



防蝕工程

期刊網址：<http://www.anticorr.org.tw>



## 沿岸地區金屬材料與大氣腐蝕劣化因子關聯性統計分析 The analysis of long-term atmospheric corrosion factors and metallic materials in coastal areas of Taiwan- from 2009 to 2020

羅建明<sup>\*1</sup>、蔡立宏<sup>1</sup>、柯正龍<sup>1</sup>、賴瑞應<sup>1</sup>

Chien-Ming Lo<sup>\*1</sup>, Li-Hung Tsai<sup>1</sup>, Jang-Long Ko<sup>1</sup>, Jui-Ying Lai<sup>1</sup>

### 中文摘要

臺灣為一四面環海之海島，具有高溫、高溼與高鹽份的環境，屬高腐蝕環境區域。而臺中港地處臺灣西海岸中點，是臺灣南北交通的中心。港區在東北季風的影響下，臺中港區可能會受到來自中國大陸、韓國、日本與臺灣北部的懸浮微粒、大氣污染物、沙塵等腐蝕劣化因子的影響，造成金屬材料銹蝕損壞。有鑑於此，本研究以沿海地區臺中港 0 m 試驗站為例，將 2009 年至 2020 年大氣腐蝕劣化因子調查與碳鋼、鋅、銅、鋁四種螺旋狀金屬暴露試驗資料，進行沿岸地區金屬材料與腐蝕劣化因子關聯性統計分析。

研究結果顯示，將選取的 9 個環境因子進行逐步迴歸分析，經篩選檢驗進入符合迴歸分析基本假設之金屬模式中，碳鋼自變數為平均風速、濕潤時間、氯鹽沉積速率；鋅為平均風速、風向、濕潤時間；銅為平均風速、平均氣溫；鋁為平均風速、風向及濕潤時間。

**關鍵詞：**大氣腐蝕、腐蝕因子、腐蝕環境、腐蝕速率。

### Abstract

Taiwan is an island surrounded by sea and has an environment with high temperature, high humidity, high salinity, and high corrosion. Taichung port is located on the west coast of central Taiwan and it is a traffic hub from northern Taiwan to southern Taiwan. Taichung port is predisposed to particulate matter, air pollution and sand dust from China, South Korea, Japan, and Northern Taiwan during the northeast monsoon season, causing metallic materials to be easily corroded by these pollutants. The present study used an exposure test of four spiral metals, including carbon steel, zinc, copper, and aluminum to investigate atmospheric corrosion factors of these

收到日期：111 年 04 月 11 日

修訂日期：111 年 06 月 23 日

接受日期：111 年 08 月 21 日

<sup>1</sup>交通部運輸研究所港灣技術研究中心

<sup>1</sup> Harbor & Marine Technology Center, Institute of Transportation, Ministry of Transportation

\*聯絡作者：[appleloe@gmail.com](mailto:appleloe@gmail.com)

metals through a 0 m test station in Taichung port from 2009 to 2020.

Stepwise regression analysis was applied to investigate the nine environmental factors related with atmospheric corrosion of these four metals. The results indicated that the independent variables of carbon steel included the average wind speed, wetting time, and chloride deposition rate. The independent variables of zinc included average wind speed, wind direction and wetting time. The average wind speed and average temperature were independent factors of copper. The independent factors of aluminum included average wind speed, wind direction and wetting time.

**Keywords:** Atmospheric corrosion; Corrosion Factors; Corrosives environments; Corrosion rate.

## 1. 前言

由於全球各地氣候條件受緯度、地形、距離海遠近及當地或附近腐蝕性污染物質排放等因素影響，大氣腐蝕具有強烈地域性。而臺灣為一四面環海之海島，具有高溫、高溼與高鹽份的環境，屬高腐蝕環境區域。而臺中港地處臺灣西海岸中點，是臺灣南北交通的中心如圖 1。港區附近有台電台中火力發電廠及關連工業區排放污染物，在東北季風的影響下，臺中港區可能會受到

來自中國大陸、韓國、日本與臺灣北部的懸浮微粒、大氣污染物、沙塵等腐蝕劣化因子的影響，造成金屬材料銹蝕損壞。有鑑於此，瞭解金屬在大氣環境下腐蝕特性，有其必要性。有鑑於此，本研究依據 CNS 大氣腐蝕性分類及試驗等標準 [1-5]，將碳鋼、鋅、銅、鋁四種螺旋狀金屬，自 2009 年至 2020 年大氣腐蝕劣化因子調查與金屬暴露試驗進行沿岸地區金屬材料與腐蝕劣化因子關聯性統計分析。

