不確定技術革新下最適環境污染投資之決策分析*

林達榮 助理教授
國立東華大學國際企業學系

葉欣妮 研究生
銘傳大學管理科學研究所

摘要

本文旨在探討環境污染防治政策的決策評估過程中，面臨環境污染技術革新的不確定性及成本投入不可回復性之下，如何建立最適改善污染源的環境決策評估。本文闡述有別於傳統成本利益法，利用實質選擇權並擴展 Pindyck(2002)連續期間評價模式之環境污染防治決策探討，試圖找出採用環境污染防治政策之社會成本的門檻值 q^* 以及最適進行防制時點，提供相關敏感度分析數值例說明。

關鍵詞：環境污染、技術革新、實質選擇權、不可回復性、決策評估

*本文承蒙 92 年度國科會(*NSC92-2416-H-130-006-*)專題研究計畫經費補助，謹此致謝。

壹、前言

環境政策在傳統的經濟評價中多以成本利益分析法(cost benefit analysis)為主。眾多國家利用課二氧化碳稅或燃料稅抑制全球暖化，此等徵稅政策將會產生期望的利益現金流量。由於政策上抑制溫室氣體排放之行為，進而減少家庭及公司燃料的使用，降低大氣中CO_2值，減緩溫室效應所造成之環境損害。

傳統的決策評估中，期望利益現金流量的淨現值大於期望成本現金流量的淨現值時，則建議採用減緩溫室效應之投資政策。政策採用與否為其所探討之經濟面不外乎來自期望成本與利益及折現率之檢討。然而，傳統成本利益分析法的架構在環境政策之決策忽視三個關於大多數環境問題的重要特性，第一，採用環境政策的未來成本及利益的不確定性。舉例說，溫室效應造成溫度上升之影響，亦不知溫室效應對經濟層面影響之程度。第二，環境政策包含重要的不可回復性(irreversibility)，而此等不可回復性造成環境損害成本之投入資金無法回收。第三，環境政策的採用非得目前即刻執行或永不執行之考量，在多數案例中，延期採用環境政策或是等待新的資訊取得亦為可行的。然而此等不確定性、不可回復性、及延期的可能，都在在影響採用政策的最適時點及產生防治溫室效應之效益。

Kolstad (1992) 提供降低環境擴散政策包含沉沒成本的三時期模式之考量，利用三時期模式研究成本利益的不確定性和採用降低污染源政策的關聯性。模式假設其污染儲存量為固定，污染發散率之降低發生在第一期或第二期，此等期間之污染量降低不確定，其伴隨著降低污染量的淨利。結果顯示如果採用政策無沉沒成本，則學習率越快，第一時期的污染擴散率越低。亦即，愈早進行污染防治政策越有利。Hammitt et al. (1992) 研究關於採用降低溫室效應擴散的政策的不確定性下，進行兩期間模式之探討。其結果顯示，污染防治政策傾向等待額外資訊後再進行判斷。Hendricks (1992) 發展連續時期的全球暖化模式，考慮不可回復的污染儲存量下，研究降低污染發散率政策的時點。其考慮藉由假設參數在某一固定

期間減少之不確定性的學習，如何影響著政策採用的時點。Tsur and Zemel (1998) 探討最適污染控制在發生環境變動時所產生威脅之影響，並將不可回復情況延伸到兩種可回復性的情況: 單一事件及循環事件。研究顯示不可回復性情況可能導致更多污染的危機，可回復性情況導致較少污染。Kelly and Kolstad (1999) 以不確定性和未知學習參數之成長模式，進行評估溫室效應發散之政策，並證明學習速度與溫室效益發散之政策存在顯著關係。Pindyck (2000) 假設資訊是連續的，但關於採用環境政策的成本利益和主要環境變數的未來發展為不確定性，建立連續時期的採用環境政策模式。研究重點為不可回復性與不確定性如何影響著政策的計畫及採用的時點。Louberge et al., (2002) 研究關於處理核廢料之最適時點問題。在不確定情況下利用實質選擇權(real options)進行投資決策為基礎，並利用數值分析及敏感度說明在進行實際決策評估中的敏感課題，文中評估最適執行政策的問題與美式延伸選擇權(American spread option)評估最適執行政策所處理問題相似。

Pindyck (2002) 利用二期間(two-period)及連續時間(continuous time)決策評估模式，探討政策何時被採用之最適時點。在二期間決策評估模式中，以現有之降低環境污染程度及其經濟成本的資訊，探討在兩種可能的時間上政策被採用之時點；在連續時間決策評估模式，假設資訊是連續的，但關於採用環境政策的成本利益和主要環境變數的未來發展為不確定性，建立連續時期的採用環境政策模式。環境政策在傳統成本利益分析上，主要探討的是政策是否該被採用，然而考慮到環境的不確定性和不可回復性時，政策何時被採用為考量重點之所在。亦即，採用環境政策不只侷限在是否該採用政策，污染防治政策何時被採用之最適時點之最適停止問題亦為值得探討之問題。本文擴展 Pindyck(2002)之連續期間溫室效應決策評估模式，在考慮環境的不可回復性和經濟的不確定下，進行環境污染防治政策之最適採用時機之探討，希望在藉由相關變數的假設與修正原始Pindyck(2002)模式之情況下，能更符合實際環境污染的現況，並希望藉由本文所探討的環境污染防治政策之最適期望時點，提供給環保當局的參考依據。

