

以系統動力學模擬登革熱擴散現象與 評估防治策略效果—台南市為例

黃經洲* 陳加屏 艾昌瑞

目標：建構一個以台南市人文、氣候、感染人數等實際資料為依據的登革熱擴散因果模式，並用以評估數種防治策略的效果。**方法：**運用系統動力學，建構感染者中心-雙流巴氏模式(Agent-Dual flow Bass Model)。感染者中心以受感染者的活動半徑進行模擬，取代行政區域的人為劃分。單流式是人傳人的感染擴散型式，雙流式是指人與蚊交互接觸感染的擴散型式。**結果：**1.以感染者中心方法取代原本以人為區域劃分法，重新描繪台南市2007年登革熱感染人數變化曲線後，發現本模式的模擬行為能彌補人為區域劃分法的缺失。2.試著將氣溫增加2°C、雨量增加0.5倍時，感染人數會比原氣象水準高5.5倍，顯示登革熱暴發率對氣溫與雨量等氣候因素具高敏感性。3.防治策略能抑制感染人數的成長，而五種策略中，以噴殺蟲劑效果(-85%)最好，若合併三項同屬教育性質的策略，其綜合效果(-84%)與噴殺蟲劑旗鼓相當。**結論：**以氣溫閾值(約24.2°C)，取代病媒蚊指數做為登革熱爆發門檻的領先指標，更能提前預防登革熱。(台灣衛誌 2009；28(6)：541-551)

關鍵詞：巴氏(Bass)模式、登革熱、系統動力學、防治策略

前 言

全球有超過100個國家曾遭受登革熱的侵襲，約有25億以上的人生活在登革熱的威脅下，每年有超過5千萬人感染登革熱[1]，儘管世界衛生組織投入相當多的研究在登革熱的傳染上，但對於疫苗的研發，尚無成果[2]。台灣也長期受登革熱的威脅，因此如何防範登革熱對於公衛而言是相當重要的議題。

對於防制策略的評估，回顧現有文獻，可歸納出三類主要的探究方法-統計方法、數理解析法、以及系統動力學法。評述如下：

統計方法主要是從出象的資料去歸納模式，譬如；美國疾管局建構一個適合波多黎各疫情爆發的偵測模式，作法是取自1989-1993年，以每年4、5、6月三個月的病例數加總，求出平均數與變異數，並以一個平均數加兩個變異數，成為臨界值，作為流行初期時預先的警訊[3]，Runge-Ranzinger 等人研究指出偵測模式若加入看守式的行動監測，可改良偵測系統的靈敏度(sensitivity)，以及加入血清型實驗資料可改良偵測系統精細度(specificity) [4]，但類此基於統計的模式，或能夠預警，但無法了解登革熱擴散現象背後的因果機制，無助於評估防治策略成效。

數理解析法乃是建構登革熱的擴散模式，然後以解析法求得全域通解[5]。全域通解可以獲得模式整體的行為面貌，不像數值模擬解只能求得某一特定狀態的行為。通解好似從空中鳥瞰，數值特定解好似從路上

國立中正大學管理學院企業管理研究所系

*通訊作者：黃經洲

聯絡地址：嘉義縣民雄鄉大學路168號

E-mail: huang541015@yahoo.com.tw

投稿日期：98年5月11日

接受日期：98年12月9日

開車經過。兩者對於模式特質的洞察高下立判。然而追求全域通解的代價是，其一必須盡可能的精簡，否則難以求解。但是對於登革熱這類涉及人類、生物、環境、區域、氣候、社會經濟等多種因素交相影響的問題，精簡的結果是捨棄掉脈絡攸關的因素，使得模式的結論過於抽離實際與地區防疫工作難有交集。其二，影響全域通解行為型態的參數值並不容易估計。這方面後續的研究陸續開發出三種參數估計方法，然而若登革熱疫情發生區域的資訊不精確，亦難有效估計。

面對上述挑戰，一些立基於數理模式法的學者，開始採用電腦模擬來尋求突破，譬如，Derouich與Boutayeb考慮受感染人口中，只有部分人終身免疫的實際情況，利用電腦模擬，放寬模式的限制，讓潛在受感染人口在接續兩次的疫情中從固定值改為變數[6]。

不過，以模擬法來處理數理模式的研究仍不多見。而系統動力學卻是始終主張以模擬法代替解析法的另一種方法。由於它特別著重於處理動態複雜問題，而解析法是無法符合此一需求的。所謂動態複雜性是指：時間滯延(指決策行動到真正的決策效果出現所需的時間)、因果回饋(藉調整模式內的變數與情境，分析對系統內變數和行為曲線引發何種影響，來了解系統內部變數間所隱含的因果關係)、非線性(變數間關係明確屬線性；變數間關係複雜而不明確屬非線性)[7]。過去曾多次被應用在公衛議題上[8,9]，例如：涉及人對人傳染的SARS、HIV等疾病的研究。爾後Ritchie-Dunham JL和Mendez Galvan JF研究團隊，將其擴展到需蚊蟲才能傳染的登革熱，它以黃熱病模式為基礎[10]，整合蚊蟲、個體、成本、政策等變數，建構出系統動力學模式，系統性評估在墨西哥地區，各防治策略效果的差異性[11]。本研究亦採用系統動力學，但在模式假設上有四點主要不同處；1.潛在感染人口與病媒蚊的計量，採用感染者中心(Agent)觀點，也就是說模擬區域的劃分，是以受感染者為圓心，蚊子飛行距離為半徑(受溫度影響)所圍成的圓面積內涵蓋的人口數加總(圓