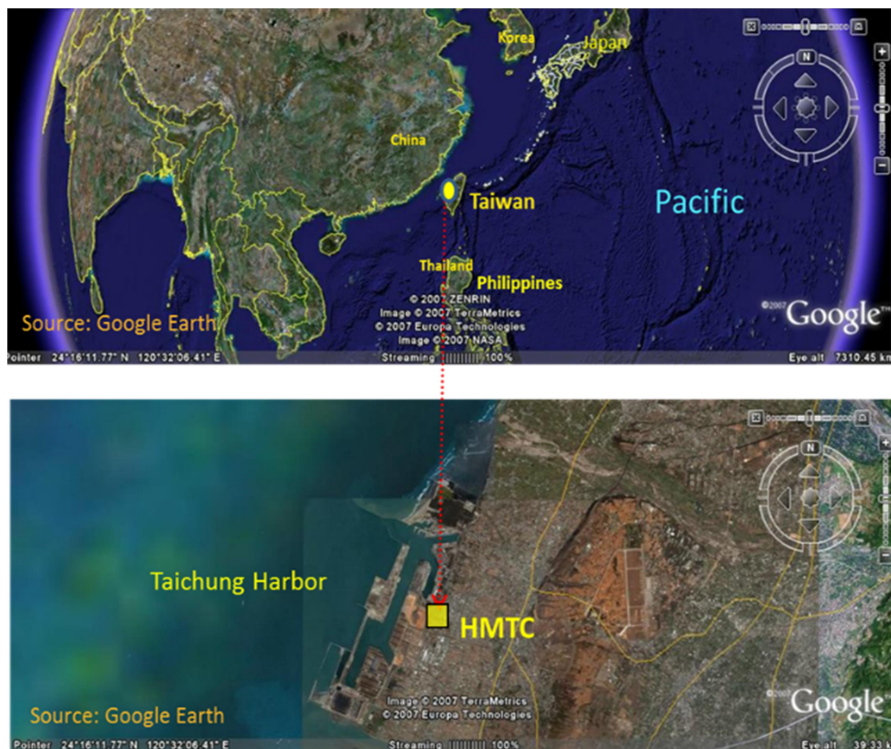


圖 1 臺中港 0 m 試驗站位置圖。  
Figure 1 Location of the Taichung Port 0 m and the atmospheric corrosion station.

## 2. 研究方法

### 2.1 研究回顧-大氣腐蝕相關研究

迴歸分析是一種統計分析方法，它利用一組自變數 (independent variable) 對某一依變數 (dependent variable) 建立關係式以便做為預測的依據，也可以做為評估自變數對依變數的效用。其應用於大氣腐蝕研究主要目的在於了解金屬材料與大氣環境腐蝕因子間之數值關係。利用此關係可以由大氣腐蝕因子調查，預測金屬腐蝕速率。在過去國外文獻以迴歸分析進行大氣腐蝕速率評估，如 Mendoza (1999) [6]於不同氣候條件及區域如沿海、城市工業區、農村等，進行碳鋼大氣腐蝕速率評估。結果顯示，由於二氧化硫與氯鹽及濕潤時間之間存在相互作用，使碳鋼腐蝕速率增加；碳鋼腐蝕速率與氯鹽在沿海區域明顯高於其他地區。並與 ISO9223 標準比較，發現碳鋼腐蝕速率與 ISO 標準並不相同，ISO 標準無法套用在全世界各地區。Legault (1978) [7]、Pourbaix (1993) [8]與 Morales (2007) [9]等人，也證實金屬材料腐蝕速率與暴露時間存在雙對數線性迴歸模式關係。Su (1988) [10]利用迴歸分析探討大氣環境中各因子對金屬腐蝕率之影響程度，結果得到不同暴露地點與環境因子分別影響金屬腐蝕速率，驗證出迴歸模式地域性限制的問題。Tsai (1993) [11]進行環境腐蝕因子迴歸分析，討論溫度、相對溼度、氯鹽沉積量與二氧化硫沉積量對碳鋼和耐候鋼之腐蝕速率的影響，針對高腐蝕速率區域須分別處理數據，再進行迴歸分析。Chou (2012) [12]以迴歸分析建立鋅金屬腐蝕速率預測模式研究結果，針對氯鹽、二氧化硫與溼潤時間 3 項環境因子對臺灣地區鋅金屬的腐蝕速率，以氯鹽的影響最為顯著。Lo (2014) [13]探討臺灣碳鋼與大氣腐蝕環境因子之關聯性，結果得知沿海區以氯鹽與濕潤時間，季節性以冬季與秋季與一年期碳鋼腐蝕有顯著相關。經由上述文獻發現在不同試驗

區域環境腐蝕分類標準，其腐蝕等級往往超越 ISO 9223 提出的環境腐蝕性分類之等級。故利用迴歸分析建立專屬於該地區之腐蝕速率與環境因子之數值關係，應可提升預測金屬材料腐蝕的準確性。

### 2.2 大氣腐蝕研究分析方法

研究方法有單因子迴歸分析及複線性迴歸分析。本研究利用複線性迴歸分析 MLR (Multiple Linear Regression) 找出金屬腐蝕速率與污染物及氣象因子的關係式，使用之軟體為 SPSS，針對模式之建立，先消除模式中多餘的自變數與降低共線性(collinearity)的現象，本研究採用逐步迴歸法(Stepwise Regression Procedure)吳明隆(2000) [14]，其步驟為：首先在模式中與準則變數相關性最高者，進入迴歸方程式中。其次控制迴歸方程式中之變數，根據每個模擬變數與準則變數間之淨相關(partial correlations)的高低來決定進入方程式的順序，而進入方程式的標準在於模擬變數的標準化迴歸係數必須通過 F 值或 F 機率值規定的標準。已被納入方程式的模擬變數必須再經過反向剔除法的考驗，以決定該項變數是否被保留，進入迴歸方程式的變數若符合剔除標準，則會被淘汰，被剔除之模擬變數無法在進入模式中。在模式之建立過程中，需留意共線性的問題，亦即模擬變數間的相關性太高，以致於迴歸模式的參數不能完全被估計出來。而在本研究中，所建立的模式必須先通過共線性的檢定，方可用來模擬大氣腐蝕速率。

