

# 臺灣銅金屬大氣腐蝕環境分級模式之建構

謝幼屏<sup>1</sup> 蔡立宏<sup>2</sup> 賴瑞應<sup>3</sup> 黃烟宏<sup>1</sup>

<sup>1</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心 副研究員

<sup>2</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心 主任

<sup>3</sup>交通部運輸研究所運輸技術研究中心 科長

## 摘要

依據我國國家標準 CNS 13401，金屬材料大氣腐蝕分級可依劑量-反應函數計算金屬腐蝕損失量，推估腐蝕性級別，惟其引用之劑量-反應函數係依據國外數據建立，應用時有參數適用問題。本研究嘗試利用臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查數據及採用迴歸分析法，建立適用臺灣地區之銅金屬劑量-反應函數(腐蝕速率與大氣腐蝕因子間之迴歸模式)，並依據統計推論應遵循之程序，確立分析結果具意義，再透過實際調查數據進行驗證，確認模式預測正確率。結果顯示：依模式提出之銅金屬腐蝕速率計算式及實際數據驗證，確認預測正確率近 90%，可提供推估臺灣銅金屬腐蝕環境分級參考。

## 一、前言

金屬材料大氣腐蝕機制主要受到大氣中所含水分、氧氣和腐蝕性物質聯合作用而產生，因此，金屬在大氣中之腐蝕行為與速率存有地域性差異。中華民國國家標準 CNS 13401：金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-分級、測定與評估<sup>[1]</sup>係對應國際標準組織 ISO 9223:Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation<sup>[2]</sup>，將金屬材料大氣腐蝕環境由低至高分為 C1~C5 與 CX 共 6 個等級，提供辦理防蝕設計或選用防蝕工法之參據，可減少金屬材料或構造物未達設計年限就已銹蝕損壞的問題，降低因防蝕不足造成的經濟損失。

依據 CNS 13401，金屬材料大氣腐蝕環境級別主要依據標準金屬試片測得之第 1 年腐蝕速率決定，或應用劑量-反應函數(dose-response function)推估。惟 CNS 13401 係依 ISO 9223 內容修訂成為中華民國國家標準，ISO 9223 中劑量-反應函數係依據國外數據所建立。考量到大氣腐蝕具有地域性差異，臺灣地處熱帶、亞熱帶地區，屬高溫、高濕與高鹽的海島型氣候，與其他溫帶地區、大陸型氣候國家之腐蝕環境差異頗大，如逕引用國外數據建立的劑量-反應函數於我國，會有模式參數不適用問題，實有必要以本土數據建立適用臺灣地區金屬腐蝕速率之劑量-反應函數。

CNS 13401 主要針對碳鋼、鋅、銅、鋁等 4 種工業最廣泛應用的金屬材料進行大氣腐蝕環境分級，其中，碳鋼與鋅金屬為建造公共工程最常使用的金屬材料，已有相關文獻針

對碳鋼與鋅金屬建立臺灣地區大氣腐蝕預測模式<sup>[3,4,5,6]</sup>，但銅、鋁金屬迄今仍無探討文獻。其實，銅具有高導電性、高導熱性、耐腐蝕性、適宜的強度、易加工成形等特性，在日常生活中銅金屬與銅合金非常常見，例如：純銅常用來做電線與電纜內芯、冷氣與冰箱內銅管、電路板上的銅箔等；黃銅(銅鋅合金)常用來做水龍頭、鑰匙、閥門、門把、門鎖、樂器(小號、長號)、螺絲、五金零件等；青銅(銅錫合金)常見物品有雕像、藝術品、鐘、鈴、軸承、齒輪等，實亦有探討銅金屬腐蝕之必要性，爰本研究嘗試以臺灣實際調查數據建立適用臺灣地區的銅金屬腐蝕速率劑量-反應函數，提供推估臺灣銅金屬腐蝕環境分級參考。

本研究運用交通部運輸研究所(以下簡稱本所)進行臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查得到的數據，以迴歸分析法(Regression Analysis)建立銅金屬腐蝕速率與大氣腐蝕因子間的迴歸模式，亦即劑量-反應函數，此一模式除說明臺灣地區各項大氣腐蝕因子對於銅金屬腐蝕之影響外，亦並可據以由大氣腐蝕因子調查數據推估銅金屬腐蝕速率，進而預測其腐蝕環境等級。

