

國立政治大學理學院心理學系 碩士論文

Department of Psychology, National Chengchi University Master Thesis

錯誤可能性與預期衝突對於錯誤偵測系統之影響

—以回饋負波為例

Error Likelihood and Conflict in Error Monitoring  
System: A Study of Feedback Negativity

張滌方

Yin-Fang Chang

指導教授：顏乃欣 博士

中華民國 一百零一年 七月

## 摘要

現今解釋錯誤偵測系統及前扣帶皮質 (ACC) 的關係之理論主要為增強學習理論。增強學習理論認為個體會在行為後對於行為結果產生預期，並將該預期與實際結果進行比較，若實際結果較預期結果差則會活化 ACC 進而觀察到較大的 FN (Feedback Negativity) 振幅。近年來有學者提出奠基於增強學習理論的錯誤可能性理論，錯誤可能性理論則認為當個體在學習到行為與結果之間的關聯後，當接收到可能犯錯的訊息時便會活化 ACC 而引起較大的 FN。本研究主要的目的為探討增強學習理論及錯誤可能性理論的適用性，其次為探討風險之因素是否能反映於 FN 上。由於兩理論對於風險情境中是否會觀察到 FN 有不同的預測，錯誤可能性理論預測會在高風險的情況下觀察到較大的 FN；而增強學習理論則預測由於風險畫面並非回饋畫面，故風險不會影響 FN。實驗一藉由探討風險與 FN 間之關係企圖提供兩理論初步之區分並提供風險研究的實驗證據，實驗一結果顯示 FN 確實會反映風險之因素。也點出增強學習理論用以解釋錯誤偵測系統之不完備之處。而實驗二則利用操弄回饋結果好壞及高低錯誤可能性以檢驗錯誤可能性對於錯誤偵測系統之必要性，實驗二結果顯示錯誤可能性為事件評估之因素之一。除此之外，實驗二亦提供 FN 反映懊悔之支持性證據。

關鍵字：事件相關腦電波(ERP)、回饋相關負波(FN)、風險、前扣帶皮質 (ACC)、增強學習理論 (Reinforcement Learning Theory)、錯誤可能性理論 (Error-Likelihood Theory)、錯誤偵測系統、懊悔

## Abstract

The reinforcement learning (RL) theory attempted to explain the role of anterior cingulate cortex (ACC) in the error monitoring system. In RL theory, it is suggested that individuals will compare the feedback with their expectation. When the feedback is worse than expected, the ACC is activated and greater FN (feedback negativity) is elicited. In contrast with RL theory, the error-likelihood (EL) theory suggests that the ACC is activated when perceiving high error likelihood. The main purpose of this study is to examine these two theories and investigate which theory can better explain the error monitoring system. By manipulating the risk level (Experiment 1), we can differentiate these two theories by different predictions on risk condition. In EL theory, greater FN on risk condition is predicted. In RL theory, no difference of risk level is predicted. Moreover, we try to provide some evidences for the relation of risk and ACC in experiment 1. In experiment 2, we manipulate the feedback (positive vs. negative) and error likelihood (high vs. low) in a modified gambling task. Greater FN is observed on high error likelihood events and unexpected events indicated that both RL theory and EL theory are supported. It is revealed that the FN also reflects the feeling of regret.

Keywords: FN, Risk, ACC, Reinforcement Learning Theory, Error-Likelihood Theory, Error Monitoring System

# 目次

第一章、緒論.....	1
第二章、文獻探討.....	3
第一節、事件關連電位 (Event-Related Potential, ERP) .....	3
第二節、回饋關連負波 (Feedback Negativity, FN) 及其本質.....	4
第三節、FN 的生理相關機制及相關理論 .....	10
第四節、風險因素及 FN.....	15
第三章、研究議題.....	18
第四章、實驗一.....	20
第一節、參與者.....	20
第二節、實驗設計、作業及流程.....	20
第三節、實驗程序.....	22
第四節、神經生理訊號記錄(Neurophysiological Recording).....	22
第五節、資料分析流程 .....	23
第六節、實驗結果.....	23
第七節、討論 .....	26
第五章、實驗二.....	29
第一節、參與者.....	29
第二節、實驗設計、作業及流程.....	29
第三節、實驗程序.....	31
第四節、神經生理訊號紀錄(Neurophysiological Recording) .....	31
第五節、資料分析流程 .....	31
第六節、實驗結果.....	31
第七節、討論 .....	33
第六章、綜合討論.....	35
第一節、風險 .....	35
第二節、ACC 與懊悔.....	36
第三節、錯誤可能性及錯誤偵測系統.....	36
第四節、總結 .....	37
參考文獻.....	38
附表說明.....	46
附表.....	47

附圖說明 ..... 51  
附圖 ..... 52



# 第一章、緒論

我們每天一睜開眼就面臨許許多多的選擇。而在面臨選擇時，過去的經驗及我們如何評估一個事件將是影響決策的關鍵。在每次的選擇後，人們會以不同的角度評估該次選擇的後果好壞，並學習到選擇與結果之間的關連。在下一次面臨選擇時，這些評估的角度及學習到的經驗將被提取出來進而影響到下一次的決策。

科技的進步讓我們得以窺探腦部的活動及變化，近年來更有許多實驗證據指出這一系列人類評估事件及學習的歷程都可以在大腦找到相對應的生理變化。其中，背後側前額葉皮質 (dorsal lateral prefrontal cortex, DLPFC) 及前扣帶皮質 (anterior cingulate cortex, ACC) 在認知處理及錯誤偵測上有重要的角色 (Kerns et al., 2004)。而錯誤偵測系統更是涉及到我們如何評估一個事件的好壞及以增強學習的方式塑造我們的選擇偏好及行為。在錯誤偵測系統中，ACC 扮演了評估事件、比較個體訊息及外界回饋結果的角色。並透過中腦多巴胺系統針對下一次的行為進行調控。

研究者多藉由回饋關連負波 (feedback negativity, FN) 為主要的觀察指標，FN 為負向回饋在腦波上產生負向偏移的波形，形成機制一般認為與大腦多巴胺系統及 ACC 有關。藉由觀察 FN 的變化以推論人們是如何評估事件，許多學者對於此現象所反映的性質有許多的爭論，如絕對好壞、相對好壞、預期衝突等等。然而在評估事件好壞時，需考量的因素不能僅就輸贏的角度進行評估，而是需將各種可能的因素 (如結果變異程度、機率等) 一同納入考量。同時，越來越多研究指出風險 (risk) 的生理機制與多巴胺系統、ACC 有關。故本研究企圖以 FN 作為指標，探討 ACC 在評估事件好壞時是否會反映風險之因素。

而風險也是得以區分現今解釋 FN 的兩大理論的現象，目前解釋錯誤偵測系統的理论主要有增強學習理論 (Reinforcement Learning Theory) 及錯誤可

能性理論 (Error-Likelihood Theory)。兩個理論對於 ACC 活化的時間點及評估錯誤來源有所不同，增強學習理論認為錯誤來自於回饋結果與真實結果差異的衝突，而錯誤可能係理論則認為錯誤來自於有可能犯錯的情況。兩個理論對於風險呈現畫面有不一樣的預測，故藉由風險作業以評估兩理論的適用性。



## 第二章、文獻探討

### 第一節、事件關連電位 (Event-Related Potential, ERP)

事件關聯電位 (event-related potential; ERP)是由腦電波 (electroencephalogram; EEG)所獲得的電生理訊號。藉由將實驗者所感興趣之事件進行時間定位(time-locked)處理程序後所擷取出的腦波。ERP中所包含的電位正、負向偏移以及其時間點在腦波研究中被稱之為要素(component)，而依據腦波於頭顱上的分佈以及對於不同實驗中變項的反映，這些要素則可被視為大腦中針對各種知覺、認知以及行為的反應 (Zani & Proverbio, 2003)。

一般定義 ERP 的三大要素為：振幅 (amplitude)、時間 (latency) 及分布情形 (topography)。其中 ERP 中的振幅可以表示相關認知歷程中神經活動的反應數量，愈大的振幅表示著愈多數量的認知歷程相關神經的活動，而從實驗刺激呈現開始到 ERP 要素產生這一段時間被定義為該要素的發生時間，一般而言該段時間間隔是以毫秒表示，時間間隔愈長，也表示反映相對應認知功能的要素產生時間愈晚。分布情形則為 ERP 在空間向度上的特性之一，藉由觀察 ERP 的分佈情形可以得知 ERP 要素主要發生的頭顱表面位置以及該要素在頭顱上被激發的型態。

ERP 雖不像功能性核磁共振造影 (functional magnetic resonance imaging; fMRI)以及正子攝影掃描 (positron emission tomography scan; PET scan)等影像測量具有良好的空間解析度 (spatial resolution)，但它的時間解析度 (temporal resolution) 極佳，因而相當適合作為測量短暫認知歷程的工具。



## 第二節、回饋關連負波 (Feedback Negativity, FN) 及其本質

回饋關連負波 (feedback negativity, FN) 係由錯誤相關負波 (error-related negativity, ERN) 衍生而來。FN 與 ERN 主要有兩項不同之處：反應內容與出現時間。FN 主要是反應的是經由外界刺激給予的負向回饋 (negative feedback)，且出現時間約在負向回饋出現後的 250~300ms 間；而 ERN 反應的則為參與者在作業中不經意的錯誤 (slip)，出現時間約在錯誤發生後約 100ms 前後。

Hohnsbein 等首先發現當參與者在反應作業中產生錯誤 (slip)，在所紀錄的 ERP 中會有一個與該錯誤時間接近的負波，他們並將此稱為錯誤負向腦電波 (Error Negativity,  $N_E$ ) (Hohnsbein, Falkenstein, & Hoormann, 1989)。Gehring 等也驗證了此一現象，並將此現象命為錯誤相關負波 (error-related negativity, ERN) (Gehring, Goss, Coles, Meyer, & Donchin, 1993)。目前發現 ERN 產生的最大值是在腦部前葉中央 (fronto-central) 上所紀錄的點，其發生的時間是在錯誤反應後的 100 ms 左右 (Botvinick, Braver, Barch, Carter, & Cohen, 2001)。ERN 的現象也被許多研究團隊以不同形式的作業所驗證 (Scheffers, Coles, Bernstein, Gehring, & Donchin, 1996)。

以上敘述的錯誤相關負波 (ERN) 為對不經意的錯誤反應。同時，近年來有研究發現，當一回饋告知參與者的反應是錯誤的反應時，則參與者亦會有負波的產生 (Holroyd & Coles, 2002; Miltner, Braun, & Coles, 1997) (圖一)。這種經由回饋所產生的負波，由於出現的時間為 250 至 300ms 間，與傳統 ERN 的 100ms 不同而有所區隔。學者將這種經由回饋得知錯誤所產生的負波稱為 FN (Yeung, Holroyd, & Cohen, 2005)，或 fERN (feedback error-related negativity; Holroyd & Krigolson, 2007)。

置圖一於此

此外，也有研究指出 ERN 與 FN 之間會因為外在訊息量的多寡而有所不同。若參與者可自己偵測錯誤則會引發較大的 ERN，而 FN 的量便會較小；反之，若錯誤無法由參與者自身所察覺，而需由外界線索提供則引發的 ERN 量會較小，而 FN 的量較大。顯示 ERN 與 FN 皆與錯誤偵測有關，唯偵測錯誤來源的不同而有所不同(Heldmann, Russeler, & Munte, 2008)。FN 與 ERN 的異同整理列於表一。

置表一於此

而 FN 所反應之本質則引發一連串的討論，學者就 FN 可能反應的變項一一進行探討，如絕對輸贏/輸贏 (Gehring & Willoughby, 2002)、相對好壞(Holroyd et al., 2004; Nieuwenhuis, Yeung, Holroyd, Schurger, & Cohen, 2004; Yen, 2007)、數值/數量 (Kreussel et al., 2012)、事件發生可能性 (Gibson, Krigolson, & Holroyd, 2006; Kreussel, et al., 2012)、預期與實際結果之差異(Chang & Yen, 2008; Chang, Yen, Lin, Chen, & Kao, 2010; Simons, 2007)、衝突(Holroyd & Krigolson, 2007)。

有學者認為 FN 所反應的特質為「絕對錯誤」，即 FN 是對輸錢作反應。Gehring 等設計了一個能將「絕對錯誤 (輸錢)」及「相對錯誤 (選擇錯誤)」加以區辨的實驗。該作業要求參與者在兩副牌間進行選擇，選擇後電腦會依序呈現

被選擇與未選擇 (alternative) 的結果，因此參與者可以比較兩副牌的結果。本實驗的邏輯為，若 FN 反應的是金錢的輸贏 (絕對錯誤)，則結果應該不論未被選擇的牌為何，只要選擇的結果是輸錢就會有 FN 的產生。但若 FN 反應的是選擇是否正確 (相對錯誤)，則只要選擇結果劣於另一個未被選擇的結果，就會有 FN 的反應。如：參與者選擇「輸 5 元」的選項，未被選擇的結果則為「輸 25 元」，此時參與者雖然輸錢但相較於輸 25 元，輸 5 元的選擇是正確的，因此不會有 FN 的反應。實驗結果發現，FN 對於「輸贏」的反應大於「正確」(Gehring & Willoughby, 2002)。而此觀察到的負波也被命名為 MFN (medial frontal negativity)，後續的研究也指出 MFN 的出現時間為 200 至 300ms 間，較典型的 FN 發生時間早(Goyer, Woldorff, & Huettel, 2008)。

另一派學者認為 FN 所反應的特質為「相對錯誤」，即 FN 是對較差的結果作反應。例如 Nieuwenhuis 等曾修改了 Gehring 實驗所呈現的方式，實驗作業與 Gehring 的相同，唯增加以紅色或綠色以強調輸贏或選擇對錯。實驗結果發現 FN 並非對輸錢有反應，而是對主試者所強調的項目作反應(Nieuwenhuis, et al., 2004)。然而，雖然結果顯示 FN 是對主試者所強調的項目作反應，但可從其呈現的圖表中簡略看出，強調選擇對錯組其 FN 較強調輸贏組明顯。這似乎表示，大腦處理「輸贏」及「反應對錯」的機制是有所不同的。而這兩組的差距可能不僅單純反應主試者所強調的項目，可能更加上 FN 在本質上對於「輸贏」及「反應對錯」之間反應程度差異的效果量。如此筆者認為：FN 應對於選擇對錯有較強的反應，而在 Nieuwenhuis 的實驗中，主試者所強調的項目，應只是更突顯錯誤而已。因此 Nieuwenhuis 的研究應可被視為支持「FN 主要反應選擇上的錯誤，即相對錯誤」。

其他相關實驗也支持 FN 所反應的是相對錯誤，在 Holroyd 等在 2004 年的研究中，參與者被要求在螢幕所呈現的三個選項中選取其中之一，之後由螢幕呈現結果以告知此次選擇使參與者輸了或贏了多少錢(Holroyd, Larsen, & Cohen,

