

統計區分類系統在洪災事件之人口暴露量推估

Assessing Population Exposure in Potential Flood Area for Using Census Demography System

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
博士後研究

林美君*

Mei-Chun Lin

國立臺灣大學
生物環境系統工程學系
教授

蘇明道

Ming-Daw Su

國立臺灣大學
地理環境資源學系
副教授

蔡博文

Bor-Wen Tsai

內政部統計處
統計長

陳敬宏

Chin-Hong Chen

內政部統計處
科長

劉惠玲

Hui-Ling Liu

摘要

推估人口暴露量是災害防救與風險管理的重要過程之一，但因為隱私權因素，人口資料多以行政單元進行發布與統計，易引起面積可調整單元問題與空間趨勢的扭曲。故內政部統計處建立一個比行政單元更小的空間單元、空間單元均勻性高且邊界穩定的單元系統-統計區分類系統。本文應用較小空間單元之人口統計，有效且正確推估洪災潛勢區內的影響的人口暴露量，以洪災潛勢事件為例，應用洪災潛勢圖推估淹水潛勢區內的影響人數，闡述統計區分類系統之效益。

關鍵詞：統計區分類系統，人口，暴露量，隱私權。

ABSTRACT

Assessing exposure of population in potential hazard area is vital process in disaster prevent ion and risk management. Population data always were aggregated into administrative district and published for individual private. However, it causes the modifiable areal unit problem (MAUP) and destroy spatial pattern for aggregating data.

*通訊作者，國立臺灣大學生物環境系統工程學系博士後研究，10617 臺北市大安區羅斯福路 4 段 1 號，madgebse@gmail.com

To solve this problem, Department of Statistics, Ministry of the Interior constructed census demography system which has multi-scale unit, space homogenous and steady boundary of characteristic. The purpose of this research is using multi-unit to estimate population exposure and using flood event to estimate population exposure for explaining the utility of census demography system.

Keywords: Exposure, Census demography system, Private, Multi-scale unit.

一、前言

人口資料的應用涉及公共衛生、區域規劃、零售設置、資源分配或社會經濟活動等，上述活動皆與人口息息相關(Dobson *et al.* 2000; Hay *et al.* 2005; Garb *et al.* 2007)，又詳細正確的人口資料與人口分布(population distribution)是決策的重要參考因素之一(Weichselbaum *et al.* 2005; Kim and Yao 2010)。

基於保護隱私因素，權責單位多將人口資料以特定空間單元加總統計後發布，如美國採用街廓(block)、日本與澳大利亞均採用網格(grid square/mesh statistic)、英國以輸出地區(output areas) (Martin 2002)或臺灣採用村里界(周學政 2005；林建元和李萬凱 2005；台灣地理資訊學會 2008)，相較於原始資料，加總至面空間單元的資料，有扭曲資料的空間分布及空間可調整單元問題(modifiable areal unit problem, MAUP) (Openshaw 1984; Unwin 1996)之可能性。除此之外，以行政單元發布人口資料時，易面臨分區單元不夠細緻及行政邊界變動問題(謝心怡 2007；林美君 2011)，故在不同使用者收集資料時使用空間單元(如集水區、學區、選區)也有所不同(Goodchild *et al.* 1993)，在使用空間單元不夠細緻情況下，導致較小的空間單元的人口資料不易取得與資料整合分析之困難。有鑑於此，內政部統計處負責推動辦理建置「統計區分類系統」，利用街道巷弄、門牌地址或經緯度等對位功能及區劃效果，統計區分類系統由統計區、一級發布區、二級發布區、鄉鎮市區、縣市等空間單元組成，空間單元具有階層性關係，建置通用性長久

固定之最小統計區基礎圖資，俾利整合社會經濟各項公務登記及調查統計資料，轉化為具有空間分布之統計資訊，再利用各階層統計區地理圖資萃取社經資料分布及變遷趨勢資訊，提升社會經濟統計資料之應用，作為政府及民間單位各項政策規劃與決策重要參據。

當人為或天然災害發生時，災害範圍與行政邊界可能與行政單元不一致或橫跨數個行政區，故以行政單元為基礎的人口統計資料，無法正確估算受災的人口數量，正確估計相關受災人數時需由現地調查，此舉相當耗時耗成本，故以行政區為基礎的人口資料在防救災時的效益不彰。本文應用統計區分類系統的人口統計資料，以洪災事件為研析案例，進行防救災風險管理下之人口暴露量推估，藉由暴露量分析去討論統計區分類系統與行政區兩者間之差異。

