生化戰防禦資源之樂透配置

曾偉君*

各國現有防禦體系能應付自然發生之生化災害或小規模之生化武器攻擊；卻未能應付未來超強威力之新型生化武器或大規模攻擊。因此，本研究探討在生化戰防禦資源短缺之情況下，是否有最適之配置（allocate）方式，以求人們福祉之極大化。在這些攸關生死之資源配置的課題上，夫妻情侶必然在乎對方是否獲得，父母亦必然在乎子女是否獲得；資源配置的機制若是忽略此種偏好，將有所缺失。本文提出創新的集團抽籤（bundle lottery）機制，乃在公平之原則下，讓小群體成員勝出之聯合機率更多樣化且可自由選擇；有如在商品空間中間斷（discrete）而有限的商品組合外增加各種新組合。對國民而言，是傳統抽籤（lottery）之柏拉圖改善（Pareto improvements），因此，比傳統抽籤更適合來配置有限的生化戰防禦資源。本文並以台美日為例，模擬在不同生物戰防禦資源供給水準下，其最適之配置。研究結果發現集團抽籤可行而且擁有下列特性：1.可讓人們選擇提高或維持關係密切的親人小群體中的所有人皆勝出之聯合機率。2.每個人中簽機率相同，人人平等。3.能顯著降低生化武器攻擊損失所帶給一國國民之負效用。

關鍵詞：生物戰、恐怖主義、集團抽籤、柏拉圖改善、軍事經濟

---

* 國立中興大學應用經濟系助理教授。聯絡方式：(W) 04-22840350 ext.107 Fax：04-22860255 (H)04-2265-8886 Email：tweichun@nchu.edu.tw。作者感謝兩位匿名評論人之細心閱讀本文及指正，同時特別感謝交通大學胡均立教授之評論及建議。感謝江長周、楊奕農、以及陳吉仲等教授之鼓勵以及學會研討會和中原大學國貿系研討會參與者之意見。文中若仍有錯誤，完全是作者的責任。
本文文稿審查作業之執行由楊明憲編輯負責。

農業經濟叢刊（Taiwanese Agricultural Economic Review），8:2（2003），179-201。
中國農村經濟學會出版

I、緒　論

毀滅紐約雙塔的 911 事件發生已 2 年，賓拉登威脅將發動生物恐怖攻擊，法國為了對付流氓國家可能發動的化學或生物武器攻擊，進行了核子嚇阻武力戰略的調整，反恐成為熱門議題，東京地鐵沙林毒氣之記憶猶新，美伊戰爭甫結束，…。隨著人體基因解碼之完成、生物科技之迅速發展，成本低而效果大之生化武器（biological and chemical weapons），成為中小型國家及恐怖集團之最愛（註 1）。威力驚人之生物武器之出現或使用，是世人正共同面對而越來越急迫的新威脅（註 2）。

對付自然發生之生化災害或小規模之生物武器攻擊，各國有其防禦體系來應付，例如 Henreting（2001）所探討的美國的生物恐怖主義防禦策略（bioterrorism defense strategy）。然而，對未來大區域同時受攻擊或超強威力之新型生化武器威脅，現有體系似乎未能有效面對。亦即，無法處理生化戰之防禦資源之大量短缺之情況。

以下的理由亦隱涵生物戰防禦資源，例如 Pearson（1998）提及的疫苗或抗病毒素，經常會有供給量短缺之問題：1.先攻後守：先有攻擊武器，才有其防禦疫苗，且疫苗之生產需一定時程，若攻方在守方尚未量產至人人皆有便發動攻擊，守方防禦資源之供給量必短缺。 2.資訊不對稱：生化戰具有利於攻方之資訊不對稱性質，蓋其僅需發展一兩種武器，而守方若要備齊不下數十種潛在生化武器之防禦資源，成本過高，遑論同種病毒之不同病毒株（strain）其防禦所需亦不同（註 3）。 3.需求飆升：被攻擊前守方對單項防禦資源之需求低，被攻擊時對該生化武器防禦資源之需求驟然飆升。總之，有平時無法足量準備，急時供給不足之特性。

因此，本研究探討在生化戰之防禦資源之大量短缺之情況下，是否有最適之配置方式，以未雨稠繆，求人們福祉之極大化。並以台美日為例，研究

模擬在不同生物戰防禦資源供給水準下，其最適配置之架構為何。

生化戰防禦資源大量短缺無法一人一份的情況下，誰應獲得這些攸關生死之資源？若是如一般財貨依照價格機能來配置（註 4），易有社會正義之爭議。抽籤（lottery）因為具有中簽機率相同，人人平等之特性，特別適合用來配置有限的生化戰防禦資源（註 5）。

在這些攸關生死之資源配置的課題上，夫妻情侶必然在乎對方是否獲得，父母亦必然在乎子女是否獲得。關係密切的親人有強烈的同生共死的偏好。資源配置的機制若是忽略此種偏好，將有所缺失。本文創新的集團抽籤（bundle lottery）機制，可使擁有此種偏好及一般偏好的人之福利得到柏拉圖改善；而且，它保有傳統樂透每個個人中簽機率相同，人人平等之特性。

集團抽籤，乃一個巧妙的層扣設計隨機抽籤機制，它改變傳統抽籤中個人勝出為獨立事件（故小群體中的所有人皆勝出之聯合機率很低）之情況；集團抽籤讓個人可於事前選擇提高小群體中的所有人皆勝出之聯合機率（而以降低小群體中僅有部份人勝出之聯合機率為代價，以維持每個個人中簽機率相同，人人平等之特性）。

此創新的集團抽籤制，乃在公平之原則下，讓小群體成員勝出之聯合機率更多樣化且可自由選擇，有如在商品空間中間斷（discrete）而有限的商品組合外增加各種新組合，對國民而言，是傳統抽籤之柏拉圖改善（Pareto improvements），故比傳統抽籤更適合來配置有限的生化戰防禦資源（註 6）。