2004)。此研究進行三種操弄設計：只有贏的情況 (win)、只有輸的情況 (lose) 及有輸有贏的情況 (even)。這三種情境所操弄的是回饋內容的不同：只有贏的組別其回饋有贏 0 元、贏 2.5 元及贏 5 元；只有輸的組別其回饋則有輸 0 元、輸 2.5 元及輸 5 元；有輸有贏組的三種回饋是輸 2.5 元、輸/贏 0 元及贏 2.5 元。實驗結果發現，在有輸有贏情況中的「輸 2.5 元」、只有贏的情況中「贏 0 元」及「贏 2.5 元」(較差的兩選項)、只有輸的情況中「輸 2.5 元」及「輸 5 元」(較差的兩選項)等情況下皆有觀察到 FN。且在比較贏組及輸組的「輸/贏 0 元」的反應後，也發現在只有贏的情況中的「贏 0 元」結果其 FN 反應較只有輸的情況中「輸 0 元」結果大。這些皆提供了「FN 為對『相對』較差的結果作反應」的研究證據。

由於對於 FN 所反應的特質一直有所爭論，許多研究者企圖以整合性的研究歸納及探討 FN 所反應的究竟為何(Chang & Yen, 2008; KreuSSel, et al., 2012)。Chang 等人設計了一個實驗企圖以釐清 FN 反應的究竟為立即回饋或非立即回饋(延宕回饋、整體期望值)。實驗設計將立即回饋與非立即回饋設計為不一致，即將正向立即回饋(如：每次贏 10 元/輸 10 元)與不一致的負向非立即性回饋(偶爾輸 50 元且最後結果為輸錢/偶爾贏 50 元且最後結果為贏錢)連結。若 FN 反應的是立即回饋，則會在負向立即回饋(輸 10 元)的情況中有 FN；但若 FN 反應的是非立即回饋，則會在與負向非立即回饋有所連結的刺激(贏 10 元)後發現 FN (Chang & Yen, 2008)。

實驗數據顯示，在正向情境中(立即回饋為：輸 10 元、贏 10 元；非立即回饋為：累積多次輸 10 元後便有機會獲得 50 元)，由於不論立即回饋是正向或負向，皆會導致正向的結果(整體期望直接為正)，所以正負向立即回饋皆沒有引發 FN。在負向情境中(立即回饋為：輸 10 元、贏 10 元；非立即回饋為：累積多次贏 10 元後便有可能失去 50 元)，由於正向立即回饋與負向非立即回饋有所連結，故即使立即回饋為正(贏 10 元)，仍引發較大的 FN。

實驗結果發現，即使在立即回饋為正的情況下仍會引發 FN（與負向非立即回饋連結），這一結果提供了反駁「FN 反應立即回饋」的證據。由於支持 FN 反應立即回饋之論述為：FN 會反應回饋結果本身，即 FN 僅會反應負向立即回饋。但本實驗在正向立即回饋後發現 FN，即表示 FN 反應之特質不僅僅為「立即」之回饋，更是會考量到「非立即」之因素。然而，該研究也可以以另一個角度來解釋，如對於後續事件的可能性或是風險程度。而此研究也有許多其他可能的混淆變項值得進一步探究。

近期也有研究證據指出，FN 會與自身預期有關係(Holroyd & Krigolson, 2007; Holroyd, Larsen, et al., 2004; Pfabigan, Alexopoulos, Bauer, & Sailer, 2011)。在 Holroyd(2004)的實驗中，參與者會在贏的情境中預期自己會贏錢，所以當結果為贏 0 元時，此結果與參與者的預期有所衝突，而產生 FN。同時有證據顯示，FN 不僅反應負向回饋，更同時反應了「非預期的結果」。例如 Holroyd 與 Krigolson 在 2007 年的研究中進行時間估計的作業，並藉由操弄作業難度以獲得非預期結果（困難作業中的正確及簡單作業中的錯誤）與預期結果（困難作業中的錯誤及簡單作業中的正確）的出現，結果顯示，非預期結果的差異波（簡單作業的錯誤－困難作業的正確）在 200 至 400ms 間有一個明顯大於與預期結果的差異波（困難作業的錯誤－簡單作業的正確）的負波出現(Holroyd & Krigolson, 2007)。

Chang 等人也以牌局的方式重複驗證 FN 反應預期衝突的效果(Chang, et al., 2010)。藉由操弄正向回饋（贏錢）出現之比率使參與者在不同情境中有不同程度的預期（在正向回饋比率高的情境中預期自己會贏錢，在負向回饋比率高的情境中預期自己會輸錢），並檢驗符合與不符合預期結果的腦波是否有所不同。結果顯示，非預期的正向回饋相較於預期的正向回饋會引發較大的 FN。在 fMRI 的研究也有支持的證據(Potts, Martin, Burton, & Montague, 2006)。

綜上所述，FN 所反應的特質至今仍有許多爭議及可能，而這一系列的研

究及討論仍持續進行中(Bellebaum, Kobza, Thiele, & Daum, 2011; Bellebaum, Polezzi, & Daum, 2010; Goyer, et al., 2008; San Martín, Manes, Hurtado, Isla, & Ibañez, 2010)。



### 第三節、FN 的生理相關機制及相關理論

研究者利用 BESA (brain electric source analysis) 分析 ERN 及 FN 產生的來源，並發現此負波可能產生於 ACC (Dehaene, Posner, & Tucker, 1994; Holroyd & Coles, 2002; Miltner, et al., 1997)。功能性磁振造影 (fMRI) 的資料也證實當接收到錯誤的回饋訊息時，ACC 會有較大的活化現象 (Holroyd, Nieuwenhuis, et al., 2004)。之前的研究普遍認為，ACC 與行為的自我監控有關，當行為結果不如預期的時候它便會被激發。在神經生理證據上亦提供了相對應的支持證據 (Gemba, Sasaki, & Brooks, 1986; Niki & Watanabe, 1979)。Brooks 認為前扣帶溝扮演「比較者」的角色，其功能為比較個體行為結果以及行為意圖之間的差異。

目前解釋 FN 產生的理論主要有兩種理論，分別為增強學習理論 (Reinforcement Learning Theory, RL-Theory) 及錯誤可能性理論 (Error Likelihood Theory, EL Theory)。

增強學習理論 (Reinforcement Learning Theory, RL Theory) 最初是在觀察動物學習新事物時發現而提出，研究發現當行為產生的結果是好的，便會強化該行為；反之若行為產生的結果為不好的，則會弱化該行為。而此論述也成為後續資訊科學發展人工智慧系統時的基石 (Sutton & Barto, 1998)。根據增強學習理論，我們會在過去的學習經驗中建立起對各事件的預期結果，並且在下次面臨選擇時藉由這些預期來幫助進行決策並將選擇的結果與預期進行比較。若結果不符合預期則會產生預期錯誤進而更新對該選擇的預期，並調整下一次的選擇行為。

增強學習理論強調的是刺激/選擇與回饋之間的聯結，個體藉由比較預期結果與實際結果之間的差異以調整對下次選擇結果的預期。相關的研究結果也提供支持性的證據，Schultz 等人在猴子的多巴胺神經元觀察到神經元的活化與預期錯誤有關 (Schultz, Dayan, & Montague, 1997)，研究結果發現當回饋結果出

現時，正向預期錯誤會增強神經元的活化，負向預期錯誤會降低神經元的活化，而沒有預期錯誤時神經原則維持原本活化的狀態。這樣的實驗結果也在人體 fMRI 研究有類似的發現(O' Doherty et al., 2004)。

Holroyd 與 Cole 將增強學習理論用來解釋 FN 的現象並認為 FN 背後的神經生理機制為，基底核 (basal ganglia) 扮演適應批判的角色，前扣帶皮質皮質則相當於一個控制過濾器。當個體動作訊息透過前扣帶皮質皮質傳送到負責判斷適應的基底核時，此時基底核便會比較個體的動作訊息以及外界回饋訊息的結果，並透過中腦多巴胺系統傳送訊息至前扣帶皮質皮質使之對於下一次的行為進行調控。基底核的多巴胺神經元活動增加時，會抑制前扣帶皮質皮質的活動；而基底核的多巴胺神經元活動減少時，前扣帶皮質皮質的活動會因此而增加。綜合上述理論以及 FN 實驗結果，當個體所面對回饋結果較預期差時，基底核的多巴胺神經元活動減少，前扣帶皮質皮質的活動因而活動增加，在腦波上可觀察到較大的振幅；當回饋結果較預期好時，基底核的多巴胺神經元活動增加，抑制前扣帶皮質皮質的活動，進而在腦波上觀察到較小的振幅(Holroyd & Coles, 2002) (圖二)。近年來該理論無論是在藥理的研究上(de Bruijn, Hulstijn, Verkes, Ruigt, & Sabbe, 2004; Zirnheld et al., 2004)，亦或對人體多巴胺系統進行侵入性的測量結果，皆提供了支持的證據(Müntz et al., 2007)。

-----  
置圖二於此  
-----

錯誤可能性理論 (Error-Likelihood Theory) 則是由 Brown (2005) 等人提出，此理論架構奠基於增強學習理論之上，認為個體會學習到一個行為反應 (action) 與結果 (outcome) 之間的關聯，並在每次結果出現時更新下次的預



期進而影響到下次的行為。在個體學習到行為反應與結果之間關連後，看到較容易引發負向結果的畫面或行為反應時會發出警訊。

他們藉由進行一個修改的訊號改變作業 (Change Signal Task)，提出一套解釋的機制。在訊號改變作業中，參與者將看到不同顏色的高低錯誤可能性的提示畫面，接著呈現箭頭 (go signal) 並要求參與者按鍵反應。在某些嘗試次中，改變訊號 (change signal) 呈現並要求參與者改變其反應以此造成反應衝突 (conflict)。而高低錯誤可能性則是以操弄改變訊號延遲 (change signal delay, CSD) 以達成高錯誤可能性回合的錯誤率為 50% 而低錯誤可能性回合的錯誤率為 4%。

Brown 等人並以電腦模擬的方式提出兩種模式，這兩種模式分別為錯誤可能性模式 (Error-Likelihood Model) 及衝突模式 (Conflict Model)。在錯誤可能性模式中，有一個錯誤訊號 E、兩組刺激輸入層 (高、低錯誤可能性)，兩組刺激輸入層中有兩細格 (初始的 Go 訊號及 Change 訊號)。初始呈現 go 訊號時會送訊號至 ACC 而若之後有 change 訊號出現則會另外送訊號至 ACC。ACC 收到訊號時活化 control 並抑制後續反應以進行控制。而錯誤訊號 E 會加強刺激影響 ACC 活化的加權值，由於高錯誤可能性的錯誤率較高，故會造成高錯誤可能性刺激對於 ACC 活化的加權值較大。因而造成高錯誤可能性的加權值大於低錯誤可能性的加權值，對於相同的 go 訊號及 change 訊號值皆可發現在高錯誤可能性的情況下 ACC 活化較大。而在衝突模式中，訊號會先經由反應評估是否造成衝突後再傳送至 ACC。若有衝突的情況則會活化 ACC 進而激發 control 並抑制及控制反應。因此兩模式對於不同情況 (高低錯誤可能性及高低衝突程度) 下 ACC 活化的程度有不同的預測 (見圖三)，並將此與 MRI 所獲得的資料進行比對。錯誤可能性模式預測 ACC 活化的程度會反應衝突訊號、高低錯誤可能性 (無論是衝突訊號的有無，所以應可以在 go 訊號及 conflict 訊號情況中皆可觀察到高低錯誤可能性的差異)。而衝突模式預測 ACC 活化的程度應該在衝突反應訊號的有無上有差異。

且兩模式在行為預測上沒有差異。

-----  
置圖三於此  
-----

研究結果顯示，ACC 活化的情況出現在衝突訊號產生時 (change > go)，高錯誤可能性大於低錯誤可能性情境。值得注意的是，高低錯誤可能性的差異僅出現在衝突情境 (change)，也同時可以在非衝突情境 (go) 中發現。這樣的結果顯示兩理論皆可解釋衝突引起 ACC 活化增加，但僅有錯誤可能性理論可以解釋在非衝突情境中仍可觀察到高低錯誤可能性的差異。

Brown 等人更後續提出看法，認為之所以過去研究可以在衝突情境中觀察到 ACC 的變化是因為反應衝突可能代表了較高的錯誤可能性。他們認為 ACC 的活化並非起因於衝突或錯誤，而可能是起因於 ACC 為偵測錯誤發生可能性，而當衝突情況產生時即暗示了錯誤發生的可能而會引起更多的監控系統的介入因而引發 FN (Brown & Braver, 2005)。而這樣的理論也能解釋為何過去研究發現 ACC 在接收到外界回饋之前便有活化的反應 (Holroyd, Nieuwenhuis, et al., 2004)。

根據以上兩理論之介紹，可以發現兩個理論雖然都企圖解釋 FN，但兩理論在神經迴路、ACC 活化時間點及錯誤來源有所不同。兩理論之異同整理於下表 (見表二)。

-----  
置表二於此  
-----

根據原始的增強學習理論，回饋訊號需先經由基底核 (basal ganglia) 比較個體的動作訊息以及外界回饋訊息的結果後才傳送至 ACC。錯誤來自於當回饋結果與預期有所衝突時，所以錯誤訊號產生的時間點為回饋畫面呈現之後。而根據錯誤可能性理論，當個體已學習到訊號與結果之間的關聯時，當會引發較高錯誤可能性畫面出現時，警示訊號會送至 ACC 並引起認知系統的介入。故可得知 ACC 活化的時間為當個體偵測到錯誤可能性時且會涉及注意力及認知系統的介入 (Brown & Braver, 2007) 且可能早於回饋結果。

綜上所述，此兩個理論對於引發錯誤訊號的時間點有所差異，故本研究企圖釐清兩理論的差異並探討兩理論在錯誤監控系統的適用性。



#### 第四節、風險因素及 FN

風險評估一向是決策中的重要因素，過去對風險也有相當程度的研究，對應的風險測驗量表也相當豐富。現今量測風險偏好的量表有知覺尋求的阿奈特量表(Arnett Inventory of Sensation Seeking, AISS)、風險態度量表(Attitude to risk taking)、氣球模擬風險作業(Balloon Analogue Risk Task, BART)、選擇困境問卷(Choice Dilemma Questionnaire)、特定領域風險態度量表(Domain-Specific Risk Attitude Scale, DOSPERT)等。

越來越多研究開始檢驗風險行為與腦部酬賞迴路的神經生理機制，與風險行為及腦部酬賞迴路相關的腦區有前額葉基底區(Orbital Frontal Cortex, OFC)、紋狀體(Striatum)、阿肯伯氏核(Nucleus Accumbens, NAcc)、背中側前額葉(dorsomedial frontal cortex)及前扣帶皮質(Anterior Cingulate Cortex, ACC)。其中 OFC 與紋狀體與酬賞預期及傳遞有較大相關(Breiter, Aharon, Kahneman, Dale, & Shizgal, 2001; Liu et al., 2007; Schultz, Tremblay, & Hollerman, 2000); 而 NAcc 則會在預期負向回饋時的活化(Galvan, Hare, Voss, Glover, & Casey, 2007)。此外, DMFC 與 ACC 與負向酬賞歷程及反應轉換及選擇導引等有關(Kennerley, Walton, Behrens, Buckley, & Rushworth, 2006; Liu, et al., 2007)。研究也發現風險行為的特質與傳導物質多巴胺的濃度有關(Cloninger, 1987; Gerra et al., 2000; Hansenne et al., 2002)。

