

# 臺灣地區碳鋼金屬腐蝕速率與腐蝕因子之 關聯性分析

謝幼屏<sup>1</sup> 蔡立宏<sup>2</sup> 賴瑞應<sup>3</sup> 羅建明<sup>4</sup> 賴俊呈<sup>5</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

<sup>4</sup> 交通部運輸研究所運輸技術研究中心前副研究員

<sup>5</sup> 交通部運輸研究所運輸技術研究中心助理研究員

## 摘要

臺灣屬於高腐蝕環境，為評估臺灣地區大氣腐蝕劣化因子對於碳鋼腐蝕速率的影響，本文採用臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查之數據，以迴歸分析法建立碳鋼腐蝕速率與大氣腐蝕劣化因子間的迴歸模式，並依據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，確立分析結果為具意義之模式。

研究結果顯示：在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下，濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率、風速、風向等 5 項大氣腐蝕劣化因子是影響碳鋼腐蝕速率的顯著影響因子，兩者間之關係為對數線性關係，關係模式為： $\ln(\text{Fe}_{\text{corr}}) = 2.798 + 0.012\text{TOW} + 0.233 \ln(\text{Cl}) + 0.240 \ln(\text{SO}_2) + 0.254 \ln(\text{W}_S) - 0.116\text{W}_d$ ；模式顯示此 5 項大氣腐蝕劣化因子的變動可說明碳鋼腐蝕速率變動的 57.6%，其對碳鋼腐蝕速率影響之相對重要性以氯鹽沉積速率最高，二氧化硫沉積速率次之，第三是濕潤時間百分比，風速與風向則較低。

## 一、前言

臺灣為一海島，地處熱帶、亞熱帶地區，高溫、高濕與高鹽份的環境，造成金屬在大氣中容易腐蝕劣化。金屬材料的大氣腐蝕機制主要是受大氣中所含水分、氧氣、和腐蝕性物質聯合作用而產生的破壞；因此，為瞭解臺灣地區大氣腐蝕狀況，交通部運輸研究所(以下簡稱本所)自 96 年起進行臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查，研究成果提供各界做為辦理金屬構件設計與維護管理之參考。

調查內容包括：(1)依據中華民國國家標準(以下簡稱 CNS)，就金屬及合金之大氣腐蝕性污染測定方法，進行臺灣全島及澎湖、金門與馬祖等地區之大氣腐蝕劣化因子調查，(2)依據 CNS 製作碳鋼、鋅、銅、鋁標準試樣，並進行現地暴露試驗與腐蝕速率量測，(3)彙整調查試驗結果，進行大氣腐蝕環境分類，並發行年報與建立網站，提供外界查詢及應用。

基於全球各地氣候條件受緯度、地形、距離海洋遠近及當地或附近腐蝕污染物質排放等因素影響，大氣腐蝕具有強烈地域性。臺灣具有高溫、高濕與高鹽份的環境，屬於高腐蝕環境，為評估臺灣地區大氣腐蝕劣化因子對於碳鋼腐蝕的影響，本文運用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)建立大氣腐蝕劣化因子與碳鋼腐蝕速率間的迴歸模式，據以說明在臺灣目前氣候條件與污染情境下，各項大氣腐蝕劣化因子對於碳鋼腐蝕之影響。

## 二、研究方法

研究方法採用迴歸分析法，迴歸分析是社會科學研究方法中最基本也是最重要的統計分析技術以及假說驗證方法，是常用來研究多個變數關係的一種方法，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>[1]</sup>、Legault and Pearson(1978)<sup>[2]</sup>、Pourbaix(1993)<sup>[3]</sup>、Morales et al.(2007)<sup>[4]</sup>、Su(1988)<sup>[5]</sup>、Tsai(1993)<sup>[6]</sup>、Chou et al.(2011)<sup>[7]</sup>、Lo et al.(2014)<sup>[8]</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>[9-10]</sup>：