### 3. 結果與討論

今彙整 2010 至 2020 年臺中港 0 m 現地暴露試驗及腐蝕環境因子資料，如表 1 摘要表及表 2 統計表，每季所調查數據共有 44 個期程，今以 碳鋼 ( $\mu\text{m}/\text{yr}$ )、鋅 ( $\mu\text{m}/\text{yr}$ )、銅 ( $\mu\text{m}/\text{yr}$ )、鋁 ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{yr}$ ) 四種金屬腐蝕速率為依變數、暴露時間 (day)、濕潤時間 (%)、氯鹽沉積速率 ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )、平均氣溫 ( $^{\circ}\text{C}$ )、平均風速 ( $\text{m}/\text{s}$ )、風向 ( $360^{\circ}$ )、降雨時數 (hr)、降雨量 (mm)、日照時數 (hr) 及共 9 項腐蝕環境因子為自變數，進行 MLR，並從中選出符合迴歸分析基本假設之迴歸式，刪減後所選出輸入變數，再使用 SPSS 軟體進行逐步迴歸分析之後，可得分析結果如下：

#### 3.1 臺中港 0 m 碳鋼金屬 MLR

由表 3 至表 5 可知，研究變數依篩選進入模式之順序分別為平均風速 ( $X_5$ )、濕潤時間 ( $X_2$ )、

氯鹽沉積速率 ( $X_3$ )、等，此迴歸模式之  $R^2$  可達 0.54。其迴歸方程式為：

$$Y_1 = -133.243 + 33.859X_3 + 3.235X_2 + 1.556X_5 \quad (5-1)$$

接下來進行殘差分析，由表 3 當 DW (Durbin-Watson) 值接近 2 左右，通常沒有違反獨立性的假設，圖 2 標準化常態 P-P 圖，可以看出從左下到右上的 45 度直線上接近常態分配，表示殘差符合常態性，圖 3 變異數均質性中當圖形呈現水平的隨機分配，即可認定並未違反殘差變異數同質性的假設。由上述迴歸模式檢驗結果可知，此碳鋼逐步迴歸分析符合迴歸分析基本假設，故使用其篩減之變數平均風速、濕潤時間、氯鹽沉積速率等。

表 1 臺中港 0 m 金屬腐蝕與環境因子摘要表。

Table 1 Descriptive statistics of metal corrosion and environmental factors at Taichung Port 0 m.

Variable	Unit	Code	N	Minimum	Maximum	Mean	Std.Deviation
Day	(day)	( $X_1$ )	44	65	135	93	11
TOW	(%)	( $X_2$ )	44	8.5	75.3	39.2	13.6
CL	( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )	( $X_3$ )	44	1.6	138.3	24.9	25.3
TEMP	( $^{\circ}\text{C}$ )	( $X_4$ )	44	15.6	29.5	23.2	4.4
WDSD	( $\text{m}/\text{s}$ )	( $X_5$ )	44	3.20	6.40	4.50	0.8
WDIR	( $360^{\circ}$ )	( $X_6$ )	44	114	303	212	45
H_24R	(hr)	( $X_7$ )	44	23	1256	299	282
AP_HR	(mm)	( $X_8$ )	44	0	262	103	57
SUN_hr	(hr)	( $X_9$ )	44	181	842	539	142
Fe	( $\mu\text{m}/\text{yr}$ )	( $Y_1$ )	44	39.7	604.0	184.8	100.5
Zn	( $\mu\text{m}/\text{yr}$ )	( $Y_2$ )	44	6.1	62.2	21.7	12.7
Cu	( $\mu\text{m}/\text{yr}$ )	( $Y_3$ )	44	1.1	28.0	12.5	6.2
Al	( $\text{g}/\text{m}^2/\text{yr}$ )	( $Y_4$ )	44	4.8	93.8	32.3	19.3

表2 臺中港 0 m 金屬腐蝕與環境因子統計表。

Table 2 Metal corrosion and environmental factors statistical table at Taichung Port 0 m from 2010 to 2020.