綜合腦區及神經傳導物質的研究，顯示風險行為與多巴胺及 ACC 有關。而 ACC 與多巴胺即為 FN 的來源及可能因素，藉由這些關係讓我們得以推論 FN 與風險可能有所關連。Santesso 的研究也顯示 FN 與風險兩者有相關，其研究結果顯示風險測驗量表分數越高分者，在進行旁側夾擊測驗(Flanker Task)時所引發的 ERN 量會與測驗分數成正比(Santesso & Segalowitz, 2009)。然而該研究僅以風險測驗量表的分數與 FN 的量進行相關考驗，而非直接操弄風險程度以檢驗 FN 與之間的關係。

目前已有研究者企圖以愛荷華賭博作業探討 FN 與風險程度之關係，Chung (2011) 藉由控制回饋的變異係數(coefficient of variation, CV)以觀察 FN 的變化。回饋結果的變異係數(coefficient of variation, CV)，即標準差除以平均數，CV 越大即變異性越高，風險程度越高，CV 越小即風險程度越低。在該實驗中，參與者將得以自由選擇風險較高的 A 牌或風險較低的 B 牌，並從中觀察選擇後腦波及 FN 的變化。實驗發現風險趨避的參與者在看到低風險牌的損失相較於高風險損失的結果會有較大的 FN 產生。該研究主要分析的腦波區段為看到回饋畫面之後並未針對選擇畫面進行 FN 的分析，故該研究結果應為著重對於回饋結果的評估而非風險可能性的評估。且受限於愛荷華賭博作業之形式，參與者在該實驗中為自行選擇故無法良好的控制參與者接收到正、負向回饋的比率。而正負向回饋出現的比率在過去研究中也已被證實是會影響 FN 的振幅 (Chung, 2011)。

而風險的操弄方式，過去主要多採用操弄變異或輸贏比率兩者。唯這兩者所代表的意義有所不同。變異係數為操弄可能結果的數值差異程度，反映的為結果的不確定性 (uncertainty)，過去研究也指出不確定因素的呈現會活化前扣帶皮質 (Ke'ri, 2004)，可能也會與 FN 的振幅有關 (Hirsh, 2008; Yu, Zhou, Zhou, 2011)。而操弄輸贏比率的方式則是藉由操弄輸或是贏的機率以創造出高低的風險程度，其中所代表的意義即為獲得酬賞的機率。過去研究發現也有觀察到事件發生可能性與 FN 之間的關係 (Gibson, Krigolson, & Holroyd, 2006; KreuSSel, et al., 2012)。

在 fMRI 的研究也發現 ACC 的活化與預期風險 (expected risk) 有關，Brown & Braver (2007) 藉由提示畫面以操弄不同的錯誤可能性及錯誤強度並觀察 ACC 活化的變化。參與者接收到以不同顏色所提示的高低錯誤可能性訊號後進行訊號改變作業。除了高低錯誤可能性的提示之外，實驗者藉由操弄犯錯的懲罰 (金錢損失的數值) 以造成不同錯誤的強度 (magnitude)。參與者在各情境中每回合正

確作答皆可獲得 0.02 元的酬賞，而在高錯誤可能性情境（70%犯錯機會）的低錯誤強度的回合中犯錯會損失 0.01 元；在低錯誤可能性情境（30%犯錯機會）的低錯誤強度的回合中犯錯會損失 0.00 元。實驗結果發現，風險嫌惡(risk averse)的參與者 ACC 活化情況同時與錯誤可能性及錯誤強度有關。但礙於實驗設計所限，在四種情境下的期望值並未控制至一樣而可能進而影響實驗結果。

綜上所述，目前對於風險與錯誤監控系統的探討仍未有研究直接以腦波進行完善的探討。故本研究企圖控制過去研究的混淆因素（呈現次數、期望值）以探討風險提示畫面與 FN 關連之探討，且同時檢驗不同的風險操弄方式及其所代表的意義是否會影響到 FN 的振幅。



### 第三章、研究議題

本研究的主要目的為探討增強學習理論與錯誤可能性理論的適用性。實驗一將主要探討風險與 FN 間之關連，並企圖提供兩理論初步之區分。而實驗二則直接檢驗兩理論之間的關係。

錯誤可能性理論奠基於增強學習論，然而不同於增強學習理論的部份為，錯誤可能性理論強調當錯誤可能性畫面呈現時(即使錯誤可能性畫面並非實際回會結果)便會活化 ACC 而觀察到較大振幅的 FN。而是否錯誤可能性畫面便能活化 ACC 與激發較大的 FN 仍有所爭議且增強學習理論及錯誤可能性理論對於風險造成的 ACC 活化預測有所不同。一般而言，風險代表了損失的可能性，故風險增加即代表錯誤的可能性增加。故以預期風險的角度而言，當風險相關的訊息呈現時參與者即可察覺到風險並將風險評估的結果納入決策之考量。錯誤可能性理論會預測當預期風險時，個體便察覺錯誤之可能性進而引起較高的 ACC 活化。且關鍵性的一點為，錯誤可能性理論預測當線索/行為與結果之間的連結建立起來後。即便結果尚未出現，若線索或行為已能讓個體察覺到犯錯的機會高時，便會活化 ACC。換句話說，ACC 活化的時間為當個體偵測到錯誤可能性時且會涉及注意力及認知系統的介入(Brown & Braver, 2007)且可能早於回饋結果。而根據增強學習理論，個體僅會評估結果與預期間之差異，故若僅預期風險而非實際回饋時，則應不會有 ACC 的活化。兩理論對於風險是否會造成 ACC 的活化之所以有不同的預測，便是因為兩理論對於 ACC 活化時間點有不同預測而成。

對於解釋 FN 的兩大理論的適用性，本研究將以兩個實驗探討之。由於兩大理論對於預期風險畫面是否會產生 FN 的預測有所不同，且現今並未有研究直接探討 FN 與風險的關係。故實驗一將針對 FN 與風險之關連進行探討，檢視 FN 是否會反映風險程度。由於錯誤可能性可以由錯誤可能發生比率及可能損失幅度兩部分進行探討，故實驗設計納入了不同變異程度及不同比率的選項以檢驗錯誤

發生比率及幅度與 FN 之關連。若經由實驗一發現在預期風險時觀察到較大的 FN，則代表提供支持錯誤可能性理論之證據且證實 FN 與風險間的關係。

實驗二則是進一步釐清增強學習理論或錯誤可能性理論何者較能完整解釋人類錯誤偵測系統及兩者之間的關係。實驗設計一個同時會包含回饋及錯誤可能性訊息之畫面藉以觀察 FN 變化之情況。若僅支持增強學習理論，應只會在負向回饋或非預期回饋出現時觀察到 FN；若僅支持錯誤可能性理論，應只會在高錯誤可能性畫面出現時觀察到 FN；若兩理論皆被支持，則應該在負向回饋且高錯誤可能性畫面觀察到最大的 FN。





## 第四章、實驗一

由於過去研究顯示 FN 與風險決策的關係，但至今仍未有研究能直接且控制完善的檢驗兩者之關係。故本研究企圖操弄風險程度以觀察風險是否與 FN 有所關連。實驗一將針對 FN 與風險之關連進行探討，檢視 FN 是否會反映風險程度。由於錯誤可能性可以由錯誤可能發生比率及可能損失幅度兩部分進行探討，故實驗設計納入了不同變異程度及不同比率的選項以檢驗錯誤發生比率及幅度與 FN 之關連。

### 第一節、參與者

參與者皆為國立政治大學大學部的學生共 17 人，其中男性 9 人。參與者平均年齡為 22.24 歲。所有的參與者視力必須正常或經矯正後正常，且皆為右利及並未經過腦傷者。實驗前告知參與者除了基本的實驗參與費用 300 元之外，會依其表現而斟酌發放額外的 100 元獎金以提高參與者參與程度。實驗全長（連同電極紀錄帽的配戴及事後清理等步驟）約 3 個小時。

### 第二節、實驗設計、作業及流程

實驗共分兩個情境，風險變異情境（CV Condition）及風險比率情境（Percentage Condition）。兩情境的實驗程序及皆指導語相同，唯回饋結果之可能性不同。採用參與者內設計，參與者以不同順序的方式進行兩種情境，情境所實施的先後順序以共軛平衡（counter-balance）之排序以避免時序效應。

兩個情境內分別有其獨立的探索階段（練習題）及電腦選擇階段（正式實驗），在探索階段中，參與者可自由的選擇 A 或 B 並被要求盡量在此階段找出 A 跟 B 的規則及好壞；而在電腦選擇階段，參與者僅被要求觀看電腦選擇的結果且此階段的結果將與他們獲得的獎金金額有關。兩情境的探索階段皆有 40 個嘗試

次供參與者自由選擇，而電腦選擇部分則有 80 個嘗試次。

風險變異情境(CV Condition)控制兩選項的輸贏機率及期望值，操弄 A、B 選項的風險變異程度，在此的風險變異程度定義為結果的變異係數(coefficient of variation, CV)。CV 越大即變異性越高風險程度越高；CV 越小即風險程度越低，故以 CV 來區分可將兩個選項視為高風險及低風險的選項。

風險比率情境(Percentage Condition)則控制兩選項的變異情況及期望值，操弄兩選項的輸贏機率。藉由操弄輸贏的比率以區分風險程度，損失機率越高其風險程度越高；損失機率越低風險程度越低，故以輸贏機率來區分可將兩選項分為高風險及低風險的選項。

實驗流程如圖四所示。實驗作業在電腦進行，參與者坐在距離刺激螢幕的 80~100 公分處。在探索階段的嘗試次，提示聲及選牌畫面同時呈現，參與者可以自由選擇 A 牌或 B 牌，接著出現持續 1000ms 的十字凝視點。凝視點畫面結束後接著呈現被選的 A 牌或 B 牌。被選牌的畫面持續 1500ms 後接著是 1500ms 的十字凝視點，最終出現 1500ms 的回饋畫面。在電腦選擇階段的嘗試次，提示聲出現後參與者按鍵開始該回合。參與者按鍵後，出現持續 1000ms 的十字凝視點。凝視點畫面結束後呈現 1500ms 電腦所選的牌。接著是 1500ms 的十字凝視點，最終出現 1500ms 的回饋畫面。

-----  
置圖四於此  
-----

在正式實驗中，參與者無需進行選擇，而是直接觀看電腦選擇出的結果。此設計是為避免前述文獻探討時提到的會因參與者選擇偏好而影響到各選項出

現之次數。而在練習部分，為加強參與者了解 A、B 兩副牌之關連，故提供參與者選擇的機會。所有畫面中數字及文字呈現的顏色皆為白色，且畫面及文字皆控制在視角 15 度以內以避免參與者眼部的移動。兩情境的輸贏變異數值、輸贏出現比率列於下表。各選項期望值控制為一致。

-----  
置表三於此  
-----

### 第三節、實驗程序

待參與者抵達實驗室後，首先主試者會對於此次實驗作簡單的介紹，並請參與者簽署實驗同意書並填寫刺激尋求量表及基本資料表。刺激尋求量表主要分為刺激尋求、經驗尋求、反抑制及厭倦的感受性四個向度。大致上總分越高者越追求刺激。以上程序確認完成後，參與者接著會被帶入隔音設備良好且燈光控制在昏暗情況的空間以進行實驗。在腦波紀錄準備工作完成後，參與者會在螢幕上看到實驗指導語並填寫，以了解實驗進行的程序及注意事項。確認參與者沒有疑問後，即開始進行練習題（探索階段），探索階段結束後進行正式實驗（電腦選擇）的部份。在實驗中，每 40 個嘗試次會有 5 分鐘的休息時間。實驗完成後，主試者會對參與者簡單說明實驗主要目的。接著請參與者簽署資料使用同意書並給予實驗參與金。

### 第四節、神經生理訊號記錄(Neurophysiological Recording)

本實驗將以 NeuroScan 公司的 SynAmp2 系統來蒐集腦波資料，以銀/氯化銀 (Ag/AgCl) 材質的電極測量參與者的腦波 (EEG)，所有電極的電阻都必須降

至 5 k $\Omega$  以下。電極以 10-20 system montage 的方式配置，共有 64 個 channel，採樣頻率為 500 Hz。並同時測量 EOG (electrooculogram)，EOG 的測量為在左眼的上下測量垂直眼動(vertical)，在兩眼外側測量水平眼動(horizontal)。即時濾波(online filter)設定為 DC200Hz，腦波參照點(reference)則設為 active reference (Cz 至 FCz 間)。

#### 第五節、資料分析流程

腦波的資料採用 Scan 4.5 進行分析，進行直流電校正(DC correction)、眼動校正 (Ocular Artifact Reduction) 以排除眼動的干擾。接著以 0.01Hz - 30 Hz 的範圍則為濾波(filter)進行的通過區間(Band-pass)，腦波分段 (Epoching) 將以畫面出現的前 100 ms (做為基準點，baseline) 到出現後的 1000 ms 為區間劃分嘗試次。所有區間皆先以兩耳後乳突位置(M1, M2)的平均進行再參照，進一步排除電波大於 60  $\mu$ V 或小於 -60  $\mu$ V 的數據 (Artifact Rejection)。在本研究 FN 的定義為波峰 (Peak) 與起始區 (Onset) 的差異，起始點定義為事件後的 160-240ms 的最大值，而波峰定義為事件後的 240-360ms 的最小值。

#### 第六節、實驗結果

實驗結果分為三個部分以進行分析，分別為選擇牌畫面、回饋畫面及問卷相關分析。在選擇牌畫面進行 2 (情境)  $\times$  2 (風險程度)  $\times$  3 (記錄點：Fz, Cz, Pz) 的 ANOVA 考驗。以檢驗高低風險程度是否會造成不同的 FN 的量，及檢驗不同操弄風險的方式 (機率或變異程度) 是否會影響 FN。對於回饋畫面的分析則進行 2 (情境)  $\times$  2 (風險程度)  $\times$  2 (輸贏結果) 的 ANOVA 考驗。為避免違反球形假設，腦波數據的變異數分析有使用 Greenhouse-Geisser 法校正自由度。