二、暴露量與人口推估

區域之災害風險管理主要由災害(hazard)潛勢、暴露量(exposure)、易損度(vulnerability)與緊急應變能力(coping capacity)所組成(Davidson and Lambert 2001; Rerts *et al.* 2009)。災害潛勢是不益、損害、危害與影響人類生活並造成損失的自然事件，具有不同規模大小與事件發生頻率之特性；暴露量是描述受到災害影響之人數或財產損失程度，即暴露在災害地區之人口、建築物、工程設施、基礎建設與管線、公共設施以及經濟活動狀況等；易損度為暴露在風險下物件於自然災害強度下所受到的損失程度，其程度介於 0 (無損失)和 1 (全部損失)之間(Besio *et al.* 1998; Mcneil *et al.* 2005)，藉此描述人口、建物或其他物件對

該災害事件之抵抗能力；應變能力指於災害事件發生時，所採取之減災、處理之能力之措施承受之。除此之外，也有文獻對以災害、易損度、暴露量為主軸定義成風險，經常使用如式(1)的方式表示(Besio *et al.* 1998)：

$$R = H \times V \times E \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中 R 為災害風險，H 表示災害發生的機率，V 是損害度，E 為暴露量，亦即在災害發生時受影響之人或財物等(Zhijun *et al.* 2009)。若就洪災事件而言，暴露量是遭受淹水災害之人、建物或財物的數量，暴露量與損害程度的乘積即是該是洪災事件的災害損失，即洪災風險即為洪災事件發生之機率與相對應之災害損失的乘積。

2.1 暴露量推估

在自然災害風險管理說明暴露量會涉及人口暴露量(population exposure)、建物暴露量(building exposure)、經濟暴露量(economic exposure)、生命暴露量(lifeline exposure)等四類(Davidson *et al.* 2001)。其中人口暴露量可由居民或日間流動人口進行評估，建物暴露量由建物數量與平均建物價值進行評估；經濟暴露量可以評估農業收入、工商業家數、經濟損失等項目；生命暴露量是評估災害區內的受損之生命個體，並進行量化。換言之，暴露量主要是描述災害所影響之人口數、結構物、經濟活動損失等，因此暴露量分析是災害風險管理中的重要要務之一。

除此，在進行暴露量評估時，需要先行掌握災害之範圍與程度，應用災害範圍與人口分布、工商活動與社會經濟等資料，針對受災範圍內評估該災害事件所造成的暴露量。

就洪災事件的風險管理過程中，倘若能建立社會經濟之地理資訊系統圖層，例如建物類型、土地使用別、區域內的人口數等屬性資料，該過程用來描述區域內的人口及社會經濟活動情況，應用空間分析之套疊分析，將洪災潛勢範圍圖與社會經濟圖層直接套疊，便可估計洪災潛勢內的暴露量。

又本研究以人口於洪災潛勢區內之數量視為暴露量，應用統計區分類系統中的不同空間單元，如統計區、一級發布區、二級發布區、村里與區之人口統計量推估洪災潛勢區內之影響人口數。再者，洪災潛勢範圍與行政邊界可能不一致或橫跨數個行政區，對於非吻合行政區界之範圍的區域，透過下列方法瞭解區域內空間單元的人口推估，相關的推估法如點內差法、面積內差法、二元分區密度法、多類別分區密度法與統計迴歸法。

2.2 特定空間單元之人口推估

2.2.1 點內差法(point-based interpolation)

Lam (1983) 提出以點為基礎的內差法(point-based interpolation)，在來源區(已知空間單元)中先行建立一個網格空間單元，應用來源區(source zone)的平均人口密度，建立來源區內中的網格人口密度趨勢面，透空間疊合方式估計目標區(target zone)的人口數(Lam 1983; Pan and Liu 2002)。此法又被定義為“point-in-polygon”(PP)法(Burrough 1986)，以來源區(source zone)的重心是否落於目標區(target zone)為評估依據，當來源區的重心落於目標區時，目標區的人口推估則是加總落於目標區的來源區之人口數量(Garb *et al.* 2007)。

2.2.2 面積內差法(areal weighted interpolation)

此法是依據面積比例為權重，直接將資料重分配至另一空間單元(Wright 1936; Goodchild and Lam 1980)，主要以空間的幾何內差，以來源區之資料為已知條件，進行目標區人口推估，此法經常被應用在空間單元之邊界不一致情況下(Flowerdew and Green 1992; Gregory and Ell 2005)。來源區域之人口數、面積視為已知，依照面積比例，等比例估算目標區之人口數，數學描述式如式(2) (Lam 1983; Holt *et al.* 2004)。

$$P_j = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ij} \times P_i}{A_i} \quad \dots\dots\dots(2)$$