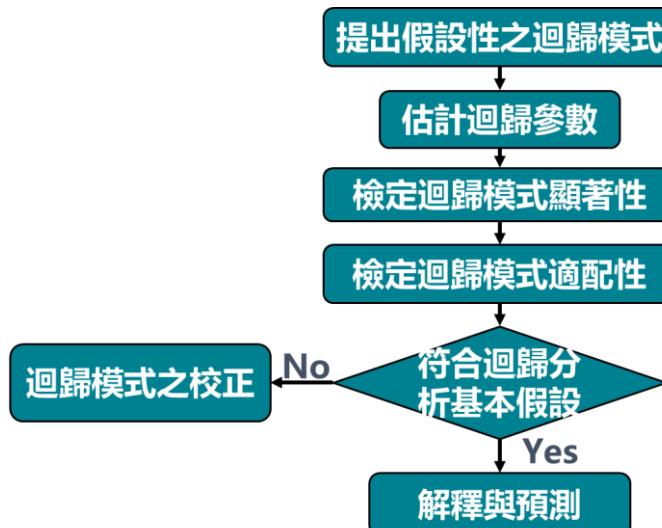


圖 1 回歸分析步驟

### 1. 提出假設性之迴歸模式

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，提出假設性的迴歸模式。

### 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，以 t 檢定值來檢定常數項與各解釋變數參數值的顯著性，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，迴歸模式的  $R^2_{adj}$ (Adjusted R squared, 調整後判定係數)表示模式說明反應變數的變異比例， $R^2_{adj}$  值愈高代表模式可說明反應變數的變異量愈大。

### 5. 確認模式符合迴歸分析的基本假設

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)作為判斷方法，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，則殘差圖應是沒有規則性的散佈，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，以判斷誤差項是否具有自我序列相關(autocorrelation)的特性。
- (4)線性重合：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，一般視 3 個標準差以上的數值為離群值。

### 6. 校正迴歸模式

若確認模式符合迴歸分析的基本假設，則完成模式的建置工作，可進行後續的解釋與預測工作，若不符合，則需進行迴歸模式之校正。

### 三、建立迴歸模式

本節運用本所進行臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查得到的數據，依循迴歸分析步驟，建立大氣腐蝕劣化因子與碳鋼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在說明大氣腐蝕劣化因子與碳鋼腐蝕速率間的關聯性，因此，模式中的反應變數為碳鋼腐蝕速率，解釋變數為大氣腐蝕劣化因子。

關於解釋變數的選擇，參考 CNS13401(IOS 9223)<sup>[11-12]</sup>規範中以溫度—濕度複合因子(濕潤時間百分比)、二氧化硫與氯鹽 3 項因子為金屬在大氣中腐蝕的主要腐蝕因子，爰本文選擇濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率 3 項因子為解釋變數；另考量臺灣位處季風地帶，本所前期研究<sup>[13]</sup>顯示，冬天東北季風期之金屬腐蝕速率較夏季西南季風時高，因此，加入風速、風向 2 項解釋變數以評估季風對腐蝕的影響。

綜上，本文提出之假設性迴歸模式中的反應變數為碳鋼腐蝕速率，解釋變數 5 項，分別是濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率、風速、風向，各變數說明如表 1。

表 1 回歸模式變數說明

變數名稱	變數代號	單位	說明
碳鋼腐蝕速率	$Fe_{corr}$	$\mu m/yr$	反應變數
濕潤時間百分比	TOW	%	解釋變數
氯鹽沉積速率	Cl	$mg/m^2/day$	解釋變數
二氧化硫沉積速率	SO <sub>2</sub>	$mg/m^2/day$	解釋變數
風速	W <sub>s</sub>	m/s	解釋變數
風向	W <sub>d</sub>	0：東北風 1：西南風	解釋變數

註：風向資料原為 0~360 度的數值資料，為反應臺灣地區主要受到東北季風與西南季風影響，將風向資料簡化為東北風、西南風 2 項，改以指標變數(indicator variable)表示，0 表示東北風，1 表示西南風。

##### 2. 資料說明

為探討目前大氣環境下臺灣地區碳鋼腐蝕速率與 5 項大氣腐蝕劣化因子間的關聯性，將以本所進行臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查之 111 年 89 個大氣腐蝕試驗站季資料<sup>[14]</sup>為分析基礎，試驗點位置如圖 2 所示。89 個試驗站的 4 季資料共計有 356 筆數據，扣除試樣遺失的 6 筆數據，共計有 350 筆數據。各試驗站均有碳鋼腐蝕速率的現地試驗資料；部分試驗站無調查氯鹽沉積速率或二氧化硫沉積速率，在分析時引用鄰近試驗站的調查數據；各試驗站的濕潤時間百分比、風速、風向 3 項資料引用中央氣象署的鄰近氣象站資料，取各季平均值。