以下第貳節探討在溫室效應產生之環境污染為不確定下，拓展 Pindyck(2002)之連續期間決策評估模式，試圖建立採用環境污染防治政策之最適決策評估模式，並試圖找出採用環境污染防治政策之社會成本之門檻值 q^* 以及最適進行防治之期望時點；第參節 則對社會成本之門檻值 q^* 及進行相關數值分析，相關數值根據原模型的假設數據整理而成後，進行數值分析及敏感度分析後，提供本模型之模擬分析結果說明；最後，第肆節為結論。

貳、模型建立

一、模型假設與構建

(一)參數、變數定義

本文嘗試以環境污染防治政策投入與否之連續期間模式，說明環境污染量擴散的程度為不確定性下之最適污染防治決策評估進行探討，並試圖尋找採用環境污染防治政策社會成本之門檻值 θ^*。假設 θ_t 為 t 時點污染防治之社會成本參數，服從幾何布朗運動，

$$d\theta_t = \alpha\theta_t dt + \sigma_1\theta_t dz_1(t) \tag{1}$$

期初值 θ_0 為假定已知，其中，α 單位時間污染防治之社會成本的瞬間成長率，σ_1 為標準差，$dz_1(t)$ 為服從平均零、標準差 $\sqrt{dt}$ 之標準溫納過程(Wiener process)。

P_t 為 t 時點環境污染儲存量之狀態變數；E_t 為污染排放量，亦即控制環境污染儲存量 P_t 之流量變數且為外生變數，說明如下：

$$dP_t = \left(\beta E_t - \delta P_t\right)dt + \sigma_2 dz_2(t) \tag{2}$$

其中，δ 為隨著時間污染源消散的自然率，β 為吸收合併因子，σ_2 為標準差，$dz_2(t)$ 為服從平均零、標準差 $\sqrt{dt}$ 之標準溫納過程(Wiener process)。

假設 θ_t 與 P_t 相互獨立，即 $E_t\left(dz_1dz_2\right)=0$。此外 $B(\theta_t, P_t)$ 為 t 期之社會成本函數，由於大部分環境污染問題中，實際上污染物所造成的損害遠超過於污染儲存量所增加的比例，因此，當環境污染儲存量越大時，其所反應在社會成本之變化量 $B(\theta_t, P_t)$ 上

所減少的量越小，亦即成本效益越低。亦即，當環境污染儲存量越大時，相對地需要額外成本的支出（機械設備成本之投入），因此，本文將$B(\theta_t, P_t)$定義為$-\theta_t P_t^2$，意指$B(\theta_t, P_t)$與P_t為存在於二次反向關係，藉以描繪上述成本函數之特性；

$$B(\theta_t, P_t) = -\theta_t P_t^2 \tag{3}$$

以下模式的相關限制條件。

(a) E_t：$\begin{cases} E_t = E_0 & \text{未採用環境污染防治政策} \\ E_t = E_1 & \text{採用環境污染防治政策} \end{cases}$，其中$0 \le E_1 \le E_0$。

(b) $C(E_1) = c_1(E_0 - E_1) + c_2(E_0 - E_1)^2$，其中$0 \top E_1 \quad E_0$且$c_1, c_2 > 0$，$C(E_1)$為污染排放量減少之污染防治成本，$E_0 - E_1$為污染排放量之減少量。減少污染排放量的一單位成本[1]為$dC(E_1)/dE_1 = -c_1 - 2c_2(E_0 - E_1) < 0$。假設採用此污染防治政策成本為完全沉沒成本。

(二)擴展模式

環境污染防治政策執行與否之目標為使污染防治執行與否下之期望社會淨收益之現值最大考量下進行決策評估。亦即，

$$W_t(P_t, \theta_t \mid P_0, \theta_0) = \max_{\theta_t} E_0\left[\int_0^\infty B(P_t, \theta_t) e^{-rt} dt - C(E_1) e^{-r\tilde{T}}\right] \tag{4}$$

其中，$\tilde{T}$為污染防治政策被採用時點，$E_0 - E_1$為污染排放量減少量，$E_0(\cdot)$為社會淨收益在$t=0$的期望值，r為折現率，R_0及q_0為在$t=0$之已知相對應之數值。假設執行污染防治政策時，必須支付污染防治成本$C(E_1)$，污染排放量從E_0減少到E_1。

