显著 ($F(5, 75) =$

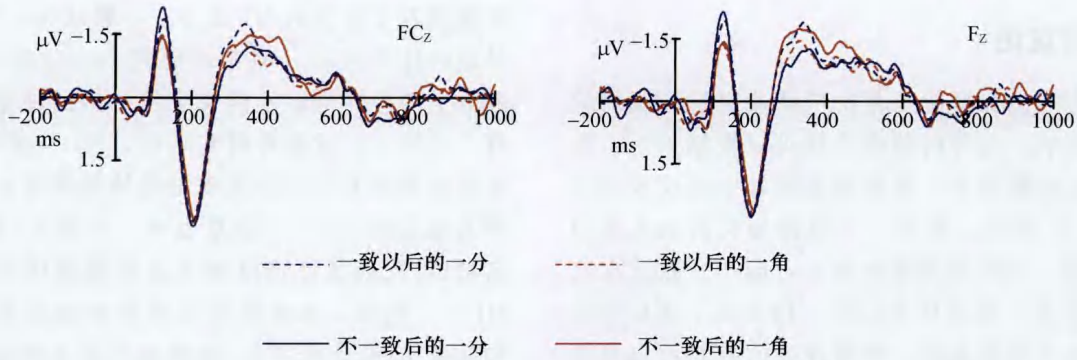


图2 额叶中线位置上两个电极的总平均图

0.01, $p = 0.94$). 奖励与电极之间的交互作用不显著($F(5, 75) = 0.07, p = 0.80$). 三因素交互作用不显著($F(5, 75) = 0.60, p = 0.45$).

N1成分的潜伏期: 三因素的重复测量方差分析结果显示, 冲突的主效应不显著($F(1, 15) = 0.67, p = 0.43$), 奖励的主效应不显著($F(1, 15) = 0.12, p = 0.73$). 电极的主效应边缘显著($F(5, 75) = 4.07, p = 0.06$). 冲突与奖励的交互作用不显著($F(1, 15) = 1.16, p = 0.30$). 冲突与电极之间的交互作用不显著($F(5, 75) = 0.04, p = 0.85$). 奖励与电极之间的交互作用边缘显著($F(5, 75) = 3.50, p = 0.08$). 三因素交互作用不显著($F(5, 75) = 0.08, p = 0.79$).

2.2.2 N300-450成分的波幅 三因素的重复测量方差分析结果如下: 冲突的主效应不显著($F(1, 15) = 0.60, p = 0.45$), 奖励的主效应也不显著($F(1, 15) = 1.55, p = 0.23$). 电极的主效应也不显著($F(5, 75) = 0.56, p = 0.47$). 冲突与奖励的交互作用显著($F(1, 15) = 7.39, p = 0.02$). 冲突与电极之间的交互作用不显著($F(5, 75) = 0.18, p = 0.68$). 奖励与电极之间的交互作用边缘显著($F(5, 75) = 3.95, p = 0.07$), 三因素交互作用不显著($F(5, 75) = 0.28, p = 0.61$). 简单效应分析结果表明, 在奖励为一分的情况下, 冲突效应边缘显著($F(1, 15) = 3.52, p = 0.08$), 一致条件下N300-450成分的波幅显著大于不一致条件下的; 奖励为一角的情况下, 冲突效应很显著($F(1, 15) = 8.39, p = 0.01$), 不一致条件下N300-450成分的波幅显著大于一致条件下的, FCz位置上的效应最

大($F(1, 15) = 10.85, p = 0.005$).

2.3 偶极子溯源分析结果

由于本研究主要的关注点在于考察同为得一角, 不一致试次与一致试次对反馈负波的影响, 所以只对不一致得一角与一致得一角两种条件的差异波做了溯源分析. FRN: 采用不一致条件得一角减去一致条件得一角的差异波作为分析对象, 重建反馈信息呈现后300—450 ms时间窗口内的源. 在采用一个偶极子定位的结果残差非常大的情况下, 用两个偶极子进行溯源分析, 根据主成分分析显示, 两个成分一起可以解释绝大多数的变异. 两个偶极子分别定位在左半球前扣带回(left ACC, Talairach 坐标: -21, 7, 47, Brodmann32区)和海马旁回或者边缘叶附近(right sub-gyral, Talairach 坐标: 15, -10, -10, Brodmann28区)(见图3), 残差为13.131%.