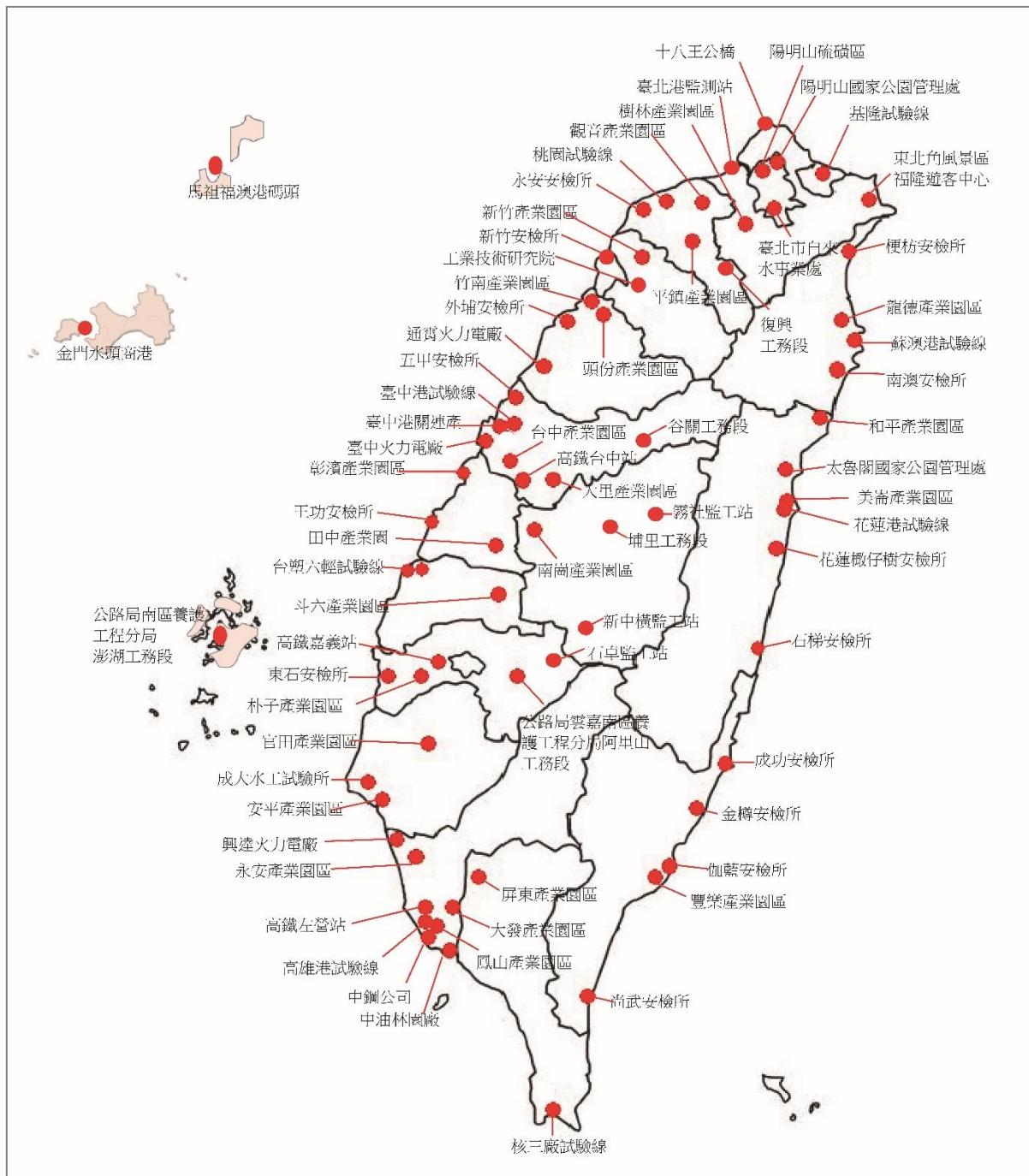


圖 2 試驗點位置分佈圖

### 3. 模式假設

假設在真實情況下臺灣地區碳鋼腐蝕速率，主要受到濕潤度、氯鹽、二氧化硫、風速、風向等 5 項大氣腐蝕劣化因子影響；碳鋼腐蝕速率與 5 項大氣腐蝕劣化因子之間的關係是線性關係模式；且此一關係模式可以用本所在臺灣地區各試驗站的數據來推估。

令臺灣地區碳鋼腐蝕速率與 5 項大氣腐蝕劣化因子濕潤度、氯鹽、二氧化硫、風速、風向之迴歸模式為：

$$Fe_{corr} = b_0 + b_1 TOW + b_2 Cl + b_3 SO_2 + b_4 W_s + b_5 W_d + e \quad (1)$$