## 二、研究方法

本研究採用迴歸分析法。迴歸分析法是研究社會科學最基本也是最重要的統計分析技術以及假說驗證方法，常用於研究多個變數關係，可依據統計數據配適一條合適的直線或曲線，找出解釋變數(或稱自變數、影響變數)與反應變數(或稱應變數、依變數)間的函數關係，據以說明變數間的關聯性。迴歸分析法在大氣金屬腐蝕與腐蝕因子關聯性分析上經常使用，例如：Mendoza and Corvo(1999)<sup>[7]</sup>、Legault and Pearson(1978)<sup>[8]</sup>、Pourbaix(1993)<sup>[9]</sup>、Morales et al.(2007)<sup>[10]</sup>、Su(1988)<sup>[11]</sup>、Tsai(1993)<sup>[12]</sup>等。

迴歸分析的步驟如圖 1 所示。以下分別說明各步驟的主要內容<sup>[13,14]</sup>：

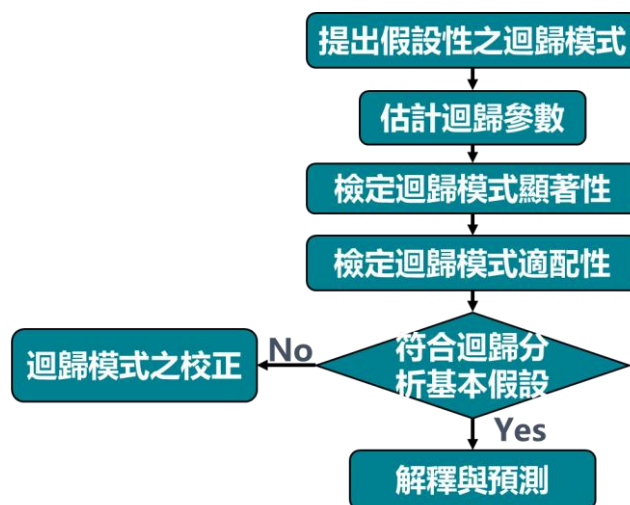


圖 1 迴歸分析步驟

## 1. 提出假設性迴歸模式

依照變數與變數之間的關係，針對問題選擇適當的反應變數與解釋變數，提出假設性之迴歸模式。

## 2. 估計迴歸參數

整理各變數的統計數據，據以配適一條線性迴歸模式，估計模式中的迴歸參數。

## 3. 檢定迴歸模式顯著性

顯著性檢定係在確定解釋變數與反應變數之間是否有顯著的線性關係，通常以 F 檢定值來檢定整個模式的顯著性(F 檢定：檢定迴歸模式中迴歸係數是否全部為 0 之統計假說檢定(Hypothesis Testing)方法)，以 t 檢定值來檢定常數項與各解釋變數參數值的顯著性(t 檢定：檢定迴歸模式中個別迴歸係數是否為 0 之統計假說檢定(Hypothesis Testing)方法)，並以 95%為判斷是否具顯著性的顯著水準。

## 4. 檢定迴歸模式適配性

適配性檢定係在確定模式具有說明能力，通常檢視迴歸模式的判定係數  $R^2$  (coefficient of determination ; R squared)或調整後判定係數  $R^2_{adj}$  (Adjusted R squared)。判定係數  $R^2$  表示模式可說明反應變數的變異比例，數值愈高，代表模式可說明反應變數的變異量愈大，模式適配性愈好。一般而言，判定係數達 0.5 以上就算可以接受。

在進行多元迴歸分析時，以檢視調整後判定係數  $R^2_{adj}$  較適當。因為判定係數  $R^2$  值會有隨著自變數增加，但模式解釋能力不增之高估現象，而調整後判定係數  $R^2_{adj}$  經過調整後，可避免此一問題。

## 5. 確認模式符合迴歸分析基本假設

在確認迴歸模式的顯著性與適配性之後，必須進一步確認迴歸模式是否符合迴歸分析之基本假設，包含常態性、均質性、獨立性和線性重合等基本假設。

(1)常態性：可利用常態機率圖(又稱 P-P 圖)做為判斷方法，當數據來自一個常態分配的母體時，常態機率圖上殘差值的累積機率，會約略呈現一條左下至右上的  $45^\circ$  直線。

(2)均質性：可由殘差與反應變數預測值之殘差圖(以下簡稱殘差圖)檢視。因為殘差是不可解釋的部分，如果模式符合均質性，則殘差圖應為沒有規則性的散佈，若殘差有一規則性，則應再將它抽離放在可解釋的部分。若殘差圖呈現非線性狀，表示模式中解釋變數與反應

變數間的關係可能是非線性關係，若殘差圖呈現外張喇叭狀或大小不一狀，表示殘差可能不具有相同的變異數，違反均質性。

(3)獨立性：亦透過檢視殘差圖來判斷，如果模式符合獨立性，殘差彼此獨立、無自我相關問題，殘差圖應是沒有規則性的散佈，若數據是時間序列資料，則可再進行 DW 檢定(Durbin-Watson test, 檢定迴歸模式中誤差項是否存在自我相關之統計方法)，以判斷誤差項是否具有自我相關(autocorrelation)的特性。