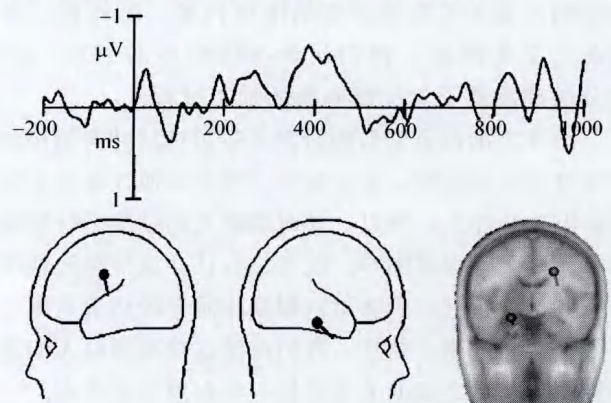


图3 不一致得一角减去一致得一角的差异波及其在300—450 ms时间窗口内的偶极子溯源分析图

电极点FCz, 左侧表示的是靠近前扣带回的偶极子, 中间表示的是靠近海马旁回的偶极子

3 结论与讨论

本研究的主要目的是考察情绪冲突的控制对奖赏加工的影响。主要的脑电结果可以概括如下：首先，一分奖励相对于一角奖励在额叶中线位置诱发了更负的N1成分；其次，一致性与奖赏的关系可以影响对同一个奖励刺激的加工，即不一致试次之后的一角相比一致试次之后的一角诱发了更负的反馈负波。这个结果表明，情绪冲突的控制可以显著地影响大脑的奖赏加工过程。从作者的了解来看，这是情绪控制影响奖赏加工的第一个研究。

需要指出的是，本研究中反馈相关负波的基本模式与经典反馈相关负波的模式并不相同^[36-38]。在传统的反馈相关负波研究中，被试做完反应之后还不能立即知道自己的奖励是多少。但是在本研究中，由于被试事先明白刺激类型与奖励的关系，被试在做完反应之后就己经很清楚自己要得到的奖励是多少，所以本研究中被试对反馈刺激的期待和加工很可能不同于经典反馈负波产生的情景。这种差异很可能是本研究中反馈相关负波的模式与传统的反馈相关负波存在差异的原因。但是，虽然存在这种差异，我们在实验开始之前强调被试要关注自己的奖励，要求他们注意奖励图片，所以在本研究中，被试的确对奖励刺激进行了认真加工。本研究中反馈相关负波对不同的条件有不同的敏感性，这也支持了被试在反应之后认真加工了奖赏刺激。再考虑到反馈相关负波出现的电极位置、时间窗口与溯源结果等因素，我们认为本研究中的N300-450成分的确反映了对反馈刺激的加工过程。

由于之前没有类似的研究考察过情绪冲突的控制对奖赏加工的影响，也没有研究考察其他控制任务如何影响奖赏加工，所以，要对本研究的结果进行准确解释的确面临很多困难。但是结合社会认知神经科学的一些相关研究，仍然可以根据本研究的结果做出一些理论上的推测，并且，我们相信这些推测对人们理解控制与奖赏之间的关系提供一些有意义的线索。