本文以台美日等三個國家為例，模擬在低中高三種不同生物戰防禦資源供給水準下，其最適配置之架構。以各國人口數為基數，以平均家庭大小作為利他小群體之代替品（proxy），撰寫程式，模擬並驗證集團抽籤之可行性。實際操作時，各國之國民分別向其防禦中心投遞小群體偏好書，載明願同生共死之小群體名單（註 7），各國防禦中心以其電腦及程式跑出生物戰防禦資源各供給百分比下之中簽勝出的名單，據此配置生物戰防禦資源。

本文所提創新的集團抽籤機制，不能降低一個社會遭受生物武器攻擊之

人員損失，卻能顯著降低這些損失帶給各國國民之負效用。研究結果發現集團抽籤可行而且的確擁有下列特性： 1.可讓人們選擇提高或維持關係密切的親人小群體中的所有人皆勝出之聯合機率。 2.每個人中簽機率相同，人人平等。 3.能降低生物武器攻擊之損失所帶給一國國民之負效用。

II、集團抽籤 v.s. 傳統抽籤

假設個人 i 之偏好可由如下之效用函數一般式所刻劃：

$$U_i = U_i\left[Y_i, A_i, f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i = 1\right)\right] \tag{1}$$

式中變數定義如下：

Y_i ：個人 i 之貨幣或一籃子財貨及勞務（numeraire）。

A_i ：個人 i 之生物戰防禦資源。=1 代表獲得生物戰防禦資源，= 0 代表沒有獲得生物戰防禦資源。

$A_{g\backslash i}$ ：個人 i 所關心之親人小群體（註 8） N_i 人中，除了個人 i 以外之所有成員，是否皆獲得生物戰防禦資源。

$f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i = 1\right)$：在個人 i 有獲得生物戰防禦資源之條件下，個人 i 所關心之親人小群體 N_i 個人中，除了個人 i 以外之所有成員，是否皆獲得生物戰防禦資源。=1 代表皆獲得生物戰防禦資源，= 0 代表有人沒有獲得生物戰防禦資源。

此偏好滿足下列性質：$\frac{\partial U_i}{\partial Y_i} > 0$， $\frac{\partial^2 U_i}{\partial Y_i^2} < 0$，（貨幣之效用為正且貨幣之邊際效用遞減）；對任何貨幣水準 Y_i^0， 及 $f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i = 1\right)^0$ 水準而言， $U_i\left[Y_i^0, 1, f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i = 1\right)^0\right] > U_i\left[Y_i^0, 0, f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i = 1\right)^0\right]$，（亦即生物戰防禦資源之效用為正）；對任何貨幣水準 Y_i^0 而言， $U_i\left[Y_i^0, 1, 1\right] > U_i\left[Y_i^0, 1, 0\right]$，（在個人 i 獲得生物戰防禦資源之條件下，個人 i 所關心之親人小群體 N_i 個人中，除了個人 i 以外之所有成員，若是同時皆獲得生物戰防禦資源之效用，大於有人沒有

獲得生物戰防禦資源之效用。）孤鳥型之個人，並不在乎除了自己以外的人是否獲得生物戰防禦資源，亦即其偏好可表示為$U_i = U_i[Y_i, A]$。

生化戰防禦資源大量短缺，無法一人一份之情況下，典型的配置議題為：

N：總人數，例如 2,220 萬人。

W：生化戰防禦資源總資源數，以最小單位衡量，單位為 1，不可再細分，$W<N$，例如 500 萬份疫苗（註 9）。傳統抽籤乃自 N 人中隨機抽出 W 人，這些被抽中的人各獲得一劑疫苗。此法具有中簽機率相同，人人平等之特性。

集團抽籤乃將小群體置入若干集團中，再由所有集團中隨機抽出一些勝出之集團，如此一來，一個小群體中的所有人們，例如羅密歐與茱麗葉，要就同時勝出，不然就同時失敗，不會有一人勝出一人失敗以致天人永別之遺憾。以數式表示如下：

S：集團數，是一個待決定其數值之變數，$S < J$。J 是小群體數。

K：勝出之集團數，是一個待決定其數值之變數，$K < S < J$。

步驟一：利用格子搜尋（grid search）找出最適之 K 及 S 使得 $\frac{K}{S} = \frac{W}{N}$（註 10）。例如 S=111，K=25。令 $LI=\frac{N}{S}$ 之整數部分，$LD=\frac{N}{S}$ 之小數部分（註 11）。

步驟二：將各小群體 N_j 由大至小排列，並依次放入第 1 個集團，第 2 個集團，…，第 S 個集團，再由後往前放入第 S 個集團，第 S-1 個集團，…，第 1 個集團，…，再由前往後依次放入第 1 個集團，第 2 個集團，…，第 S 個集團，…，任何集團若放滿 LI 人就不再放入該集團，直至每一個集團都有 LI 人（註 12）。

步驟三：自 S 個集團中隨機抽出 K 個集團，被抽中的集團中的每個人各獲得一份疫苗。

步驟四：自沒被分入任何集團中的個人（人數$= N - LI * S$）隨機抽籤以分配未分給集團之餘下疫苗數（$W - LI * K$ 份），這些被抽中的人也是各

獲得一份疫苗。

以下用一個簡化的台灣例子來說明集團抽籤（見表 1）台灣人口 N 為 22.2 百萬人，假設防禦資源供給水準為 30%，隱涵防禦資源數 W 為 6.66 百萬份。假設小群體大小 N_i 均為 3（註 13），隱涵小群體數 J 為 7.40 百萬個。經由程式可求得集團數 S 為 10，勝出之集團數 K 為 3。因為 N_i 大小相同，故隨機將 7.40 百萬個小群體置入 10 個集團中。