(4)線性重合：此問題可由變異數波動因數(variance inflation factor, VIF)檢視，通常 VIF 值大於 10 時，表示解釋變數間可能有高度線性重合的問題。

(5)離群值：在以殘差圖確認迴歸模式的基本假設時，亦會同時檢視離群值，避免模式受到極端值的影響而產生不妥當的迴歸模式，一般將 3 個標準差以上的數值視為離群值。

## 6. 校正迴歸模式

若模式不符合迴歸分析基本假設，則需進行迴歸模式之校正，重新檢視模式特性，進行模式轉換或調整。

## 7. 解釋與預測

若確認模式符合迴歸分析基本假設，則完成模式的建置工作，可進行後續的解釋與預測工作。

# 三、建立迴歸模式

本節運用本所臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查數據，依循迴歸分析步驟，建立大氣腐蝕因子與銅金屬腐蝕速率間的迴歸模式。

## 3.1 提出假設性之迴歸模式

### 1. 確定反應變數與解釋變數

建立迴歸模式的目的是在說明大氣腐蝕因子與銅金屬腐蝕速率間的關聯性，因此，模式中的反應變數為銅金屬腐蝕速率，解釋變數為大氣腐蝕因子。關於解釋變數的選擇，參考 CNS 13401<sup>[1]</sup>劑量-反應函數，以溫度(T)、相對濕度(RH)、氯鹽(Cl)與二氧化硫(SO<sub>2</sub>)等 4 項為大氣腐蝕因子，本研究選擇此 4 項因子為解釋變數，各變數說明如表 1。

表 1 迴歸模式變數說明

變數名稱	變數代號	單位	說明
銅金屬腐蝕速率	Cu <sub>corr</sub>	μ m/yr	反應變數
溫度	T	°C	解釋變數
相對濕度	RH	%	解釋變數
氯鹽沉積速率	Cl	mg/(m <sup>2</sup> *day)	解釋變數
二氧化硫沉積速率	SO <sub>2</sub>	mg/(m <sup>2</sup> *day)	解釋變數

## 2. 資料說明

為探討臺灣地區銅金屬腐蝕速率與 4 項大氣腐蝕因子間的關聯性，將以本所 112 年 90 個大氣腐蝕試驗站年資料<sup>[15]</sup>為分析基礎，試驗點位置如圖 2 所示。90 個試驗站年資料共計 90 筆數據，扣除 6 處試驗站施工或試樣遺失而無數據，以及陽明山硫磺區二氧化硫沉積速率相對應於一般地區過高，視為離群值不納入分析外，實際應用 83 筆數據。現地調查數據各試驗站均有銅金屬腐蝕速率，部分試驗站因無調查氯鹽沉積速率或二氧化硫沉積速率，故分析時引用鄰近試驗站數據；另各試驗站溫度、相對濕度，則引用鄰近中央氣象署氣象站資料。

## 3. 模式假設

假設在真實情況下臺灣地區銅金屬腐蝕速率，主要受到溫度(T)、相對濕度(RH)、氯鹽(Cl)、二氧化硫(SO<sub>2</sub>)等 4 項大氣腐蝕因子影響；銅金屬腐蝕速率與 4 項大氣腐蝕因子間之關係為線性關係模式；且此一關係模式可用本所現地調查數據進行推估。

令臺灣地區銅金屬腐蝕速率與 4 項大氣腐蝕因子溫度、相對濕度、氯鹽、二氧化硫之迴歸模式為：

$$Cu_{corr} = b_0 + b_1T + b_2RH + b_3Cl + b_4SO_2 + e \quad (1)$$

式中  $b_0$  為常數項， $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  為各大氣腐蝕劣化因子的迴歸參數， $e$  是誤差項。

### 3.2 配適迴歸模式

#### 1. 估計迴歸參數

以 112 年全臺各試驗站的年資料 83 筆，應用統計軟體 SPSS 29 進行迴歸分析、估計迴歸參數。配適得到線性迴歸模式如下：

$$Cu_{corr} = -32.073 + 0.616T + 0.261RH + 0.149Cl + 0.014SO_2 \quad (2)$$

線性迴歸模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 2。



資料來源：2023 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報<sup>[15]</sup>。

圖 2 試驗點位置分佈圖

表 2 線性迴歸模式

(a)結果摘要表

模式	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
線性模式	0.695	0.484	0.457

註：R 為相關係數(correlation coefficient)；R<sup>2</sup> 為判定係數(coefficient of determination)；R<sup>2</sup><sub>adj</sub> 為調整後判定係數(adjusted R squared)。

(b)變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	540.403	4	135.101	18.267	0.001*
殘差	576.873	78	7.396	-	-
總計	1117.276	82	-	-	-