在選擇牌畫面部分，進行 2 (情境) × 2 (風險程度) × 3 (記錄點：Fz, Cz, Pz) 的 ANOVA 三因子考驗以分析參與者看到選擇牌畫面時的腦波。結果發現在記錄點的變項有差異， $F(2, 32) = 32.364$ ,  $p < .00$ 。事後比較發現在 Fz 的 FN 幅度 ( $M = -3.488$ ,  $SD = .304$ ) 顯著大於 Cz ( $M = -2.358$ ,  $SD = .327$ ) 及 Pz ( $M = -1.806$ ,  $SD = .304$ )。進一步分析風險程度與情境的結果發現有兩者的交互作用 ( $F(1, 16) = 4.483$ ,  $p = .05$ )，事後比較發現主要差異來自於 CV Condition (變異情境) 中高風險情境 ( $M = -4.094$ ,  $SD = .411$ ) 與低風險情境 ( $M = -3.294$ ,  $SD = .504$ ) 間的差異 (見圖五)。在腦波上也可以在 250-300ms 之間發現在 CV Condition 下高低風險的腦波有差異 (見圖六)。



回饋結果的部分，結果發現有記錄點的主要效果 ( $F(2, 32) = 29.260$ ,  $p < .00$ )，事後比較發現在 Fz 的 FN 最大。進行 2 (情境) × 2 (風險程度) × 2 (輸贏結果) 的 ANOVA 考驗後發現輸贏結果的主要效果 ( $F(1, 16) = 7.020$ ,  $p = .017$ )，顯示負向的結果 ( $M = -6.047$ ,  $SD = .526$ ) 會較正向的結果 ( $M = -5.299$ ,  $SD = .454$ ) 引發更大的 FN (見圖七)。

置圖七於此

除了輸贏結果的主要效果之外，也發現情境及輸贏結果的交互作用 ( $F(1, 16) = 6.380, p = .022$ )，事後比較發現風險比率情境 (Percentage Condition) 的負向結果 ( $M = -6.542, SD = .638$ ) 會較正向結果 ( $M = -4.971, SD = .456$ ) 引發較大的 FN (圖八、圖九)。風險程度與輸贏結果的交互作用也達到顯著 ( $F(1, 16) = 6.105, p = .025$ )，事後比較發現差異來自於低風險程度下輸贏結果的差異。顯示在低風險選擇後的損失 ( $M = -6.535, SD = .581$ ) 比起酬賞 ( $M = -5.252, SD = .506$ ) 會引發較大的 FN (圖十)。

置圖八於此

置圖九於此

置圖十於此

除此之外，本研究也將參與者在實驗前填寫的刺激尋求量表（Sensation Seeking Scale）的得分與腦波進行相關分析，結果發現量表得分與 CV Condition 下低風險牌呈現時的 FN 有相關。顯示當問卷分數越高時，在看到 CV Condition 中低風險牌的 FN 振幅越大（ $r=-.415$ ,  $p=.049$ ）。此結果可以解釋為越追求刺激的參與者當看到電腦選擇了較低風險的牌，會將該選項評為較差的選擇（圖十一）。同時也發現量表分數與 CV condition 下低風險牌的損失結果接近相關（ $r=-.400$ ,  $p=.056$ ），顯示追求刺激的參與者看到 CV Condition 下的低風險損失會有較大的 FN 產生（圖十二）。可解釋為追求刺激的參與者將低風險的負向結果評比的更差。



## 第七節、討論

實驗一藉由不同風險操弄方式（變異係數及輸贏比率）以引出不同線索的風險程度（高及低）。實驗結果發現在不同的風險操弄方式會在不同階段影響 FN 的振幅，以變異係數操弄的風險情境下，高風險事件會引發較低風險事件大的 FN；而在實際回饋畫面結果中，也發現情境輸贏比率情境的損失會較正向回饋引發較大的 FN。這結果可以回歸到不同風險操弄方式所代表的意涵，變異係數代

表了結果的不確定性，過去研究也指出不確定因素的呈現會活化前扣帶皮質 (Ke'ri, 2004)，也有研究發現不確定性因素與FN的振幅有關(Hirsh, 2008; Yu, Zhou, Zhou, 2011)；而操弄輸贏比率的方式則代表獲得酬賞的機率，在操弄輸贏比率的方式中會讓個體對於結果的好壞有預期（在輸的機率高的情境中，參與者會傾向預期負向的回饋），而若結果與預期不符合時會引發較大的FN。

在本研究中觀察到回饋畫面中，情境輸贏比率情境的損失會較正向回饋引發較大的FN。此結果應來自於實驗設計中，輸贏情境的損失為較少出現的回饋結果。參與者在實驗過程中會不斷的對於可能出現的結果產生預期，在輸贏情境比率中較常出現的回饋結果為正向回饋。所以當出現較少出現的回饋結果便代表了出現非預期的結果，符合過去研究對於非預期結果會引發較大FN的結論 (Schultz, Dayan, & Montague, 1997; Holroyd, 2002)。在實驗一中所觀察到的低風險選擇後的損失比起正向回饋引發較大的FN也再度呼應前人對於非預期結果會引發較大FN的發現。

實驗一結果顯示FN確實會反映風險因素，此結果提供了過去對於風險與FN關係的直接證據也同時讓我們得以檢驗增強學習理論 (Reinforcement Learning Theory) 在錯誤偵測系統中的適用性。由於預期風險代表了損失的可能性，故風險增加即代表錯誤的可能性增加。且由於實驗設計因素，預期風險呈現畫面並非實際回饋結果，增強學習理論將無法良好解釋為何回饋結果出現之前便能引發FN而該現象恰能被錯誤可能性理論給解釋。FN會反映風險因素也提供證據顯示增強學習理論在解釋錯誤偵測系統上有所疏漏。由於風險或錯誤可能性的因素並未包含於增強學習理論之解釋範圍內，表示完整的錯誤偵測系統應包含除了回饋、預期衝突以外更多的評估因素（如錯誤可能性）。

根據目前實驗結果顯示，在選擇牌畫面呈現時FN會反映風險程度而在回饋結果畫面呈現時FN會反映回饋結果好壞。雖然兩部分畫面分別顯示支持錯誤可能性及增強學習理論，但受限於實驗設計將錯誤可能性訊息及回饋結果訊息分



別呈現於選牌畫面及回饋結果畫面故並無法直接比較錯誤可能性與增強學習理論在錯誤偵測系統中的關係。本研究將在實驗二中設計將兩個訊息同時呈現於同一畫面，以利研究者藉由觀察 FN 振幅的變化以探討 FN 所反應的是否僅有回饋訊息或僅有錯誤可能性訊息，或是兩者皆有。



## 第五章、實驗二

經由實驗一發現 FN 確實會反映風險，顯示確實增強學習理論用以解釋錯誤偵測系統上有所不足。故實驗二將檢驗是否錯誤可能性同為錯誤偵測系統下的評估因素。在實驗二中，設計一個同時會包含增強學習訊息及高低錯誤可能性訊息之畫面藉以觀察 FN 變化之情況。若錯誤可能性因素應被包含於錯誤偵測系統，則應可觀察到 FN 的振幅在同時包含負向回饋訊息及高錯誤可能性訊息時有最大的反應。

### 第一節、參與者

參與者皆為國立政治大學大學部的學生共 15 人，其中男性 9 人。參與者平均年齡為 24.47 歲。所有的參與者視力必須正常或經矯正後正常，且皆為右利及並未經過腦傷者。實驗前將告知參與者除了基本的實驗參與費 300 元之外，會依其結果發與獎金。實驗全長（連同電極紀錄帽的配戴及事後清理等步驟）約 3 個小時。

### 第二節、實驗設計、作業及流程

實驗作業在電腦進行，參與者坐在距離刺激螢幕的 80~100 公分處。在實驗過程中參與者將進行類似比大小之賭博遊戲，遊戲規則為每回合將接續呈現三副牌，若在該次獲得的牌數字大於前一次呈現的牌便可獲得金額酬賞（10 元）；而若在該次獲得牌小於或等於前一張牌時則會損失一些金錢（10 元）。參與者在第二張牌呈現時可以按鍵決定要不要取得第三張牌，若拒絕第三張牌則不會有任何酬賞或損失。三張牌皆以實際撲克牌之畫面呈現，為出現的牌僅有數字 1 至數字 9（為避免圖型的差異及為讓參與者有明確的預期分界，故不包含 10、J、Q 及 K 牌）。

每個回合開始時提示聲及十字凝視點同時呈現並維持 1000ms。接著會呈現 1500ms 的基準牌，在 1000ms 的十字凝視點後接著呈現第二張的比較牌。第二張的比較牌呈現 1500ms 時參與者可以按鍵決定是否要取得第三張牌。接著呈現十字凝視點及第三張牌。全部實驗結束後，累積的積分會換為獎金發放給參與者。實驗流程如圖十三。

-----  
置圖十三於此  
-----

本實驗設計操弄第二張牌的符合預期與否及錯誤可能性(高、低)之訊息。由於第二張牌同時代表了預期(以第一張牌的數值以推估第二張牌的可能性)及錯誤可能性(以推估呈現第三張牌是否有機會獲得酬賞)。舉例來說，參與者在第一張牌獲得紅心 3 而第二張牌獲得紅心 8。則對參與者而言，該牌同時包含了符合預期(出現大於 3 的數值機率較高)與高錯誤可能性(第三張牌要獲得大於紅心 8 的可能性較低)的訊息。故第二張牌的意義可有高錯誤可能性的非預期回饋、高錯誤可能性的預期回饋、低錯誤可能性的非預期回饋、低錯誤可能性的預期回饋四種。

根據增強學習理論及錯誤可能性理論，將預期兩者之假設有所不同。若為支持增強學習理論，則預期 FN 的幅度依大小為高錯誤可能性的非預期回饋、低錯誤可能性的非預期回饋、低錯誤可能性的預期回饋、高錯誤可能性的預期回饋。而若支持錯誤可能性理論，則預期 FN 的幅度依大小為高錯誤可能性的非預期回饋、高錯誤可能性的預期回饋、低錯誤可能性的非預期回饋、低錯誤可能性的預期回饋。

### 第三節、實驗程序

同實驗一。

### 第四節、神經生理訊號紀錄(Neurophysiological Recording)

同實驗一。

### 第五節、資料分析流程

同實驗一。

### 第六節、實驗結果

實驗結果依照三張牌呈現以分為三個部分以進行分析。第一張牌將進行 3 (錯誤可能性) × 3 (記錄點) 的 ANOVA 考驗。以檢驗錯誤可能性是否會影響 FN 的振幅。對於第二張牌畫面的分析則進行 2 (預期) × 2 (錯誤可能性) × 3 (記錄點) 的 ANOVA 考驗。第三張牌畫面則是進行 2 (反應) × 2 (回饋結果) × 3 (記錄點) 的考驗。為避免違反球型假設，腦波數據的變異數分析使用 Greenhouse-Geisser 法校正自由度。

在第一張牌畫面的部分，依照數值的大小分為錯誤可能性低、中、高三組。錯誤可能性低的組別包含牌面 1, 2, 3 及 4；錯誤可能性中的組別為牌面 5；錯誤可能性高的組別則是牌面 6, 7, 8 及 9。結果顯示在記錄點的變項有差異， $F(2, 28)=19.882, p<.00$ 。事後比較發現在 Fz 的 FN 幅度 ( $M=-6.312, SD=.705$ ) 顯著大於 Cz ( $M=-3.646, SD=.458$ ) 及 Pz ( $M=-2.395, SD=.518$ )。也發現錯誤可能性有主要效果， $F(2, 28)=17.854, p<.00$ ，事後比較顯示當錯誤可能性為中等 (出現 5) 時，FN 的振幅 ( $M=-5.642, SD=.654$ ) 大於當錯誤可能性高 ( $M=-3.415, SD=.377$ ) 及低 ( $M=-3.295, SD=.445$ ) 時。且錯誤可能性高低之間沒有差異 (見

圖十四)。

-----  
置圖十四於此  
-----

第二張牌畫面中 2 (預期) × 2 (錯誤可能性) × 3 (記錄點: Fz, Cz, Pz) 的分析結果顯示在記錄點的變項有差異,  $F(2, 28)=13.310$ ,  $p=.001$ 。事後比較發現在 Fz 的 FN 幅度 ( $M=-5.642$ ,  $SD=.626$ ) 顯著大於 Cz ( $M=-3.670$ ,  $SD=.560$ ) 及 Pz ( $M=-2.381$ ,  $SD=.557$ )。在 Cz 的 2 (預期) × 2 (錯誤可能性) 分析中發現預期結果的主要效果,  $F(1, 14)=13.759$ ,  $p=.002$ , 非預期訊息 ( $M=-3.911$ ,  $SD=.570$ ) 所引發的 FN 會較預期訊息 ( $M=-3.428$ ,  $SD=.558$ ) 大。同時也發現錯誤可能性的主要效果接近顯著 ( $F(1, 14)=4.422$ ,  $p=.054$ ) , 事後比較顯示高錯誤可能性訊息會引發較大 FN (見圖十五)。各 FN 的數值如表四。

-----  
置圖十五於此  
-----

-----  
置表五於此  
-----

第三張牌畫面的 2 (反應: 拒絕、接受) × 2 (正負向結果) × 3 (記錄點: Fz, Cz, Pz) 的考驗的分析結果顯示在記錄點的變項有差異,  $F(2, 28)=8.784$ ,  $p=.005$ 。事後比較發現在 Fz 的 FN 幅度 ( $M=-5.378$ ,  $SD=.692$ ) 顯著大於 Cz ( $M=-3.178$ ,  $SD=.541$ ) 及 Pz ( $M=-2.624$ ,  $SD=.608$ )。也同時發現反映及正負向

結果的交互作用， $F(2, 28)=4.087$ ， $p=.037$ ，事後比較顯示在贏的結果下，拒絕（ $M=-4.129$ ， $SD=.476$ ）及接受（ $M=-3.363$ ， $SD=.472$ ）的反映會引發不同振幅的 FN（見圖十六）。

-----  
置圖十六於此  
-----

## 第七節、討論

實驗二的實驗中接連呈現三副牌，三副牌各自可讓研究者看到不同的訊息。首先在第一副牌觀察到參與者在藉由當下訊息以建立後續的預期及想法的腦波變化；第二副牌可以觀察到腦波對於預期及錯誤可能性的影響；第三副牌可以觀察參與者在觀察選擇結果時腦波的變化。

第一副牌的分析結果發現當參與者看到牌面 5 時會引發最大的 FN，而高低錯誤可能性之間沒有差異。表示當參與者無法藉由此訊息以推斷後續結果時會引發較大的 FN，此結果與實驗一 FN 反映風險因素的結果可以相互解釋。由於無法對於結果的不確定性而有較高的風險程度因而觀察到較大的 FN 振幅。

第二副牌同時包含了兩個因素：增強學習理論之因素（預期）與錯誤可能性因素。分析結果發現非預期結果與錯誤可能性因素會對 FN 振幅造成影響，顯示錯誤偵測系統在評估事件時，預期與錯誤可能性兩者皆會被納入評估之因素。且觀察到的 FN 振幅依序為高錯誤可能性的非預期回饋、高錯誤可能性的預期回饋、低錯誤可能性的非預期回饋、低錯誤可能性的預期回饋。

結果顯示，記錄點 Cz 觀察到的 FN 振幅與預期及錯誤可能性有關。過去研究中，主要觀察到 FN 的紀錄點位置為 Fz 及 FCz（Gehring, et al., 1993;