試驗 期程 (季)	暴露 時間 (day)	濕潤 時間 (%)	氯鹽 沉積速率 (mg/m <sup>2</sup> /day)	平均氣溫 (°C)	平均風速 (m/s)	平均風向 (360°)	降雨時數 (hr)	降雨量 (mm)	日照時數 (hr)	碳鋼 腐蝕 速率 (µm/yr)	鋅 腐蝕 速率 (µm/yr)	銅 腐蝕 速率 (µm/yr)	鋁 腐蝕 速率 (g/m <sup>2</sup> /yr)
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
2010_q1	127	39.2	60.6	19.5	5.4	114	99	108	687	234.7	20.3	16.7	23.1
2010_q2	88	8.5	13.1	20.2	4.3	149	242	138	402	144.3	21.1	8.2	12.5
2010_q3	92	23.6	16.0	27.6	4.0	190	655	135	564	39.7	7.8	7.5	5.7
2010_q4	96	30.0	22.2	26.2	4.6	156	219	96	610	223.7	29.8	14.0	21.8
2011_q1	99	44.7	19.3	16.2	6.1	122	85	71	492	183.1	38.1	16.9	23.4
2011_q2	90	47.1	3.0	20.3	4.4	160	110	82	390	178.6	8.6	13.3	22.7
2011_q3	84	34.0	8.0	28.4	3.7	211	209	69	647	156.2	8.4	13.0	14.2
2011_q4	98	41.0	39.7	25.9	4.5	159	213	119	611	395.3	15.5	16.6	30.2
2012_q1	84	55.3	12.3	16.6	6.4	128	101	96	290	298.6	16.4	20.5	35.2
2012_q2	91	60.0	17.0	20.5	4.4	165	356	109	354	271.5	10.1	12.2	25.3
2012_q3	91	51.9	1.6	28.0	4.1	191	997	174	595	187.4	11.2	9.0	12.2
2012_q4	135	38.8	27.2	23.5	4.4	180	220	154	842	131.9	11.7	15.4	43.3
2013_q1	84	75.3	70.6	17.0	5.4	230	47	50	367	604.0	23.9	15.6	77.5
2013_q2	91	56.0	15.5	24.2	3.6	190	526	204	390	144.0	9.8	7.7	33.4
2013_q3	85	29.5	16.8	28.4	3.4	210	1256	156	627	116.1	18.2	6.9	13.4
2013_q4	90	45.6	42.0	23.1	5.2	202	25	27	613	239.2	30.6	21.8	52.7
2014_q1	90	47.0	17.4	15.6	5.5	208	133	105	420	162.4	14.5	14.1	51.7
2014_q2	92	57.2	4.3	23.5	3.6	213	644	147	388	146.5	13.1	4.6	25.5
2014_q3	91	36.8	6.7	29.3	3.6	212	409	76	772	71.8	11.6	3.2	4.8
2014_q4	110	34.9	16.4	22.5	5.0	209	54	70	715	143.4	16.4	8.9	25.9
2015_q1	91	47.3	6.3	17.0	4.9	231	66	48	507	122.8	21.2	12.9	35.0
2015_q2	85	46.3	5.3	25.8	3.8	200	478	169	573	117.1	17.2	4.4	25.7
2015_q3	100	32.5	11.7	28.2	4.2	214	549	190	683	130.9	27.9	11.8	24.3
2015_q4	88	38.5	13.7	22.6	4.7	251	84	35	530	151.1	36.9	18.6	30.2
2016_q1	91	58.9	8.2	16.0	5.4	256	464	262	311	192.4	17.3	8.7	37.4
2016_q2	65	56.7	7.0	25.1	3.4	215	325	83	339	103.1	20.2	6.4	28.2
2016_q3	91	28.6	3.8	29.3	3.7	190	239	71	506	88.9	7.3	5.8	25.5
2016_q4	97	44.2	22.3	22.3	5.0	227	75	44	181	185.7	20.3	13.4	93.8
2017_q1	111	39.5	66.2	17.8	5.5	251	60	58	558	192.7	33.1	18.9	59.8
2017_q2	91	37.7	25.1	25.2	3.6	198	563	191	509	97.7	18.8	5.1	14.5
2017_q3	79	21.7	24.6	29.4	3.2	206	281	75	636	95.4	25.8	5.8	11.1
2017_q4	103	29.5	138.3	23.2	5.5	272	54	58	600	285.2	47.4	23.2	55.1
2018_q1	91	42.8	33.2	16.9	5.2	274	157	144	416	313.2	30.0	13.6	39.4
2018_q2	92	19.8	31.8	26.0	3.7	229	146	49	648	154.8	19.5	9.8	27.0
2018_q3	91	27.8	22.8	28.6	3.3	203	748	144	610	127.8	14.3	10.5	22.1
2018_q4	90	31.9	20.8	22.4	5.3	283	30	43	582	306.9	45.9	25.8	54.8
2019_q1	91	53.7	16.4	18.3	5.2	284	202	136	411	312.7	39.8	19.1	56.9
2019_q2	91	46.2	11.4	25.0	3.6	218	658	192	494	185.7	20.3	12.9	30.2
2019_q3	91	29.6	42.6	28.6	3.7	204	735	119	637	134.7	9.4	9.0	31.3
2019_q4	91	24.8	22.3	22.3	5.6	294	76	48	713	172.4	44.7	20.1	68.5
2020_q1	91	43.5	38.6	18.2	4.6	279	138	61	565	166.2	26.5	12.2	37.8
2020_q2	91	31.1	12.6	25.0	3.7	227	278	94	605	104.2	6.9	1.1	11.2
2020_q3	91	11.9	4.2	29.5	3.4	202	107	12	773	57.1	6.1	5.5	8.6
2020_q4	91	25.2	75.8	22.8	6.3	303	23	0	569	262.1	62.2	28.0	38.4

表 3 臺中港 0 m 碳鋼逐步迴歸分析之模型摘要表。

Table 3 Model summary of carbon steel stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	$R$	$R^2$	調整後 $R^2$	Durbin-Watson
迴歸	0.761	0.579	0.547	1.912