式中  $b_0$  為常數項， $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_5$  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 111 年 89 個試驗站的季資料 350 筆，應用統計軟體 SPSS 22.0 進行迴歸分析、估計迴歸參數。配適得到線性迴歸模式如下：

$$Fe_{corr} = -32.551 + 1.761 TOW + 0.822 Cl + 0.524 SO_2 + 19.672 W_s - 21.649 W_d \quad (2)$$

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。

**表 2 線性迴歸模式**

(a)結果摘要表

模式	R	$R^2$	$R^2_{adj}$
線性模式	0.731	0.535	0.528

註：R 為相關係數(correlation coefficient)； $R^2$  為判定係數(coefficient of determination)； $R^2_{adj}$  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	2411100.340	5	482220.068	79.171	0.000*
殘差	2095256.972	344	6090.863	-	-
總計	4506357.312	349	-	-	-

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)	-32.551	18.521	-1.758	0.080	-
TOW	1.761	0.264	6.676	0.000*	1.071
Cl	0.822	0.085	9.630	0.000*	1.082
SO <sub>2</sub>	0.524	0.043	12.224	0.000*	1.064
W <sub>s</sub>	19.672	3.806	5.169	0.000*	1.083
W <sub>d</sub>	-21.649	8.753	-2.473	0.014*	1.037

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=79.171(P=0.000) 達 95%顯著水準，可知模式顯著；檢視各參數的 t 檢定值，資料顯示除常數項的 t 檢定值未達 95%顯著水準，其他各解釋變數參數的 t 檢定值均達 95%顯著水準，可知各解釋變數的影響亦均顯著。

常數項的 t 檢定未通過，顯示常數項  $b_0$  可能為 0。因此，另配適一個無常數項線性模式。以同樣 350 筆數據配適得到無常數項線性模式如下：

$$Fe_{corr} = 1.388TOW + 0.826 Cl + 0.531SO_2 + 16.063W_s - 26.741W_d \quad (3)$$

無常數項線性模式的摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 3。

**表 3 無常數項線性迴歸模式**

(a)結果摘要表

模式	R	$R^2$	$R^2_{adj}$
無常數項線性模式	0.909	0.826	0.824

註：R 為相關係數(correlation coefficient)； $R^2$  為判定係數(coefficient of determination)； $R^2_{adj}$  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	10066737.940	5	2013347.588	328.563	0.000*
殘差	2114071.087	345	6127.742	-	-
總計	12180809.027	350	-	-	-

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
TOW	1.388	0.157	8.822	0.000*	4.570
Cl	0.826	0.086	9.644	0.000*	1.632
SO <sub>2</sub>	0.531	0.043	12.430	0.000*	1.128
W <sub>s</sub>	16.063	3.214	4.998	0.000*	4.446
W <sub>d</sub>	-26.741	8.285	-3.228	0.001*	1.490

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

無常數項線性模式的 F 值=328.563 (P=0.000)，各解釋變數參數的 t 值均達 95%顯著水準，可知模式顯著、各解釋變數的影響亦均顯著。

### 3. 檢定模式適配性

線性模式的  $R^2_{adj} = 0.528$ ，表示模式中解釋變數能說明碳鋼腐蝕速率變異的 52.8%，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  $R^2_{adj}$  值達 50%，應屬可接受範圍。

另外，無常數項線性模式的  $R^2_{adj} = 0.824$ ，表示模式中解釋變數能說明碳鋼腐蝕速率變異的 82.4%，顯示無常數項線性模式的適配性高於線性模式( $R^2_{adj} = 0.528$ )，因此，比較 2 模式的適配性，以無常數項線性模式較佳。