Miltner, et al., 1997)。但仍有部分 FN 的研究亦採用較為後端的 Cz 做為分析的位置。近期研究指出，錯誤監控系統除了前扣帶皮質 (ACC) 之外，疆核 (habenula) 在錯誤監控上亦扮演著與行為修正有關的角色 (Hikosaka, 2010)。在以人類作為參與者的研究中，以 fMRI 進行參與者大腦活動量測，發現參與者在面對非預期的負向結果時，疆核位置的活化程度顯著上昇 (Salas, Baldwin, de Biasi, & Montague, 2010)。本研究的結果顯示出錯誤偵測系統可能同時涉及 ACC 及 habenula 兩腦區，需待後續研究進一步證實。

在實驗二的第三副牌中發現，當參與者拒絕了隱含有正向結果的選項時會引發較大的 FN。此外也可藉由趨勢觀察到當參與者選擇接受卻得到負向回饋時也會引發較大的 FN。這些結果都顯示似乎 FN 除了反映事件評估因素之外，也會反映情緒性的結果。過去也有許多 FN 會反映情緒性因素的研究，而主要 FN 的振幅會與負向情緒較有關 (Yasuda, Sato, Miyawaki, Kumano & Kuboki, 2004; Wiswede, Münte, Krämer & Rüsseler, 2009)。

在參與者拒絕了隱含有正向結果的選項部分，參與者在拒絕後看到正向結果時會引發參與者懊悔的負向情緒。也有賭博作業研究顯示當參與者有懊悔的情緒時會引發較大的 FN (Moser & Simons, 2009)。而在參與者接受了隱含負向結果的選項部分，參與者在接受後看到負向結果時也會引發參與者失望的負向情緒。綜合這些結果，顯示 FN 除了評估事件之外，同時也會反映負向情緒因素。

## 第六章、綜合討論

本研究主要目的為探討錯誤可能性於錯誤偵測系統中所扮演的角色。由於高風險預期的概念即包含錯誤的可能性，故實驗一中藉由風險作業以檢驗 FN 之振幅是否能反映錯誤可能性之因素。結果發現 FN 之振幅確實會反映風險程度的高低，且會受到不同風險操弄方式影響。此研究結果也顯示單純由增強學習理論解釋錯誤偵測系統實有所不足。實驗二更進一步探討增強學習訊號及錯誤可能性訊號何者較能完整解釋錯誤偵測系統。實驗二設計一個同時會包含增強學習訊息及錯誤可能性訊息之畫面，結果顯示 FN 的振幅會同時受到增強學習及錯誤可能性兩者訊息的影響。

### 第一節、風險

過去對於風險與 FN 的研究並未能良好控制回饋畫面呈現次數及期望值等混淆變項，企圖藉由實驗的設計以控制混淆變項及將預期風險與實際回饋結果區分的作業。實驗一藉由操弄變異係數 (CV) 或輸贏比率以造成高低風險程度，結果發現在操弄變異係數的情境下高風險選項會較低風險選項引發較大的 FN。過去風險相關研究多半使用輸贏機率或變異程度以操弄風險程度，在此研究結果中顯示變異係數在 ERP 實驗中較輸贏比率能操弄風險程度。在 ERP 實驗中，藉由操弄變異係數可避免操弄輸贏比率所造成正負向結果嘗試次不平均而引發的 P300。過去從行為和動物的研究結果皆顯示，CV 為較佳的操弄方式(Weber, Shafir, & Blais, 2004; Chung, 2011)。而 CV 可反映結果的不確定性 (uncertainty)，過去研究也指出不確定因素的呈現會活化前扣帶皮質 (Kerri, 2004)，可能也會與 FN 的振幅有關 (Hirsh, 2008; Yu, Zhou, Zhou, 2011)。故此研究結果可提供 FN 與不確定性因素關連之證據。



## 第二節、ACC 與懊悔

在實驗二中，參與者可以選擇是否讓第三副牌加入比較。結果發現當參與者拒絕了原本會有正向回饋的牌時，會觀察到較大的 FN。當個體得知自己並未選擇的選項會引發較好結果時，會產生懊悔之情緒。顯示 FN 除了評估事件的好壞之外也會反映情緒的因素，本研究結果顯示 FN 會與參與者懊悔的情緒有關。

Bell (1982)將懊悔描述為將一件給定事件的結果或狀態與將要選擇的狀態進行比較所產生的情緒。由此描述中可得知懊悔不僅是一種情緒，更牽涉到許多高等認知功能的處理。與基本情緒 (Basic Emotion) 不同的是，懊悔最初是起源至比較選擇與否的結果。個體評估自己選擇後的結果並且將選擇結果與未選擇結果進行比較，若該次選擇未能帶來較好的結果則會產生懊悔的情緒。過去研究也有證實懊悔情緒會活化與前扣帶回皮質 (Chandrasekhar et al., 2008)，也有研究指出懊悔情緒會引發較大振幅的 FN (Zhou, Yu & Zhou, 2010; Moser & Simons, 2009)。

## 第三節、錯誤可能性及錯誤偵測系統

由於過去主要用以解釋錯誤偵測系統的理论為增強學習理論，而增強學習理論之主要核心為比較實際結果與預期之間的衝突並且藉此差異以調整下次的決策行為。但增強學習理論並未能就尚未出現衝突前的訊號進行解釋，如本研究的實驗一。由於研究結果發現高預期風險的訊號會反映於 FN 的幅度上，而高預期風險對參與者代表的意義為預告犯錯的機會較大。綜合以上，除了顯示錯誤可能性的訊號會活化前扣帶皮質，更點出有些無法單純由增強學習理論所解釋的現象 (風險因素)。

而在實驗二中更直接比較增強學習訊號及錯誤可能性訊號對於錯誤監控

系統之影響，結果發現兩者皆有影響。且根據 FN 的振幅顯示兩者影響的程度相近。推估當非預期結果或高錯誤可能性畫面呈現時皆會傳送錯誤偵測訊號至前扣帶皮質並活化之，進而觀察到較大的 FN。對照至本實驗結果，顯示當一個畫面同時包含了非預期結果及高錯誤可能性訊息時，會有最大的 FN 產生；而非預期結果及高錯誤可能性各別出現時會引發振幅相近的 FN；當畫面並未包含非預期結果及高錯誤可能性訊息時則不會觀察到 FN。顯示無論單看增強學習理論或是錯誤可能性理論皆無法良好解釋此研究結果，唯有綜合兩者。故建議在錯誤偵測系統中納入錯誤可能性之評估因素，並待後續研究確認其可行性。

#### 第四節、總結

綜合本研究的兩個實驗，主要發現錯誤可能性對於個體在評估事件的影響。由於過去主要用以解釋錯誤偵測系統的理论為增強學習理論，而增強學習理論之主要核心為比較實際結果與預期之間的差異。本研究的實驗一點出有些無法單純由增強學習理論所解釋的現象（風險因素），並在實驗二中更直接指出錯誤可能行對於事件評估的影響。如此的現象更值得讓研究者重新思考不論增強學習理論或是錯誤可能性理論皆無法全面解釋現實生活中的事件評估依據，唯有將各種評估之因素納入並統整。

## 參考文獻

- Bell, D. E. (1982). Regret in decision making under uncertainty. *Operations research*, 961-981.
- Bellebaum, C., Kobza, S., Thiele, S., & Daum, I. (2011). Processing of expected and unexpected monetary performance outcomes in healthy older subjects. *Behavioral Neuroscience*, 125(2), 241.
- Bellebaum, C., Polezzi, D., & Daum, I. (2010). It is less than you expected: The feedback-related negativity reflects violations of reward magnitude expectations. *Neuropsychologia*, 48(11), 3343-3350.
- 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.
- Breiter, H. C., Aharon, I., Kahneman, D., Dale, A., & Shizgal, P. (2001). Functional imaging of neural responses to expectancy and experience of monetary gains and losses. *Neuron*, 30(2), 619-639.
- Brown, J. W., & Braver, T. S. (2005). Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex. *Science*, 307(5712), 1118-1121.
- Brown, J. W., & Braver, T. S. (2007). Risk prediction and aversion by anterior cingulate cortex. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 7(4), 266-277.
- Chang, Y. F., & Yen, N. S. (2008). *The feedback-related negativity is sensitive to the delayed outcome*. Paper presented at the 15th annual

meeting of the Cognitive Neuroscience Society, San Francisco, CA, U.S.A.

Chang, Y. F., Yen, N. S., Lin, K. Y., Chen, C. Y., & Kao, C. H. (2010). *The FRN is associated with the expectation*. Paper presented at the 17th annual meeting of the Cognitive Neuroscience Society, Montreal.

Chung, H. K. (2011). *Risk factor in somatic marker hypothesis*. Unpublished master's thesis, Chengchi University, Taipei, Taiwan.

Cloninger, C. R. (1987). A systematic method for clinical description and classification of personality variants: A proposal. *Archives of general psychiatry*, 44(6), 573.

de Bruijn, E. R. A., Hulstijn, W., Verkes, R. J., Ruigt, G. S. F., & Sabbe, B. G. C. (2004). Drug-induced stimulation and suppression of action monitoring in healthy volunteers. *Psychopharmacology*, 177(1), 151-160.

Dehaene, S., Posner, M. I., & Tucker, D. M. (1994). Localization of a neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 5(5), 303-305.

Galvan, A., Hare, T., Voss, H., Glover, G., & Casey, B. (2007). Risk-taking and the adolescent brain: who is at risk? *Developmental science*, 10(2), 8-14.

Gehring, W. J., Goss, B., Coles, M. G. H., Meyer, D. E., & Donchin, E. (1993). A neural system for error detection and compensation. *Psychological Science*, 4(6), 385.

- Gehring, W. J., & Willoughby, A. R. (2002). The medial frontal cortex and the rapid processing of monetary gains and losses. *Science*, *295*(5563), 2279–2282.
- Gemba, H., Sasaki, K., & Brooks, V. (1986). Error potentials in limbic cortex (anterior cingulate area 24) of monkeys during motor learning. *Neuroscience letters*, *70*(2), 223–227.
- Gerra, G., Zaimovic, A., Timpano, M., Zambelli, U., Delsignore, R., & Brambilla, F. (2000). Neuroendocrine correlates of temperamental traits in humans. *Psychoneuroendocrinology*, *25*(5), 479–496.
- Gibson, J., Krigolson, O., & Holroyd, C. (2006). Sensitivity of the feedback error-related negativity to reward probability. *Psychophysiology*, *43*, 41–42.
- Goyer, J. P., Woldorff, M. G., & Huettel, S. A. (2008). Rapid Electrophysiological Brain Responses are Influenced by Both Valence and Magnitude of Monetary Rewards. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(11), 2058–2069.
- Hajcak, G., Moser, J. S., Holroyd, C. B., & Simons, R. F. (2007). It's worse than you thought: The feedback negativity and violations of reward prediction in gambling tasks. *Psychophysiology*, *44*(6), 905–912.
- Hansenne, M., Pinto, E., Pitchot, W., Reggers, J., Scantamburlo, G., Moor, M., & Ansseau, M. (2002). Further evidence on the relationship between dopamine and novelty seeking: a neuroendocrine study. *Personality and individual differences*, *33*(6), 967–977.

- Heldmann, M., Russeler, J., & Munte, T. (2008). Internal and external information in error processing. *BMC Neuroscience*, *9*(1), 33.
- Hikosaka, O. (2010). The habenula: from stress evasion to value based decision making. *Nature Reviews Neuroscience*, *11*(7), 503–513.
- Hirsh, J. B., & Inzlicht, M. (2008). The devil you know. *Psychological Science*, *19*(10), 962.
- Hohnsbein, J., Falkenstein, M., & Hoormann, J. (1989). Error processing in visual and auditory choice reaction tasks. *Journal of Psychophysiology*, *3*, 32.
- Holroyd, & Krigolson. (2007). Reward prediction error signals associated with a modified time estimation task. *Psychophysiology*, *44*(6), 913–917.
- Holroyd, C. B., & Coles, M. G. H. (2002). The neural basis of human error processing : Reinforcement learning, dopamine, and the error-related negativity. *Psychological Review*, *109*(4), 679–709.
- Holroyd, C. B., & Krigolson, O. E. (2007). Reward prediction error signals associated with a modified time estimation task. *Psychophysiology*, *44*(6), 913–917.
- Holroyd, C. B., Larsen, J. T., & Cohen, J. D. (2004). Context dependence of the event-related brain potential associated with reward and punishment. *Psychophysiology*, *41*(2), 245–253.
- Holroyd, C. B., Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Nystrom, L., Mars, R. B., Coles, M. G. H., & Cohen, J. D. (2004). Dorsal anterior cingulate cortex shows fMRI response to internal and external error signals. *Nature*

*Neuroscience*, 7(5), 497-498.

Kennerley, S. W., Walton, M. E., Behrens, T. E. J., Buckley, M. J., & Rushworth, M. F. S. (2006). Optimal decision making and the anterior cingulate cortex. *Nature neuroscience*, 9(7), 940-947.

Kéri, S., Decety, J., Roland, P. E., & Gulyás, B. (2004). Feature uncertainty activates anterior cingulate cortex. *Human Brain Mapping*, 21(1), 26-33.

Kerns, J. G., Cohen, J. D., MacDonald, A. W., Cho, R. Y., Stenger, V. A., & Carter, C. S. (2004). Anterior cingulate conflict monitoring and adjustments in control. *Science*, 303(5660), 1023-1026.

Kreussel, L., Hewig, J., Kretschmer, N., Hecht, H., Coles, M. G. H., & Miltner, W. H. (2012). The influence of the magnitude, probability, and valence of potential wins and losses on the amplitude of the feedback negativity. *Psychophysiology*, 49(2), 207-219.

Liu, X., Powell, D. K., Wang, H., Gold, B. T., Corbly, C. R., & Joseph, J. E. (2007). Functional dissociation in frontal and striatal areas for processing of positive and negative reward information. *The Journal of neuroscience*, 27(17), 4587-4597.

Münte, T. F., Heldmann, M., Hinrichs, H., Marco-Pallares, J., Krämer, U. M., Sturm, V., & Heinze, H. J. (2007). Nucleus accumbens is involved in human action monitoring: evidence from invasive electrophysiological recordings. *Frontiers in human neuroscience*, 1(11), 1-6.

