

嘉南藥理科技大學專題研究計畫成果報告

以實測資料推導台灣地區垃圾發熱量經驗公式之研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：CNEV-91-21

執行期間：91 年 1 月 1 日至 91 年 12 月 31 日

計畫主持人：林健榮

共同主持人：張翊峰

計畫參與人員：

執行單位：環境工程衛生系

中華民國 92 年 2 月 27 日

摘要

本研究以台灣地區 2001 年第 3 季至 2002 年第 1 季之鄉鎮縣市每季垃圾採樣分析之實測資料共 135 組數據，分析每組垃圾之物理組成成分包括紙類、纖維布類、木竹、廚餘類、塑膠類、皮革橡膠類及其他類等可燃性物理成分比例配合實測之低位發熱量，以多元迴歸統計模式建立台灣地區本土化之發熱量經驗公式，並將此公式所推導之發熱量推估結果與台灣地區 12 組季平均實測資料進行比對，以評估本研究推導公式應用的可行性。本研究結果所推導的垃圾發熱量經驗公式分為簡易公式及完全公式兩種，其中簡易公式的複判定係數 R^2 (coefficient of multiple determination) 等於 0.986，完全公式之 R^2 等於 0.990，顯示此二者皆為合宜的統計推估模式。另一方面，本經驗模式若與其他發熱量推估公式相比較，本模式所推估結果與實測資料之平均絕對百分誤差(Mean Absolute Percentage Error; MAPE) 相較其他三成分、物理組成比例推估及元素分析推估模式之誤差值都為低，顯示本研究推導之經驗公式在台灣地區極具有實用價值，其成果可裨益相關縣市環保主管機關及中央決策單位擬定廢棄物管理政策時之參考。

關鍵詞：垃圾物理組成、發熱量經驗推估公式、多元迴歸分析

一、研究內容與目的

台灣地區妥善處理廢棄物最終處置問題一直為環境保護重要的議題，由於資源回收（焚化）廠具有需求土地面積小、減容效果最佳且可回收能源及電力等優點，故已逐漸替代掩埋方式成為未來都市垃圾處置的主流。台灣地區垃圾處理處置問題在未來將取決於焚化爐效率及功能，其設計之功能及操作營運成本是否能符合垃圾妥善處理之要求。故此，垃圾產出性質的質量變化，尤其鄉鎮市垃圾低位發熱量變化情形將是未來焚化爐重要營運及操作考量最重要之參數之一。但由於垃圾採樣常面臨季節、氣候等因素之差異，加之台灣地區積極推動

資源回收集垃圾減量等工作，使垃圾性質受政策影響而有很大差異，對於焚化爐所需的低位發熱量數據影響尤大。在目前台灣地區各鄉鎮地區主管機關往往受限經費

僅能對簡單物理組成分析，而無法進一步分析發熱量及元素等之化學分析，若能以建構以本土化之物理組成成分推估低位發熱量之經驗公式，更顯得迫切且必要。

本研究以台灣地區 2001 年第 3 季至 2002 年第 1 季之鄉鎮縣市每季垃圾採樣分析之實測資料共 135 組數據，分析每組垃圾之物理化學成分，以多元迴歸統計模式建立台灣地區本土化之發熱量經驗公式，並將此公式所推導之發熱量推估結果與台灣地區北、中、南三區及全國共 12 組實測平均資料進行比對，以評估本研究推導公式應用的可行性。其成果將可有益於主管機關以較低的檢驗成本預判垃圾進入焚化廠垃圾發熱量品質之優劣，據以調整焚化爐之操作條件，並可作為決策單位擬定廢棄物管理政策時之參考。

二、文獻回顧

垃圾發熱量除利用熱卡計分析外，尚可利用推估模式計算發熱量，其類型大致可分三成分組成分析推估，如式(1)及(2)；由物理組成分析推估，如式(3)及(4)；由元素分析推估，如式(5)~(7)，各種分析方式之摘要說明如下：

(一) 三成分推估

$$LHV = 45V - 6W \quad (1)$$

式中 V ：可燃成分(%)。

$$LHV = 44.75V - 5.85W + 21.2 \quad (2)$$

上述式(1)中，假定可燃份 V 之發熱量以 4,500Kcal/kg 計算，水分蒸發潛熱以 600Kcal/kg 計算，式(2)中可燃份 V 之發熱量以 4,475Kcal/kg 計算，水分蒸發潛熱以 585Kcal/kg 計算。