首先讨论一下N1在本研究中的意义。本研究中，加工一分硬币图片比加工一角图片在额叶中线

位置诱发了更负的N1成分。一般认为，N1反映了早期的注意过程。但是本研究中一分和一角在N1成分上的差异肯定不能完全从一般的注意角度来解释。实际上，近来有研究表明，N1与情绪性有关。虽然有些研究并没有发现负性情绪相比正性情绪会诱发更负的N1^[39]，但是也有一个研究(采用了110名被试)发现负性情绪相比正性情绪诱发了更负的N1^[40]。同样，也有研究发现在比较复杂的社会认知任务中(合作任务)，在被试与对家利益相互冲突的情况下，相比被试与对家互利的情况，前者会诱发一个更负的N1^[41]。这些结果表明，N1与负性的和需要回避的刺激或情境有关。在N1阶段，被试对硬币的加工还只是一个早期的分类过程^[42]，本研究中的N1效应可能与被试对低奖赏刺激的回避有关。在本研究中，一分相对于一角而言，从绝对数量上相差很多，从相对比例上也很小，所以，对于被试来说，一分也可以看做是一个负性的反馈，至少是一个吸引力很小的奖励，这就导致了被试在加工一分硬币的时候，很可能产生了负性的或者回避的反应，所以一分硬币诱发了更负的N1。

本研究还发现刺激的一致性对奖赏加工的影响出现在300—450ms的时间段。对于同一个一分图片，当它出现在一致刺激之后与出现在不一致刺激之后，虽然存在差异，但是其差异只是边缘显著。而且，一分奖励无论是从绝对值还是相对值上都很小，所以虽然它在一致刺激之后相比在不一致刺激之后诱发的N300-450成分有一个更负的趋势，我们打算对其做详细的讨论。对于同一个一角图片，当它出现在不一致刺激之后，其诱发的N300-450成分更负。这个结果表明，当面临一个不一致的刺激，对其冲突的控制会增强对之后奖赏刺激的加工。虽然脑电的溯源存在诸多局限，但是仍然可以提供一些有意义的线索。从对N300-450成分的溯源结果来看，前扣带回很可能部分贡献了N300-450成分的产生。实际上，先前的一些研究也提示了前扣带回与心理努力有关^[28]。近来的一些动物研究也发现，前扣带回是心理努力与奖赏联系回路的一个重要组成部分^[1]。这些发现前扣带回在心理努

1) Hauber W, Sommer S. Prefrontostriatal circuitry regulates effort-related decision making. *Cereb Cortex*, (in press)

力与奖赏加工相联系的研究促使我们推测,前扣带回在冲突控制影响奖赏加工的过程中扮演重要角色。从溯源的角度来看,对奖赏刺激的增强加工可能有两个来源:一是情绪冲突控制本身会激活前扣带回,这种增强的激活水平又作为一个背景或者基线,增强了其对之后奖励刺激的反应;二是在需要高控制的情况下,被试会需要付出更大的心理努力,这种心理努力负荷的增加可能会增强其对奖赏刺激的期待,从而强化对奖赏刺激的加工。

近来, Botvinick 等发现前扣带回在心理努力对奖赏加工的打折过程中起着重要作用^[43]。他们发现,在心理努力程度较高的情况下,前扣带回的激活水平较高,伏隔核(nucleus accumbens)的激活水平降低,而且伏隔核激活水平与前扣带回激活水平负相关。他们认为这个结果支持前扣带回对伏隔核的奖赏加工存在一定的打折作用。这一点也支持了本研究中所发现的前扣带回参与了心理努力影响奖赏加工的过程。但是,这个研究与本文研究都缺乏对奖赏的主观评定。

另外,溯源结果还发现其中一个偶极子靠近海马旁回。先前的 fMRI 研究发现,海马旁回与人类的动机功能密切相关,食物与金钱奖赏都能够激活海马旁回^[44-46]。虽然脑电的溯源分析存在一定的局限性,尤其是对这些位置比较深的结构进行解释需要更谨慎一些,但是整体上来说,这些溯源结果与 fMRI 的研究结果比较一致,也为我们理解本研究提供了一些有益的线索。

本研究的一个主要缺陷在于我们缺少被试对奖赏刺激的主观评定,这就限制了我们将脑电结果与主观感受联系起来。由于缺乏整个被试群体的主观评定结果,我们只能从被试的脑电反应的层面上推测冲突控制对奖赏加工的影响,不能从被试的主观感觉层面上去分析情绪冲突的控制对奖赏加工的影响。

我们的研究结果主要有两个发现,一是奖赏加工中对高低奖赏的早期区分可以在一个很早的时间段开始,反映在前部额叶的 N1 成分上;二是情绪冲突的控制过程可以影响之后奖赏刺激的加工。