面積*人口密度)，不扣除不同受感染者所圍圓面積重疊部份，取代人為行政區域劃分將總人口數當作潛在感染人口，因病媒蚊的活動範圍只具局部性質，並不知人類行政區域如何劃分。2.改用陽性容器數取代無法被精確測量的病媒蚊數。3.擴充巴氏(Bass)模式為雙流式。巴氏擴散理論經常被行銷領域學者運用在預測新產品的銷售量上，由於理論基礎與傳染病學相似(巴氏是以大眾媒體與口碑作為新產品的擴散力量，與傳染病學的人相互接觸擴散力量相當)，因此也被運用來了解傳染疾病的擴散現象[12]。但原有巴氏模式只能表徵人傳人的單流式傳染，而登革熱病毒不是人傳人及蚊傳蚊，而是兩者接觸交叉感染的特性，所以將它擴充為雙流式(圖一)。4.以台南市地理、人文及2007年氣候、感染人數等本土性資料作為分析情境。

本研究目標，打破人為行政區域劃分的作法，建構感染者中心一雙流巴氏模式，以一個獨立的感染區塊為例，整合出一個具蚊蟲環境、個體社會、結構變數、防治策略的動態系統模式，進一步了解模擬登革熱擴散現象，並以台南市2007年資料來評估各防治策略效果。

材料與方法

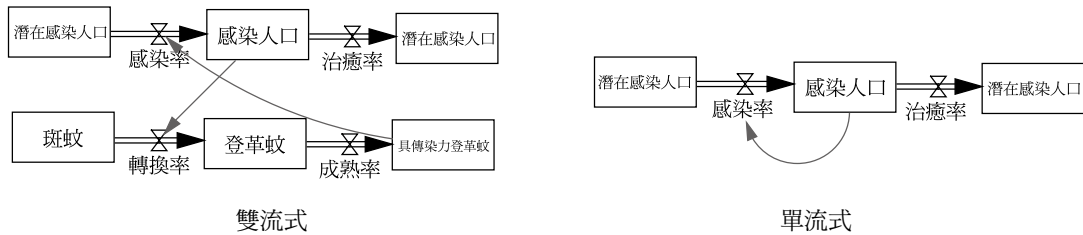
研究材料

以2007年台南市登革熱擴散為研究對象，分別由中央氣象局和疾病管制局取得台南市的總人口765,779人，總面積175.6456km²，人口密度4,317人/km²，最高點海拔40m，2007年平均氣溫24.9°C，總雨量2,207.3mm，總感染人數1,497人等資料，作為模式的參數值。本研究採用Vensim Version 5作為開發工具[13]。

系統動力學

系統動力學是由Jay W. Forrester教授所創立的系統分析理論。其理論主要建立在四項基礎上[14]：

1. 資訊回饋：外在環境變化與系統內決策行



圖一 單流式與雙流式示意圖

動，兩者間所產生的資訊循環過程。

2. 控制理論：在系統機制的運作下，評估與比較實際值與目標值的重複過程。
3. 決策程序：依據資訊的完整與正確性，發展各種方案從中進行選擇的過程。
4. 電腦模擬：運用電腦建立數學模式，來描述系統行為隨時間變化的因果關係。

目標在提供人類了解動態複雜系統，透過系統動力學建模過程，將系統中實際運作的結構，呈現於具體的模式上，讓決策者進而解決系統中的問題。整套研究方法著重在處理時間滯延、因果回饋、非線性之動態系統方面的研究。

巴氏(Bass)與SIR (Susceptible、Infected、Removed)擴散理論

巴氏擴散理論在行銷領域中，很多新產品銷售預測模式的理論都來自於它，主要的假設是一個創新產品的潛在購買者受到大眾媒體與口碑兩種訊息交流的影響，受大眾媒體影響的購買者，稱之為創新者，受口碑影響，則稱為模仿者，巴氏模式可用下列方程式表示： $(dP/dt) = -(p+q)PA$ ； $(dA/dt) = (p+q)PA$ ； $N = P + A$ ，其中： t ：表時間； P ：表潛在購買者； A ：表購買者； N 表總個體數； p ：表創新係數，大眾媒體對新產品潛在購買者的影響力； q ：表模仿係數，口碑對新產品潛在購買者的影響力。若擴大巴氏模式，則可假設購買者過一段時間後會有重覆購買行為，可能再成為潛在購買者[12]。

SIR擴散理論早期多為社會學、傳染病

學、生物學所運用，模式可用下列方程式表示： $(dS/dt) = -\beta SI$ ； $(dI/dt) = \beta SI - \gamma I$ ； $(dR/dt) = \gamma I$ ； $N = S + I + R$ ，其中： t 表時間； S 表潛在感染個體； I 表有傳染力個體； R 表治癒個體(具免疫能力)； N 表總個體數； β 指感染接觸係數； γ 指恢復係數[15]。