採用污染防治政策的準則：利用式(1)及式(2)求解出式(4)最大淨現值。本文藉由動態規畫(dynamic programming)處理上述最大淨現值問題, 亦即評估兩個決策領域(執行污染防制策略與否)之專案價值做為採用污染防治政策的依據 $W_t^N(\theta_t, P_t)$定義為未採用環境污染防治政策之函數值$E_t = E_0$，$W_t^A(\theta_t, P_t)$定義為採用環境污染防治政策之函數值$E_t = E_1$，本文假設開始存在無環境污染防治政策投入之狀態。由於$B(\theta_t, P_t) = -\theta_t P_t^2$，因此$W_t^N(\theta_t, P_t)$滿足 Bellman equation:

[1]當導入污染防制後排放量下降標準越多，亦即則 E_1越小時，所需之投入成本亦就越多，故反應出污染排放量與投入成本間存在反向關係。

$$rW^{N}=-\theta P^{2}+\left(\beta E_{0}-\delta P\right)W_{p}^{N}+\alpha\theta W_{\theta}^{N}+\frac{1}{2}\sigma_{1}^{2}\theta^{2}W_{\theta\theta}^{N}+\frac{1}{2}\sigma_{2}^{2}W_{pp}^{N} \tag{5}$$

式(5)省略時間下標t，以下探討同樣省略時間符號。$W^{A}(\theta,P)$亦需滿足 Bellman equation:

$$rW^{A}=-\theta P^{2}+\left(\beta E_{1}-\delta P\right)W_{p}^{A}+\alpha\theta W_{\theta}^{A}+\frac{1}{2}\sigma_{1}^{2}\theta^{2}W_{\theta\theta}^{A}+\frac{1}{2}\sigma_{2}^{2}W_{pp}^{A} \tag{6}$$

由式(5)、 (6)微分方程式，可藉由下式之限制條件求得$W^{N}(\theta,P)$及$W^{A}(\theta,P)$之解。

$$W^{N}\left(0,P\right)=0 \tag{7}$$

$$W^{A}\left(0,P\right)=0 \tag{8}$$

$$W^{N}\left(\theta^{*}(P),P\right)=W^{A}\left(\theta^{*}(P),P\right)-C\left(E_{1}\right) \tag{9}$$

$$W_{\theta}^{N}\left(\theta^{*}(P),P\right)=W_{\theta}^{A}\left(\theta^{*}(P),P\right) \tag{10}$$

因此，當$\theta(P)\geq\theta^{*}(P)$時，則環境污染政策應該被採用。限制條件(7)、(8)反應出當θ為零時，則環境污染防治政策價值為零，限制條件(9)為等價條件(value matching condition)，亦即當$\theta(P)=\theta^{*}(P)$時，執行採用環境污染防治政策的選擇權，將招致污染防治成本$C\left(E_{1}\right)$之淨收益，亦即$W^{A}\left(\theta^{*}(P),P\right)-C\left(E_{1}\right)$，限制條件(10)為平滑條件(smooth pasting condition)。式(5)、(6)微分方程式，藉由上式之限制條件(7)-(10)中求出其解:

$$\begin{aligned}W^{N}(\theta,P)=A(P)\theta^{\gamma}&-\frac{\theta P^{2}}{r-\alpha+2\delta}-\frac{2\beta^{2}E_{0}^{2}\theta}{(r-\alpha)(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)}\\&-\frac{2\beta E_{0}\theta P}{(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)}-\frac{\sigma_{2}^{2}\theta}{(r-\alpha)(r-\alpha+2\delta)}\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}W^{A}(\theta,P)=&-\frac{\theta P^{2}}{r-\alpha+2\delta}-\frac{2\beta^{2}E_{1}^{2}\theta}{(r-\alpha)(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)}\\&-\frac{2\beta E_{1}\theta P}{(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)}-\frac{\sigma_{2}^{2}\theta}{(r-\alpha)(r-\alpha+2\delta)}\end{aligned} \tag{12}$$

從限制條件式(7)中可知$A(P)$為正常數，γ為方程式$r=\alpha\gamma+\frac{1}{2}\sigma_{1}^{2}\gamma(\gamma-1)$之正根，如下式所示:

$$\gamma = \frac{1}{2} - \frac{\alpha}{\sigma_1^2} + \sqrt{\left(\frac{\alpha}{\sigma_1^2} - \frac{1}{2}\right)^2 + \frac{2r}{\sigma_1^2}} > 1 \tag{13}$$

式(11)之右式的第一項為減少污染排放量到E_1的選擇權價值，第二項及第五項為現在污染量所產生的社會成本之現值，說明P之變動，第三項及第四項為未來污染排放量為E_0時所產生之社會成本之現值。式(12)之右式的第一項及第五項為現在污染量所產生的社會成本之現值，說明P之變動，第二及第三項為未來污染排放量為E_1時所產生之社會成本之現值。利用式(11)、(12)求解出採用環境污染防治政策之$\theta^*(P)$門檻值及常數$A(P)$，如下式所示:

$$A(P) = (E_0 - E_1)\left[\frac{\gamma - 1}{c_1 + c_2(E_0 + E_1)}\right]^{\gamma - 1}\left[\frac{2\beta^2(E_0 + E_1) + 2\beta P(r - \alpha)}{\gamma(r-\alpha)(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)}\right]^{\gamma} \tag{14}$$

$$\theta^*(P) = \frac{\gamma(r-\alpha)(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)\left[c_1 + c_2(E_0 + E_1)\right]}{2(\gamma-1)\beta\left[\beta(E_0 + E_1) + P(r-\alpha)\right]} \tag{15}$$

$$\frac{2\beta(\gamma-1)\left[\beta(E_0 + E_1) + P(r-\alpha)\right]\theta^*(P)}{\gamma(r-\alpha)(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)} = \left[c_1 + c_2(E_0 + E_1)\right] \tag{16}$$