其中 P：人口數；A：面積；i：來源區域；j：目標區域；n：來源區數量。

Source Zones			Target Zones		
A B C			D E F		
	Pop.	Area		Area of Intersection	
A	10	6	D	A	2
B	20	4	E	B	0
C	40	6	F	C	4

資料來源：Lam, 1983

圖 1 面積內差法示意圖

圖 1 左部分表示來源區的地理單元及人口統計資料，分別為 A、B、C 三個區域組成，人口數各為 10、20 及 40 人，面積各為 6、4、6 平方單位；圖 1 右部分為目標區的地理單元，目標區由 D、E、F 三個區域組成，並經由空間疊合後，可建立目標區與來源區的面積分析，如 D 區域有 4 個平方單位是來自於 A 區域，有 2 個平方單位是來自於 C 區域，根據式(2)，可估計 D 區域之人口數，經由面積內差內差法，推得 D 區域人口數為 20 人，計算如式(3)：

$$P_D = \frac{4 \times 10}{6} + \frac{2 \times 40}{6} = 20 \quad (3)$$

2.2.3 二元分區密度法

將區域分成「無人居住區 (uninhabited/unoccupied residential area) 與有人居住區 (inhabited/occupied residential area)」(Wright 1936; Keping *et al.* 2004)，藉此排除人口區域的無人區如交通用地、水利用地、公墓、公園…等，修正人口在全區域內是均勻分布的觀點。

區域內的人口重分配至有人居住區，無人居住區與有人居住區之分配權重分別為 0 與 1，權重為 0 表示無人分布，權重為 1 則為有人分布，故無人居住區的人口密度為 0，有人居住區的人口密度則採用該區域人口數除以有人居住區的面積，以使得人口重分配結果較符合實際人口空間分布特性(Yuan *et al.* 1997; Eicher and Brewer 2001; Holt *et al.* 2004; Keping *et al.* 2004; Langford and Higgs 2006)。

2.2.4 多類分區密度法

社會經濟之發展型態會影響人口之分布概況，若採用不同社會經濟資料如土地使用分區、路網可及性、地價…等，作為人口空間分布之權

重參考，藉此提升人口分布型態研討之效能，故多類別的分區密度法逐漸被發展。若以住宅區為例，可透過輔助資料建立高、中、低密度等之住宅區權重(Flowerdew and Green 1992; Relbel and Agrawal 2005; Wu *et al.* 2005; Wu 2006)。多類別分區密度法推估方式與二元分區密度法雷同，最大差異在於二元推估法只能夠辨別有人居住區與無人居住區，於多類別權重法則是區分成數種類別，各類別之權重介於 0~1 之間，權重大小則是由輔助資料之特性決定(Goodchild *et al.* 1993; Holt *et al.* 2004; Langford 2006)，計算如式(4)：

$$P_t = \frac{\sum_{c=1}^n (P_s \times W_c)}{A_c} \times A_{tc} \quad (4)$$

其中， P_t 表示目標區之人口推估量， P_s 表示來源區之總人口， W_c 表示不同土地使用類別之權重， A_c 表示不同使用類別的面積， A_{tc} 表示目標區在不同類別的面積。

2.2.5 統計迴歸法

統計模型方法乃是探討人口與社會經濟變數間之關係，多採用迴歸方式推估區域內之總人口數(Langford, Maguire *et al.* 1991)，文獻中常討論都會區面積、土地使用類別、居住區域、影像解析度、社會經濟等對區域人口推估之影響(Green 1956; Flowerdew and Green 1992; Webster 1996; Yew, Smith *et al.* 1997)。文獻中認為都會區面積與人口關係，以距離為考量因素，由都會中心向外擴散，呈現負指數關係(negative exponential function)，離都會區中心越遠之區域，其人口數越少(Newling 1965; Wu *et al.* 2005)。但因在都會區中仍是會受到土地使用類別影響，導致人口有疏密程度，其後又提出不同土地使用類別對修正人口影響，認為此法較都會區面積影響更為顯著，從而建立各種土地使用類別與人口關係(Yew *et al.* 1997; Donnay and Unwin 2001)。

過程中需收集多個與人口分布相關之屬性(如高程、路網、建物、地價、土地使用分區等)，以人口數為應變數 y ，其餘相關屬性視為自變數 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，利用迴歸分析的方法進行分析，如式(5)所示，透過迴歸分析，得知各種不同的都