Miltner, W. H., Braun, C. H., & Coles, M. G. (1997). Event-related brain

- potentials following incorrect feedback in a time-estimation task: Evidence for a 'Generic' neural system for error-detection. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 9(6), 788-798.
- Moser, J. S., & Simons, R. F. (2009). The neural consequences of flip flopping: The feedback related negativity and salience of reward prediction. *Psychophysiology*, 46, 313-320.
- Nieuwenhuis, S., Yeung, N., Holroyd, C. B., Schurger, A., & Cohen, J. D. (2004). Sensitivity of electrophysiological activity from medial frontal cortex to utilitarian and performance feedback. *Cerebral Cortex*, 14(7), 741-747.
- Niki, H., & Watanabe, M. (1979). Prefrontal and cingulate unit activity during timing behavior in the monkey. *Brain research*, 171(2), 213-224.
- O'Doherty, J., Dayan, P., Schultz, J., Deichmann, R., Friston, K., & Dolan, R. J. (2004). Dissociable roles of ventral and dorsal striatum in instrumental conditioning. *Science*, 304(5669), 452-454.
- Oldfield, R. (1971). The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97-113.
- Pfabigan, D. M., Alexopoulos, J., Bauer, H., & Sailer, U. (2011). Manipulation of feedback expectancy and valence induces negative and positive reward prediction error signals manifest in event-related brain potentials. *Psychophysiology*, 48(5), 656-664.
- Potts, G. F., Martin, L. E., Burton, P., & Montague, P. R. (2006). When things are better or worse than expected: The medial frontal cortex



- and the allocation of processing resources. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(7), 1112–1119.
- Salas, R., Baldwin, P., de Biasi, M., & Montague, P. R. (2010). BOLD Responses to Negative Reward Prediction Errors in Human Habenula. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*(36).
- San Martín, R., Manes, F., Hurtado, E., Isla, P., & Ibañez, A. (2010). Size and probability of rewards modulate the feedback error-related negativity associated with wins but not losses in a monetarily rewarded gambling task. *NeuroImage*, *51*(3), 1194–1204.
- Santesso, D. L., & Segalowitz, S. J. (2009). The error-related negativity is related to risk taking and empathy in young men. *Psychophysiology*, *46*(1), 143–152.
- Scheffers, M. K., Coles, M. G. H., Bernstein, P., Gehring, W. J., & Donchin, E. (1996). Event-related brain potentials and error-related processing: An analysis of incorrect responses to go and no-go stimuli. *Psychophysiology*, *33*(1), 42–53.
- Schultz, W., Dayan, P., & Montague, P. R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science*, *275*(5306), 1593–1599.
- Schultz, W., Tremblay, L., & Hollerman, J. R. (2000). Reward processing in primate orbitofrontal cortex and basal ganglia. *Cerebral Cortex*, *10*(3), 272–283.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction* (Vol. 1): Cambridge Univ Press.
- Weber, E. U., Shafir, S., & Blais, A.R. (2004). *Predicting risk*

*sensitivity in humans and lower animals: risk as variance or coefficient of variation. Psychological Review, 111, 430-445.*

- Yen, N. S. \*, Lai, Y. R., Chang, Y. F., Yeh, T. H., & Chen, K. H. (2007b, Sep.). The effect of expectancy on feedback-related negativity. Poster presented at the 5th Annual Meeting of Society for Neuroeconomics, Boston, U.S.A.
- Yeung, N., Holroyd, C., & Cohen, J. (2005). ERP correlates of feedback and reward processing in the presence and absence of response choice. *Cerebral Cortex, 15*(5), 535-544.
- Yu R, Zhou W, Zhou X. (2011). Rapid Processing of Both Reward Probability and Reward Uncertainty in the Human Anterior Cingulate Cortex. *PLoS ONE 6*(12): e29633.
- Zani, A., & Proverbio, A. M. (2003). *The cognitive electrophysiology of mind and brain*: Academic Press.
- Zhou, Z., Yu, R., & Zhou, X. (2010). To do or not to do? Action enlarges the FRN and P300 effects in outcome evaluation. *Neuropsychologia, 48*(12), 3606-3613.
- Zirnheld, P. J., Carroll, C. A., Kieffaber, P. D., O'donnell, B. F., Shekhar, A., & Hetrick, W. P. (2004). Haloperidol impairs learning and error-related negativity in humans. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16*(6), 1098-1112.

## 附表說明

表一：ERN 與 FN 異同整理比較表。

表二：增強學習理論及錯誤可能性理論異同整理比較表。

表三：實驗一牌局設計。

表四：實驗二腦波數值。



## 附表

表一

	ERN	FN
全名	錯誤相關負波 (Error-Related Negativity)	回饋相關負波 (Feedback-Related Negativity)
別名	response ERN, rERN, $N_E$	feedback ERN, fern, FN
作業型態	反映作業	賭博作業、估計作業
錯誤來源	內在	外在
來源	ACC	ACC
發生時間	事件後 50~150ms	回饋後 250~350ms

表二

增強學習理論 錯誤可能性理論

錯誤來源	回饋結果	錯誤可能性畫面
時間點	回饋結果呈現	錯誤可能性呈現時
來源	ACC	ACC
注意力系統	不需介入	介入



表三

	CV Condition		% Condition	
	高風險牌	低風險牌	高風險牌	低風險牌
+	50%	50%	50%	75%
-	50%	50%	50%	25%
CV	10.72	4.12	10.72	10.72
EV	100	100	100	100



表四

	預期結果	非預期結果
高錯誤可能性	-3.753 (2.307)	-4.072 (2.740)
低錯誤可能性	-3.103 (2.069)	-3,750 (1.858)



## 附圖說明

圖一：典型 FN 波形（摘自 Gehring & Willoughby, 2002）。

圖二：增強學習理論機制示意圖（摘自 Holroyd & Cole, 2002）。

圖三：錯誤可能性模式與衝突模式（摘自 Brown, 2005）。

圖四：實驗一流程圖。參與者先看到兩副牌並按鍵開始該回合，呈現電腦選擇的其中一副牌後，接續呈現回饋畫面。

圖五：實驗一操弄方式及風險高低之腦波結果。

圖六：實驗一選擇牌畫面變異程度操弄方式下高低風險程度之腦波趨勢圖。

圖七：實驗一回饋畫面正負向回饋腦波比較結果。

圖八：實驗一回饋畫面操弄方式及輸贏結果。

圖九：實驗一回饋畫面操弄方式及輸贏結果腦波。

圖十：實驗一回饋畫面高低風險程度與輸贏結果之比較。

圖十一：實驗一風險測量問卷與選擇牌畫面變異操弄情境下低風險腦波之相關。

圖十二：實驗一風險測量問卷與回饋畫面變異操弄情境下低風險損失腦波之相關。

圖十三：實驗二流程圖。

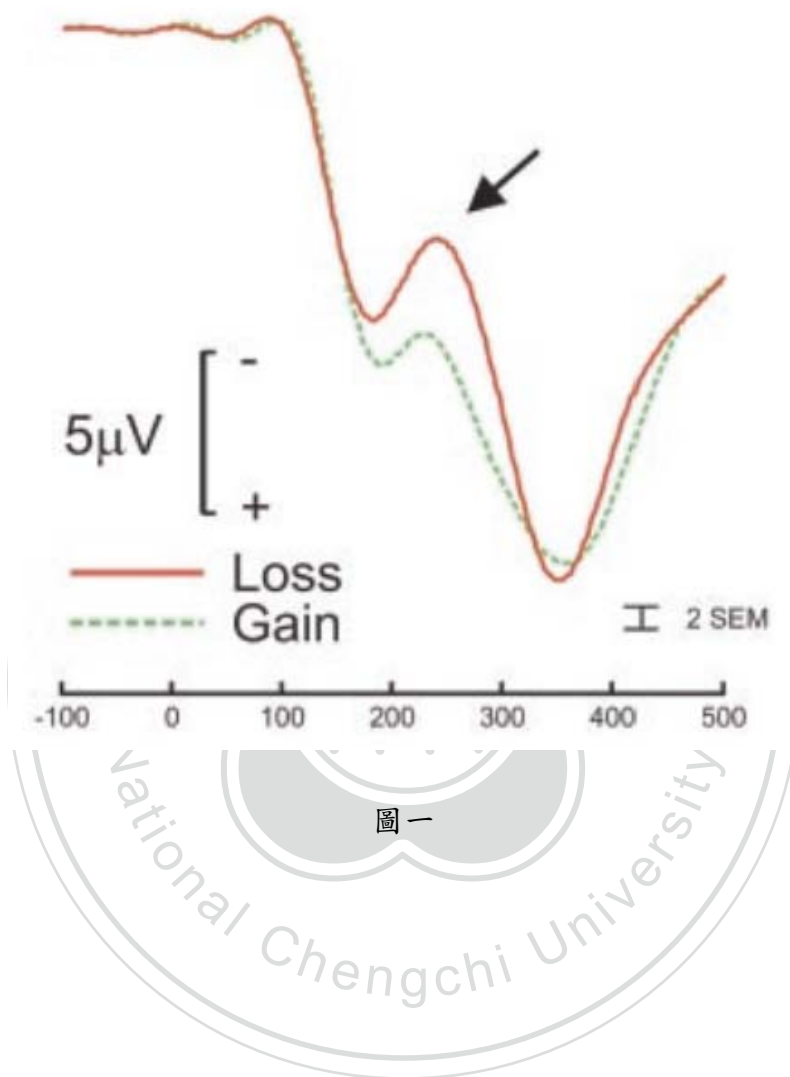
圖十四：實驗二中第一副牌的數值，將牌面數值大小分為高、中、低錯誤可能性。

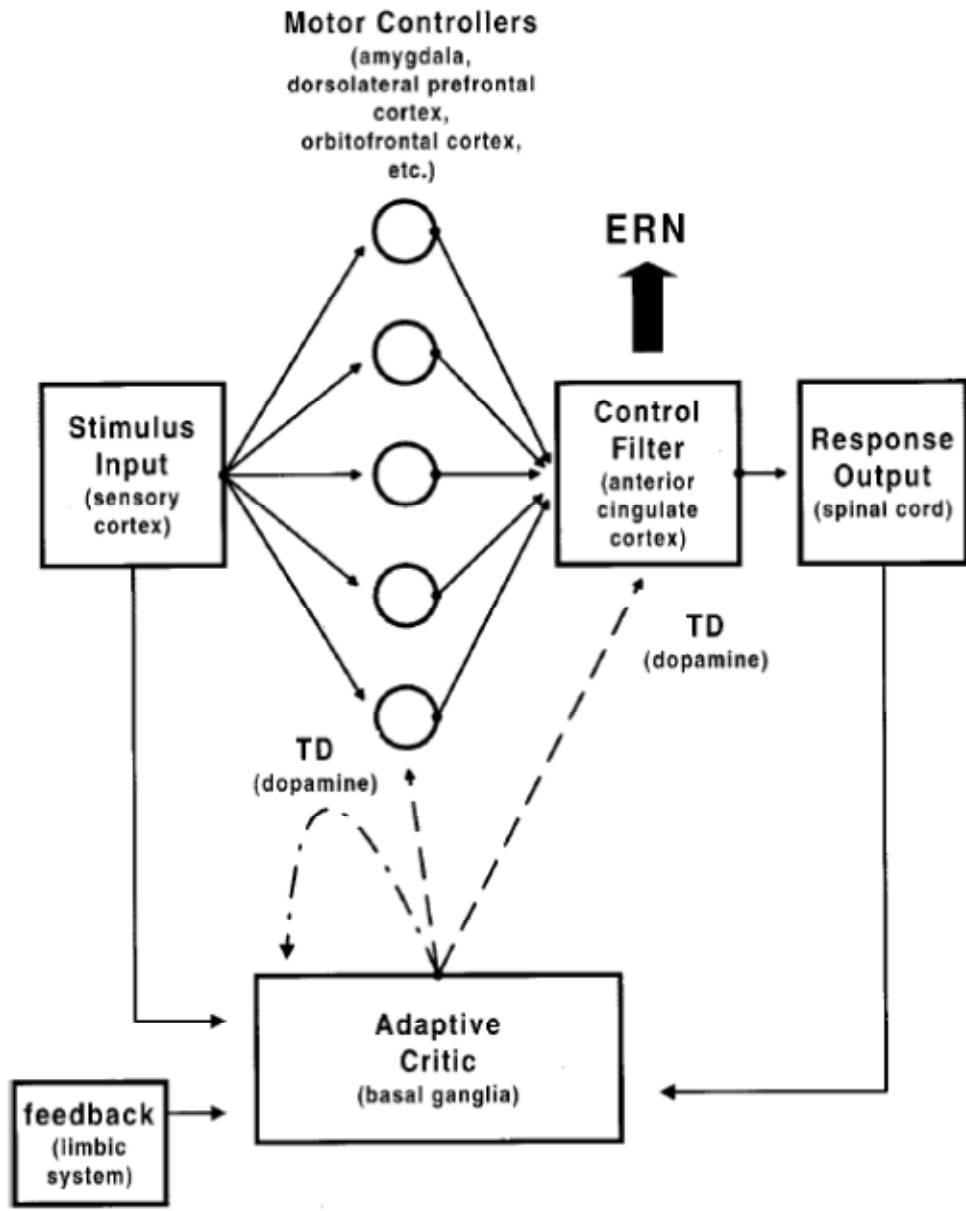
圖十五：實驗二中第二副牌的數值，高低風險程度與預期結果。

圖十六：實驗二中第三副牌的數值，參與者選擇與其結果。

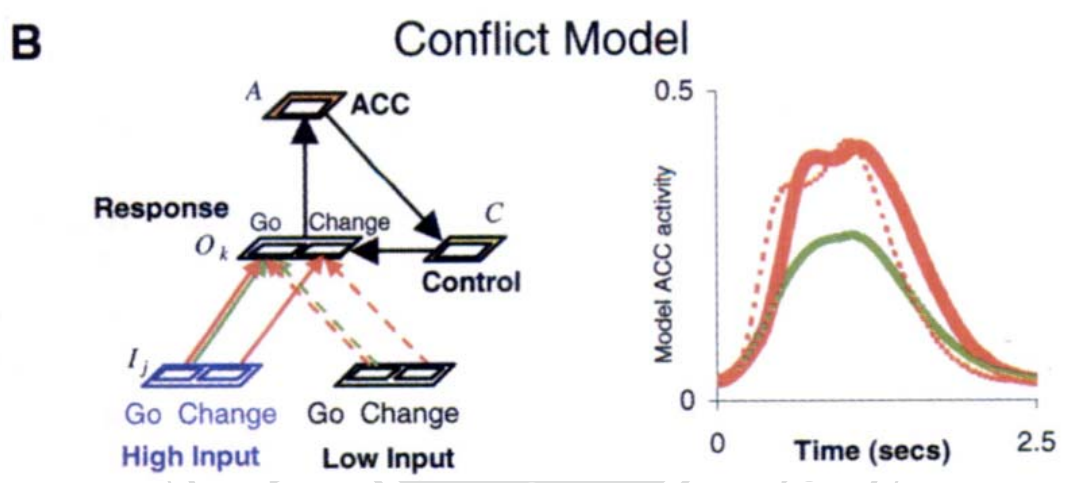
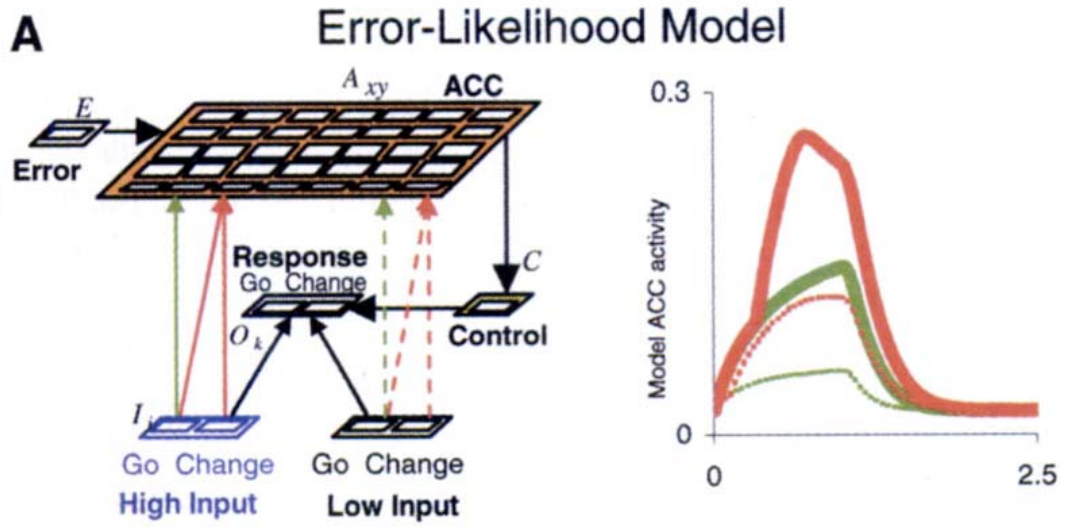