(二) 物理組成成分推估經驗公式

$$LHV = 88.2B + 40.5(E + A) - 6W \quad (3)$$

式中， B ：塑膠含率(%)， E ：廚餘含率(%)， A ：紙類含率(%)，皆以乾基表示， W ：表示垃圾含水分(%)。

$$LHV = (38.52A + 92.09B + 49.24C + 38.34D + 37.55E$$

$$+ 64.07F) \times \left(\frac{100 - W}{W} \right) - 6W \quad (4)$$

式中，A：紙類含量(%)，B：塑膠含量(%)，C：纖維布類含量(%)，D：木竹類含量(%)，E：廚餘類含量(%)，F：其他類含量(%)，A~F皆為以乾基表示，W為含水量(%)，本式為台灣地區經驗公式(林景行，2000)，其中係數值為調查台灣地區各物理組成份之實測發熱量換算而得。

(三) 元素分析推估公式

$$LHV = 81C + 342.5 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 22.5S - 6(W + 9H) \quad (5)$$

式(5)為 Dulong 式，假設氧燃燒皆化合成水。

$$LHV = 81 \left(C - \frac{3O}{8} \right) + 57 \times \frac{30}{8} + 345 \left(H - \frac{O}{16} \right) + 25S - 6(W + 9H) \quad (6)$$

式(6)為 Steuer 式，假設氧一半化合為 H₂O 之型式，另一半化合為 CO 之型式。

$$LHV = 81 \left(C - \frac{3O}{4} \right) + 342.5H + 22.5S + 57 \frac{3O}{4} - 6(W + 9H) \quad (7)$$

式(7)為 Scheurer-Kestner 式，假設 O 全部化合為 CO 之型式。

上述推估方式中，元素分析推估由於需要各項化學組成分析，雖為精確的推估方式，但往往分析過程需要較多量的時間與金錢獲取精密的分析，效益較不經濟，而物理組成分析推估經驗公式則相較三成分分析推算精確性較高，而比起元素分析估算所需資料分析取得較易，惟需依各地區組成構成因素的差異或消費習慣有著不同的差異，故在應用上有所區隔。

三、研究方法

本研究係以多元迴歸模式推估台灣地區物理組成發熱量經驗公式，所需進行步驟如下：

(一) 樣本區的選定：

本研究由 2001 年第 3 季至 2002 年第 1 季進行台灣省北、中、南三區(每區十五個鄉鎮市共四十五個鄉鎮市)每三個月採樣一次，共 135 組樣本進行垃圾採樣及化驗分析。

(二) 垃圾物理化學性質測定分析

依據採樣標準方法，分析每個樣本包括三成分分析：水分、可燃份、灰份；物理組成：紙類、塑膠類、纖維布類、木竹類、廚餘類、皮革橡膠、其他等七類物理乾基比例；化學分析碳、氫、氧、氮、硫、磷、鉀、有機氯等，以及實測發熱量：高位發熱量、低位發熱量。

(三) 建立台灣地區本土化發熱量推估經驗公式

將所得之樣本資料及採樣數據以多元迴歸模式進行分析，建立本土化經驗公式，本研究迴歸模式採用逐步迴歸選取法，推導經驗公式如下：

$$LHV = (A \times a + B \times b + C \times c + D \times d + E \times e + F \times f + G \times g) \times \left(\frac{100 - W}{100} \right) - 6W \quad (8)$$

式中 A=紙類(%); B=塑膠類(%); C=纖維布類(%); D=木竹類(%); E=廚餘類(%); F=皮革類(%); G=其他類(%), A~G 表示物理組成乾基之比例, W=水分含量(%), a,b,c,d,e,f,g 分別代表本研究所推估之各乾基物理組成份比例之迴歸係數值。

(四) 公式之驗證

為驗證所推估公式的適用性，本研究將所推導之公式以台灣地區北、中、南三區及全國共 12 組實測平均低位發熱量資料進行比較，並以環保署「環境檢驗室品管分析執行指引」(NIEA-PA104)文件中相對百分差異(R)值，驗證推估值與實測值之差異。其中：

$$\text{百分差異 } R(\%) = \frac{|X_1 - X_2|}{\frac{1}{2}(X_1 + X_2)} \times 100\% \quad , X_1 \text{ 代表推估值, } X_2 \text{ 代表實測值。}$$