参 考 文 献

1 Robbins TW, Everitt BJ. Neurobehavioural mechanisms of re-

ward and motivation. *Curr Opin Neurobiol*, 1996, 6(2): 228-236

2 Schultz W. Multiple reward signals in the brain. *Nature Rev Neurosci*, 2000, 1(3): 199-207

3 Hikosaka O, Bromberg-Martin E, Hong S, et al. New insights on the subcortical representation of reward. *Curr Opin Neurobiol*, 2008, 18(2): 203-208

4 Kringelbach ML. The human orbitofrontal cortex: Linking reward to hedonic experience. *Nature Rev Neurosci*, 2005, 6(9): 691-702

5 McClure SM, York MK, Montague PR. The neural substrates of reward processing in humans: The modern role of fMRI. *Neuroscientist*, 2004, 10(3): 260-268

6 O'Doherty JP. Reward representations and reward-related learning in the human brain: Insights from neuroimaging. *Curr Opin Neurobiol*, 2004, 14(6): 769-776

7 Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty. *J Risk Uncertain*, 1992, 5: 297-323

8 Walton ME, Bannerman DM, Alterescu K, et al. Functional specialization within medial frontal cortex of the anterior cingulate for evaluating effort-related decisions. *J Neurosci*, 2003, 23(16): 6475-6479

9 Rudebeck PH, Walton ME, Smyth AN, et al. Separate neural pathways process different decision costs. *Nat Neurosci*, 2006, 9: 1161-1168

10 Phillips PEM, Walton ME, Zhou TC. Calculating utility: Pre-clinical evidence for cost-benefit analysis by mesolimbic dopamine. *Psychopharmacology*, 2007, 191: 483-495

11 McClure SM, Laibson DI, Loewenstein G, et al. Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. *Science*, 2004, 306: 503-507

12 Roesch MR, Taylor AR, Schoenbaum G. Encoding of time-discounted rewards in orbitofrontal cortex is independent of value. *Neuron*, 2006, 51: 509-520

13 Stevens JR, Rosati AG, Ross KR, et al. Will travel for food: Spatial discounting in two new world monkeys. *Curr Biol*, 2005, 15: 1855-1860

14 Walton ME, Kennerley SW, Bannerman DM, et al. Weighing up the benefits of work: Behavioral and neural analyses of effort-related decision making. *Neural Netw*, 2006, 19: 1302-1314

15 Kacelnik A, Marsh B. Cost can increase preference in starlings. *Animal Behaviour*, 2002, 63: 245-250

16 Matsushima T, Izawa E, Aoki N, et al. The mind through chick eyes: Memory, cognition and anticipation. *Zoolog Sci*, 2003, 20: 395-408