附圖

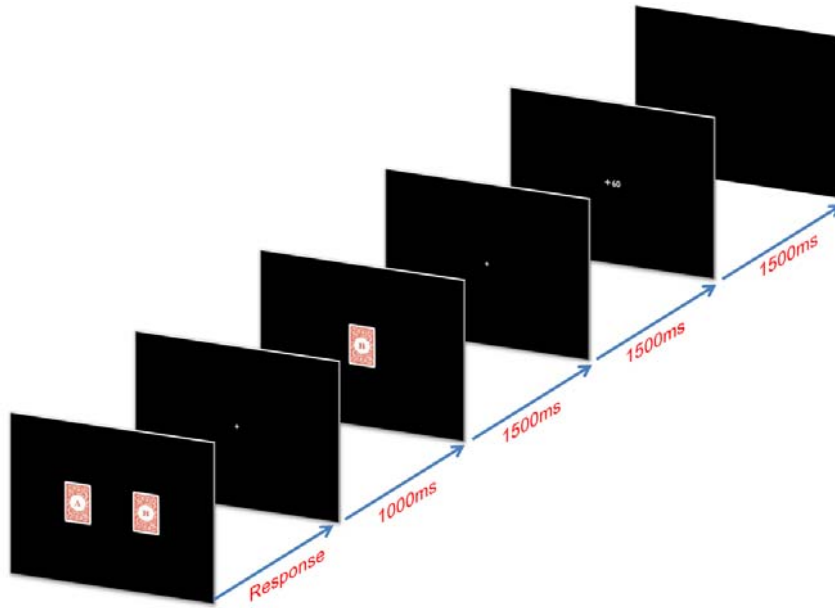


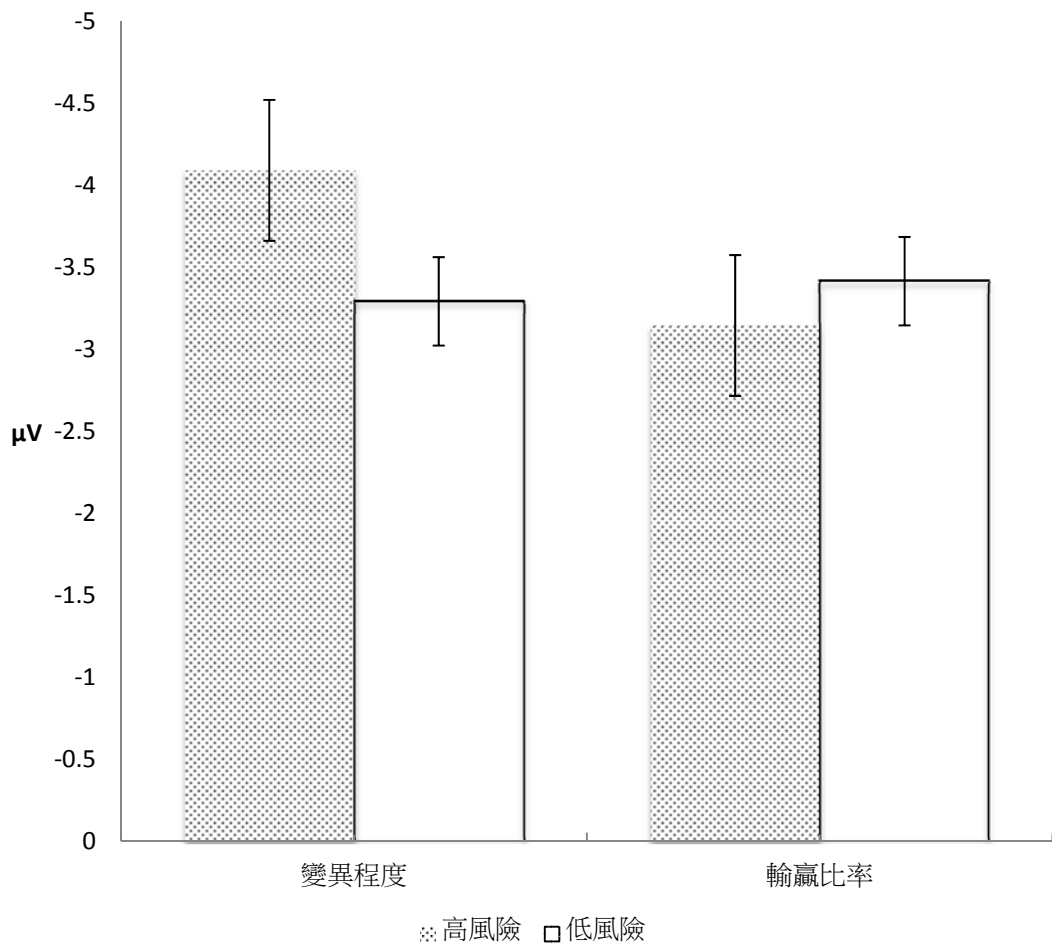


圖二



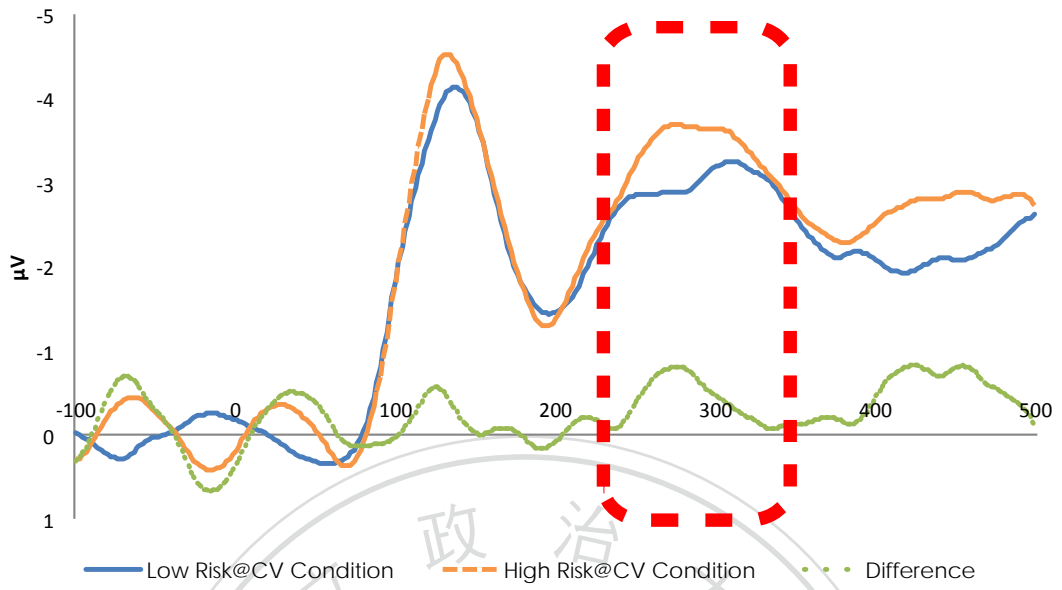
圖三

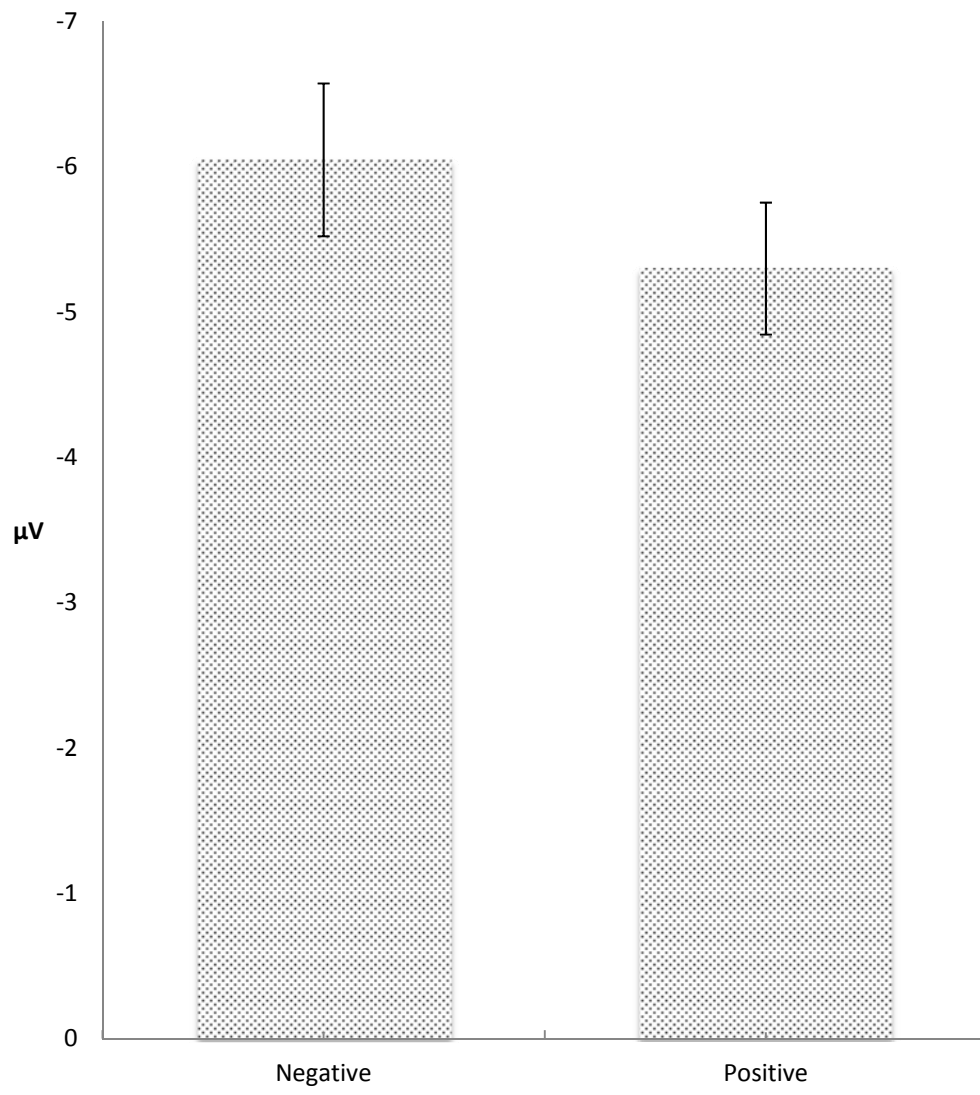




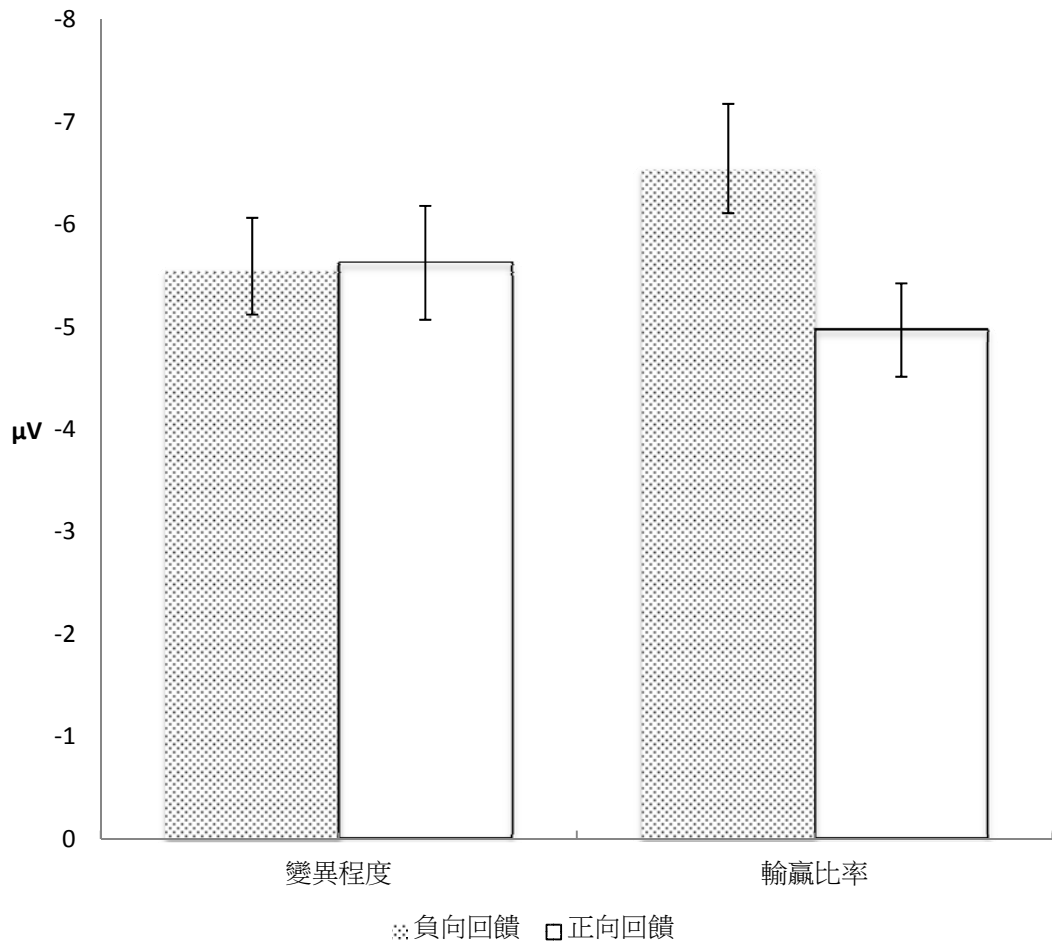
圖五

### Risk Level @ CV Condition



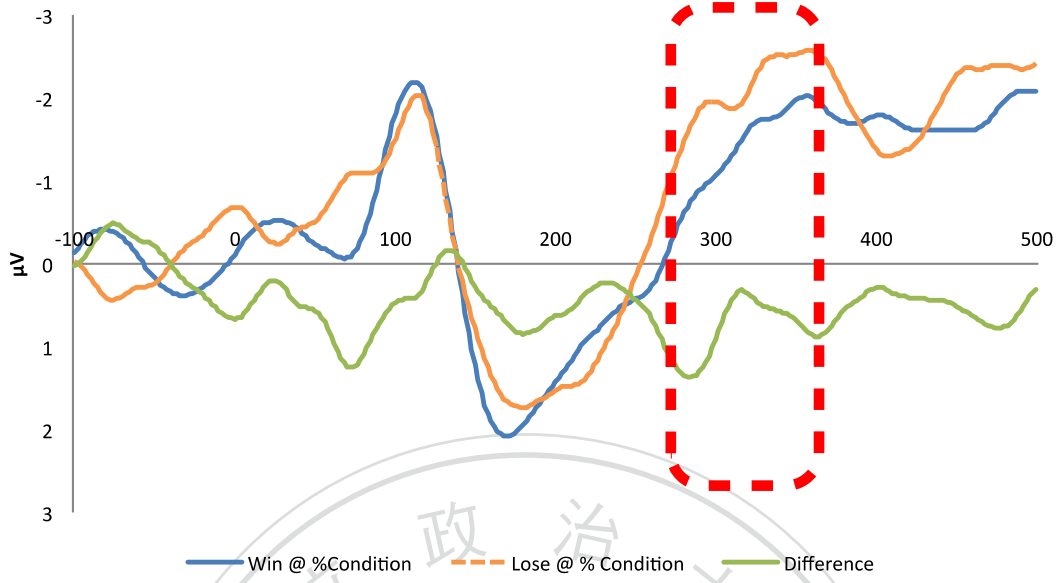