表 4 臺中港 0 m 碳鋼逐步迴歸分析之參數估計表。

Table 4 Coefficients of carbon steel stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

		$\beta$ 之估計值	標準誤	$t$ 值	顯著性
(常數)		-133.243	57.017	-2.337	.025
平均風速	$X_5$	33.859	13.597	2.490	.000
濕潤時間	$X_2$	3.235	.802	4.036	.000
氯鹽沉積速率	$X_3$	1.556	.464	3.353	.010

符號『\*』表示  $P$  值 < 0.05，達統計上顯著。

表 5 臺中港 0 m 碳鋼逐步迴歸分析之變異數分析。

Table 5 ANOVA of carbon steel stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	平方和	自由度	平均平方和	$F$ 檢定	顯著性
迴歸	251430.654	3	83810.218	18.315	.000
殘差	183044.375	40	4576.109		
總和	434475.029	43			

符號『\*』表示  $P$  值 < 0.05，達統計上顯著。

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

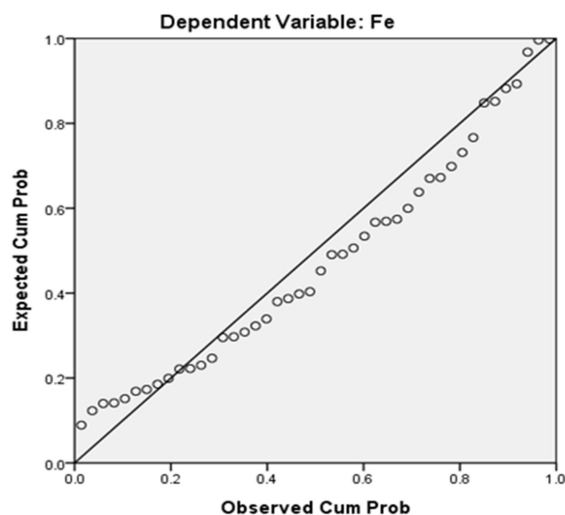


圖 2 臺中港碳鋼逐步迴歸分析標準化常態 P-P 圖。

Figure 2 Normal P-P plot of stepwise regression analysis standardized residual of carbon steel at Taichung Port 0 m.

Scatterplot

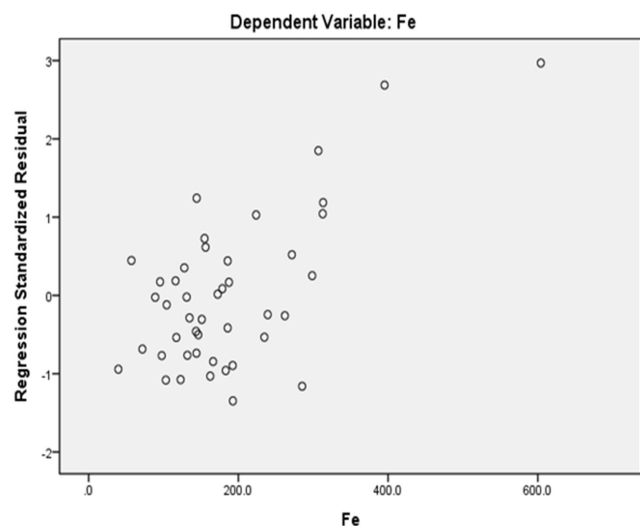


圖 3 臺中港碳鋼逐步迴歸分析之殘差散佈圖。

Figure 3 Scatter Plot of Residuals of Stepwise Regression Analysis of carbon steel at Taichung Port 0 m.

### 3.2 臺中港 0 m 鋅金屬 MLR

由表 6 至表 8 可知，逐步迴歸分析的研究變數依篩選進入模式之順序分別為平均風速(X5)、風向(X6)、濕潤時間(X2)，此迴歸模式之 R<sup>2</sup> 為 0.629。其迴歸方程式為：

$$Y_2 = -35.381 + 8.813X_5 + 0.125X_6 - 0.228X_2 \quad (5-2)$$

接下來進行殘差分析，由表 6 當 DW 值接近 2 左右，通常沒有違反獨立性的假設，圖 4 可

以看出從左下到右上的 45 度直線上即越接近常態分配，殘差符合常態性，圖 5 變異數均質性中當圖形呈現水平的隨機分配，即可認定並未違反殘差變異數同質性的假設。由上述迴歸模式檢驗結果可知，鋅金屬逐步迴歸模式，經過篩選檢定有平均風速、風向、濕潤時間 3 種環境因子對鋅金屬腐蝕速率具影響力。並且對鋅金屬大氣腐蝕速率模式的解釋能力達 63 %。

表 6 臺中港 0 m 鋅逐步迴歸分析之模型摘要表。

Table 6 Model summary of zinc stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	R	R <sup>2</sup>	調整後 R <sup>2</sup>	Durbin-Watson
迴歸	0.809	0.655	0.629	1.957

表 7 臺中港 0m 鋅逐步迴歸分析之參數估計表。

Table 7 Coefficients of zinc stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

		β 之估計值	標準誤	t 值	顯著性
(常數)		-35.381	8.032	-4.405	.000
平均風速	X <sub>5</sub>	8.813	1.399	6.298	.000
風向	X <sub>6</sub>	.125	.027	4.649	.000
濕潤時間	X <sub>2</sub>	-.228	.090	-2.518	.016