SIR與巴氏兩理論之擴散力量看似不同(SIR是人與人的接觸，巴氏是口碑與大眾媒體)，但背後之數學模式其實大同小異(相同處：SIR的 (dS/dt) 、 (dI/dt) 、 β 分別相對應於巴氏的 (dP/dt) 、 (dA/dt) 、 $(p+q)$ 。差異處：SIR假設感染人口經治療後變成治癒個體，而擴大巴氏模式則假設購買者過一段時間後，會因產品的消耗或更新，可能再成為潛在購買者)。

由於具傳染力登革蚊終生具傳染力，因此對登革蚊生態流而言並無治癒個體迴路，而在感染者擴散流方面，曾被感染登革熱者也不具免疫能力，治癒後又成為潛在感染人口。以上兩個擴散流在概念上，斑蚊生態流和巴氏模式相似，而感染者擴散流則與擴大巴氏模式較接近，因此本研究採用巴氏模式為理論基礎並擴大延伸，作法是：用蟲媒取代口碑與大眾媒體的擴散力量，先建立單一的受感染者流和斑蚊生態流，而登革熱病毒是人與蚊相交互感染，因此改變了原先單流式的擴散路線，變成具傳染力登革蚊將病毒傳給潛在感染人口使其變成感染人口，此人再傳播給斑蚊變成具傳染力登革蚊，如此動態循環，既是感染者中心-雙流巴氏模式(圖一)的基礎架構。

感染者中心-雙流巴氏模式(Agent-Dual

Flow Bass Model)說明

本研究依據疾病管制局預防登革熱報告和相關文獻來建構模式。整個模式分成三個次模式，分別為「受感染者擴散流」、「蚊子生態與登革蚊生態」與「防疫部門」。圖二為本模式經簡化後之因果回饋示意圖。各個次模式內主要變數與因果關係說明如下：

受感染者擴散流：潛在被感染人口，以感染者中心觀點估計，乃是疫情感染源頭，即某個受感染者活動範圍(蚊子飛行半徑圓形面積)的人口數，經由與病蟲的接觸轉化成潛伏感染人口，單位時間的轉化量稱感染率，其值受人口感染比值、與蚊接觸頻率、飛行能力、具傳染力母登革蚊等變數影響。潛伏期過後成為正式具有傳播登革熱病毒能力，稱為正被感染人口，單位時間的轉化量稱為暴發率，經治療後又再度成為潛在感染人口，其中治療期約為6天，這些人口若再被叮咬，則可能因免疫系統的活化，引發凝血方面的缺失，導致出血性登革熱，此時又具傳播病毒能力，成為正被感染人口，此變化可能重複(第3或第4次..)，但也有可能死亡(圖二上半部)。

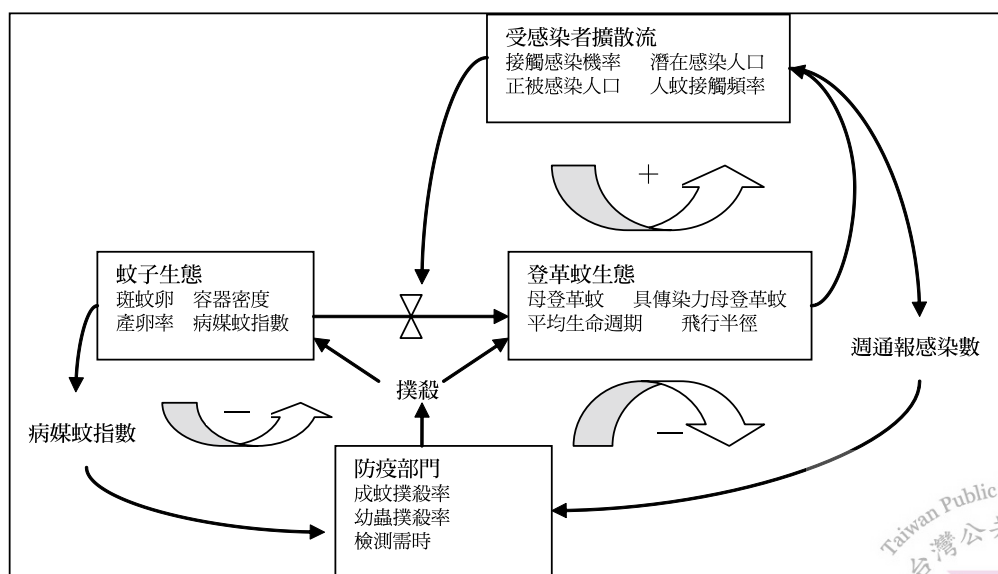
蚊子生態與登革蚊生態：斑蚊卵由疫區

的容器密度、病媒蚊指數、溫度函數、雨量函數、比值函數等變數決定，埃及斑蚊產卵後，經三天後轉化成幼蟲，再經七天後轉化成母埃及斑蚊，此為埃及斑蚊生態。母埃及斑蚊經由叮咬正被感染人口後，變成母登革蚊，單位時間的轉化量稱為轉換率，其值受埃及斑蚊比值和與人接觸頻率影響，而與人接觸頻率又受人蚊接觸頻率與正被感染人口總量影響，潛伏期過後，成為具有傳播病毒能力的母登革蚊，單位時間的轉化量稱為成熟率(圖二下半部)。