之後，由 10 個集團隨機抽取 3 個集團，此 3 個集團中之每個人皆獲得一份疫苗，恰好將全部 W=6.66 百萬份疫苗分完。傳統抽籤之勝出率 $=\dfrac{W}{N}$=30%，集團抽籤之勝出率 $=\dfrac{K}{S}$，其差異 $\dfrac{K}{S}-\dfrac{W}{N}$=0，隱涵二者勝出率完全相同。

以下以數式驗證這個本文創新的集團抽籤機制保有傳統抽籤法中的每個人中簽機率相同，人人平等之特性。亦驗證集團抽籤機制，讓小群體成員勝出之聯合機率更多樣化且可自由選擇，有如在商品空間中間斷而有限的商品組合外增加各種新組合，對國民而言，是傳統抽籤之柏拉圖改善，因此，此新的機制比傳統抽籤更適合來配置有限的生化戰防禦資源。

2.1 傳統抽籤中個人勝出之機率

首先定義下列事件：

B_1={一人小群體放入集團的事件},

B_2={兩人或兩人以上小群體放入集團的事件},

G={勝出的事件}。

依機率理論，傳統抽籤中個人勝出之機率：

$$P(G)_{TL}=\frac{W}{N} \tag{2}$$

其下標代表傳統抽籤（Traditional Lottery；TL）。

表 1　一個簡化的台灣例子來說明集團抽籤

變數名稱及定義	
N ：人口（百萬人）	22.2
$\frac{W}{N}$ ：防禦資源供給水準	30%
W：防禦資源數（百萬份）	6.66
J ：小群體數（百萬個）	7.40
N_i ：小群體大小	3
S：集團數	10
K：勝出之集團數	3
$\frac{K}{S}-\frac{W}{N}$ ：集團勝出率及傳統抽籤勝出率之差異	0
LI 各集團之人數（百萬人）	2.22
$LI*K$：勝出之集團獲得之資源數（百萬份）	6.66

資料來源：本研究。

2.2 集團抽籤中兩人或兩人以上之小群體中個人勝出之機率

而集團抽籤中兩人或兩人以上之小群體中個人勝出之機率可用式 3 表示：

$$P(G)_{BL2} = P(B_2) * P(G \mid B_2) + P(\sim B_2) * P(G \mid \sim B_2) \tag{3}$$

其下標 BL 代表集團抽籤（Bundle Lottery；BL），下標 2 代表兩人或兩人以上之小群體。亦即集團抽籤中個人勝出之機率，等於被放入集團之機率，乘上被放入集團後勝出之條件機率，加上未被放入集團之機率，乘上未被放入集團後勝出之條件機率。

假設實務上成員僅一人之小群體數目大於集團數 S。此假設相當合理，因為集團數 S 大約為 4 位數而各國人口之 1%即遠超過此數。各國人口成員

僅一人之小群體比例當遠不只 1%。而我們可推得兩人或兩人以上之小群體（及小群體中之個人）被放入集團之機率 $P(B_2)$ =1，而兩人或兩人以上之小群體（及小群體中之個人）不被放入集團之機率 $P(\sim B_2)$ =0。因此集團抽籤中兩人或兩人以上之小群體中個人勝出之機率等於被放入集團後勝出之條件機率：

$$P(G)_{BL2} = P(B_2) * P(G \mid B_2) \tag{4}$$

而集團抽籤步驟三是自 S 個集團中隨機抽出 K 個集團，被抽中的集團中的每個人各獲得一份疫苗。因此根據機率理論，有分入集團之小群體中之個人，其勝出之機率：

$$P(G \mid B_2) = K / S \tag{5}$$

而因為在步驟一已利用格子式搜尋找出最適之 K 及 S 使得 $\frac{K}{S}$ 之值最接近 $\frac{W}{N}$，因此 $\frac{K}{S}$ 及 $\frac{W}{N}$ 之差異甚小。例如令 S=1 萬，搜尋 K 之值，則 $\frac{K}{S}$ 與任何一個界於零與 1 之間之機率值（例如 $\frac{W}{N}$）之差距必不會大於 10^{-4}，更何況我們搜尋數值在 1 萬以下之 S 及 K 之組合（i.e. $K < S < 10000$），就有將近 10^8 組合，計算這 10^8 組 $\frac{K}{S}$ 之值，我們可找出其值最接近 $\frac{W}{N}$ 者，因此實務上 $\frac{K}{S}$ 及 $\frac{W}{N}$ 之差異通常小於 10^{-8}（必不會大於 10^{-4}），故 $\frac{K}{S}$ 可視為 $\frac{W}{N}$ 之極佳逼近。

因此集團抽籤中兩人或兩人以上之小群體中個人勝出之機率：

$$P(G)_{BL2} = P(B_2) * P(G \mid B_2) + P(\sim B_2) * P(G \mid \sim B_2) = \frac{K}{S} \approx \frac{W}{N} \tag{6}$$

總之，$E[P(G)_{BL2}] = \frac{W}{N}$， $\mathrm{Var}[P(G)_{BL2}] << [\mathrm{Range}\ P(G)_{BL2}]^2 \leq 10^{-8}$（註 14）。

2.3 集團抽籤中一人小群體之個人勝出之機率

集團抽籤中一人小群體個人勝出之機率可用式 7 表示：

$$P(G)_{BL1} = P(B_1) * P(G \mid B_1) + P(\sim B_1) * P(G \mid \sim B_1) \tag{7}$$