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(c)參數估計表

模式	b	標準誤	t	顯著性(P)	VIF
(常數)	-32.073	10.028	-3.198	0.002*	-
T	0.616	0.163	3.770	0.001*	1.420
RH	0.261	0.093	2.797	0.006*	1.579
Cl	0.149	0.026	5.682	0.001*	1.150
SO <sub>2</sub>	0.014	0.007	1.877	0.064	1.024

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

## 2. 檢定模式顯著性

由模式的 F 檢定值=18.267( $P=0.001$ ) 達 95%顯著水準，可知模式顯著；檢視各參數的 t 檢定值，由常數項  $b_0$ 、解釋變數 T、RH、Cl 參數  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$  的 t 檢定值達 95%顯著水準，解釋變數 SO<sub>2</sub> 參數  $b_4$  的 t 檢定值未達 95%顯著水準(t 檢定未通過)，可知常數項  $b_0$  不為 0，且解釋變數 T、RH、Cl 的影響顯著，但解釋變數 SO<sub>2</sub> 的參數  $b_4$  可能為 0，解釋變數 SO<sub>2</sub> 的影響不顯著。

因解釋變數 SO<sub>2</sub> 的參數  $b_4$  的 t 檢定未通過，在此，將解釋變數減為 T、RH、Cl 等 3 項，以同樣 83 筆數據配適得到 3 變數線性模式如下：

$$Cu_{\text{corr}} = -33.793 + 0.652T + 0.279RH + 0.152Cl \quad (3)$$

3 變數線性迴歸模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 3。由 3 變數線性模式的 F 值=22.465( $P=0.001$ )，常數項與 3 解釋變數參數的 t 值均達 95%顯著水準，可知模式顯著、各解釋變數的影響亦顯著。

表 3 3 變數線性迴歸模式

(a)結果摘要表

模式	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
3 變數線性迴歸模式	0.678	0.460	0.440

註：R 為相關係數(correlation coefficient)；R<sup>2</sup> 為判定係數(coefficient of determination)；R<sup>2</sup><sub>adj</sub> 為調整後判定係數(adjusted R squared)。

(b)變異數分析表

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	514.350	3	171.450	22.465	0.001*
殘差	602.925	79	7.632	-	-
總計	1117.276	82	-	-	-

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(c)參數估計表

模式	b	標準誤	t	顯著性(P)	VIF
常數	-33.793	10.144	-3.331	0.001*	-
T	0.652	0.165	3.957	0.001*	1.400
RH	0.279	0.094	2.957	0.004*	1.562
Cl	0.152	0.027	5.695	0.001*	1.147

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

### 3. 檢定模式適配性

3 變數線性模式的  $R^2_{adj} = 0.440$ ，表示模式中解釋變數能說明銅金屬腐蝕速率變異的 44.0%，基於本研究試驗站是設置在戶外，較易受地區環境不可控制因素影響，一般而言， $R^2_{adj}$  達到 0.5 即可接受，惟此一  $R^2_{adj}$  值未達 50% 以上，模式解釋能力略有不足。

### 4. 確認模式的基本假設

進一步確認迴歸模式是否符合迴歸分析基本假設，包含常態性、均質性、獨立性和線性重合等基本假設，並一併檢視離群值。

(1)常態性：由 3 變數線性模式的常態機率圖(圖 3)上各點分佈情形來看，圖形略有偏離直線，判斷模式可能違反常態分配之假設。

(2)均質性：由 3 變數線性模式的殘差圖(圖 4)上各點分佈情形來看，殘差圖無顯示特定圖型，判斷模式可能無違反變異數相同之均質性假設。

(3)獨立性：由模式的殘差圖(圖 4)上各點分佈情形來看，殘差值均隨機分布在 0 的中心線周圍，無明顯規律性，判斷殘差可能彼此獨立，無自我相關問題，另基於資料非時間序列資料，不再進行 DW 檢定。