防疫部門：成蚊撲殺率代表防疫人員噴殺蟲劑的執行力，除考慮平常時的撲殺執行力外，我們再加入當病媒蚊密度和感染人數增加時，防疫人員對撲殺執行力的乘數效果。用幼蟲撲殺率代表施放化學劑撲殺幼蟲的執行力。檢測需時可分析出醫院通報的時效性，對疫情的影響力(圖二下半部)。

模式方程式

本模式以非線性積分方程組來表徵74個變數間的因果關係，限於篇幅無法逐條說明。其中主要用積分來表達動態因果關係，譬如： $I = \int (i - d - c) dt$ 其中； t = 時間； I = 正被



圖二 登革熱擴散因果迴路示意圖

感染人口； i = 感染率； d = 致死率； c = 治療率，所代表的涵義為：感染登革熱人數的變化率，減去死亡人數的變化率，再減去治療人數的變化率，積分後就是某時點的正被感染人口。

外生參數與內生變數意涵與估計

74個變數裡其中21個屬外生參數以常數顯示，其值受氣候、地理、人文、防治策略、病媒蚊生態等外在因素影響(即只單向影響模式，不受模式中其它變數影響)。另53個屬內生變數，主要用來描述受感染者擴散流、蚊子生態與登革蚊生態、防疫部門三類別的動態變化。防治策略在模式中以外生參數來量化其施行的強度：

1. 人蚊接觸頻率(contacts/people/day)：「衛教宣導策略」教育民眾感染登革熱的特徵，減少埃及斑蚊叮咬正被感染者的機率，降低母登革蚊的產生。
2. 容器密度(receptacle/m²)：「孳生源清除策略」減少積水容器的產生，降低蚊蟲出生比值。
3. 檢測需時(day)：「通報強化策略」使醫師提高警覺，來提升通報時效性，縮短撲殺執行時間。
4. 成蚊撲殺率(receptacle/day)：「噴殺蟲劑策略」縮短蚊子生命週期。
5. 幼蟲撲殺率(receptacle/day)：「施放化學劑策略」降低幼蟲數。

註：()內代表參數單位。

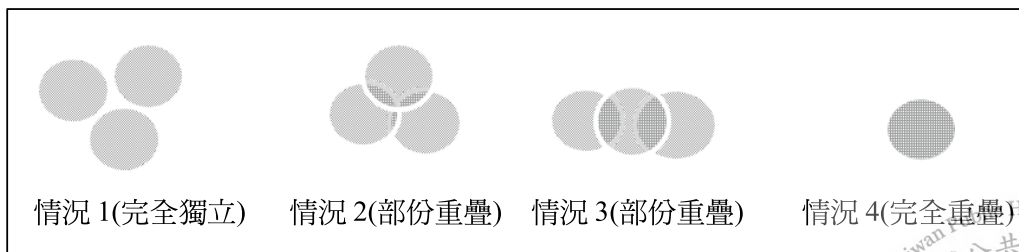
內生變數的推算與外生參數值的估計，採用以下三種量化方法：

1. 內生變數採用推算法：

- (1) 潛在感染人口：以感染者住處為圓心，蚊子飛行距離為半徑(受溫度影響)所圍成的圓面積內涵蓋的總人口數(圓面積*平均人口密度)，不扣除不同受感染者所圍圓面積重疊部份。實例說明：某日有三新病例產生，假設當日氣溫為24°C，對應到蚊子飛行半徑為42m，其圍成的面積情況可能有數種—完全獨立、部分重疊、完全重疊(圖三)，本研究以完全獨立(寬估)來計算潛在受感染人數，共增加 $3 \times 42\text{m} \times 42\text{m} \times 3.14 \times 0.004317 \text{人/m}^2 = 71.7 \text{人}$ 。
- (2) 病媒蚊指數：病媒蚊指數和雨量和溫度成正相關[16,17]，我們以南市2007年雨量和溫度(當月平均值)作自變數，六個行政區各隨機抽樣10個里(共60個)，將這些里每月所公佈的布氏指數(級數)轉化成容器指數(%)當依變數，做複迴歸分析，以最小平方估計參數得迴歸方程式：病媒蚊指數 = $1.421 \times \text{溫度函數} + 0.009 \times \text{雨量函數} - 30.341$ ， R^2 值為0.22($p < 0.05$)。(溫度、雨量函數則是取自於台南市2007年每日氣溫、每月累積雨量曲線圖)

2. 觀察和訪談法，估計外生參數值：

- (1) 容器密度：由於本研究以陽性容器數取



圖三 估計潛在感染人數示意圖

註：本模式不計算重疊部份，皆以情況1 (完全獨立)估計。

代不易精確計算的病媒蚊數，故訪談衛生局防治登革熱專員，在每月調查布式指數過程中，是如何認定容器的種類藉此去估算容器密度範圍，結果約為 $0.05-0.5 \text{ receptacle/m}^2$ 。