### 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，並一併檢視離群值。

常態性：由線性模式與無常數項線性模式的常態機率圖(圖 3)上各點分佈情形來看，2 圖形均略有偏離直線，判斷模式可能違反常態分配之假設。

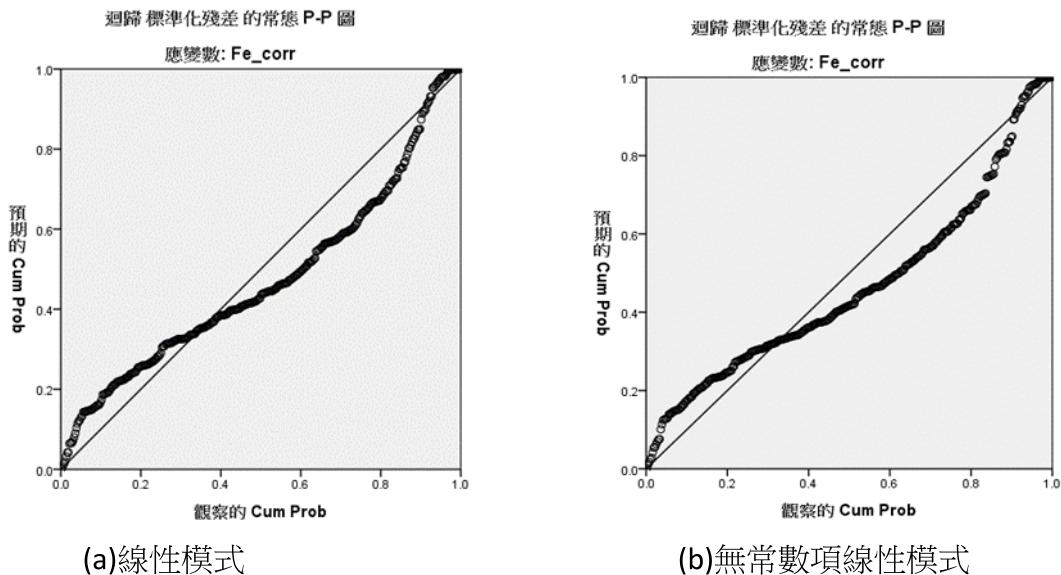


圖 3 線性模式與無常數項線性模式的常態機率圖

均質性：由線性模式與無常數項線性模式的殘差圖(圖 4)上各點分佈情形來看，2 者殘差圖均略有外張喇叭狀，判斷 2 模式可能違反變異數相同之均質性假設。

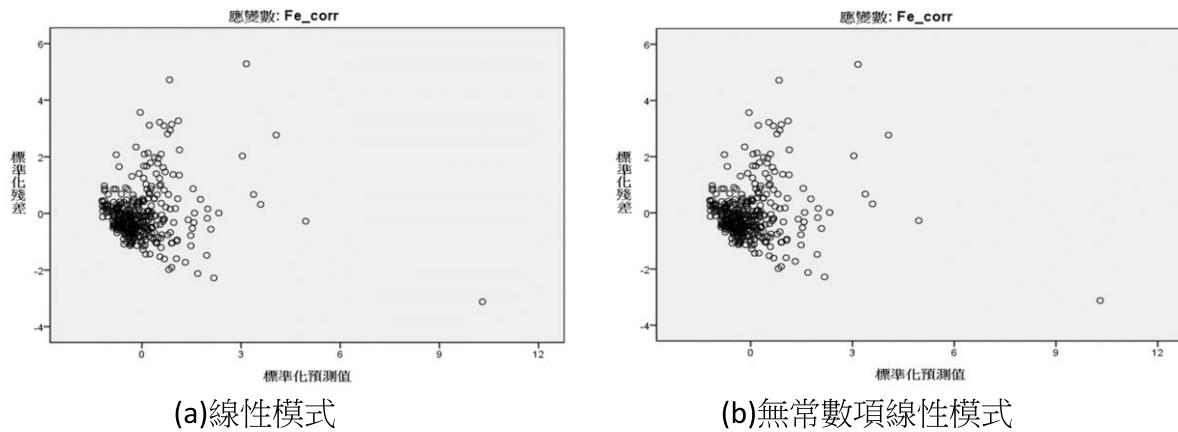


圖 4 線性模式與無常數項線性模式的殘差圖

獨立性：由 2 個模式的殘差圖(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。

線性重合：由 2 個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。

離群值：2 個模式均有 9 個反應變數預測值在 3 個標準差之外。

## 5. 綜合判斷

綜而言之，線性模式與無常數項線性模式 2 模式的顯著性檢定均通過；適配性以無常數項線性模式的適配性較高，線性模式亦達可接受範圍；但在基本假設方面，2 模式可能均違反迴歸分析常態性、均質性的基本假設。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

經檢視殘差圖與常態機率圖，判斷建立的線性模式與無常數項線性模式 2 模式可能違反常態性與均質性的基本假設，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；濕潤時間是指能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、風速、風向等環境因子是在水膜產生後加速金屬腐蝕的因子。