(4)線性重合：由模式中各解釋變數的 VIF 值均小於 10，判斷解釋變數間無高度線性重合問題。

(5)離群值：模式有 2 個反應變數預測值在 3 個標準差之外。

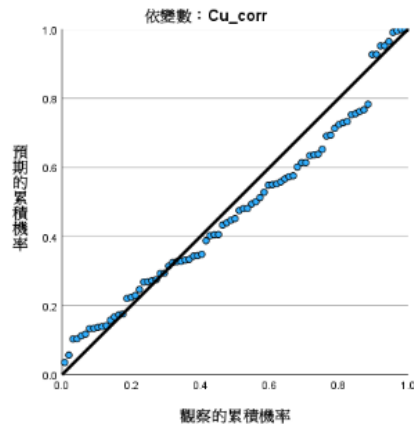


圖 3 3 變數線性迴歸模式的常態機率圖

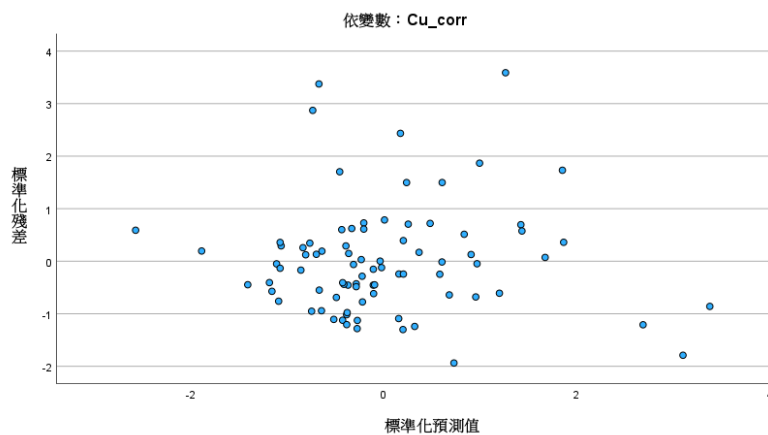


圖 4 3 變數線性迴歸模式的殘差圖

## 5. 綜合判斷

綜而言之，3 變數線性模式的顯著性檢定通過，但模式適配性略低，且模式可能均違反迴歸分析常態性的基本假設。依此分析結果判斷配適的線性迴歸模式可能不太妥適，有需要進行模式校正，重新配適一個新的模式。

### 3.3 校正迴歸模式

經檢定模式適配性與檢視殘差圖，判斷建立的 3 變數線性模式適配性略低且可能違反常態性基本假設，在此嘗試進行模式轉換。

#### 1. 提出對數線性模式

考慮到大氣金屬腐蝕是一種水膜下的電化學反應，空氣中水分子在金屬表面凝聚生成水膜，與空氣中氧氣通過水膜進入金屬表面，是產生金屬腐蝕的基本條件；溫度與相對濕度可反應在金屬表面上產生水膜而發生腐蝕的時間，而氯鹽、二氧化硫等環境因子是在水膜產生後加速金屬腐蝕的因子。

並考慮到 CNS 13401 之建議，由環境條件與暴露情境，計算出適用於銅金屬腐蝕速率的劑量-反應函數為：

$$r_{\text{corr}} = 0.0053P_d^{0.26} \exp(0.059RH + f_{\text{Cu}}) + 0.01025S_d^{0.27} \exp(0.036RH + 0.049T)$$

$$f_{\text{Cu}} = 0.126(T-10) \text{ 當 } T \leq 10^\circ\text{C}; \text{ 除此之外, } f_{\text{Cu}} = -0.008(T-10) \quad (4)$$

式中  $r_{\text{corr}}$  是銅金屬腐蝕速率； $P_d$  是二氧化硫沉積速率； $S_d$  是氯鹽沉積速率； $RH$  是相對濕度； $T$  是溫度。

此一公式顯示：在溫度與相對濕度為定值時，銅金屬腐蝕速率與氯鹽、二氧化硫沉積速率間的關係是線性關係；在氯鹽、二氧化硫沉積速率為定值時，銅金屬腐蝕速率與溫度、相對濕度間的關係是指數關係。

參考大氣金屬腐蝕理論與上述劑量-反應函數所顯示銅金屬腐蝕速率與溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率之關係，嘗試將腐蝕速率取對數值為反應變數，以氯鹽、二氧化硫等 2 項腐蝕因子各取對數值為解釋變數，加上溫度、相對濕度 2 項既有解釋變數，建立一個新的對數線性迴歸模式，轉換後的模式如下：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = b_0 + b_1T + b_2RH + b_3\ln(\text{Cl}) + b_4\ln(\text{SO}_2) + e \quad (5)$$

式中  $b_0$  為常數項， $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  為各解釋變數的迴歸參數， $e$  是誤差項。

估計迴歸參數後，配適得到對數線性模式如下：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(\text{Cl}) + 0.267\ln(\text{SO}_2) \quad (6)$$

對數線性模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 4。

**表 4 對數線性模式**

**(a)結果摘要表**

模式	R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>
對數線性模式	0.797	0.635	0.616

註：R 為相關係數(correlation coefficient)；R<sup>2</sup> 為判定係數(coefficient of determination)；R<sup>2</sup><sub>adj</sub> 為調整後判定係數(adjusted R squared)。

**(b)變異數分析表**

模式	平方和	自由度	平均平方和	F	顯著性(P)
迴歸	35.612	4	8.903	33.930	<0.001*
殘差	20.467	78	0.262	-	-
總計	56.079	82	-	-	-