符號『\*』表示 P 值 < 0.05，達統計上顯著。

表 8 臺中港 0 m 鋅逐步迴歸分析之變異數分析。

Table 8 ANOVA of zinc stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
迴歸	4562.910	3	1520.970	25.275	.000d
殘差	2407.062	40	60.177		
總和	6969.972	43			

符號『\*』表示 P 值 < 0.05，達統計上顯著。

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

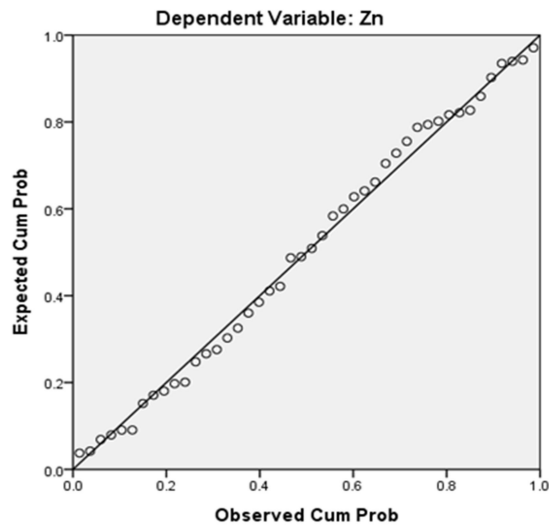


圖 4 臺中港鋅金屬逐步迴歸分析之標準化常態 P-P 圖。

Figure 4 Normal P-P plot of stepwise regression analysis standardized residual of zinc at Taichung Port 0 m.

Scatterplot

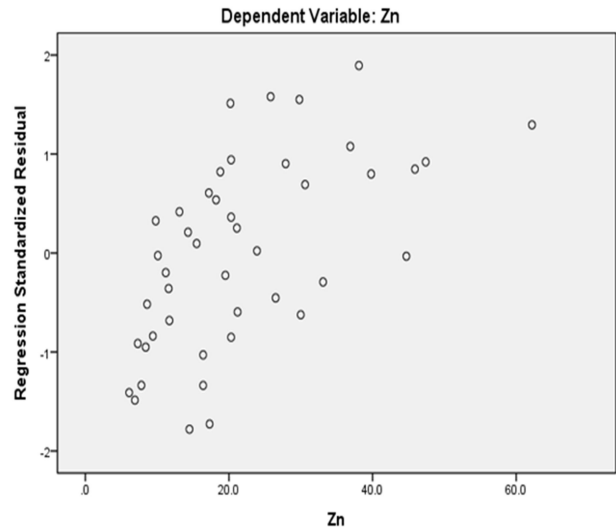


圖 5 臺中港鋅逐步迴歸分析殘差散佈圖。  
Figure 5 Scatter Plot of Residuals of Stepwise Regression Analysis of zinc at Taichung Port 0 m.

### 3.3 臺中港 0 m 銅金屬 MLR

由表 9 至表 11 可知，逐步迴歸分析研究變數依篩選進入模式之順序分別為平均風速( $X_5$ )、平均氣溫( $X_4$ )，此迴歸模式之  $R^2$  為 0.679。其迴歸方程式為：

$$Y_3 = -34.846 + 7.68X_5 + 0.548X_4 \quad (5-3)$$

接下來進行殘差分析，由表 9 當 DW 值 (1.747) 接近 2 左右，通常沒有違反獨立性的假

設，圖 6 標準化常態 P-P 圖，可以看出從左下到右上的 45 度直線上接近常態分配，表示殘差符合常態性，圖 7 變異數均質性中當圖形呈現水平的隨機分配，即可認定並未違反殘差變異數同質性的假設。由上述銅金屬迴歸模式檢驗結果可知，此逐步迴歸分析符合迴歸分析基本假設，故使用其篩減之變數平均風速與平均氣溫做為後續 ANN 之建構。

表 9 臺中港 0 m 銅金屬逐步迴歸分析之模型摘要表。

Table 9 Model Summary of zinc stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	$R$	$R^2$	調整後 $R^2$	Durbin-Watson
迴歸	0.833	0.694	0.679	1.747

表 10 臺中港 0 m 銅金屬逐步迴歸分析之參數估計表。

Table 10 Coefficients of copper metal stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	$\beta$ 之估計值	標準誤	$t$ 值	顯著性
(常數)	-34.846	8.346	-4.175	.000
平均風速	$X_5$ 7.680	.958	8.020	.000
平均氣溫	$X_4$ .548	.195	2.809	.008

符號『\*』表示 P 值 < 0.05，達統計上顯著。



表 11 臺中港 0 m 銅金屬逐步迴歸分析之變異數分析。

Table 11 ANOVA of copper metal stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
迴歸	1164.145	2	582.072	46.406	.000c
殘差	514.267	41	12.543		
總和	1678.412	43			