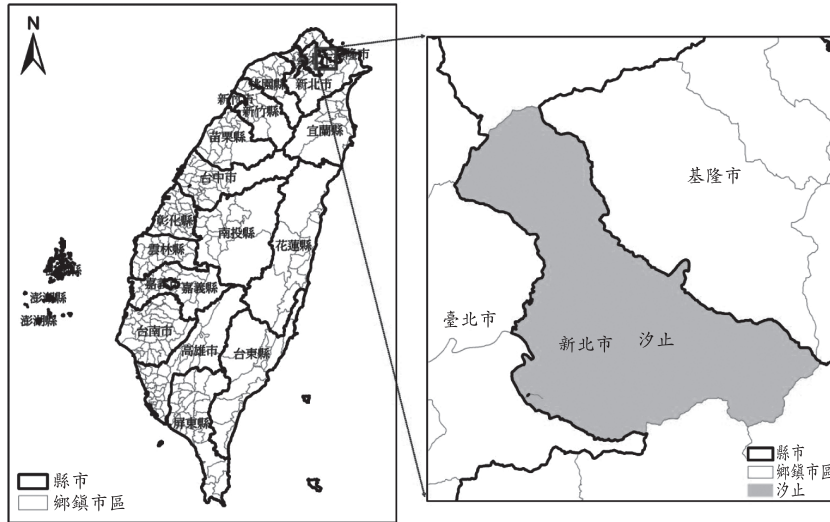


圖 2 汐止區之地理分布圖

會區內之人口分布情形，推估結果成效甚佳 (Kraus *et al.* 1974; Weber 1994; Lo 2003)。

$$y = \left(\sum_{i=1}^n \beta_i x_i \right) + \alpha + \varepsilon \dots\dots\dots (5)$$

其中 y ：人口數； x ：人口分布相關屬； n ：自變數(人口分布相關屬性)總個數； α ：迴歸式截距項； β ：各項變數係數項； ε ：迴歸式誤差項

上述之人口推估法，多著重於多種輔助資料，如土地使用分區、衛星影像圖、交通路網等資料之參考應用，以加總後之人口數為基礎去推估特定空間單元內的人口數數量，又本研究欲評估統計區分類系統之效能，將利用不同空間單元之人口統計進行洪災潛勢區內之人口暴露量推估，故採用面積內差法為人口暴露量之推估法。

三、實例分析

以新北市汐止區為研討區域，位於新北市東北部，西以大坑溪、基隆河、內溝溪與台北市為界，東則以丘陵地與基隆市相鄰，地理位置分布如圖 2，該區域四面環山，位於台北盆地東南隅，西南側有基隆河從中蜿蜒貫穿，全區地形多元，僅在基隆河兩岸內為較大的河谷平原外，其餘多為山坡地形為主。此區的氣候易受基隆地區

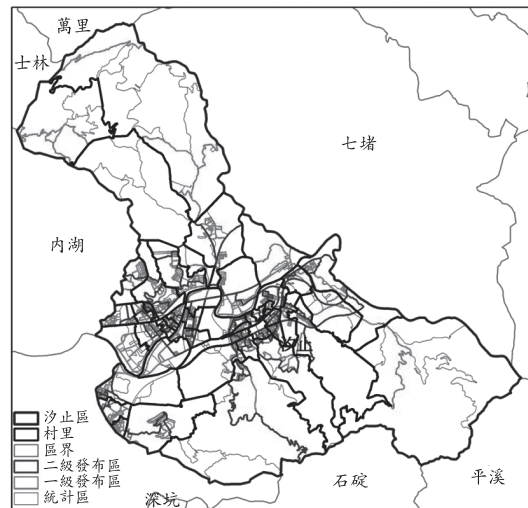
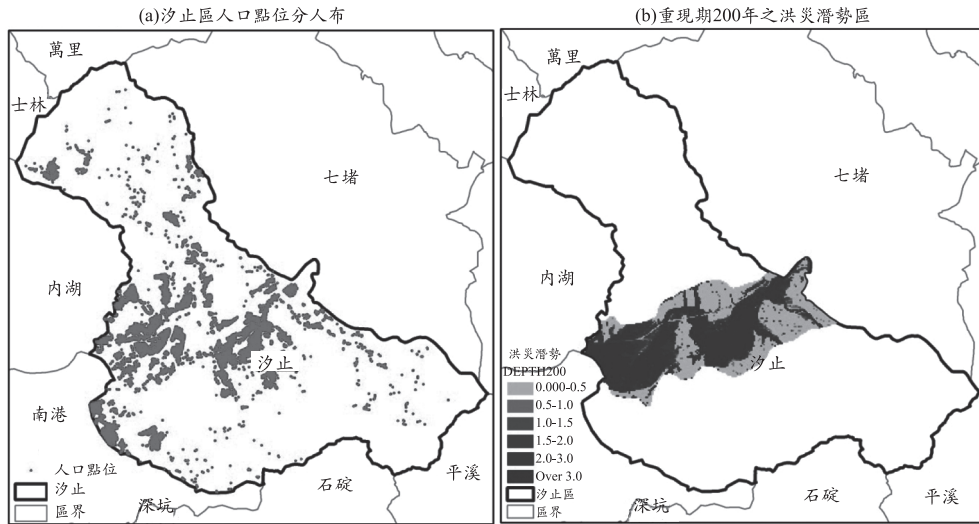