由式(15)可知，利用選擇權評估採用環境污染防治政策之門檻值$\theta^*(P)$，相較於用傳統成本利益法多出$\gamma/\gamma-1$，其反應出利用選擇權所得之門檻值$\theta^*(P)$，相較於傳統成本利益法之門檻值$\theta^*(P)$高，因此在決策上產生等待或延期動作之考量。

藉由$\Delta W = W^* - W^{**}$比較最適採用環境污染防治政策之機會成本與機會利益，建構採用環境污染防治政策之最適決策評估，W^*為最適評估環境污染防治決策之函數值，亦即為延期採用環境政策之函數值，W^{**}為立即採用環境污染防治決策之函數值，若$\theta(P) \le \theta^*(P)$，則表示無最適採用環境污染防治政策之時機，且$W^* = W^N$，$W^{**} = W^A - C(E_1)$，則

$$\begin{aligned}\Delta W = {} & A(P)\theta^{\gamma} - \frac{2\beta^2\theta\left(E_0^2 - E_1^2\right)}{(r-\alpha)(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)} - \frac{2\beta\theta P(E_0 - E_1)}{(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)} \\ & + c_1(E_0 - E_1) + c_2(E_0 - E_1)^2\end{aligned} \tag{17}$$

將式(17)改寫成$\Delta W = O_C - O_B$其中，

$$O_C = c_1\left(E_0 - E_1\right) + c_2\left(E_0 - E_1\right)^2 + A(P)\theta^{\gamma} \tag{18}$$

$c_1\left(E_0 - E_1\right) + c_2\left(E_0 - E_1\right)^2$為立即採用環境污染防治政策的投入成本，$A(P)\theta^{\gamma}$為採用環境污染防治政策之選擇權價值，即延期採用政策而招致的成本(機會成本)：

$$O_B = \frac{2\beta^2\theta\left(E_0^2 - E_1^2\right)}{(r-\alpha)(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)} + \frac{2\beta\theta P\left(E_0 - E_1\right)}{(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)} \tag{19}$$

O_B為連續污染發散率減少所產生的額外社會成本流量的現值，亦即現在採用環境污染防治政策之機會利益。當$\theta(P) \le \theta^*(P)$且$\Delta W = W^* - W^{**} = O_C - O_B > 0$時，現在採用環境污染防治政策的機會成本大於機會利益，因此環境污染防治政策傾向延期。而當決策者評估環境污染防治政策傾向於延期，則此時我們所關心的另一課題，就是採用環境污染防治政策之最適時間點為何，亦即當$\theta(P) \ge \theta^*(P)$之採用環境污染防治政策之確切時間點為何，而在第二小節將探討採用政策之最適時間點問題。

二、採用環境污染防治政策之最適時點

當環境污染防治政策之決策評估為延期時，我們所關心的是：當$\theta(P) \ge \theta^*(P)$，此時採用環境污染防治政策的時間點，而為了探討最適時點問題，本文利用兩種方法：污染防治之社會成本$\theta^*(P)$及折現率r，試圖找出環境污染防治政策之最適採用時點，為區分兩種方法所得之時間點，本文將$\theta^*(P)$所得之時點設為t^*，而折現率r所得之時點設為T^*，並比較此兩種方法所得之最適時間點差異。

(1)污染防治之社會成本$\theta^*(P)$求最適時點t^*：

針對環境污染防治政策政策之最適時間點問題進行分析，亦即採用環境污染防治政策之最適時點問題:當$\theta(P) \ge \theta^*(P)$且污染排放量降至$E_1$時。

在$\theta(P) \ge \theta^*(P)$之條件下，環境污染防治政策之決策者等待進入社會成本門檻值

達到$\theta^*(P)$之時點t^*，再行採用環境污染防治政策。由於$\theta^*(P)$服從幾何布朗運動，$E\left[\theta_t^*\right]$為期望社會成本之門檻值

$$E\left[\theta_t^*\right] = \theta_o e^{\alpha t^*} \tag{20}$$

經由式(20)可求得採用環境污染防治政策之最適期望時點為

$$E\left[t^*\right] = \frac{1}{\alpha} log\left(\frac{\theta_t^*}{\theta_0}\right) \tag{21}$$