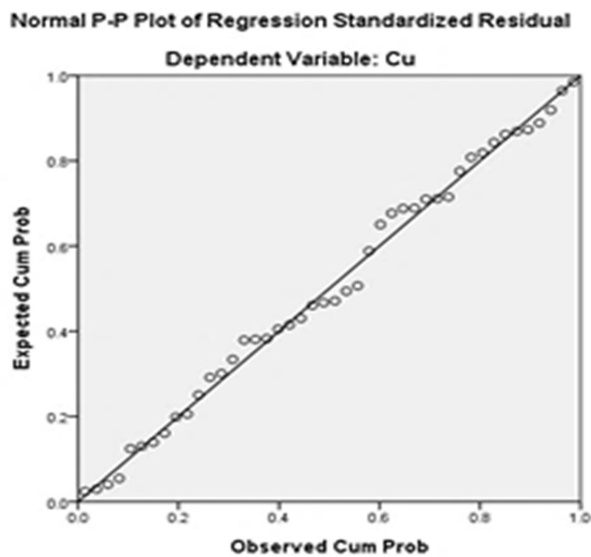


圖 6 臺中港銅金屬逐步迴歸分析之標準化常態 P-P 圖。

Figure 6 Normal P-P plot of stepwise regression analysis standardized residual of copper metal at Taichung Port 0 m.

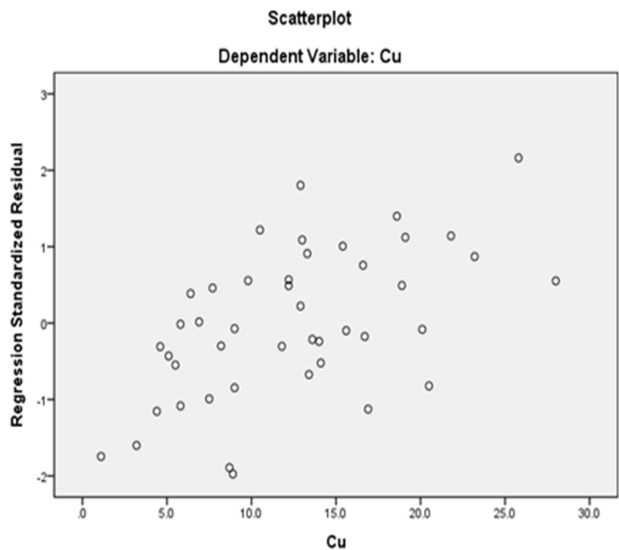


圖 7 臺中港銅金屬逐步迴歸分析之殘差散佈圖。

Figure 7 Scatter Plot of Residuals of Stepwise Regression Analysis of copper metal at Taichung Port 0 m.

### 3.4 臺中港 0 m 鋁金屬 MLR

由表 12 至表 14 可知，逐步迴歸分析的研究變數依篩選進入模式之順序分別為平均風速 ( $X_5$ )、風向 ( $X_6$ )、濕潤時間 ( $X_3$ )，此迴歸模式之  $R^2$  為 0.524。其迴歸方程式為：

$$Y_4 = -64.248 + 10.239X_5 - 0.169X_6 + 0.373X_3 \quad (5-4)$$

接下來進行殘差分析，由表 12 當 DW 值接

表 12 臺中港 0 m 鋁金屬逐步迴歸分析之模型摘要表。

Table 12 Model Summary of aluminum stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	R	R2	調整後 R2	Durbin-Watson
迴歸	0.747	0.558	0.524	1.412

近 2 左右，通常沒有違反獨立性的假設，圖 8 標準化常態 P-P 圖，可以看出從左下到右上的 45 度直線上接近常態分配，表示殘差符合常態性，圖 9 變異數均質性中當圖形呈現水平的隨機分配，即可認定並未違反殘差變異數同質性的假設。由上述鋁金屬迴歸模式檢驗結果可知，此逐步迴歸分析符合迴歸分析基本假設。

表 13 臺中港 0 m 鋁金屬逐步迴歸分析之參數估計表。

Table 13 Coefficients of aluminum stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

		$\beta$ 之估計值	標準誤	$t$ 值	顯著性
(常數)		-64.248	13.832	-4.645	.000
平均風速	X <sub>5</sub>	10.239	2.409	4.250	.000
風向	X <sub>6</sub>	.169	.046	3.669	.001
濕潤時間	X <sub>3</sub>	.373	.156	2.397	.021

符號『\*』表示 P 值 < 0.05，達統計上顯著。

表 14 臺中港 0 m 鋁金屬逐步迴歸分析之變異數分析。

Table 14 ANOVA of aluminum stepwise regression analysis at Taichung Port 0 m.

	平方和	自由度	平均平方和	F 檢定	顯著性
迴歸	8997.421	3	2999.140	16.808	.000d
殘差	7137.408	40	178.435		
總和	16134.830	43			

符號『\*』表示 P 值 < 0.05，達統計上顯著。

Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

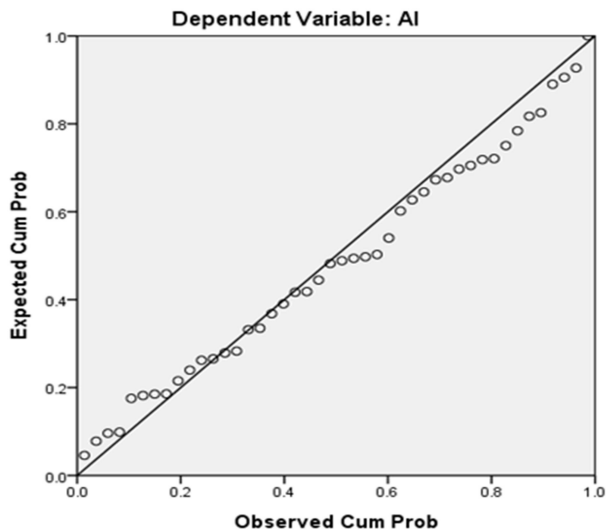


圖 8 臺中港鋁金屬逐步迴歸分析之標準化常態 P-P 圖。  
Figure 8 Normal P-P plot of stepwise regression analysis standardized residual of aluminum at Taichung Port 0 m.