其下標代表集團抽籤，下標 1 代表一人小群體。而 B_1 代表一人小群體不被放入集團的事件。因為總集團數為 S，有 $LD*S$（$=\frac{N}{S}$ 之小數部分$*S$）個一人小群體無法置入任何集團，則不能置入任何集團之一人小群體數目界於 0 與 S 之間；因其為隨機，故平均值為 $\frac{S}{2}$。假設一人小群體之數目為 M，則一人小群體不能置入任何集團之機率 $P(\sim B_1) = \frac{S}{2M}$（註 15），被放入集團之機率 $P(B_1) = 1 - \frac{S}{2M}$。一但被置入一個集團中，一人小群體之個人勝出之條件機率，與兩人或兩人以上之小群體被放入集團後勝出之條件機率完全相同。故：

$$P(G \mid B_1) = P(G \mid B_2) = \frac{K}{S} \approx \frac{W}{N} \tag{8}$$

總之，$\mathrm{E}[P(G \mid B_1)] = \frac{W}{N}$，$\mathrm{Var}[P(G \mid B_1)] << [\mathrm{Range}\, P(G \mid B_1)]^2 \leq 10^{-8}$（註 16）。

沒有分入集團之個人，其勝出之條件機率，等於未分配給集團之生化戰防禦資源總資源數，$W - LI * K$，除以沒有分入集團之個人總人數，$N - LI * S$（註 17）：

$$P(G \mid \sim B_1) = (W - LI * K)/(N - LI * K) \tag{9}$$

因為我們利用格子式搜尋（grid search）來找出 $\frac{K}{S}$ 之值最接近 $\frac{W}{N}$ 者，因此 $\frac{K}{S}$ 及 $\frac{W}{N}$ 之差異甚小。例如令 S=1 萬，搜尋 K 之值，則 $\frac{K}{S}$ 與任何一個界於零與 1 之間之機率值（例如 $\frac{W}{N}$）之差距必不會大於 10^{-4}，更何況我們

搜尋數值在 1 萬以下之 S 及 K 之組合（i.e. K< S <10000），就有將近10^8組合，計算這10^8組$\frac{K}{S}$之值，我們可找出其值最接近$\frac{W}{N}$者，$\frac{LI*K}{LI*S}$及$\frac{W}{N}$之差異= LI $\frac{K}{S}$及$\frac{W}{N}$之差異≤LI*（$\frac{K}{S}$及$\frac{W}{N}$之差異）。既然$\frac{K}{S}$及$\frac{W}{N}$之差異甚小。因為 LI 是一個正整數，且因為$LI*K \approx W$及$LI*S \approx N$，故$\frac{W-LI*K}{N-LI*S}$及$\frac{W}{N}$之差異≤LI*（$\frac{K}{S}$及$\frac{W}{N}$之差異）。之前以證明$\frac{K}{S}$及$\frac{W}{N}$之差異必不會大於10^{-4}，（實務上差異通常小於10^{-8}）。故$\frac{W-LI*K}{N-LI*S}$及$\frac{W}{N}$之差異≤LI*（10^{-4}）。實務上$\frac{W-LI*K}{N-LI*S}$及$\frac{W}{N}$之差異≤LI*（10^{-8}）≤10^{-3}。但是因為此種差距可能是正值亦可能是負值，故：

$E[P(G|\sim B_1)] = \frac{W}{N}$。$Var[P(G|\sim B_1) << [\text{Range}\, P(G|\sim B_1)]^2 \leq 10^{-6}$ (註18)。因此，

$$
\begin{aligned}
&E[P(G)_{BL1}] = P(B_1)*P(G|B_1) + P(\sim B_1)*P(G|\sim B_1)\\
&=(1-\frac{S}{2M})*E[P(G|B_1)] + (\frac{S}{2M})*E[P(G|\sim B_1)]\\
&=(1-\frac{S}{2M})*\frac{W}{N} + (\frac{S}{2M})*\frac{W}{N}\\
&=\frac{W}{N}
\end{aligned} \tag{10}
$$

2.4 羅密歐-茱麗葉遺憾

此處證明，集團抽籤可讓人們，選擇提高關係密切的親人小群體中的所有人皆勝出之聯合機率。傳統抽籤個人勝出之機率為$\frac{W}{N}$。設小群體中之人數為 N_j， $N_j \geq 2$。因為傳統抽籤個人勝出之機率為獨立事件，所以傳統抽籤小群體中的所有人皆勝出之聯合機率為$\sqrt{(W/N)^{N_j}}$。

集團抽籤個人勝出之機率等於$\frac{K}{S}$ $(\approx \frac{W}{N})$。因為集團抽籤乃自 S 個集團

中隨機抽出 K 個集團，任何一個人數 $N_j \geq 2$ 之小群體中的所有人，皆在同一個集團，因此，小群體中的所有人皆勝出之聯合機率仍然等於 $\frac{K}{S} \approx \frac{W}{N}$。因為 $0 \leq \frac{W}{N} \leq 1$，所以對任何一個人數 $N_j \geq 2$ 之小群體而言，傳統抽籤之下小群體中的所有人皆勝出之聯合機率為 $\sqrt{(W/N)^{N_j}}$，必然小於集團抽籤之下小群體中的所有人皆勝出之聯合機率 $\frac{K}{S} \approx \frac{W}{N}$。

進一步來看，在個人 i 勝出之情況下，其親人小群體中之成員中有人沒勝出（我們稱之為羅密歐-茱麗葉遺憾）之可能性。首先看傳統抽籤，在一個人勝出之下，其親人小群體中之成員有人沒勝出之可能性是一種條件機率。等於 1 減去「在一個人勝出之下，其親人小群體中之所有成員皆勝出之條件機率」（因為傳統抽籤個人勝出之機率為獨立事件）：

$$1-(W/N)^{N_j-1} \tag{11}$$

其次看集團抽籤，在一個人勝出之情況下，其親人小群體中之成員有人沒勝出之可能性是一種條件機率。等於 1 減去「在一個人勝出之下，其親人小群體中之所有成員皆勝出之條件機率」：

$$1\text{-}(K/S)/(K/S)=0 \tag{12}$$

總之，在一個人已勝出之情況下，其親人小群體中之成員有人沒勝出之可能性（羅茱遺憾）在傳統抽籤下為 $1-(W/N)^{N_j-1}$，此值為正，且隨親人小群體之人數增加成幾何級數迅速遞增。而在集團抽籤下，羅茱遺憾則確定為零。由此可見集團抽籤之優越性。