(2)折現率r求最適時點T^*：

亦即當決策者決定一開始採用環境污染防治政策之進入社會成本為θ_0之時點為原點$t=0$，經過T^*時間決策者決定採用環境政策之進入社會成本為θ_T^*，$E\left[e^{-\rho T^*}\right]$為期望折現因子

$$E\left[e^{-rT^*}\right] = \left(\frac{\theta_0}{\theta_T^*}\right)^{\beta} \tag{22}$$

經由式(22)可求得採用環境污染防治政策之最適期望時點為

$$E\left[T^*\right] = \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)\log\left(\frac{\theta_t^*}{\theta_0}\right) \tag{23}$$

由式(21)與(323)可知, 可知, 利用$\theta^*(P)$所求得之時間點t^*為r所求得之時間點T^*的$r/(\alpha\beta)$倍。

三、模式比較說明

以下說明將 Pindyck(2002)之原始模式中之$\theta(P)$與本文擴展模式之$\theta^*(P)$進行比

較，擴展模式之$\theta^*(P)$和原始模式之$\theta(P)$分別如下：

擴展模式：$\theta^*(P)=\dfrac{\gamma(r-\alpha)(r-\alpha+\delta)(r-\alpha+2\delta)\left[c_1+c_2(E_0+E_1)\right]}{2(\gamma-1)\beta\left[\beta(E_0+E_1)+P(r-\alpha)\right]}$

原始模式：$\theta(P)=\dfrac{\gamma(r-\alpha)^3 c}{2(\gamma-1)\beta\left[\beta E_0+P(r-\alpha)\right]}$ ；c為污染防治成本$C=c\mathrm{E}_0$之係數。

在原始模式上，Pindyck(2002)假設$E_1=0$和$\delta=0$條件下，污染防治成本$C=c\mathrm{E}_0$；擴展模式則假設污染防治成本$C(E_1)=c_1(E_0-E_1)+c_2(E_0-E_1)^2$，亦即在擴展模式中採用環境污染防治政策時，則其進入成本包含著部份污染排放量的降低。為比較擴展模式$\theta^*(P)$和原始模式$\theta(P)$之異同，本文假設$E_1=0$和$\delta=0$的條件下，則擴展模式$\theta^*(P)$為原始模式$\theta(P)$的$\theta(P)$的$\left[c_1+c_2\times(E_0+E_1)\right]/c$倍。若$c_1=c$則進一步化簡為$1+c_2(E_0+E_1)/c_1$，說明二次成本函數型態與線性型態之差異。

參、數值分析與敏感度分析

一、 數值分析

(一) 最適環境污染防治政策之策略價值評估之數值分析

由於本模型無法得到封閉性數理解析解，故在此小節將利用數值分析進行擴展模式說明，並藉此讓連續期間的環境污染防治政策，能有更明確的決策依據。再者，本文相關資料之數據來源將依照 Pindyck (2002)中之數據，為使環境污染防治政策在決策分析易於比較，本文假設$E_1=0$和$s_1=0$，其中$E_1=0$為希望當採用環境污染防治政策，能有效發現採用此環境污染防治政策對污染排放量有明確的改善；令$s_1=0$是希望每年從污染儲存量中所產生的社會成本降之最低，所有相關資料數據整理如表 1 所示:

表 1 相關變數與參數值

變數與參數	估計數值	資料來源
c_1	$c_1 = 4000$	Pindyck(2002)
c_2	$c_2 = 0.02$	同上
未採用環境污染防治政策之污染排放量 E_0	$E_0 = 300000$ 噸/年	同上
採用環境污染防治政策之污染排放量 E_1	$E_1 = 0$ 噸/年	本文假設
環境污染量 R	R = 1 千萬噸	Pindyck(2002)
吸收合併因子 b	$b = 1$	同上
污染衰退率 d	$\delta = 0.02$	同上
折現率 r	$r = 0.04$	同上
污染防治之社會成本的瞬間成長率 a	$a = 0.01$	同上
污染防治之社會成本的標準差 s_1	$s_1 = 0$	本文假設
環境污染儲存量的標準差 s_2	$s_2 = 1000$	Pindyck(2002)

(資料來源：本研究整理)

將表 1 之參數值分別代入式(11)、(12)及(17)進行數值分析，所得之最適環境污染防治政策採用時點之價值近似解，其結果如下表 2 所示：

表 2 連續時期之最適環境政策採用時點

W^*	W^{**}	ΔW
0	1.25	1.75

(資料來源：本研究整理)

(單位：十億元)

數值分析結果得知，$\Delta W = 1.75$ (十億)為大於零之數值，最適環境污染防治政策之採用時點為延期採用環境污染防治政策，即若於立即採用環境污染防治政策，則立即採用污染防治政策的機會成本將高於採用污染防治政策的機會利益，因此在此數值分析中，延期採用環境污染防治政策為最適環境決策點。

(二) 採用環境污染防治政策之最適時點之數值分析

根據工研院能資所研究顯示，因應氣候變化公約，各國無不把二氧化碳排放量列為重要管制依據，而我國政府在「氣候變化綱要公約」評估及採行策略分析案中，則設定 2010 年為我國管制目標年，期許國人在 2010 年時穩定我國二氧化碳排放量，進而進行減量回歸至 1990 年的排放水準。而若台灣在 2010 年要回復