(2)採半結構訪談法，防治登革熱專員在對南市民眾推展登熱防治工作的過程中，綜合性評估民眾的認知、態度與行為上的表現。在認知上；評估民眾對疾病傳播機轉了解的程度，態度上；對防治工作執行時的配合度，行為上；防止病媒蚊產生行為的積極度，結果發現衛教宣導策略成效，隨時間微幅增加。

(3)詢問如何撲殺、何時撲殺病媒蚊，以及撲殺範圍界定等，結果建立了病媒蚊紋數函數以及通報感染人數函數來決定噴殺蟲劑策略、施放化學劑策略強度。

3. 檔案資料法：藉由檔案資料[18,19]，獲得下列外生參數值：

(1)登革熱治療期6天，出血性登革熱致死率0.05。(2)雌蚊平均生命週期30天。

(3)登革蚊轉換期=10天。(4)登革熱潛伏期=6天。(5)卵浮化期=10天。

結 果

1. 行為面(behavior validity)和結構面效度(structural validity)

系統動力學模式的效度檢驗可分行為效度與結構效度。前者係指模式模擬行為與真實行為的複現程度；後者係指模式中的方程式是否均有相關理論、文獻或證據支持[20]。

行為效度：本研究發現，若模擬區域的選擇是以整個台南市做為一個區塊，這將使台南市的總人口765,779等於潛在感染人口，但事實上蚊子的飛行範圍有限，因此潛在感染人口應以受感染者為圓心、蚊子飛行距離為半徑的圓周範圍內的人口數。況且蚊子也不會因人為的縣、市界限而不飛越。故用人為劃分區域計算潛在感染人口的方式，不符實際情況。其次，以全台南為一區塊的

模擬行為只有一個波峰，也不符合2007年台南地區登革熱感染曲線，是呈現由小到大的三個波峰型態(圖四)(圖五)。因此我們採感染者中心觀點，認為感染區塊是自然範圍，如此就可以合理推論，2007年台南市登革熱感染範圍，是由三個不相連的區塊所構成，才會有三個波峰型態，彌補人為區域劃分法的缺失。本研究基於研究目的只在於評估防治策略效果，所以只選擇感染人數最多，波峰也較明確的第三波來模擬(圖六)。

結構效度(structural validity)：感染者中心-雙流巴氏模式中每一方程式皆根據相關文獻、理論與證據建構，符合系統動力學結構效度之要求。

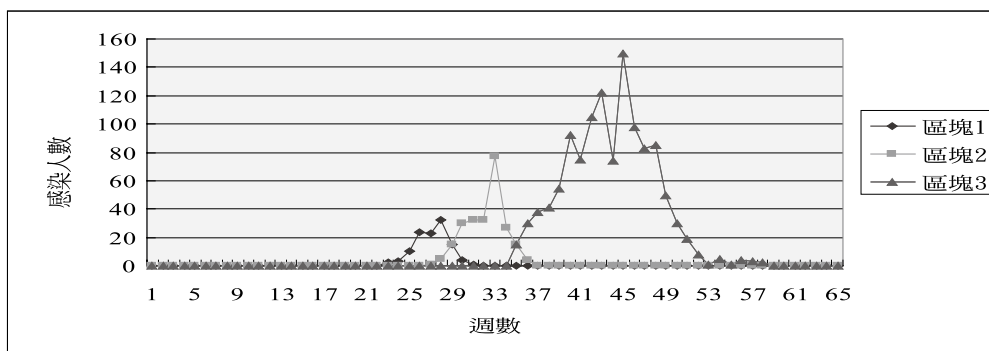
2. 模式敏感性分析

我們模擬所得曲線(圖四)將其全年每日氣溫變化曲線上移 2°C 以及每月雨量增加0.5倍(其餘19個外生變數固定不變)，模式模擬出感染人數會比原氣象水準增加了5.5倍，此數值顯示出氣溫、雨量的高敏感性。在敏感性分析過程也發現，當氣溫若低於某閾值溫度，此時即使不施行防治策略，爆發率亦可向下遞減，於是我們再試著將全年每日氣溫變化曲線，將其最高曲段逐漸下壓，發現約在 24.2°C 時感染人數會由原先1,180人變成10人，我們將此值設為閾值溫度，建議每當夏日到來，早晚平均溫度達此值時，防治工作就要啟動。

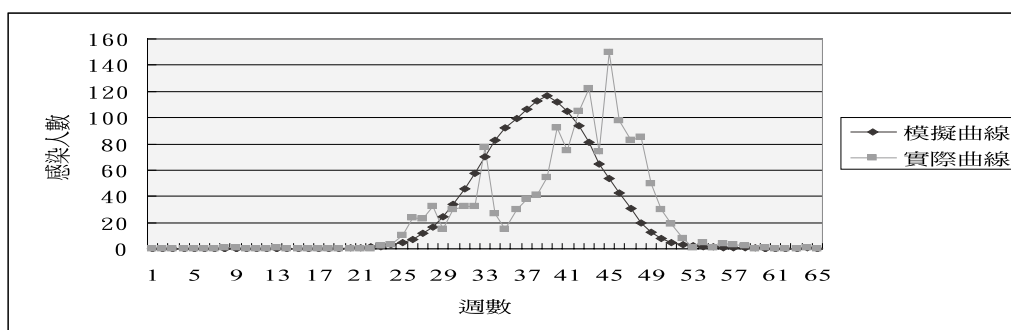
氣溫、人口密度兩者人類力量很難左右，應屬背景因素，因此我們增加考慮兩者間的交互作用，發現當人口密度提升25%時，全年每日氣溫變化曲線下移 0.7°C ，其感染人數就可到達原有水準，所以登革熱爆發的閾值溫度並非固定值，密度越高造成爆發的閾值溫度越低，反之越高。