2.5 集團抽籤可有效縮小人們因生物戰導致之效用損失

現在來比較傳統抽籤下以及集團抽籤下個人之效用水準，因為對任何 Y_i^0 及 A_i^0 水準而言 $U_i\left[Y_i^0,1,1\right] > U_i\left[Y_i^0,1,0\right]$。而且由羅茱遺憾可得：$f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i=1\right)_{TL} \le f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i=1\right)_{BL}$，因此只要不是孤鳥型的人，

$$U_i\left[Y_i^0, A^0{}_i, f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i=1\right)_{TL}\right] < U_i\left[Y_i^0, A^0{}_i, f\left(A_{g\backslash i} \mid A_i=1\right)_{BL}\right] \tag{13}$$

亦即其在集團抽籤下個人之效用水準不低於其在傳統抽籤下個人之效用水準。對孤鳥型之個人，因其偏好為 $U_i = U_i\left[Y_i, A\right]$。所以：

$$U_i\left[Y_i^0, A^0{}_i\right]_{TL} = U_i\left[Y_i^0, A^0\right]_{BL} \tag{14}$$

亦即其在集團抽籤下個人之效用水準，與傳統抽籤下個人之效用水準會相同（註 19）。總之，以上證明了集團抽籤是傳統抽籤之柏拉圖改善。因此，集團抽籤比傳統抽籤能縮小人們因生物戰導致之效用損失。

III、以集團抽籤分配生物戰防禦資源——台美日三國模擬實證分析

台美日三國人口數、平均家庭大小、以及國民所得之基本資料如國內生產毛額、及平均每人 GDP 如表 2 所示。

表 2 台美日三國人口及國民所得基本資料

	台	美	日
人口（百萬人）	22.2	275.6	126.9
平均家庭大小（人/家庭）	3.32[1]	3.14[2]	2.70[3]
國內生產毛額（十億美元）	281.2	10082.2	4164.4
平均每人 GDP（美元）	12621	35401	32757

註 1：內政部之內政概要，http：//www.moi.gov.tw/W3/outline/c-3.htm。

註 2：美國普查局（US census bureau），http：//www.census.gov/prod/2001pubs/c2kbr01-8.pdf。

註 3：日本國立人口及社會安全研究所（National Institute of population and Social Security Research，Japan），http：//www.ipss.go.jp/English/S_D_I/Indip. html#t_22。

其餘資料來源：行政院主計處第三局網頁，之主要國家重要經社指標：http：//www.dgbasey.gov.tw/dgbas03/bs8/world/i_socec3.xls。

先前例子中防禦資源供給水準為 30%乃任意選定，以下放寬D:\吳珮瑛--第八卷第二期\曾偉君.doc至有理數。亦即由介於 0 與 1 之單位均等分配（uniform distribution）中隨機抽取之數值來代表。如此即涵蓋實際遭受生物武器攻擊時，一國之防禦資源供給水準之所有可能。抽出之數值.281（見表 3），代表台灣防禦資源供給水準為百分之 28.1，亦等於傳統抽籤下，個人勝出之機率 $P(G)_{TL}$。隱涵 22.2 百萬人口僅有將近 6 百萬（6260234）份防禦資源。因為我們沒有全體國民之小群體偏好資料，因此以家庭作為小群體之代替品，由泊松（Poisson）分配中隨機抽取 6606540 個數值來代表利他小群體，每個小群體之大小介於 1 與 16 之間，使得總人數恰好等於 22.2 百萬人（註 20）。

由程式求出集團數 S=8291，勝出之集團數 K=2338。將 6606540 個利他小群體依照大小排列，放入 8291 個集團（各集團之人數 LI 為 2677 人，餘下 N-S*LI =4993 個一人小群體），由 8291 個集團中抽出 2338 個勝出之集團。集團勝出率 $\frac{K}{S}$ 極為逼近傳統抽籤勝出率 $\frac{W}{N}$，其差異僅為 5.107×10^{-10}。

勝出之集團獲得 $LI*K$= 6258826 份資源，因此未被勝出集團獲得之資源數= W-$K*LI$ =1408，將被未能置入集團之 4993 個一人小群體分得。自 4993 人之中隨機抽取 1408 人，其勝出機率亦=.281。此模擬實證結果證實本文創新的集團抽籤機制，的確擁有每個人中簽機率相同，人人平等之特性。

表 3 以集團抽籤分配生物戰防禦資源--台灣

變數名稱及定義	
N：人口（百萬人）	22.2
$\frac{W}{N}$：防禦資源供給水準	.281
W：防禦資源數	6260234
J：小群體數	6606540
N_j：小群體大小	N_j=1，2，3，…，or 16
S：集團數	8291
K：勝出之集團數	2338
$P(G)_{TL}$：傳統抽籤下，個人勝出之機率	.281
$\frac{K}{S}-\frac{W}{N}$：集團勝出率及傳統抽籤勝出率之差異	-5.107×10^{-10}
LI：各集團之人數	2677
$LI*K$：勝出之集團獲得之資源數	6258826
N-$S*LI$：未被放入集團之人數	4993
W-$K*LI$：未被勝出集團獲得之資源數	1408
（W-$K*LI$）/（N-$S*LI$）：未被放入集團之人之（第二階段）勝出率	.281