(五) 各模式之比較

為比較本模式所推估數據與現有推估模式作比較，本研究將 16 組之實測資料帶入上述各預測模式(1)~(8)中，並計算各模式之平均絕對誤差(MAPE)，作為模式預測之精確度比較，其中 MAPE 預測模式之公

式及評估預測能力之分類如下所示：

$$\text{平均絕對誤差 } MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - \hat{X}_i|}{X_i} \times 100, X_i \text{ 代表}$$

推估值, \hat{X}_i 代表實測值, n 為預測之數目, 其預測能力可區分為: $MAPE < 10$ 代表極佳, $10 \sim 20$ 代表優良, $20 \sim 50$ 代表可接受, > 50 代表不正確。

四、結果與討論

(一) 完全模式推估

根據 135 組採樣數據的物理及化學分析, 本研究將垃圾之紙類、塑膠、纖維布類、木竹類、廚餘類、其他類的物理組成比例 (%) 當作自變數 (independent variables), 以經過水分含量校正的低位發熱量當作因變數 (dependent variable), 經由逐步迴歸分析方法以可得到如表 1 之統計結果, 本模式因採用所有之物理組成進行分析, 迴歸結果顯示, 在 95% 的信賴區間下, 複相關係數 (coefficient of multiple correlation) R 為 0.995, 複迴歸判定係數 R^2 為 0.990, 其數據代表因變數的變異能被自變數群解釋的比例, 這結果顯示本經驗模式能充分解釋物理組成比例變化對垃圾低位發熱量的影響, 此外, 調整型複判定係數 (adjusted coefficient of multiple determination; $Adj.R^2$), 代表進一步考量模式中自變數的個數列入考量而加以調整之複判定係數, 此值可判定多元迴歸模式之合理性, 本模式 $Adj.R^2$ 值為 0.989, 顯示為一合理且適用之迴歸模式。另一方面, 係數 t 的檢定值 (t -ratio) 顯示, 皮革橡膠類的 t 檢定值為 -0.314 小於 $t(0.95; 129) = 1.65$, 未通過檢定, 而由於皮革佔物理組成不到 1%, 故模式中將皮革類予以排除。此外本模式忽略其他類之組成, 原因為包括其他類的模式推估 R^2 值與本研究相同為 0.990, 在節省分類的時間下, 故予以省略。

根據表中分析, 可將台灣地區垃圾低位發熱量經驗完全模式以下式表示:

$$LHV = (A \times 35.06 + B \times 68.82 + C \times 42 + D \times 70 + E \times 39.66) \times \left(\frac{100 - W}{100} \right) - 6W \quad (9)$$

式中 A = 紙類(%); B = 塑膠類(%); C = 纖維布類(%); D = 木竹類(%); E = 廚餘類(%), 以物理組成乾基表示, W = 水分含量(%).

(二) 簡易模式推估

由於本研究主要目的之一為提供台灣地區主管機關藉由簡單物理組成分析快速推估垃圾之低位發熱量, 故如何再簡化物理組成比例的種類以推估垃圾發熱量亦為重要課題。由於表 1 顯示可燃物中以紙類、廚餘及塑膠三種成分含量即高達垃圾物理乾基的 70~72%, 顯示若能僅由這三者比例去推斷垃圾之低位發熱量將可減少垃圾物理組成分類之時間。故本研究嘗試將垃圾之紙類、塑膠、廚餘類的物理組成比例 (%) 與經過水分含量校正的低位發熱量進行迴歸分析, 其結果如表 2 所示。

由表 1 顯示在 95% 的信賴區間下, 簡易模式的複相關係數 R 為 0.993, 複迴歸判定係數 R^2 為 0.986, $Adj.R^2$ 值為 0.986, 係數 t 的檢定值亦皆大於 $t(0.95; 136) = 1.645$, 顯示本模式亦具有極高的解釋性及為一合理的迴歸模式。故可將台灣地區垃圾低位發熱量經驗簡易模式以下式表示:

$$LHV = (A \times 40.19 + B \times 83.16 + E \times 43.25) \times \left(\frac{100 - W}{100} \right) - 6W \quad (10)$$

式中 A = 紙類(%); B = 塑膠類(%); E = 廚餘類(%), 以物理組成乾基表示, W = 水分含量(%).