圖 3 汐止區之統計區分類系統單元

之東北氣候區之影響。有效溫度大部分屬於副熱帶季風氣候區，氣候特徵屬於東北區與西南區之過渡性質，夏季雨量稍微多於冬季，區域內冬季因當大陸及地氣團南下之衝，故氣溫較低。

藉由汐止區之統計區分類系統中共有 1039 個統計區、757 個一級發布區、68 個二級發布區、46 個村里及 1 個區之空間單元(內政部 2011)，統計區系統空間單元之地理分布如圖 3 所示。



資料來源:Chen 2005, Su 2005

圖 4 人口點位分布與洪災潛勢圖

再者利用 2009 年臺北縣汐止市之第一季人口資料，汐止區內之總人口數為 187,217，配合建物門牌地址資料庫進行地址定位，方能夠繪製汐止區人口之空間分布圖，如圖 4(a)所示。以數理淹水模擬模式，模擬重現期 200 年之洪災潛勢範圍，如圖 4(b) (Chen, 2005)。由圖 4(a)與圖 4(b)進行空間疊合，方能計算洪災潛勢區內之人口暴露量，故以人口點位為基礎在洪災潛勢區內之暴露量為 142,432 人，約佔 76%之總人口數，同時以點為基礎進行人口暴露量估計值(142,432)為比較基準，依序採用區別、村里別與統計區分類系統之各層級(如二級發布區、一級發布區與最小統計區別)的人口統計資料進行空間疊合，以面積權重內差法推估人口之暴露量。

利用洪災潛勢與不同空間單元之人口統計資料進行暴露量推估，以圖 4(b)為例，汐止區總面積為 71.75 km²，總人口數為 187,217，重現期 200 年之洪災潛勢範圍面積為 14.26 km²，故以面積內差法推估洪災潛勢區內之人口暴露量數為 37,196 人，計算如式(6)：

$$187,217 \times \frac{14.26}{71.75} = 37,196 \quad \text{.....(6)}$$

同理，分別以村里、二級發布區、一級發布

區與統計區之空間單元與洪災潛勢範圍進行空間疊合，即將圖 3 之不同統計單元與圖 4(b)疊合，根據面積內差法進行洪災潛勢區內的人口暴露量估算。

以村里為例，表 1 描述各村里之面積、該村里之統計人口數、洪災潛勢面積等，採用式(2)可推求各村里之人口暴露量，將各村里之暴露量進行加總，知村里為基礎所推估之洪災潛勢區內共有 32 個村里受到影響，總計人口暴露量為 117,505 人。

又以洪災潛勢範圍內的人口點位所推估之暴露量為比較基準，所推估之人口暴露量為 142,432 人。進一步將不同空間單元進行人口暴露量推估結果、影響的空間單元數量彙整，如表 2 所示。同時將推估結果與人口點位為基礎推估之暴露量進行比對，表 2 說明若以二級發布區為基礎，洪災潛勢影響區內有 69 個二級發布區受到影響，此時所推估之人口暴露量為 137,986，誤差為 3.1%；以統計區為推估使用單元時，影響的統計區數量為 775 個，又推估人口暴露量為 141,095，誤差為 0.8%。