資料來源：本研究。

擁有式子 13 之偏好的人，可選擇投遞小群體偏好書，以提高關係密切的親人小群體中的所有人皆勝出之聯合機率。模擬實證中之 $N_j \geq 2$ 之小群體的 $P\left(A_{g-i} \mid A_i = 1\right)_{BL}$ 皆等於 100%，也等於把羅茱遺憾降低至 0%。此模擬實證結果佐證本文創新的集團抽籤機制，的確可讓人們選擇提高關係密切的親人

小群體中的所有人皆勝出之聯合機率。故能降低生物武器攻擊之損失所帶給國民之負效用。

表 4　以集團抽籤分配生物戰防禦資源—美國

變數名稱及定義	
N ：人口（百萬人）	275.6
$\frac{W}{N}$ ：防禦資源供給水準	.860
W：防禦資源數	237107229
J ：小群體數	103210222
N_j ：小群體大小	N_j =1，2，3，…，or 15
S：集團數	9365
K：勝出之集團數	8057
$P(G)_{TL}$ ：傳統抽籤下，個人勝出之機率	.860
$\frac{K}{S}-\frac{W}{N}$ ：集團勝出率及傳統抽籤勝出率之差異	1.608×10^{-10}
LI ：各集團之人數	29428
$LI*S$：勝出之集團獲得之資源數	237101396
$N\text{-}S*LI$：未被放入集團之人數	6780
$W\text{-}K*LI$：未被勝出集團獲得之資源數	5833
（$W\text{-}K*LI$）/（$N\text{-}S*LI$）：未被放入集團之人之（第二階段）勝出率	.860

資料來源：本研究。

表 4 及表 5 分別列出美日之模擬實證結果。各數值之意義與表 3 相同。美日之模擬實證結果亦證實本文創新的集團抽籤機制，的確擁有每個人中簽機率相同，人人平等之特性。且可讓人們選擇提高關係密切的親人小群體中的所有人皆勝出之聯合機率。故能降低生物武器攻擊之損失所帶給國民之負效用。

表 5　以集團抽籤分配生物戰防禦資源—日本

變數名稱及定義	
N：人口（百萬人）	126.9
$\frac{W}{N}$：防禦資源供給水準	.538
W：防禦資源數	68322293
J：小群體數	49693800
N_j：小群體大小	N_j =1，2，3，…，or 14
S：集團數	8061
K：勝出之集團數	4340
$P(G)_{TL}$：傳統抽籤下，個人勝出之機率	.538
$\frac{K}{S}-\frac{W}{N}$：集團勝出率及傳統抽籤勝出率之差異	-3.786×10^{-9}
LI：各集團之人數	15742
$LI*S$：勝出之集團獲得之資源數	6831160
$N\text{-}S*LI$：未被放入集團之人數	3738
$W\text{-}K*LI$：未被勝出集團獲得之資源數	2013
（$W\text{-}K*LI$）/（$N\text{-}S*LI$）：未被放入集團之人之（第二階段）勝出率	.538

資料來源：本研究。

IV、結　論

本文創新的集團抽籤機制，不能降低一個社會遭受生物武器攻擊之人員損失，卻能顯著降低這些損失帶給各國國民之負效用。研究結果發現集團抽籤可行而且擁有下列特性：1.可讓人們選擇提高關係密切的親人小群體中的所有人皆勝出之聯合機率。2.每個人中簽機率相同，人人平等。3.能降低生物武器攻擊之損失所帶給一國國民之負效用。

因此，此新的集團抽籤機制，在防止生物武器之攻擊，以及反恐議題上，有其價值。然而，其價值並不侷限於此。舉凡後備軍事人力之抽調，有限戰爭資源之分配給全體國民，等等有限資源分給若干群體之議題，都可以使用集團抽籤機制。

未來研究上，有幾個方向：首先，可以做抽樣調查詢問國民，以得到實際上一國國民的小群體之大小組成。其次，可以將 Neilson（1998）所提及之狀態相依偏好（state-dependent preferences）與集團抽籤相結合，以更充實理論基礎。再來，可以將致死率融入模型，使之更符合實際。最後，可以研究其他之新的抽籤機制之設計，以在公平之原則下，讓小群體成員勝出之聯合機率更加多樣化且可自由選擇，如此有如在商品空間中再增加各種新商品組合，將進一步改善國民福利。

（收件日期 2003 年 1 月 24 日，接受日期 2003 年 9 月 20 日）

註　釋

1. 國際化學武器憲章（The Chemical Weapons Convention，CWC）這個國際法已於 29 Apr 1997 開始生效執行；國際生物武器憲章（The Biological Weapons Convention，BWC）則經 140 國批准而早於 1974 生效，然而其有效落實執行之協定（Compliance protocol）仍然闕如。究其原因，化學武器製造之門檻高，偵測易（Tucker，1998），禁止化學武器對企業經濟利益之影響有限；生物武器製造之門檻低，偵測難（Chevrier，1998）。禁止生物武器之限制對企業經濟活動之影響很大。尤其牽涉到製藥業 R&D 之商業機密，以及驚人之經濟利益（Woollett，1998）。台灣、伊拉克、以色列、北韓、伊朗、利比亞、蘇俄、敘利亞、埃及、以及中國並列為全球前十大可能發展生物武器的國家（Pearson，1998），足見成本低而效果大之生物武器，深受各國喜愛。
2. 伊拉克之生物戰劑乃購買自美國種源公司（The American Type Culture Collection），包括炭疽桿菌（anthrax）及肉毒桿菌毒素（botulinum toxin），其中若干源於美國英國已停止之生物武器計劃；以及購買自法國巴斯德研究所（The Pasteur Institute）。若非聯合國特別委員會（The United Nation Special commission，UNSCOM）之努力，伊拉克可能會擁有可殺死全世界人口數次之生化戰劑武器，