並考慮到在 CNS13401(IOS 9223)<sup>[11-12]</sup>中建議由環境條件與暴露情境，計算出適用於碳鋼腐蝕速率的公式為：

$$r_{corr} = 1.77 P_d^{0.52} \exp(0.02 RH + f_{st}) + 0.102 S_d^{0.62} \exp(0.033 RH + 0.040 T) \\ f_{st} = 0.15(T-10) \text{ 當 } T \leq 10^\circ C ; \text{ 除此以外 } -0.054(T-10) \quad (4)$$

式中  $r_{corr}$  是碳鋼腐蝕速率； $P_d$  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、濕度為定值時，碳鋼腐蝕速率與氯鹽、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，碳鋼腐蝕速率與溫度、濕度間的關係是指數關係。

參考大氣金屬腐蝕理論與上述公式所顯示碳鋼腐蝕速率與溫度、濕度、氯鹽、二氧化硫沉積速率，嘗試將腐蝕速率取對數值為反應變數，以氯鹽、二氧化硫、風速等 3 項腐蝕因子各取對數值為解釋變數，加上濕潤時間、風向 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：

$$\ln(Fe_{corr}) = b_0 + b_1 TOW + b_2 \ln(Cl) + b_3 \ln(SO_2) + b_4 \ln(W_s) + b_5 W_d + e \quad (5)$$

式中  $b_0$  為常數項， $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $b_5$  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：

$$\ln(Fe_{corr}) = 2.789 + 0.012 TOW + 0.231 \ln(Cl) + 0.24 \ln(SO_2) + 0.246 \ln(W_s) - 0.11 W_d \quad (6)$$

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	$R^2$	$R^2_{adj}$
對數線性模式	0.751	0.564	0.558

註：R 為相關係數(correlation coefficient)； $R^2$  為判定係數(coefficient of determination)； $R^2_{adj}$  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	76.255	5	15.251	89.040	0.000*
殘差	58.921	344	0.171	-	-
總計	135.176	349	-	-	-

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)	2.789	0.110	25.437	0.000*	-
TOW	0.012	0.001	8.617	0.000*	1.044
ln(Cl)	0.231	0.018	12.507	0.000*	1.302
ln(SO <sub>2</sub> )	0.237	0.021	11.480	0.000*	1.119
ln(W <sub>S</sub> )	0.246	0.056	4.391	0.000*	1.236
W <sub>d</sub>	-0.110	0.047	-2.321	0.021*	1.078

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 = 89.040 ( $P=0.000$ )，可知模式顯著；由各參數的 t 檢定值均達 95% 顯著水準，可知常數項不為零，各解釋變數對反應變數的影響均顯著。

由模式的  $R^2_{adj} = 0.558$ ，表示模式中解釋變數能說明碳鋼腐蝕速率變異的 55.8%，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  $R^2_{adj}$  值達 50%，應屬可接受範圍。

## 3. 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，由殘差與預測值散佈圖(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。此外，模式中有 2 個反應變數預測值在 3 個標準差之外的離群值。

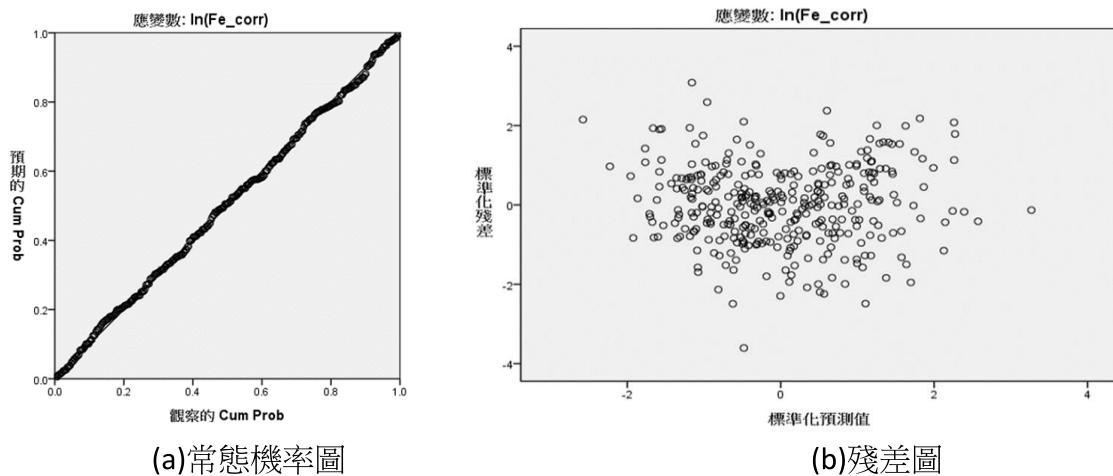


圖 5 對數線性模式的常態機率圖與殘差圖

#### 4. 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。關於模式有 2 項離群值的問題，基於試驗站是設置在戶外，調查到的數值較易受地區環境不可控制因素影響，為避免模式受到極端值的影響，將刪除 2 項離群值後，再次估計迴歸參數。