17 Schultz W. Predictive reward signal of dopaminergic neurons. *J Neurophysiol*, 1998, 80(1): 1-27

- 18 Schultz W. Getting formal with dopamine and reward. *Neuron*, 2002, 36(2): 241-263
- 19 Walton ME, Bannerman DM, Rushworth MF. The role of rat medial frontal cortex in effort-based decision making. *J Neurosci*, 2002, 22: 10996-11003
- 20 Schweimer J, Saft S, Hauber W. Involvement of catecholamine neurotransmission in the rat anterior cingulate in effort-related decision making. *Behav Neurosci*, 2005, 119: 1687-1692
- 21 Bechara A, Damasio H, Damasio AR, et al. Different contributions of the human amygdala and ventromedial prefrontal cortex to decision-making. *J Neurosci*, 1999, 19: 5473-5481
- 22 Etkin A, Egner T, Peraza DM, et al. Resolving emotional conflict: A role for the rostral anterior cingulate cortex in modulating activity in the amygdala. *Neuron*, 2006, 51(6): 871-882
- 23 Egner T, Etkin A, Gale S, et al. Dissociable neural systems resolve conflict from emotional versus nonemotional distracters. *Cereb Cortex*, 2008, 18(6): 1475-1484
- 24 Botvinick M, Nystrom LE, Fissell K, et al. Conflict monitoring versus selection-for-action in anterior cingulate cortex. *Nature*, 1999, 402(6758): 179-181
- 25 Botvinick MM, Braver TS, Barch DM, et al. Conflict monitoring and cognitive control. *Psychol Rev*, 2001, 108(3): 624-652
- 26 Botvinick MM, Cohen JD, Carter CS. Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: An update. *Trends Cogn Sci*, 2004, 8(12): 539-546
- 27 Brown JW, Braver TS. Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science*, 2005, 307(5712): 1118-1121
- 28 Naccache L, Dehaene S, Cohen L, et al. Effortless control: Executive attention and conscious feeling of mental effort are dissociable. *Neuropsychologia*, 2005, 43(9): 1318-1328
- 29 Holroyd CB, Coles MG. The neural basis of human error processing: Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychol Rev*, 2002, 109(4): 679-709
- 30 Hajcak G, Holroyd CB, Moser JS, et al. Brain potentials associated with expected and unexpected good and bad outcomes. *Psychophysiology*, 2005, 42(2): 161-170
- 31 Yeung N, Botvinick MM, Cohen JD. The neural basis of error detection: Conflict monitoring and the error-related negativity. *Psychol Rev*, 2004, 111(4): 931-959
- 32 Yeung N, Sanfey AG. Independent coding of reward magnitude and valence in the human brain. *J Neurosci*, 2004, 24(28): 6258-6264
- 33 Masaki H, Takeuchi S, Gehring WJ, et al. Affective-motivational influences on feedback-related ERPs in a gambling task. *Brain Res*, 2006, 1105(1): 110-121
- 34 Bellebaum C, Daum I. Learning-related changes in reward expectancy are reflected in the feedback-related negativity. *Eur J Neurosci*, 2008, 27(7): 1823-1835
- 35 Bai L, Ma H, Huang YX, et al. The development of native Chinese affective picture system: A pretest in 46 college students. *Chin Men Health J*, 2005, 19: 11
- 36 Hajcak G, Moser JS, Holroyd CB, et al. The feedback-related negativity reflects the binary evaluation of good versus bad outcomes. *Biol Psychol*, 2006, 71(2): 148-154
- 37 Holroyd CB, Hajcak G, Larsen JT. The good, the bad and the neutral: Electrophysiological responses to feedback stimuli. *Brain Res*, 2006, 1105(1): 93-101
- 38 Nieuwenhuis S, Holroyd CB, Mol N, et al. Reinforcement-related brain potentials from medial frontal cortex: Origins and functional significance. *Neurosci Biobehav Rev*, 2004, 28(4): 441-448
- 39 Cuthbert BN, Schupp HT, Bradley MM, et al. Probing affective pictures: Attended startle and tone probes. *Psychophysiology*, 1998, 35(3): 344-347
- 40 Peterson CK, Gable P, Harmon-Jones E. Asymmetrical frontal ERPs, emotion, and behavioral approach/inhibition sensitivity. *Soc Neurosci*, 2008, 3(2): 113-124
- 41 Boudreau C, McCubbins MD, Coulson S. Knowing when to trust others: An ERP study of decision making after receiving information from unknown people. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 2009, 4(1): 23-34
- 42 陈安涛, 张庆林, 王乃弋, 等. 分类活动中的认知控制: 一项事件相关电位研究. *自然科学进展*. 2006, 16(11): 1388-1394
- 43 Botvinick MM, Huffstetler S, McGuire JT. Effort discounting in human nucleus accumbens. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 2009, 9(1): 16-27
- 44 LaBar KS, Gitelman DR, Parrish TB, et al. Hunger selectively modulates corticolimbic activation to food stimuli in humans. *Behav Neurosci*, 2001, 115(2): 493-500
- 45 Small DM, Gitelman D, Simmons K, et al. Monetary incentives enhance processing in brain regions mediating top-down control of attention. *Cereb Cortex*, 2005, 15(12): 1855-1865
- 46 Cheng Y, Meltzoff AN, Decey J. Motivation modulates the activity of the human mirror-neuron system. *Cereb Cortex*, 2007, 17(8): 1979-1986