表 2 闡述使用較大的空間(如區域別)統計人口資料，造成的誤差較大，當以村里為基礎進行之暴露量推估，誤差百分比降至 17.5%，若選擇

表 1 村里別之人口暴露量推估

村里	人口數 (人)	村里面積 (m ²)	潛勢面積 (m ²)	暴露量 (人)	村里	人口數 (人)	村里面積 (m ²)	潛勢面積 (m ²)	暴露量 (人)
大同里	11,169	1,053,663.56	1,006,435.52	10,362	厚德里	7,399	216,565.62	216,571.37	7,399
山光里	2,907	475,040.15	475,052.76	2,907	拱北里	4,607	2,266,495.13	179,076.71	364
中興里	7,991	228,668.10	228,674.17	7,991	崇德里	9,847	3,912,426.33	777,890.97	5,052
仁德里	1,819	45,842.47	45,843.69	1,819	智慧里	2,807	85,904.25	85,906.53	2,807
北山里	8,568	995,788.16	414,963.64	5,170	湖光里	7,346	1,216,377.66	285,063.14	1,722
白雲里	15,113	3,760,969.72	323,982.50	771	湖興里	7,812	12,302,826.91	336,610.00	1,682
江北里	5,976	1,490,049.53	1,466,821.01	5,883	鄉長里	2,302	1,739,170.10	601,457.33	796
自強里	5,019	261,367.32	259,025.49	4,974	新昌里	6,000	144,547.94	144,551.77	6,000
秀山里	10,015	2,793,479.61	551,422.63	6,075	義民里	1,482	89,843.34	89,845.73	1,482
秀峰里	4,557	8,251,390.32	11,838.70	7	福安里	5,510	159,458.46	159,462.69	5,510
忠孝里	7,289	373,773.69	373,783.61	7,289	樟樹里	6,663	2,690,570.12	1,324,194.25	3,130
金龍里	9,745	304,070.87	270,544.28	8,431	橋東里	12,360	469,578.17	469,590.64	1,236
長安里	1,659	452,537.25	452,549.27	1,659	興福里	9,994	528,007.33	528,021.34	9,994
長青里	982	5,569,763.32	84,259.77	15	環河里	1,315	1,032,356.72	1,021,365.81	1,301
信望里	315	35,862.00	35,862.95	315	禮門里	1,192	82,228.63	82,230.81	1,192
保安里	1,617	1,375,526.99	748,331.05	880					
保長里	5,736	2,100,098.20	1,204,570.28	3,290	總計				117,505

表 2 不同空間單元之人口暴露量推估

空間單元	影響空間單元數量	推估人口暴露量	誤差百分比
	(個)	(人)	(%)
區	1	37,196	73.9
村里	33	117,505	17.5
二級發布區	69	137,986	3.1
一級發布區	604	141,095	0.9
統計區	775	141,251	0.8
人口點位(參考)		142,432	

統計區分類系統之單元，如二級發布區、一級發布區或統計區時，該誤差百分比皆低於 5%，故可用來說明兩點：

1. 使用的空間單元越小時，暴露量之推估值與參考值的誤差較小。
2. 使用統計區分類系統之空間單元推估之人口暴露量較行政區界為基礎推估的人口暴露量較為精確，效能較佳。

四、結論與討論

若將社會經濟資料整合至統計區分類系統，能夠將資料細緻化與保有資料在空間上的分

布特性，處理過去以行政區別為基礎之人口統計資料不易呈現人口在空間上的分布問題，不再將資料概括化，弱化 MAUP 影響，同時統計區系統之空間單元具有邊穩定與可視之特性。

目前內政部統計處積極推廣統計區分類系統之空間單元，冀望社會經濟資料能夠整合至統計區分類系統，在兼顧隱私狀況下將社會經濟資料細緻化且維持社會經濟在空間分布特性，為了說明統計區分類系統之效益，本文應用人口資料推估洪災潛勢區內之暴露量。

利用不同空間單元之人口統計進行洪災潛勢內的人口暴露量，研討空間單元對暴露量推估

之影響，同時說明統計區分類系統下之最小統計區、一級發布區與二級發布區推估結果與人口點位於洪災潛勢區內之暴露量誤差較小，以此作為評估統計區分類系統之效能。同時，統計區分類系統之人口統計較能夠描述實際人口分布概況，此系統能夠保有人口隱私與人口資料細緻化，由洪災潛勢區內之暴露量推估，研討統計區分類系統之使用效能。

由於統計區分類系統暫整合人口資料，故本研究初步採用人口資料對洪災潛勢區進行暴露量估算，無法對潛勢區內之建物數量與經濟損失等，未來若有其他單位轄管之社會經濟資料整合至統計區分類系統，對於災害之風險管理與防救災工作尚有所助益，使得資料分析能夠更多元化。