重新配適得到刪除離群值後的對數線性模式如下：

$$\ln(\text{Fe}_{\text{corr}}) = 2.798 + 0.012\text{TOW} + 0.233 \ln(\text{Cl}) + 0.240 \ln(\text{SO}_2) + 0.254 \ln(\text{W}_s) - 0.116\text{W}_d \quad (7)$$

刪除離群值後的對數線性模式摘要表、變異數分析表與參數估計表，彙整如表 5，常態機率圖、殘差圖如圖 6。分析結果顯示：刪除離群值後之對數線性模式的顯著性檢定通過；適配性達可接受範圍且較原對數線性模式略高( $R^2_{\text{adj}} = 0.576$ )；常態機率圖上的圖形近似直線，殘差圖上各殘差值隨機分布無明顯圖形，且 VIF 值  $< 10$ ，確認模式無違反迴歸分析之基本假設；模式亦無離群值。

表 5 刪離群值之對數線性模式

(a)結果摘要表

模式	R	$R^2$	$R^2_{\text{adj}}$
對數線性模式	0.763	0.582	0.576

註：R 為相關係數(correlation coefficient)； $R^2$  為判定係數(coefficient of determination)； $R^2_{\text{adj}}$  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	76.657	5	15.331	95.289	0.000*
殘差	55.026	342	0.161	-	-
總計	131.683	347	-	-	-

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)	2.803	0.106	26.327	0.000*	-
TOW	0.012	0.001	8.629	0.000*	1.045
ln(Cl)	0.234	0.018	13.060	0.000*	1.303
ln(SO <sub>2</sub> )	0.242	0.020	11.946	0.000*	1.120
ln(W <sub>S</sub> )	0.243	0.054	4.477	0.000*	1.234
W <sub>d</sub>	-0.129	0.046	-2.800	0.005*	1.080

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

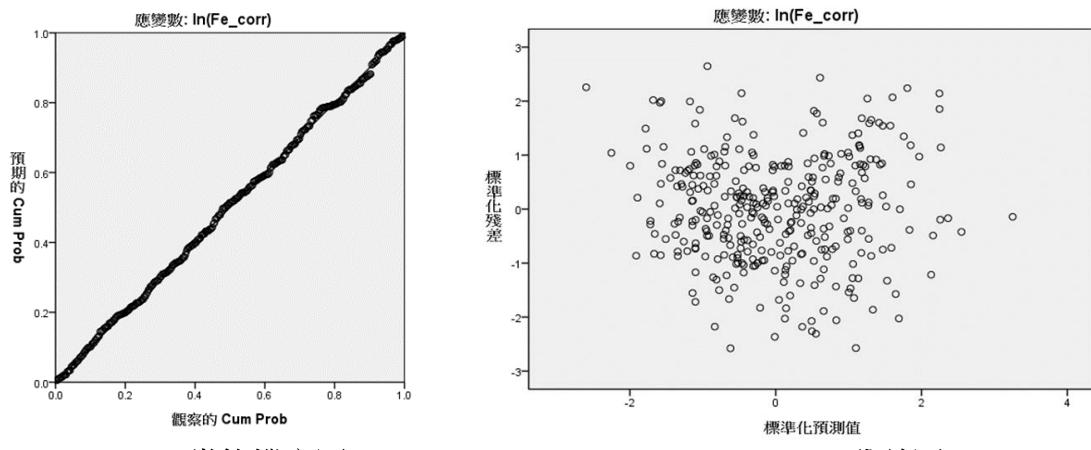


圖 6 刪離群值之對數線性模式的常態機率圖與殘差圖

### 3.4 迴歸分析結果說明

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，碳鋼腐蝕速率主要受到濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率、風速、風向等 5 項腐蝕因子的影響，碳鋼腐蝕速率與 5 項腐蝕因子間的關係是對數線性關係，關係模式如下：

$$\ln(\text{Fe}_{\text{corr}}) = 2.798 + 0.012\text{TOW} + 0.233\ln(\text{Cl}) + 0.240\ln(\text{SO}_2) + 0.254\ln(\text{W}_S) - 0.116\text{W}_d \quad (7)$$