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

(c)參數估計表

模式	b	標準誤	t	顯著性(P)	VIF
常數	-6.085	1.959	-3.107	0.003*	-
T	0.116	0.034	3.391	0.001*	1.741
RH	0.042	0.018	2.373	0.020*	1.636
ln(Cl)	0.333	0.044	7.495	<0.001*	1.220
ln(SO <sub>2</sub> )	0.267	0.087	3.069	0.003*	1.134

註：符號「\*」表示顯著性  $P \leq 0.05$ ，達統計上 95%顯著水準。

## 2. 檢定模式的顯著性、適配性

由模式的 F 檢定值=33.930 ( $P < 0.001$ )，可知模式顯著；檢視各參數的 t 檢定值，由常數項  $b_0$ 、解釋變數 T、RH、ln(Cl)、ln(SO<sub>2</sub>)參數  $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  的 t 檢定值均達 95%顯著水準，可知各解釋變數的影響均顯著，且常數項不為零。

## 3. 檢定模式的適配性

由模式的  $R^2_{adj} = 0.616$ ，表示模式中解釋變數能說明銅金屬腐蝕速率變異的 61.6%，基於本研究試驗站是設置在戶外，較易受地區環境不可控制因素影響，因此，此一模式的  $R^2_{adj}$  值達 50%以上，模式解釋能力尚可接受。

## 4. 確認模式的基本假設

接下來確認常態性、均質性、獨立性和線性重合等迴歸分析之基本假設。在常態性方面，由常態機率圖(圖 5(a))上各點分佈情形來看，圖形近似直線，推論模式無嚴重違反常態分配之假設；在均質性方面，由殘差圖(圖 5(b))上各點分佈情形來看，殘差隨機分布無明顯圖形，推論模式無嚴重違反變異數相同之假設；在獨立性方面，由殘差圖(圖 5(b))上各點分佈情形來看，殘差隨機分布在 0 的中心線周圍，無明顯規律性，推論殘差可能彼此獨立，無自我相關問題；在線性重合方面，由各解釋變數的 VIF 值 $<10$ ，顯示解釋變數間無高度線性重合問題。

## 5. 綜合判斷

綜而言之，對數線性模式的顯著性檢定通過，適配性達可接受範圍，並確認模式沒有嚴重違反迴歸分析基本假設的問題。

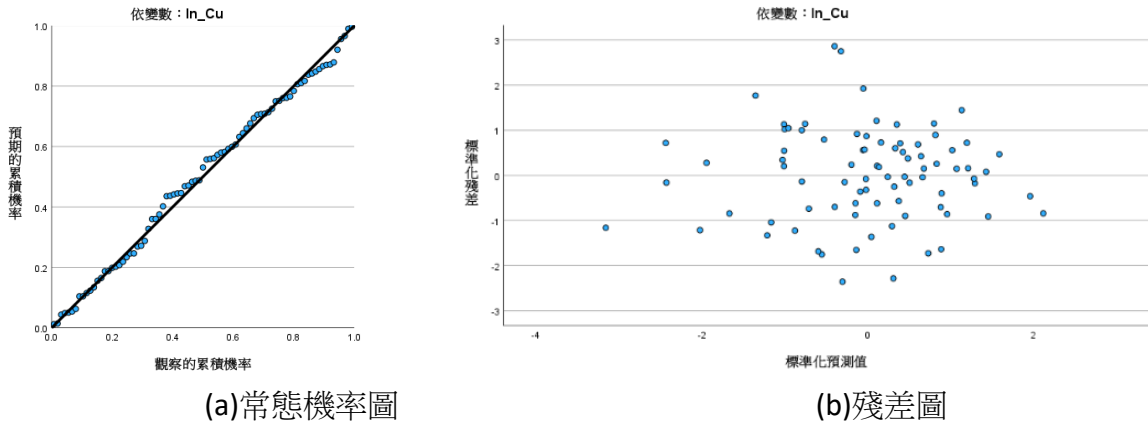


圖 5 對數線性模式的常態機率圖與殘差圖

### 3.4 迴歸分析結果說明與討論

#### 1. 結果說明

迴歸分析結果顯示，在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下，銅金屬腐蝕速率主要受到溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 4 項大氣腐蝕因子的影響。銅金屬腐蝕速率與 4 項大氣腐蝕因子間為對數線性關係，其關係模式如下：

$$\ln(\text{Cu}_{\text{corr}}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(\text{Cl}) + 0.267\ln(\text{SO}_2) \quad (7)$$