五、參考文獻

1. Arnell, N. W. (1989). "Expected annual damages and uncertainties in flood frequency estimation." Journal of Water Resources Planning and Management, **115**(1): 94-107.
2. Besio, M., Ramella, A., Bobbe, A., Colombo, A., Olivieri, C., and Persano, M. (1998). "Risk maps: theoretical concepts and techniques." Journal of Hazardous Materials, **61**: 299-304.
3. Chen, A. S., Hsu, M. H., Chen, T. S., and Chang, T. J. (2005). "Inundation model for highly developed urban areas." Water Science and Technology, **51**(2): 221-229.
4. Davidson, Rachel A., and Kelly B. Lambert. (2001). "Comparing the hurricane disaster risk of US coastal counties." Natuer Hazard Review **2**(3): 132-42.
5. Dobson, J. E., E. A. Bright, *et al.* (2000). "LandScan: A Global Population Database for Estimating Populations at Risk" Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, **66**(7): 849-857.
6. Donnay, J. P. and D. J. Unwin (2001). Modeling geographical distributions in urban areas. Remote sensing and urban analysis. J. P. Donnay, M. J. Barnsley and P. C. Longley. London, Taylor & Francis: 205-224.
7. Eicher, C. L. and C. A. Brewer (2001). "Dasymetric Mapping and Areal Interpolation: Implementation and Evaluation." Cartography and Geographic Information Science **28**(2): 125-138.
8. Flowerdew, R. and M. Green (1992). "Developments in Areal Interpolation Methods and GIS." The Annals of Regional Science **26**(1): 67-78.
9. Garb, J. L., R. G. Cromley, *et al.* (2007). "Estimating Populations at Risk for Disaster Preparedness and Response." Journal of Homeland Security and Emergency Management **4**(1): 1-17.
10. Goodchild, M. F. and N. S. Lam (1980). "Areal Interpolation: A Variant of The Traditional Spatial Problem." Geo-processing **1**: 297-312.
11. Gregory, I. N. and P. S. Ell (2005). "Breaking the boundaries: geographical approaches to integrating 200 years of the census." Journal of the Royal Statistical Society Series A (Statistics in Society) **168**(2): 419-437.
12. Hay, S. I., A. M. Noor, *et al.* (2005). "The accuracy of human population maps for public health application." Tropical Medicine and International Health **10**(10): 1073-1086.
13. Holt, J. B., C. P. Lo, *et al.* (2004). "Dasymetric Estimation of Population Density and Areal Interpolation of Census Data." Cartography and Geographic Information Science **31**(2): 103-121.
14. Kim, H. and X. Yao (2010). "Pycnophylactic interpolation revisited: integration with the dasymetric-mapping method." International Journal of Remote Sensing **31**(21): 5657-5671.
15. Kraus, S. P., L. W. Senger, *et al.* (1974). "Estimating Population from Photographically Determined Residential Land Use Types." Remote Sensing of Environment **3**(1): 35-42.
16. Garb, J. L., R. G. Cromley, *et al.* (2007). "Estimating Populations at Risk for Disaster Preparedness and Response." Journal of Homeland