3. 防治策略評估

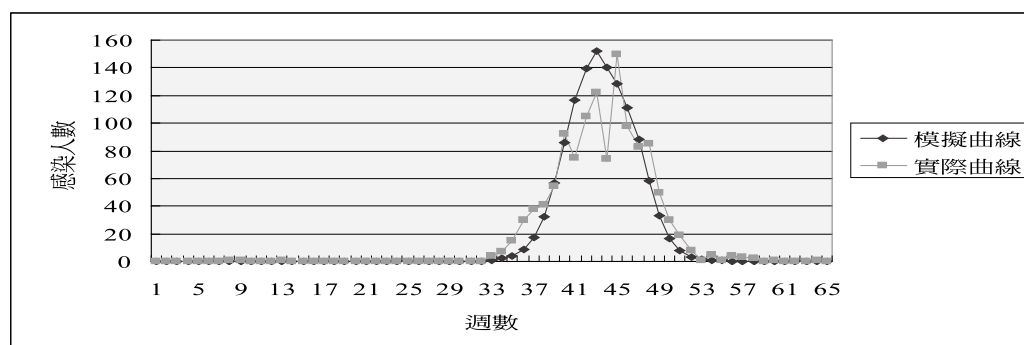
本研究評估五種防治策略，並將「衛教宣導策略」、「通報強化策略」、「孳生源清除策略」三項同屬教育性質的策略合併稱為「教育策略」。由於氣溫與雨量非常敏感，故依據氣溫與雨量的高低，分兩種天氣情境來評估：



圖四 2007年台南市登革熱感染人數曲線



圖五 人為區域劃分法產生的矛盾現象



圖六 感染者中心模擬感染曲線和實際感染人數比較圖

- (1) 正常天氣：以2007年的氣溫和雨量分佈數據為準，若各項防治策略強度提升25%，對於感染人數影響的情形如何？
- (2) 異常天氣：將2007年全年每日氣溫變化

曲線上移 2°C 及每月雨量增加0.5倍。在此情境下，各項防治策略需提升多少百分比，才能使感染人數降回2007年原始水準。結果如下(表一)所示：

表一 各項防治策略評估結果

防治策略	情境一 ^a	情境二 ^b
教育策略 ^c	-84.0%	+26.5%
衛教宣導	-74.9%	+35.5%
孳生源清除	-22.2%	+77.5%
通報強化	-1.0%	無法做到
環境策略		
噴殺蟲劑	-85.0%	+27.0%
施放化學劑	-9.5%	+614.0%
合併三項教育策略	-98.8%	+18.8%
與兩環境策略		

^a 正常天氣下，各防治策略強度提升25%，感染人數變化百分比

^b 異常天氣下，各防治策略需增加多少百分比強度，才能抵銷天氣作用

^c 合併三項教育策略後之情境模擬結果

就兩種情境，綜合比較五項防治策略，以「噴殺蟲劑」的成效最佳，「衛教宣導」次之，「孳生源清除」第三、「放化學劑」第四，「通報強化」的成效最差。合併「衛教宣導」、「孳生源清除」、「通報強化」計算其綜合效果為-84%與噴殺蟲劑的-85%兩者旗鼓相當。而五項策略多管齊下的成效優於任何單項。

「通報強化」成效居末，乍看似乎令人不解，但深究之後，反不令人意外，因為通報系統無法直接對治登革熱疫情，而是通過它啟動其它的防治策略。故單獨使用必然無法抵消氣候因素。

討 論

1. 模擬發現與公衛意涵：

依Focks DA的門檻理論(threshold theory)：一個地區中有少數外來感染個體並不會造成此地區的流行，除非此地的病媒蚊密度到達某一個門檻[21]。這也就是為何病媒蚊指數被登革熱防疫部門視為警戒指標的原因。然而依據生態學理論[22]，蚊蟲繁衍需要適合的環境(主要是氣溫及雨量兩環境條件)才能造就，以及國內學者蔡清讚、梁文敏等人利用地理資訊系統，登錄建置86~91年間病媒蚊級數和氣象資料(包括雨量、

氣溫、濕度)，並進行統計分析發現兩者有顯著相關性[17]。而本模式試著將氣溫增加2℃、雨量增加0.5倍，感染人數會比原氣象水準增加5.5倍，也直接說明氣溫及雨量非常敏感。換言之，若將氣溫閾值取代原有病媒蚊指數做為登革熱爆發門檻的領先指標，將更能提前預防，而不須等到病媒蚊超過了某一門檻才啟動防疫，恐為時已晚。尤其，目前溫室效應常造成一年四季氣候異常的高溫與多雨，若用舊的思維以領先有限的病媒蚊指數啟動防疫恐怕將重蹈2007年台南市多次爆發疫情的覆轍。這研究結果與國內學者吳佩芝等人利用時間序列研究方法發現，氣溫和雨量變異(variation)後的兩個月和登革熱的發生率(incidence rate)有顯著的關連性[23]相呼應。