到 1990 年二氧化碳排放水準，即 1.49 億公噸，則政策之採用的最適時點之分析如下，而相關資料數據來源將依照 Pindyck (2002)中之數據，及以台灣 CO_2 排放量(1990 年)佔世界 CO_2 總排放量(1990 年) 1/220 之比例，對原數值中污染排放量 E_0 及 E_1 採用前述相同比例，並將相關資料數據整理而成，如表 3 所示:

表 3 相關變數與參數值

變數與參數	估計數值	資料來源
c_1	$c_1 = 4000$	Pindyck(2002)
c_2	$c_2 = 0.02$	同上
未採用環境污染防治政策之污染排放量 E_0	$E_0 = 1364$ 噸/年	同上
採用環境污染防治政策之污染排放量 E_1	$E_1 = 871$ 噸/年	同上
最初的環境污染量 P_0	$P_0 = 1.49$ 億噸	1990 年台灣 CO_2 排放量
吸收合併因子 b	$b = 1$	同上
污染衰退率 d	$d= 0.02$	同上
折現率 r	$r = 0.04$	同上
污染防治之社會成本的瞬間成長率 a	$a = 0.01$	同上

(資料來源：本研究整理)

表 4 P 數值與 $q^*(P)$ 之估計值

R 數值	q^*(R) 估計值
$R_{1999} = 1.49$ 億噸	$q_t^* = 1.167$□10^{-7}

(資料來源：本研究整理)

現在社會成本 q_0 的數值，則以 Pindyck(2002)離散時間之現在社會成本 $q_0^D = \$20/$ 噸/ 年 估計連續時間之 q_0 值，q_0 之時間單位符合連續期間之時間單位，本文以毫秒做為連續時間 q_0 的時間單位，即 $q_0 = \$1.057?0/^{-8}/$ 噸 毫秒，並以此 q_0 值做為最初的基準，利用表 4 與式(21)求出採用環境污染防治政策之最適時點。

表 5 最適環境污染防治政策投資之方法與估計式

方法	最適期望時點估計式	最適時點
(1) 污染防治之社會成本 $q^*(P)$	$E\left[t^*\right]=\frac{1}{\alpha}log\left(\frac{\theta_t^*}{\theta_0}\right)$	$t^* = 4$
(2) 折現率 r	$E\left[T^*\right]=\left(\frac{\beta}{\gamma}\right)\log\left(\frac{\theta_t^*}{\theta_0}\right)$	$T^* = 1$

(資料來源：本研究整理)

由表 5 可知利用污染防治之社會成本 $q^*(P)$ 所求之最適時點為 $t^* = 4$ 年，而利用折現率 r 所求之最適時點為 $T^* = 1$ 年。亦即使用社會成本 $q(P)$ 所衡量二氧化碳排放量減量之政策執行時點，相較於用折現率 r 所衡量的執行點多出四倍，亦即 $r/(a\,b) = 0.04/0.01? \; 1 \quad 4$。而由此數值分析中知，若用社會成本所衡量二氧化碳減量政策，則應延期四年採用為其最適時點，若用折現率所衡量二氧化碳減量政策時，則延期一年採用政策為其最適時點。

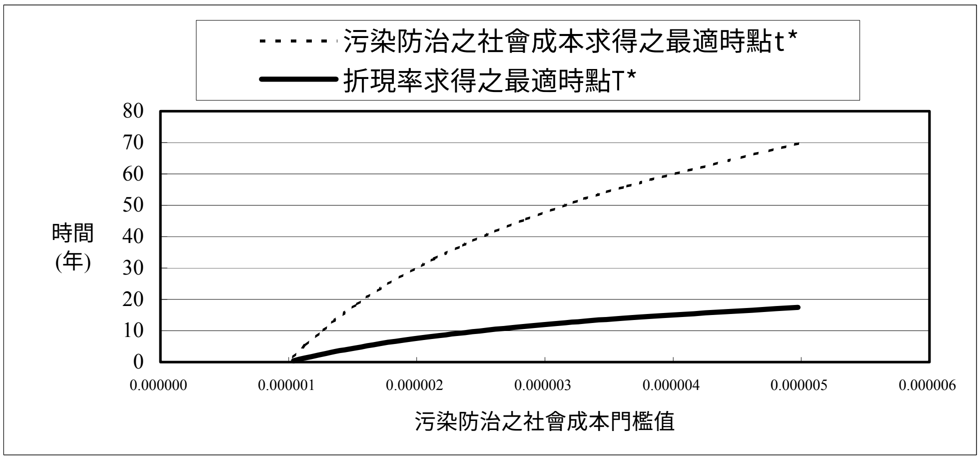

圖 1 $q^*(P)$ 與 r 求得之期望時點

由圖 1 可知，利用污染防治之社會成本 $q^*(P)$ 所求之最適時點 t^*，相較於利用折現率 r 所求之最適時點 T^* 來得大，且似乎呈現出倍數趨勢。

二、敏感度分析

本節將對污染防治社會成本 $q^*(P)$ 進行敏感度分析並探討前節假設狀況下本模式之主要變數與參數對環境污染防治政策連續時期採用時點之策略價值影響，並對其結果加以分析與說明。