依此關係模式，4 項腐蝕因子的變動可說明銅金屬腐蝕速率變動的 61.6%。

在此模式中，4 項大氣腐蝕因子均對銅金屬腐蝕速率有顯著影響，各項大氣腐蝕因子的相對重要性，可以用各大氣腐蝕因子在迴歸模式中的標準化迴歸係數大小來判斷(Ryan, 2009<sup>[16]</sup>; Tabachnick and Fidell, 2007<sup>[17]</sup>)。由模式中各解釋變數的標準化迴歸係數值(如表 5)，可知大氣腐蝕因子中以氯鹽沉積速率的相對重要性最高(0.566)，其次是溫度(0.306)，二氧化硫沉積速率(0.224)與相對濕度(0.208)等 2 項大氣腐蝕因子的相對重要性較低。

表 5 對數線性模式之標準化迴歸係數

解釋變數	標準化迴歸係數
T	0.306
RH	0.208
ln(Cl)	0.566
ln(SO <sub>2</sub> )	0.224

#### 2. 討論

本研究以迴歸分析法建立銅金屬腐蝕速率與大氣腐蝕因子間的關聯性模式，分析方法除建立線性迴歸模式外，亦可考慮建立非線性迴歸或機器學習模式，另可應用多變量分析技術，評估大氣腐蝕因子間的交互作用。

此外，本研究在構建迴歸模式時，係依據 CNS 13401 選擇以溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 4 項大氣腐蝕因子為解釋變數，後續可考慮納入風速、風向、降雨、日照等氣象因子，探討降雨沖刷效應對氯鹽、二氧化硫累積量及季風氣流對腐蝕的影響。

### 3.5 大氣腐蝕環境分級預測

依據完成構建之迴歸模式，可由大氣腐蝕因子溫度、相對濕度、氯鹽與二氧化硫沉積速率，預測銅金屬腐蝕速率( $Cu_{corr}$ )，再依腐蝕環境分級標準，推估銅金屬大氣腐蝕環境等級。

令某一地點的溫度、相對濕度、氯鹽及二氧化硫沉積速率分別是  $T_h$ 、 $RH_h$ 、 $Cl_h$  與  $SO_{2h}$  時，若令  $Cu_{corr-h1}$  表示該地點銅金屬腐蝕速率預測值，且以  $\ln(Cu_{corr-h1})$  表示該值的對數值，則運用 3.4 節構建的迴歸模式(式 7)，可計算出銅金屬腐蝕速率的點預測值，計算式為：

$$\ln(Cu_{corr-h1}) = -6.085 + 0.116T_h + 0.042RH_h + 0.333\ln(Cl_h) + 0.267\ln(SO_{2h}) \quad (8)$$

考慮到預測的不確定性，本研究參考 CNS 16238<sup>[18]</sup> (對應國際標準組織 ISO 9224<sup>[19]</sup>) 提出一種保守預測法，即將預測值加上 2 倍標準估計誤差值，以達到 95% 信賴區間，若令  $Cu_{corr-h2}$  表示該地點銅金屬腐蝕速率之保守預測值，由模式的標準估計誤差值為 0.51224717，則  $Cu_{corr-h2}$  的計算式為：

$$\ln(Cu_{corr-h2}) = -5.06051 + 0.116T_h + 0.042RH_h + 0.333\ln(Cl_h) + 0.267\ln(SO_{2h}) \quad (9)$$

在此，以 113 年試驗站的年資料<sup>[20]</sup>(扣除離群值與無數據試驗站後為 86 筆)進行預測正確率測試；亦即將 113 年 86 筆大氣腐蝕因子數據代入迴歸模式，進行銅金屬腐蝕速率預測，分別計算 86 個試驗站的  $Cu_{corr-h1}$  與  $Cu_{corr-h2}$  等 2 項預測值，進而查表得到各項預測值的腐蝕環境分級，然後，與 113 年各試驗站以金屬試片測得的銅金屬腐蝕環境分級相比較，確認預測等級是否等於或高於實際等級，據以計算出預測正確率。計算結果顯示： $Cu_{corr-h1}$  的預測正確率為 30.2%， $Cu_{corr-h2}$  的預測正確率為 89.5%；其中， $Cu_{corr-h2}$  預測正確率近 90% 的水準，應可提供做為臺灣銅金屬腐蝕環境分級的一種推估方式；而  $Cu_{corr-h1}$  預測正確率偏低，可能是模式的解釋能力較低所致，後續將再重新檢討影響因子並優化模式，據以提高模式的解釋能力。

## 四、結論

臺灣屬於高腐蝕環境，本研究利用臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查數據及採用迴歸分析法，建立適用臺灣地區之銅金屬劑量-反應函數(腐蝕速率與大氣腐蝕因子間之迴歸模式)。