依此關係模式，5 項腐蝕因子的變動可說明碳鋼腐蝕速率變動的 57.6%。

在此模式中，5 項腐蝕因子均對碳鋼腐蝕速率有顯著影響，各項腐蝕因子的相對重要性，可以用各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>[15]</sup>; Tabachnick and Fidell, 2007<sup>[16]</sup>)。由模式中各解釋變數的標準化迴歸係數值(如表 6)，可知腐蝕因子中以氯鹽沉積速率的相對重要性最高(0.521)，其次是二氧化硫沉積速率(0.442)，第三是濕潤時間百分比(0.308)，風速(0.174)與風向(-0.102) 2 項的相對重要性較低。

**表 6 對數線性模式(刪離群值)之標準化迴歸係數**

解釋變數	標準化迴歸係數
TOW	0.308
ln(Cl)	0.521
ln(SO <sub>2</sub> )	0.442
ln(W <sub>S</sub> )	0.174
W <sub>d</sub>	-0.102

#### 四、結論

臺灣屬於高腐蝕環境，為評估臺灣地區大氣腐蝕劣化因子對於碳鋼腐蝕速率的影響，本文採用臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查之數據，以迴歸分析法建立碳鋼腐蝕速率與大氣腐蝕劣化因子間的迴歸模式。

迴歸分析以碳鋼腐蝕速率為反應變數，參考 CNS13401(IOS 9223)規範以及本所前期研究結果，以濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率、風速、風向等 5 項因子為解釋變數；並採用本所 111 年臺灣地區金屬材料腐蝕環境調查季資料為分析基礎，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。

分析結果顯示：在臺灣地區目前的氣候條件與污染情境下，濕潤時間百分比、氯鹽沉積速率、二氧化硫沉積速率、風速、風向等 5 項腐蝕因子是影響碳鋼腐蝕速率的顯著影響因子，碳鋼腐蝕速率與 5 項腐蝕因子間的關係是對數線性關係，關係模式為： $\ln(\text{Fe}_{\text{corr}}) = 2.798 + 0.012\text{TOW} + 0.233 \ln(\text{Cl}) + 0.240 \ln(\text{SO}_2) + 0.254 \ln(\text{W}_S) - 0.116\text{W}_d$ ；模式顯示此 5 項腐蝕因子的變動可說明碳鋼腐蝕速率變動的 57.6%，其對碳鋼腐蝕速率影響之相對重要性以氯鹽沉積速率最高，二氧化硫沉積速率次之，第三是濕潤時間百分比，風速與風向則較低。

#### 參考文獻

1. Mendoza, A.R., & Corvo, F. Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel. *Corrosion Science*, 41, 75-86, 1999.
2. 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.
- 3. Pourbaix M., The linear bilogarithmic law for atmospheric corrosion in atmospheric corrosion, W.H. Ailor, Ed., John Wiley & Sons, 1982.
  - 4. Morales J., F. Diaz, J. Hernandez-Borges, S. Gonzalez and V. Cano, Corrosion Science, 49526-49541, 2007.
  - 5. Su F.R., Investigate the corrosion relationship of atmosphere and metal, National Taiwan University Department of Environmental Engineering Master's Thesis, 1988.
  - 6. Tsai K.J., Electricity atmospheric corrosion testing and related materials database set up summary report, Industrial Technology Research Institute, Taiwan Power Research Institute, 1993.
  - 7. 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.
  - 8. 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.
  - 9. Douglas C., Montgomery, and Elizabeth A. Peck, Introduction to Linear Regression, Second Edition, John Wiley & Sons, Publishers, 1992.
  - 10. 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。
  - 11. 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。
  - 12. ISO 9223/2012: Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres – Classification, determination and estimation.
  - 13. 陳桂清、柯正龍、羅建明、羅俊雄，「臺灣地區大氣腐蝕劣化因子調查研究(2/2)」，交通部運輸研究所，2009。
  - 14. 蔡立宏、羅建明、賴瑞應、謝幼屏，「2022 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，2023。
  - 15. Ryan, T. P., Modern Regression Methods, New York, NY: Wiley-Interscience, 2009.
  - 16. Tabachnick, B., and L. Fidell, Using Multivariate Statistics (5th ed.), Boston, MA: Pearson/Allyn & Bacon, 2007.