甚且可能發展更致命之新菌種（Simithson，1998）。

3. 一個國家或恐怖集團若想發展生物武器，最好由文獻上已被充份測試及發展成功之生物武器中選擇一到數種來發展。否則至少必須知道以下訊息：有效劑量、攻擊方式、散布方式、生物戰劑抵達目標前之生存率、攻擊載具、目標人口之實際接觸劑量、潛伏期、人之生存期（Pearson，1998）。而守方若要備齊不下數十種潛在生化武器之防禦資源，其成本過高。附錄取自 Pearson (1998) 列出若干生化武器之置死機轉以供參考。
4. 依照價格機能來配置滿足效率之特性：亦即財貨會分配給願付價格最高的一群人(Boyce，1994)。然而生化戰防禦資源一來經常是由政府免費提供，不適合依照價格機能來配置；再來因其攸關生死，故其願付價格已逼近個人之終身財富，已經是效率判準（efficiency criteria）之極端及例外情形。
5. 抽籤經常被批評為無效率及不均等，但是 Morgan（2000）質疑那是完全公正的比較。
6. 本文創新的集團抽籤機制，是實質聯合機率之改變。它與包裝效果截然不同。所謂包裝效果，是指不確定性下之產品，可經由多層之複式樂透（compound lotteries）包裝成不同產品，消費者因而對包裝不同而實質機率相同之產品有偏好。消費者若經由計算將發現複式樂透能化為簡單樂透（Starmer & Sugden，1991，第 197 頁之條件 ii），而發現這些產品完全相同。亦即這些產品實質機率完全相同。
7. 不投遞小群體偏好書的人被當成本文所稱之一人小群體處理。
8. 實務上 N_j 大多為個位數，且有一些小群體成員僅一人（本模型允許 N_j =1 以刻劃孤鳥型人士之偏好），此類成員僅一人之小群體數目通常遠大於以下要介紹之集團數 S。成為一人小群體之另一種理由是：有些關係密切之親人不想提高同時失敗之機率（為了傳終接代，照顧老人或後代等種種理由），而不投遞小群體偏好書，此類人士亦被處理成一人小群體。投不投遞小群體偏好書之決定，有賴小群體成員之群體偏好（group preferences）；(Hansson，1969）來決定，本文不擬討論其內部決策過程。然而，不論投遞或不投遞小群體偏好書，集團抽籤下任何國民之福利水準將不比傳統抽籤機制差。
9. 一份疫苗可能包括若干劑，一個人必須全部接種才算完成疫苗接種。1991 年十二月沙漠風暴攻擊伊拉克之五十萬美軍可能遭受伊拉克炭疽熱及肉毒桿菌生物武器攻擊，而當時炭疽病疫苗僅有十五萬份，肉毒桿菌疫苗更僅有一萬份。
10. 通常 $\dfrac{K}{S}$ 不會完全等於 $\dfrac{W}{N}$，但在實務上因為 N 相當大，例如 2220 萬，假設我們利用格子式搜尋（grid search）來搜尋數值在 1 萬以下之 S 及 K 之組合（i.e.

$K < S < 10000$），就有將近10^8組合，計算這10^8組$\frac{K}{S}$之值，我們可找出其值最接近$\frac{W}{N}$者，因此$\frac{K}{S}$及$\frac{W}{N}$之差異甚小（通常小於10^{-8}），故可視為極佳之逼近。意者可向本文作者索取求解之 GAUSS 程式。

11.若是$\frac{N}{S}$可以整除，則 LD 當然為零。

12.若是$\frac{N}{S}$不等於整數，也就是 $LD \neq 0$，但因實務上成員僅一人之小群體數目很多，未能置入集團之人數必小於 S，而且它仍滿足中簽機率相同，人人平等之特性，本文將證明之。

13.此處之利他小群體大小之選定，其目的是舉例方便。本文待會兒將放寬此種均等化假設使成為一般化情形。

14.因為 $P(G)_{BL2}$ 代表集團抽籤中兩人或兩人以上之小群體中個人勝出之機率，在本文之假設下，集團抽籤中兩人或兩人以上之小群體皆能置入集團，因此 $P(G)_{BL2}$ 等於$\frac{K}{S}$，但是對不同的 W 值及 N 值而言$\frac{K}{S}$會逼近但不會為全等於$\frac{W}{N}$，因此它是變數，故可取期望值及變異數。

15.通常實務上 M 相當大，例如 2220 萬人中可能有 20%~30%為一人小群體，以 20%計，1 萬除以（2*20%*2220 萬）=1.12*10^{-3}，此即一人小群體無法置入任何集團之機率。

16.因為 $P(G \mid B_1) = P(G \mid B_2) = \frac{K}{S}$，但是對不同的 W 值及 N 值而言$\frac{K}{S}$會逼近但不會為全等於$\frac{W}{N}$，因此 $P(G \mid B_1)$是變數，故可取期望值及變異數。

17.若是$\frac{N}{S}$可以整除，則此值為零。又因為 LI=$\frac{N}{S}$之整數部分，LD=$\frac{N}{S}$之小數部分$P(G)_{BLOut} = (W - LI * K)/(N - LI * S) = (W - LI * K)/(LD * N)$。

18.因為 $P(G \mid \sim B_1) = \frac{K}{S}$，但是對不同的 W 值及 N 值而言$\frac{K}{S}$會逼近但不會為全等於$\frac{W}{N}$，因此 $P(G \mid \sim B_1)$是變數，故可取期望值及變異數。

19.若是親人小群體互相關心，卻不願把雞蛋放在一個籃子裡，則可以不投遞小群體偏好書。因為不投遞小群體偏好書的人會被被當成本文所稱之一人小群體處理，其在集團抽籤下個人之效用水準，與傳統抽籤下個人之效用水準也會相同。

20.泊松分配為單一參數（parameter）之分配，其參數等於平均值亦等於變異數，因

此台灣之參數設為平均家庭大小之值 3.32。泊松分配的值域包含 0（小群體人數為 0 不具意義），我們將這些抽出值為 0 者以 1 取代之（小群體人數最少為 1），因此最後台灣之例子之小群體之平均值成為 3.36，這樣的微小改變，對本研究不具任何影響。

參考文獻

Boyce, R. J., 1994. “Allocation Goods by Lottery,” *Economic Inquiry*. 32：457-476.