- Security and Emergency Management **4**(1): 1-17.
17. Goodchild, M. F., L. Anselin, *et al.* (1993). "A framework for the areal interpolation of socio-economic data." Environment and Planning A **25**(3): 383-397.
 18. Goodchild, M. F. and N. S. Lam (1980). "Areal Interpolation: A Variant of The Traditional Spatial Problem." Geo-processing **1**: 297-312.
 19. Gregory, I. N. and P. S. Ell (2005). "Breaking the boundaries: geographical approaches to integrating 200 years of the census." Journal of the Royal Statistical Society Series A (Statistics in Society) **168**(2): 419-437.
 20. Green, N. E. (1956). "Aerial Photographic Analysis of Residential Neighborhoods: An Evaluation of Data Accuracy." Social Forces **35**: 142-147.
 21. Keping, C., M. John, *et al.* (2004). "Defining area at risk and its effect in catastrophe loss estimation: a dasymetric mapping approach." Applied Geography **24**(2): 97-117.
 22. Lam, N. S. (1983). "Spatial Interpolation Methods: A Review." The American Cartographer **10**(2): 129-149.
 23. Langford, M., D. J. Maguire, *et al.* (1991). The Areal Interpolation Problem: Estimating Population Using Remote Sensing in a GIS Framework. Handling Geographical Information: Methodology and Potential Applications. I. Masser and M. Blakemore. New York, Wiley: 55-77.
 24. Langford, M. (2006). "Obtaining population estimates in non-census reporting zones: An evaluation of the 3-class dasymetric method." Computers, Environment and Urban Systems **30**: 161-180.
 25. Langford, M. and G. Higgs (2006). "Measuring Potential Access to Primary Healthcare Services: The Influence of Alternative Spatial Representations of Population." The Professional Geographer **58**(3): 294.
 26. Lo, C. P. (2003). Zone-Based Estimation of Population and Housing Units from Satellite-Generated Land Use. Remotely sensed cities. V. Mesev. London; New York, Taylor & Francis: 157-180.
 27. McNeil, Alexander J., Rüdiger Frey, and Paul Embrechts. (2005). "Quantitative risk management: concepts, techniques and tools. Princeton" N. J.: Princeton University Press.
 28. Newling, B. E. (1965). "Urban Growth and Spatial Structure-Mathematical Models and Empirical Evidence." Annals of the Association of American Geographers **55**(4): 637-637.
 29. Openshaw, S. (1984). "The modifiable areal unit problem." Concepts and Techniques in Modern Geography **38**(41). Norwich: Geo Books. ISBN 0-86094-134-5
 30. Pan, Z. Q. and G. H. Liu (2002). "The Research Progress of Areal Interpolation." Progress In Geography **21**(2): 146-152.
 31. Relbel, M. and A. Agrawal (2005). Land Use Weighted Areal Interpolation. GIS Planet 2005 International Conference. Estoril, Portugal.
 32. Rerts, N. J., F. Nadimb, and B. Kalsne. (2009). "Quantification of vulnerability to natural hazards." Georisk **3**: 164-73.
 33. University Consortium for Geographic Information Science.
 34. Su, M. D. Kang, J. J. *et al.* (2005). "A Grid-Based GIS Approach to Regional Flood Damage Assessment." Journal of Marine Science And Technology **13**(3): 184-192
 35. Unwin, D. J. (1996). "GIS, spatial analysis and spatial statistics." Progress in Human Geography **20**(4): 540-551.
 36. Weber, C. (1994). Per-zone Classification of Urban Land Use Cover for Urban Population Estimation. Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scales. G. M. Foody

- and P. J. Curran. New York, Wiley: 142-148.
37. Webster, C. J. (1996). "Population and Dwelling Unit Estimation from Space." Third World Planning Review **18**(2): 155-176.
 38. Weichselbaum, J., F. P. Monteferri, *et al.* (2005). Sharpening Census Information in GIS to Meet Real-World Conditions – The Case for Earth Observation. Sustainable Development and Planning II. W. I. o. T. C. A. BREBBIA, UK and A. KUNGOLOS, University of Thessaly, Greece 143.
 39. Wright, J. K. (1936). "A Method of Mapping Densities of Population: With Cape Cod as an Example." Geographical Review **26**: 103-110.
 40. Wu, Shuo-sheng, Q. Xiaomin, *et al.* (2005). "Population Estimation Methods in GIS and Remote Sensing: A Review." GIScience and Remote Sensing **42**(1): 58-74.
 41. Wu, Shuo-sheng, (2006). Incorporating GIS Building Data and Census Housing Statistics for Sub-Block Population Estimation. 2006 Summer Assembly.
 42. Yew, Y., R. M. Smith, *et al.* (1997). "Remodeling Census Population with Spatial Information from Landsat TM imagery." Computers Environment and Urban Systems **21**: 245-258.
 43. Yuan, Y., R. M. Smith, *et al.* (1997). "Remodeling census population with spatial information from LandSat TM imagery." Computers, Environment and Urban Systems **21**(3-4): 245-258.
 44. Zhijun, Tong, Zhang Jiquan, and Liu Xingpeng. (2009). "GIS-based risk assessment of grassland fire disaster in western Jilin province, China." Stochastic Environmental Research and Risk Assessment **23**: 463-71.
 45. 內政部(2011)。國土資訊系統統計區建置計畫。台北，內政部統計處。
 46. 台灣地理資訊學會(2008)。國土資訊系統統計區建置計畫整體規劃暨試作。台北，內政部統計處。
 47. 周學政(2005)。社經人文地理資料庫整合應用。台北，台北市政府民政局。
 48. 林建元和李萬凱(2005)。“國土計畫與 GIS 的運用。” 國土資訊系統通訊 **55**。

收稿日期：民國 101 年 1 月 16 日

修正日期：民國 101 年 2 月 15 日

接受日期：民國 101 年 2 月 15 日