迴歸分析以銅金屬腐蝕速率為反應變數，參考 CNS 13401 中的劑量-反應函數，以溫度、相對濕度、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率等 4 項大氣腐蝕因子為解釋變數；並採用本所 112 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查年資料為分析基礎，依循統計推論應遵循之程序，完成迴歸模式顯著性、配適度檢定及基本假設符合，以確立分析得到的迴歸模式為具意義之模式。然後依模式提出 2 項銅金屬腐蝕速率預測計算式( $Cu_{corr-h1}$  與  $Cu_{corr-h2}$ )，可據以進行腐蝕速率預測與腐蝕環境分級。

分析結果顯示：在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下溫度(T)、相對濕度(RH)、氯鹽沉積速率(CI)、二氧化硫沉積速率(SO<sub>2</sub>)等 4 項大氣腐蝕因子是影響銅金屬腐蝕速率的顯著影響因子，銅金屬腐蝕速率與 4 項大氣腐蝕因子間之關係是對數線性關係，關係模式為： $\ln(Cu_{corr}) = -6.085 + 0.116T + 0.042RH + 0.333\ln(CI) + 0.267\ln(SO_2)$ ；模式顯示此 4 項大氣腐蝕因子的變動可說明銅金屬腐蝕速率變動的 61.6%，其對銅金屬腐蝕速率影響之相對重要性以氯鹽沉積速率最高，溫度次之。依模式提出 2 項銅金屬腐蝕速率計算式( $Cu_{corr-h1}$  與  $Cu_{corr-h2}$ )，並以 113 年大氣腐蝕因子調查數據預測銅金屬腐蝕速率並進行腐蝕環境分級，確認  $Cu_{corr-h2}$  計算式的預測正確率近 90%，可提供推估臺灣銅金屬腐蝕環境分級參考。

## 參考文獻

1. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 13401 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-分級、測定與評估，2019。
2. ISO 9223/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation.
3. Chou S.F., C.J. Wang, J.S. Luo, Y.F. Chiu, K.C. Chen, J.L. Ko, A regression model for predicting the corrosion rate of Zinc in Taiwan Journal of Chinese Corrosion Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 219-230, 2011.
4. Lo C. M., L.H. Tsai, M.D. Lin, Correlation between carbon steel corrosion and Atmospheric factors in Taiwan, in: Proceedings of the 19th International Corrosion Congress, Jeju Korea, 2014.
5. 謝幼屏、蔡立宏、賴瑞應、羅建明、賴俊呈，臺灣地區碳鋼金屬腐蝕速率與腐蝕因子之關聯性分析，港灣季刊，第 128 期，45-59 頁，2024。
6. 謝幼屏、蔡立宏、賴瑞應、賴俊呈，臺灣地區鋅金屬大氣腐蝕速率與腐蝕因子之關聯性分析，防蝕工程，第 39 卷，第 3 期，32-42 頁，2025。
7. Mendoza, A.R., & Corvo, F. Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel. Corrosion Science, Vol. 41, pp.75-86, 1999.
8. Legault R.A., and V.P. Pearson, in: Atmospheric factors affecting the corrosion of engineering metals ASTM STO, 646, ASTM, Philadelphia, 1978. Engineering metals ASTM STO, 646, ASTM, Philadelphia, 1978.
9. Pourbaix M., The linear bilogarithmic law for atmospheric corrosion in atmospheric corrosion, W.H. Ailor, Ed., John Wiley & Sons, 1982.

10. Morales J., F. Diaz, J. Hernandez-Borges, S. Gonzalez and V. Cano, Corrosion Science, pp.49526-49541, 2007.
11. Su F.R., Investigate the corrosion relationship of atmosphere and metal, National Taiwan University Department of Environmental Engineering Master's Thesis, 1988.
12. Tsai K.J., Electricity atmospheric corrosion testing and related materials database set up summary report, Industrial Technology Research Institute, Taiwan Power Research Institute, 1993.
13. Douglas C., Montgomery, and Elizabeth A. Peck, Introduction to Linear Regression, Second Edition, John Wiley & Sons, Publishers, 1992.
14. 溫福星，社會科學研究中使用迴歸分析的五個重要概念，管理學報，30 卷，2 期，169-190 頁，2013。
15. 謝幼屏、賴瑞應、羅建明、蔡立宏，2023 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報，交通部運輸研究所，2024。
16. Ryan, T. P., Modern Regression Methods, New York, NY: Wiley-Interscience, 2009.
17. Tabachnick, B., and L. Fidell, Using Multivariate Statistics (5th ed.), Boston, MA: Pearson/Allyn & Bacon, 2007.
18. 經濟部標準檢驗局，中華民國國家標準 CNS 16238：2024 金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性-腐蝕性級別的指引值，2024。
19. ISO 9224/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres –Guiding values for the corrosivity categories.
20. 謝幼屏、賴瑞應、鄭登鍵、蔡立宏，2024 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查研究資料年報，交通部運輸研究所，2025。