其次，以動態觀點來看，時間軸上的時機點很重要。模擬發現在登革熱擴散初期較之後期，埃及斑蚊口數的多寡具高敏感性影響，只要微幅的蚊口數增加，將會使登革熱擴散大幅成長，因此直覺上推論，認為應該加強防疫部門的警覺與反應，以便及早發現，及早撲滅。然而即使通報系統再靈敏、反應再快速，仍舊需要時間(不需時間是不切實際的夢想)，而這段難以避免的時間滯延正是疫情大肆擴張之際，故模擬發現即使時間滯延少掉25%，感染人數只不過少1%，換言之，通報強化並非有效的策略。

「孳生源清除」、「放化學劑」兩項防治策略效果雖低於「噴殺蟲劑」、「衛教宣導」，但我們若把模擬時間拉長到三年以上，發現防治效果有大幅提升的現象，因此我們認為這兩項防治策略雖緩不濟急，但卻是長期治本的方法。本模式並未考慮各項防治策略的成本因素，不論是金錢成本或是環境成本。假若考慮對環境的衝擊最小以及較佳經濟效益，則「教育策略」應該優於「噴殺蟲劑」的選擇[11]。

此外，就模式結構來看(圖二)，受感染者擴散流與蚊子生態與登革蚊生態流雙流當中，民眾防治認知的落差將嚴重的影響到「人蚊接觸頻率」，此一參數剛好位在雙流中的樞紐位置，埃及斑蚊叮咬受感染者，將

轉變成登革蚊，登革蚊再去侵襲其它未受感染者，如此循環往覆，形成指數擴散的增強環路。而「人蚊接觸頻率」在環路中的重要性好比複利計息的利率，利率高低決定了利滾利的增強環路的強度。換言之，影響「人蚊接觸頻率」的衛教宣導防治策略顯然非常之重要。雖然，模擬結果顯示噴殺蟲劑效果最好，但我們若合併衛教宣導、孳生源清除、通報系統等同屬教育性質的策略，其效果(-84%)是與噴殺蟲劑(-85%)事實上是旗鼓相當的，尤其是在擴散前的時間軸上，「教育策略」更重要於「噴殺蟲劑」。

儘管目前有相關研究顯示，施打疫苗將比環境管理更有效果能夠抑制登革熱的暴發[6]，但在有效疫苗未被發現前，改善環境、加強教育仍是平衡大自然力量和對抗病毒的主要策略。

2. 研究限制和未來方向

研究限制：感染者中心觀點計算潛在感染人口，是以受感染者為中心點，蚊子飛行距離為半徑所圍成的圓面積內涵蓋的人口數加總，不扣除不同受感染者所圍圓面積重疊部份，因此總數有高估的可能性，但如此仍較行政區域的劃分合理。不過，就本模式目的而言，旨在瞭解擴散行為以及評估防治策略優劣，而非精確預測以及決定策略施行強度，因此仍可接受其中的不精確。

未來研究方向：本研究模式有21個外生參數，有些參數容易估計，有些估計困難。然系統動力學方法特點是能將行為型態資料與模式相互映證[24]，進而可回頭推算這些參數值，類似統計迴歸的作法。因此只要將容易估計的參數值經由實地觀察或訪查估計出來後固定住，就可以透過資料與模式相互映證回頭推算這些不容易估計的參數值。這樣的作法可用以比對不同感染區域的地區差異。2007年台南市登革熱擴散資料，經過本研究重新整理後出現三個完整擴散波形，這三個波形所處的區域差異反映在21個參數值的差異上。因此未來研究可以模擬此三波，並倒推此三波所在區域的21個參數值，比較它們之間的異同，或許可以發現這三區域的

關連性，並由參數差異倒推防治策略對這些區域的影響情況，或能從中更深刻的探知防治策略在考慮地區差異後的有效性。

其次，本模式處理潛在感染人口以感染者中心的方式處理，顯示出一定的成效，未來可以更進一步探討，感染者圓周範圍從完全獨立到完全重疊的機率分佈情況。擴大模式納入影響該機率分佈的諸種因素，譬如，當地人的生活習慣，或是該區域的出入人口頻繁程度等，讓模式可以更貼近真實。(註：本篇另有附表一：模式內所有方程式列表、附表二：台南市各行政區感染人數統計表、附圖一：完整感染者中心—雙流巴式模式圖、附圖二：台南市行政區域圖。若讀者有需要，可於台灣公共衛生學會網站下載，或來信作者提供。)