Chevrier, M., 1998. “Doubts About Confidence: The Potential Limits of Confidence-Building Measures for the Biological Weapons Convention,” in *Biological Weapons Proliferation: Reasons for Concern, Courses of Action*, Report No. 18, The Henry L. Stimson Center, Washington, D.C., USA: 53-76.

Hansson, B., 1969. ”Group Preferences,” *Econometrica*. 37：50-54.

Henreting, F., 2001. “Biological and Chemical Terrorism Defense: A View from the “Front Lines” of Public Health,” *American Journal of Public Health.* 91: 718-720.

Morgan, J., 2000. “Financing Public Goods by Means of Lotteries,” *The Review of Economic Studies*. 67: 761-784.

Neilson, S. W., 1998. “Optimal Punishment Schemes with State-Dependent Preferences,” *Economic Inquiry*. 36: 266-271.

Pearson, G., 1998. “The Threat of Deliberate Disease in the 21st Century,” in *Biological Weapons Proliferation: Reasons for Concern, Courses of Action*, Report No. 18, The Henry L. Stimson Center, Washington, D.C., USA: 11-38.

Smithson, A. E., 1998. “Man Versus Microbe: The Negotiations to Strengthen the Biological Weapons Convention,” in *Biological Weapons Proliferation: Reasons for Concern, Courses of Action*, Report No. 18, The Henry L. Stimson Center, Washington, D.C., USA: 107-128.

Starmer, C. and R. Sugden, 1991. “Does Random-Lottery Incentive System Elect True Preferences? An Experiment Investigation,” *American Economics Review*. 81：230-978.

Tucker, J., 1998. “Verification Provisions of the Chemical Weapons Convention and Their

Relevance to the Biological Weapons Convention," in *Biological Weapons Proliferation: Reasons for Concern, Courses of Action*, Report No. 18, by The Henry L. Stimson Center, Washington, D.C., USA: 77-106.

Woollett, G., 1998. "Industry's Role, Concerns, and interests in the Negotiation of a BWC Compliance Protocol," in *Biological Weapons Proliferation: Reasons for Concern, Courses of Action*, Report No. 18, The Henry L. Stimson Center, Washington, D.C., USA: 39-52.

附　錄

附表 1　若干潛在生化武器之特性

種類	名　　稱	潛伏期及發作期	致病劑量	致死效果
細菌	Bacillus anthracis（炭疽桿菌)	潛伏期 1~6 天 發作期 3~5 天	10,000 spores or less	2~3 天死亡
	Yersinia pestis（鼠疫)	潛伏期 2~10 天 發作期 1~2 天	100 to 20,000 organisms	可能會死亡
	Brucella suis	潛伏期 1~3 週 發作期 數天	1,300 organisms	--
	Pasteurella Tularensis（兔熱病)	潛伏期 3~5 天 30%~60%於 30 天內死亡	10 to 50 organisms	可能會死亡
立克次體	Coxiella burnetii	潛伏期 10~20 天 發作期 2 天~2 週	10 or less organisms	--
病毒	Venezuelan equine enc-Ephalitis（委內瑞拉馬腦炎)	潛伏期 1~5 天 發作期 數天~數週	25 infect units	--
毒素	Saxitoxin	潛伏期 數分鐘~數小時 發作期 吸入致死量即死亡	150 mg.	數分鐘內死亡
	Botulinum toxin（肉毒桿菌毒素)	潛伏期 數小時~數天 發作期 24 小時~72 小時	70 nanograms	可能會死亡
	Ricin（篦麻毒素)	潛伏期 數小時 發作期 數天	200 mg.	--
	Staphylococus Enterotoxin B	潛伏期 數小時 發作期 4~6 天	2,000 mg.	--

取自 Pearson (1998)之表 1, 17-18 頁。

A Lottery Allocating Mechanism of Defense Resources for Biological and Chemical Weapons

Wei-Chun Tseng*

Current defense systems in many countries can handle small-scale biological attacks as well as biological and chemical disasters. However, none of them can handle a large-scale biological warfare. Therefore, this study investigates if there is a sound allocation mechanism to deal with shortages of biological defense resources to maximize citizens' welfares. When allocate these life-and-death crucial resources, people must care whether their family members and lovers obtain the resources or not. A mechanism that ignores these preferences is not likely to be a good one.

This study develops a new mechanism, the bundle lottery. It allows people to choose among more jointly success rates of members of a small group, while maintaining everyone's success rate being equal. Thus it is a Pareto improvement of the traditional lottery. Therefore, it is more suitable than the traditional lottery to allocate the defense resources. This study also uses Taiwan, America, and Japan as examples to illustrate the defense resources allocations under different supply levels. We found that the bundle lottery is feasible and it has the following great properties: 1.it allows people to choose among more jointly success rates of members of a small group, 2.everyone's success rate is equal, and 3.can significantly reduce the disutility caused by biological attacks.

Keywords：*biological war*、*terrorism*、*bundle lottery*、*Pareto improvement*、*war economics*

* Assistant professor, Department of Applied Economics, National Chung Hsing University.