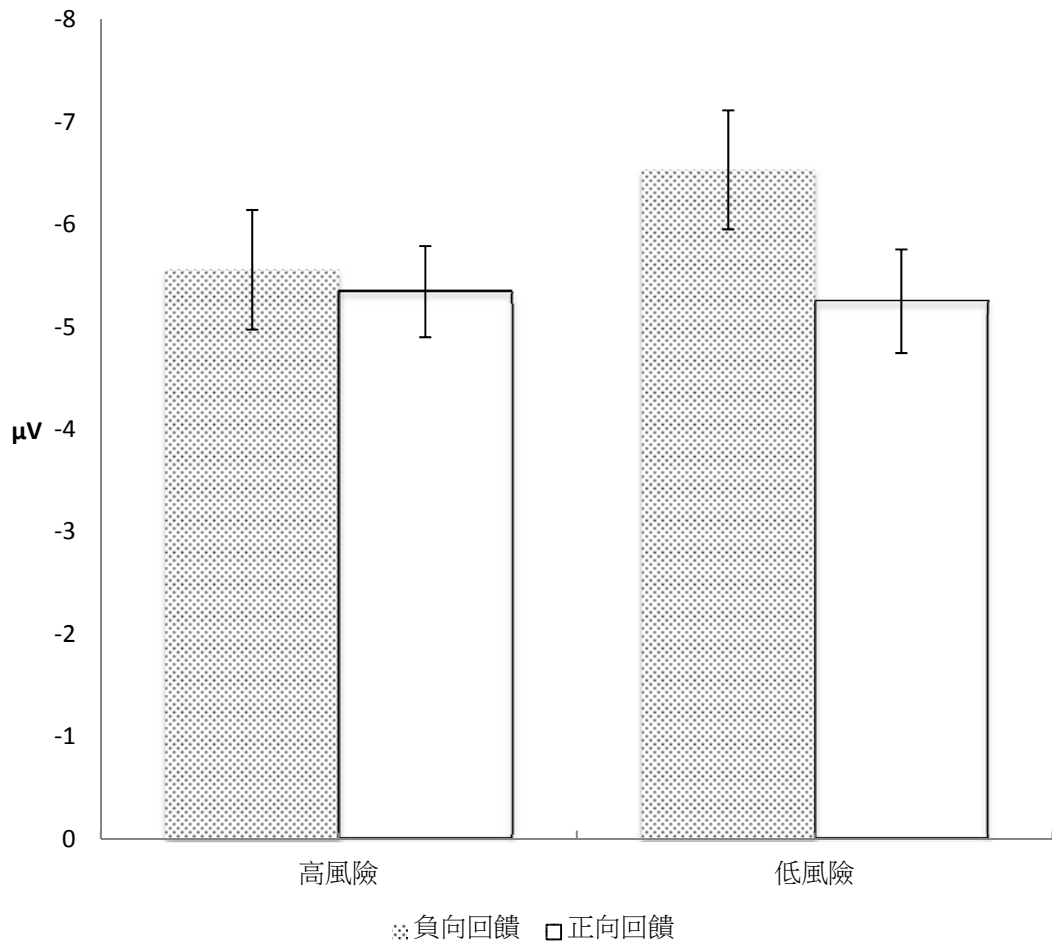
圖七

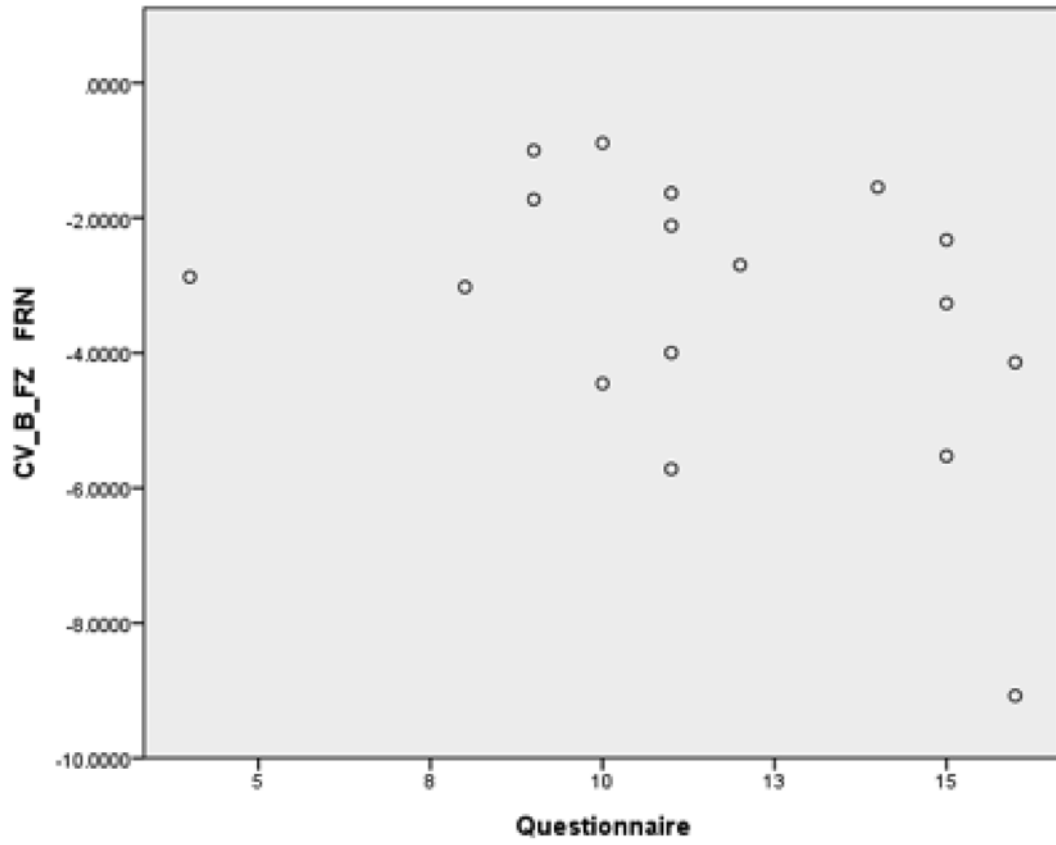


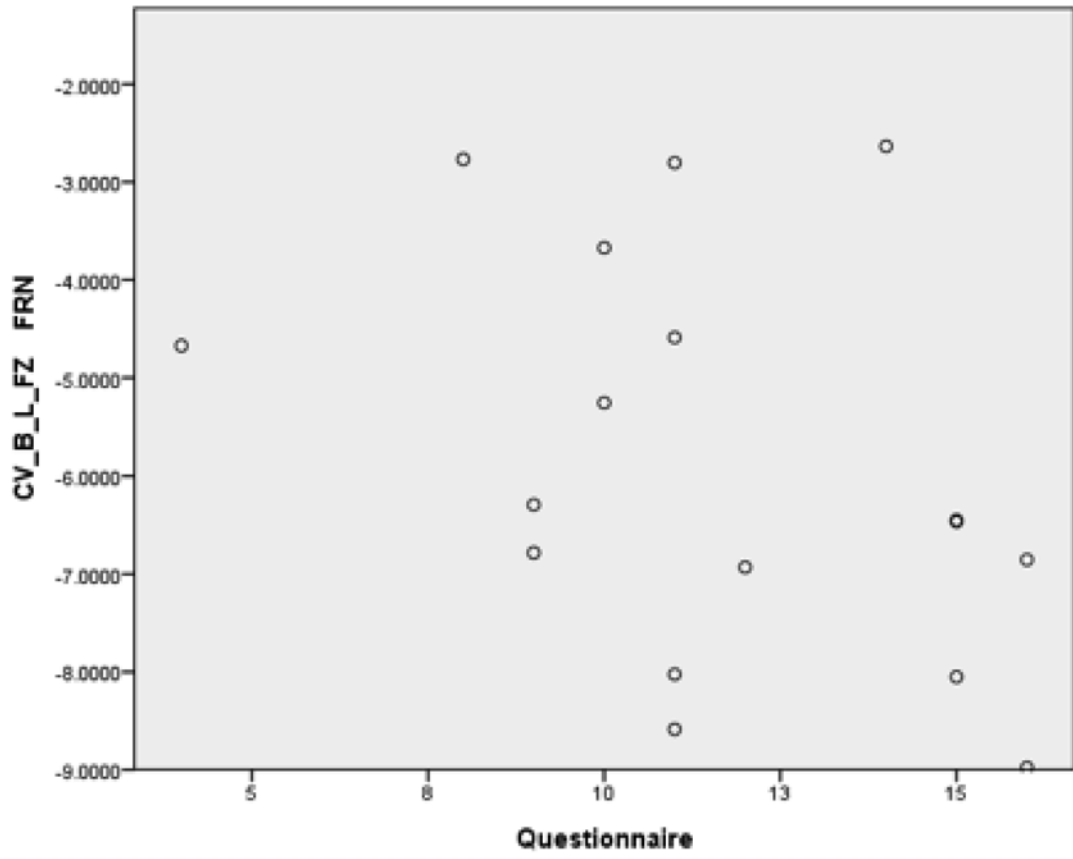


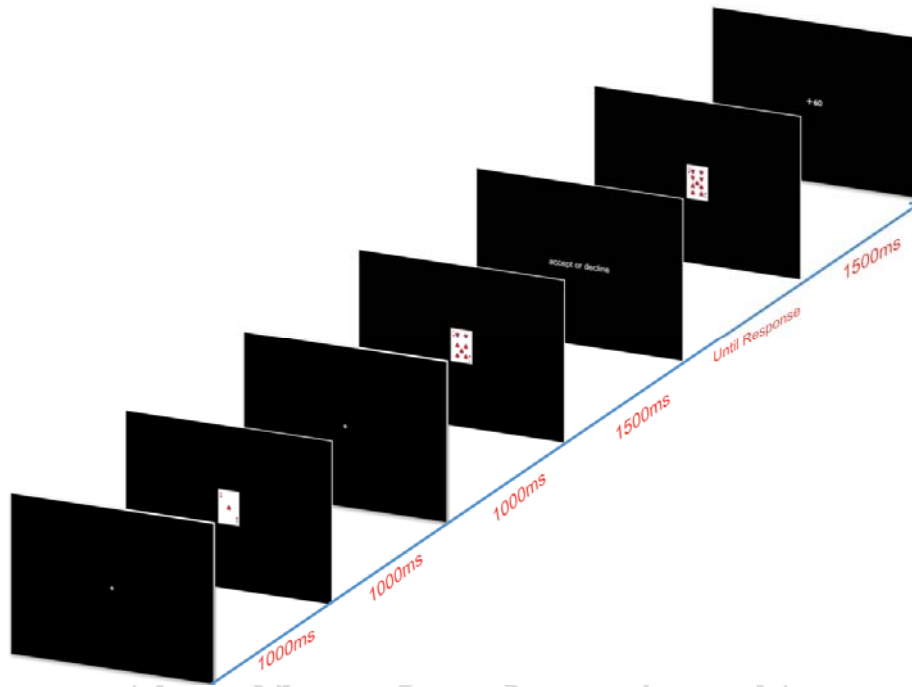
### Win Lose @ % Condition

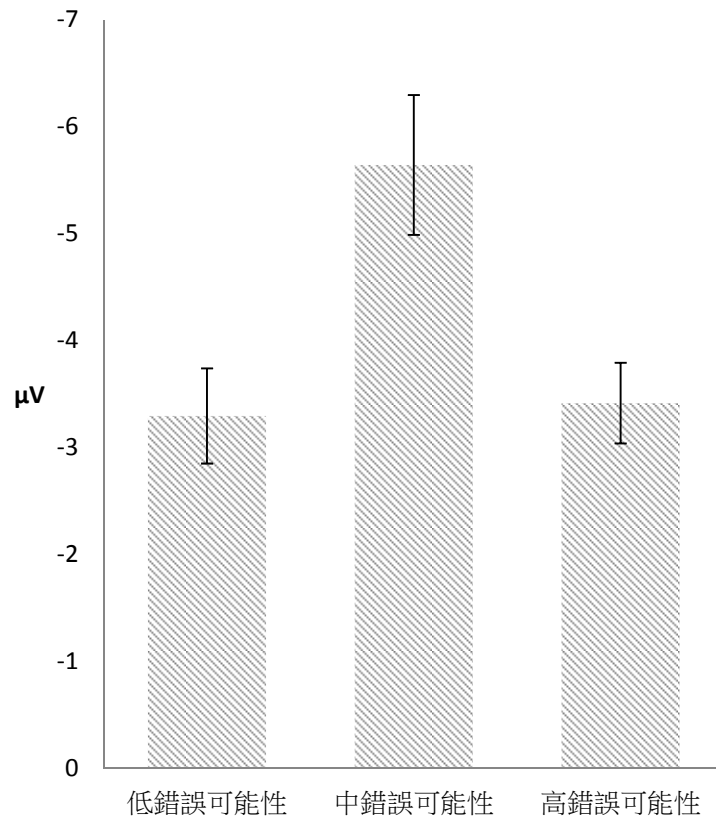












圖十四