(四) 模式驗證與分析

1. 模式之百分差異值 $R(\%)$ 比較

為探討本研究所推估模式之適用性, 故將 2001 年第 3 季~2002 年第 1 季將台灣地區垃圾分為北、中、南三區, 並按季節區分為每季每區 15 個樣品, 再將 15 個樣品的實測資料予以平均計算, 故連同全國平均數據可得每季 4 個共 16 組實測平均資料, 作為各推估模式驗證百分差異之用。其結果如表 1 所示, 表中顯示由三成分推估的式(1)及(2)百分差異結果分析中, 式(2)有較

小的百分差異值，且百分差異值皆小於 12%，顯示式(2)具有參考價值；同樣在物理推估的式(3)及(4)方面，式(4)為台灣地區經驗公式（林景行，2000），其中係數值為調查台灣地區各物理組成份之實測發熱量換算而得，其百分差異值較低，多介於 12~19%之間，參考價值較高；式(5)~(7)為元素分析推估式，表中可顯示式(5)Dulong 式及式(6)Steuer 式有很高的準確性，相對百分差異多低於 10%，顯示元素分析推估熱值的參考價值甚高，而按元素分析模式之假設，顯示垃圾中氧燃燒多化合成水，而非 Scheurer-Kestner 式中所假設 O 全部化合為 CO 之型式。

而由表 1 顯示，本研究所推估的完全模式以及簡易模式與實測資料相比較，其百分差異值相當低，結果多低於 5%，顯示本研究所推導的推估模式對於台灣地區以物理組成推估低位發熱量適用性極佳，對於主管機關具有很顯著的參考價值，將可作為資源回收廠以物理組成推估垃圾進場發熱量的參考。

2. 模式之平均絕對誤差 MAPE 之比較

為進一步比較各模式預測的精確性的優劣，本研究以平均絕對誤差 MAPE 當作指標，由表 2 顯示，以研究推估的完全模式、簡易模式、式(5)Dulong 式及式(6)Steuer 式的 MAPE 值最低，這四種模式的 MAPE 都小於 5，顯示上述模式的精確度極佳，皆能有效推估台灣地區低位發熱量。

五、結論

本研究以台灣地區 2001 年第 3 季至 2002 年第 1 季之鄉鎮縣市每季垃圾採樣分析之實測資料共 135 組數據，分析每組垃圾之物理組成分包括紙類、纖維布類、木竹、廚餘類、塑膠類、皮革橡膠類及其他類等可燃性物理成分比例配合實測之低位發熱量，以多元迴歸統計模式建立台灣地區本土化之發熱量經驗公式，並將此公式所推導之發熱量推估結果與台灣地區北、中、南三區及全國 12 組季平均實測資料進行比對，以評估本研究所推導公式應用的可行性。

本研究以多元迴歸統計模式建立台灣地區本土化之發熱量經驗公式，所得包括完全模式及簡易模式，其

中簡易公式的複判定係數 R^2 (coefficient of multiple determination)等於 0.986，完全公式之 R^2 等於 0.990，顯示此二者皆為合宜的統計推估模式。另一方面，本經驗模式若與其他發熱量推估公式相比較，本模式所推估結果與實測資料之平均絕對百分誤差以及百分差異值相較其他三成分、物理組成比例推估及元素分析推估模式之誤差值都為低，顯示本研究推導之經驗公式在台灣地區極具有實用價值，其成果可裨益相關縣市環保主管機關及中央決策單位擬定廢棄物管理政策時之參考，有益於主管機關以較低的經濟成本預判垃圾進入焚化廠垃圾發熱量品質之優劣，據以調整焚化爐之操作條件，並可作為決策單位擬定廢棄物管理政策時之參考。

表 1 台灣地區發熱量經驗公式之多元迴歸模式分析結果

模式	項目	係數估計值	t-檢定 t-ratio	複相關係數 R	複判定係數 R^2
完全模式	塑膠	68.817	11.475	0.995	0.990
	廚餘	39.658	13.572		
	紙類	35.064	10.244		
	木竹	70.021	4.440		
	纖維布	42.008	5.080		
簡易模式	塑膠	83.155	13.292	0.993	0.986
	廚餘	43.252	13.587		
	紙類	40.186	10.523		

表 2 各推估模式與實測資料之平均絕對誤差分析結果

推估模式	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	簡易式	完全式
MAPE	17.9	5.5	163	16.4	4.2	4.9	20.5	2.6	2.4