(一) $q^*(P)$ 之敏感度分析

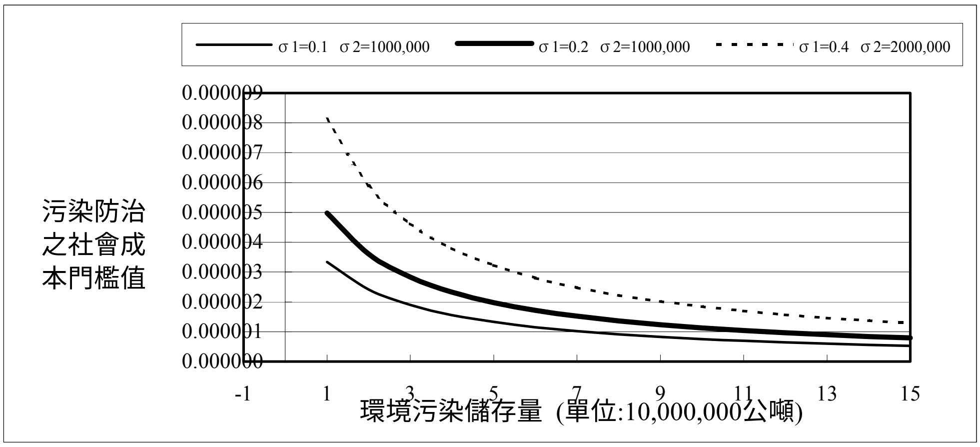

圖 2 污染防治之社會成本門檻值 $q^*(P)$ 與環境污染儲存量 P 之關聯

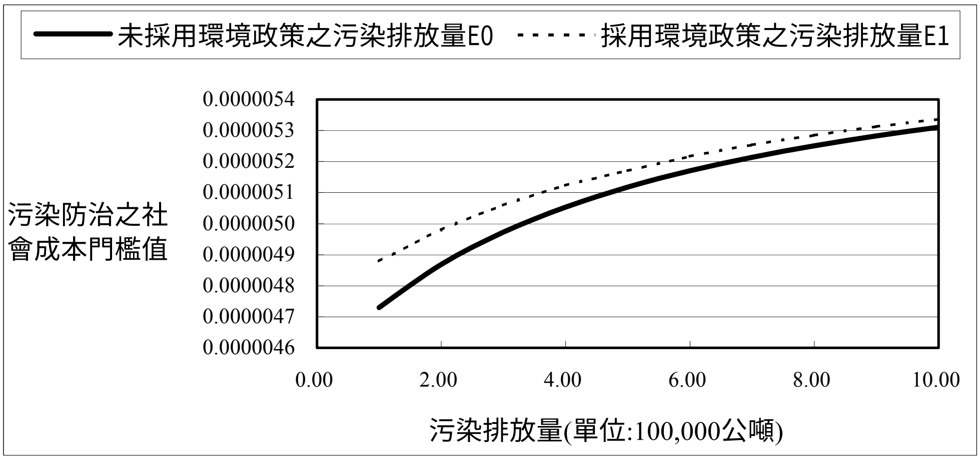

圖 3 污染防治之社會成本門檻值 $q^*(P)$ 與污染排放量之關聯

由圖 2 可知，$q^*(P)$ 為 P 之減函數，亦即當現在環境污染之儲存量 P 越多，意味著較高的社會成本，因此越傾向於採用環境污染防治政策，則污染防治之社會成

本$q^*(P)$門檻值亦越小；污染防治之社會成本的標準差s_1增加，則g越小，因此$q^*(P)$越大，亦即當污染未來社會成本的不確定性越高時，則傾向於等待採用環境污染防治政策的機會亦越高，因此選擇於現在採用環境污染防治政策的成本亦越高，故$q^*(P)$門檻值亦越大。吸收合併因子b越大，則污染發散速度越高，傾向於採用環境污染防治政策的機會亦越高，因此$q^*(P)$門檻值越小；當污染自然衰退率d越高時，則會降低環境污染量增加之速度，故$q^*(P)$門檻值越大；折現率r越大，則對於採用環境污染防治政策之選擇權價值亦越高，故$q^*(P)$門檻值越大；污染防治之社會成本的瞬間成長率a越大，則污染社會成本成長率亦越高，傾向於採用環境污染防治政策的機會亦越高，$q^*(P)$門檻值越小；由圖 3 可知，未採用環境污染防治政策之污染排放量E_0越大，則$q^*(P)$越大，未採用環境污染防治政策之污染排放量E_1越大，則$q^*(P)$越大，c_1越大，則$q^*(P)$越大，c_2越大，結果$q^*(P)$越大。