參考文獻

1. WHO. <http://www.who.int/eng.pdf>. Accessed August 10, 2008.
2. Gubler D, Clark G. Dengue/dengue hemorrhagic fever: the emergence of a global health problem. *Emerg Infect Dis* 1995;**1**:55-7.
3. Rigau-Pérez JG, Millard PS, Walker DR, Deseda CC, Casta-Vélez A. A deviation bar chart for detecting dengue outbreaks in puerto rico. *Am J Pub Health* 1999;**89**:374-8.
4. Runge-Ranzinger S, Horstick O, Marx M, Kroeger A. What does dengue disease surveillance contribute to predicting and detecting outbreaks and describing trends? *Trop Med Int Health* 2008;**13**:1022-41.
5. Nishiura H. Mathematical and statistical analyses of the spread of dengue. *Dengue Bull* 2006;**30**:51-67.
6. Derouicha M, Boutayeb A. Dengue fever: mathematical modeling and computer simulation. *Appl Math Comput* 2006;**177**:528-44.
7. Sterman JD. Modeling managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. *Manage Sci* 1989;**35**:321-39.
8. Homer JB, St Clair CL. A model of HIV transmission through needle sharing. *Interfaces* 1991;**21**:26-9.
9. DeMello S. Systems thinking and strategic planning in healthcare. *Syst Thinker* 1993;**4**:3.
10. Kalgraf K. Yellow fever model. In: Goodman M ed. *Study Notes in System Dynamics*. Cambridge: MIT Press, 1988.
11. Ritchie-Dunham JL, Mendez Galvan JF. Evaluating

- epidemic intervention policies with systems thinking: a case study of dengue fever in Mexico. *Syst Dynam Rev* 1999;**15**:119-38.
12. Bass FM. Comments on "a new product growth for model consumer durables". *Management Sci* 2004;**12**(Suppl):1833-40.
 13. Ventana Systems. Vensim DSS Reference Manual Version 5. Harvard, MA: Ventana Systems, Inc, 2003.
 14. 羅世輝、楊碩英：跨越市場臨界量之迷思--產業主流鎖定之研究。高雄：中華民國科技管理研討會論文集(第二集)，1999；169-81。
 15. Brauer F. Some simple epidemic models. *Math Biosci Eng* 2006;**3**:1-15
 16. Strickman D, Kittayapong P. Dengue and its vectors in Thailand: introduction to the study and seasonal distribution of Aedes larvae. *Am J Trop Med Hyg* 2002;**67**:247-59.
 17. 蔡清讚、梁文敏、黃維政、葉懿諄、陳志誠、林俊宏：以地理資訊系統進行登革熱病媒蚊指數與氣候因素之相關性研究。台中：第三屆環境資訊研討會，2005。
 18. 行政院衛生署疾病管制局：登革熱防治工作手冊。台北：行政院衛生署疾病管制局，2008。
 19. 黃志傑、李翠瓊、邱鴻英、吳炳輝：2004年台灣地區登革熱疫情防治報告。疫情報導 2005；**21**：385-407.
 20. Sterman JD, Wittenberg J. Path dependence competition and succession in the dynamics of scientific revolution. *Organ Sci* 1999;**10**:322-41.
 21. Focks DA. Transmission thresholds for dengue in terms of Aedes aegypti pupae per person with discussion of their utility in source reduction efforts. *Am J Trop Med Hyg* 2000;**62**:11-8.
 22. Barnett WP. The organizational ecology of a technology system. *Adm Sci Q* 1990;**35**:31-60.
 23. Wu PC, Guo HR, Lung SC, Lin CY, Su HJ. Weather as an effective predictor for occurrence of dengue fever in Taiwan. *Acta Tropica* 2007;**103**:50-7.
 24. Homer JB. Why we iterate: scientific modeling in theory and practice. *System Dynamics Rev* 1996;**12**:1-19.

Simulation and evaluating epidemic intervention policies with system dynamics: a case study of dengue fever in Tainan

JIN-JUN HUANG*, CHIA-PING CHEN, CHANG-RUI AI

Objectives: This research aims were to construct a modified model of dengue fever dispersion, taking into consideration geographic, demographic and climatic variables, and then evaluate the efficacies of intervention policies currently in use. **Methods:** From a system dynamics perspective, this study constructs a modified Agent-Dual Flow Bass Model. The definition of the variable Agent refers to the infectious population's activity sphere rather than a man-made administrative district. Single Flow indicates human-to-human spread, while Dual Flow refers to interactive infections between humans and mosquitoes. **Results:** 1. The modified Agent-Dual Flow Bass Model results in a better simulation correlation than the man-made administrative-district simulation by re-coding the 2007 dengue fever cases in Tainan. This result suggests that the new model can overcome the deficiencies in the previous model. 2. With a 2°C temperature increase and a one-half times greater rainfall, the infectious population increases by 5.5 times, which indicates that a dengue fever outbreak is highly sensitive to temperature and rainfall. 3. The intervention policies are effective for decreasing the spread of dengue fever. Among the five intervention policies, fumigation is the most effective (-85%). However, when the three educational policies are combined, the effect (-84%) is equivalent to fumigation policies. **Conclusions:** These results suggest that using a temperature threshold (24.2°C) as the leading indicator for dengue fever outbreak provides an earlier warning than the conventional Breteau index. (*Taiwan J Public Health*. 2009;28(6):541-551)

Key words: Bass Model, Dengue Fever, system dynamic, intervention policies

Department of Business Administration, College of Management, National Chung Cheng University, No. 168, University Rd., Minhsiung, Chiayi, Taiwan, R.O.C.

*Correspondence author. E-mail: huang541015@yahoo.com.tw

Received: May 11, 2009 Accepted: Dec 9, 2009