表 6 $q^*(P)$之敏感度分析彙整表

變數	P	b	d	r	a	s_1	E_0	E_1	c_1	c_2
$q^*(P)$	(-)	(-)	(+)	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)

(資料來源：本研究整理) (+)：單調遞增；(-)：單調遞減

(二) 最適環境污染防治政策時策略價值評估之敏感度分析 θ*

環境污染之儲存量P：若環境污染量增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知P變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

吸收合併因子b：若吸收合併因子增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越少。可知b變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈負相關。

污染自然衰退率d：若污染衰退率增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知d變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

折現率r：若折現率增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知r變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

污染防治之社會成本的瞬間成長率a：若污染防治之社會成本的瞬間成長率增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知a變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

污染防治之社會成本的標準差s_1：若污染防治之社會成本的標準差增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知s_1變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

環境污染儲存量的標準差s_2：環境污染儲存量的標準差的增加或減少，對於立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失則無影響，由此可知s_2變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失則無相關。

未採用環境污染防治政策之污染排放量E_0：若未採用環境污染防治政策之污染排放量增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知E_0變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

採用環境污染防治政策之污染排放量E_1：若採用環境污染防治政策之污染排放量增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知E_1變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

污染防治成本係數c_1：若c_1增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知c_1變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

污染防治係數c_2：若c_2增加，則對立即及延期採用環境污染防治政策之策略價值損失亦越多。可知c_2變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值損失呈正相關。

表 7 相關變數之敏感度分析彙整表

變數	W^N (損失函數)	W^A (損失函數)
P	(+)	(+)
b	(-)	(-)
d	(+)	(+)
r	(+)	(+)
a	(+)	(+)
s_1	(+)	(+)
s_2	(0)	(0)
E_0	(+)	(+)
E_1	(+)	(+)
c_1	(+)	(+)
c_2	(+)	(+)

(資料來源：本研究整理)　(+)：單調遞增；(-)：單調遞減；(0)：無相關

肆、結論

本文主要探討環境污染技術水準為不確定性下之連續期間污染防治評估模式，提供政府在進行採用環境污染防治政策決策時作為參考依據。相關結論說明如下:1.導入二次污染防制成本於擴展模式，在特定條件下回復至原始 Pindyck(2002)模式。2.採用政策之最適時點之探討:利用$q^*(P)$求得之時間點t^*為r求得之時間點T^*的$r/(a\,b)$倍。3.敏感度分析可知：P、b及a變動對污染防治之社會成本$q^*(P)$呈負相關；d、r、s_1、E_0、E_1、c_1及c_2變動對污染防治之社會成本呈正相關。P、d、r、a、s_1、E_0、E_1、c_1及c_2變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值的損失呈正相關。b變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值的損失呈負相關。s_2變動對立即及延期採用環境污染防治政策之潛在策略價值的損失則無相關。

參考文獻

1. Hammitt, J.K., Lempert, R.J., and Schlesinger, M.E. (1992), "A Sequential-Decision Strategy for Abating Climate Change," *Nature*, Vol. 357, pp. 315-318.
2. Hendricks, D. (1992), "Optimal Policy Response to an Uncertain Threat: The Case of Global Warming," Unpublished Manuscript, Kennedy School of Government, Harvard University.
3. Kelly, D.L., and Kolstad, C.D. (1999), "Bayesian Learning, Growth, and Pollution," *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol. 23, pp.491-518.
4. Kolstad, C.D. (1992), "Regulating a Stock Externality under Uncertainty with Learning," *Working Paper*, No.92-0112, Department of Economics, University of Illinois at Urbana-Champaign.
5. Louberge, H., Villeneuve, S., and Chesney, M. (2002), "Long-term Risk Management of Nuclear Waste: A Real Options Approach," *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.27, pp.157-180.
6. Pindyck, R.S. (2000), "Irreversibilities and the Timing of Environmental Policy," *Resource and Energy Economics*, Vol.22, pp.233-259.
7. Pindyck, R.S. (2002), "Optimal Timing Problems in Environmental Economics," *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.26, pp.1677-1697.
8. Tsur, Y., and Zemel, A. (1998), "Pollution Control in an Uncertain Environment," *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.22, pp.967-975.

Optimal Environmental Pollution Decision Analysis under Technological Innovation Uncertainty

Tyrone T. Lin
Assistant Professor
Department of International Business
National Dong Hwa University
e-mail : tjlin@mail.ndhu.edu.tw

Shin-Ni Yeh
MBA
Graduate Institute of Management Science
Ming Chuan University
e-mail: Cynthia1173@yahoo.com.tw

Abstract

This paper focuses on how to evaluate the optimal decision of environmental pollution policy under technological innovation uncertainty and irreversibility over protection costs of project. Different from traditional cost-benefit analysis, this paper uses option value and extends a continuous-time model in Pindyck (2002).This paper tries to find the threshold q^* and optimal timing of environmental pollution decision analysis. This discussion also provides simulation analysis and numerical example to illustrate the optimal pollutions policy.

Keywords: Environmental pollution, technological innovation, real option, irreversibility, decision-making