Scatterplot

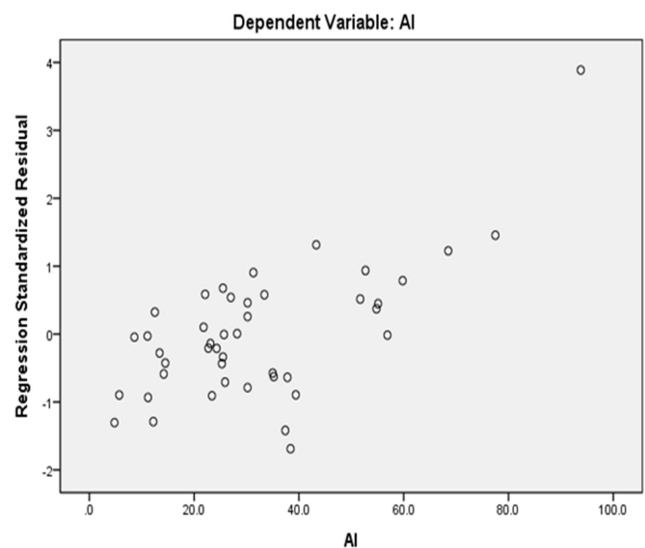


圖 9 臺中港鋁金屬逐步迴歸分析之殘差散佈圖。  
Figure 9 Scatter Plot of Residuals of Stepwise Regression Analysis of aluminum at Taichung Port 0 m.

綜合上述：將選取的 9 個因子進行逐步迴歸分析，經篩選檢驗進入符合迴歸分析基本假設之碳鋼、鋅、銅、鋁金屬模式中，所選入的變數整理如表 15，碳鋼自變數為平均風速、濕潤時間、

氯鹽沉積速率。鋅為平均風速、風向、濕潤時間，銅為平均風速、平均氣溫，鋁為平均風速、風向及濕潤時間。

表 15 逐步迴歸分析選入的自變數。  
Table 15 Stepwise regression analysis of selected independent variables.

金屬種類	選入的變數	方法
碳鋼	平均風速、濕潤時間、氯鹽沉積速率	逐步迴歸分析法 (準則：F-選入的機率 $\leq 0.05$ ， F-刪除的機率 $\geq 0.10$ )
鋅	平均風速、風向、濕潤時間	
銅	平均風速、平均氣溫	
鋁	平均風速、風向、濕潤時間	

## 4. 結論與建議

### 4.1 結論

1. 在碳鋼逐步迴歸分析符合迴歸分析基本假設，碳鋼金屬大氣腐蝕速率模式的解釋能力達 54 %故使用其篩減之腐蝕環境因子變數主要為平均風速、濕潤時間、氯鹽沉積速率等 3 種。
2. 鋅金屬逐步迴歸模式，經過篩選檢定有平均風速、風向、濕潤時間 3 種環境因子對臺中港 0 m 鋅金屬腐蝕速率具影響力，並且對鋅金屬大氣腐蝕速率模式的解釋能力達 63 %。
3. 銅金屬迴歸模式檢驗結果可知，此逐步迴歸分析符合迴歸分析基本假設，銅金屬大氣腐蝕速率模式的解釋能達 68 %，故使用其篩減之變數平均風速與平均氣溫，可做為後續臺中港 0 m 銅金屬類神經網路之建構。
4. 鋁金屬迴歸模式檢驗結果可知，此逐步迴歸分析符合迴歸分析基本假設，鋁金屬大氣腐蝕速率模式的解釋能力達 52%，其腐蝕環境因子變數為平均風速、風向及濕潤時間等 3 種。

### 4.2 建議

1. 臺中港 0 m 碳鋼、鋅、銅、鋁 4 種金屬材料與大氣腐蝕劣化因子關聯性統計，篩選得知平均風速皆為主要腐蝕劣化因子，因此在臺中港進行防蝕工程維護時，應考量風速之影響，避開秋季及冬季東北季風之天候影響。
2. 藉由臺中港 0 m 小尺度關聯性統計分析成果，可套用到其它不同環境區域，以瞭解各種不同區域環境腐蝕影響因子，提供工程人員管理、規劃、設計及維護之防蝕指南應用參考。

### 參考文獻

- [1] 中華民國國家標準 CNS 13401：金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性之分類，2019。
- [2] 中華民國國家標準 CNS 13753：金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(測定標準試片之腐蝕速率以評估腐蝕性)，2019。
- [3] 中華民國國家標準 CNS 13754：金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕性(污染之測定)，1996。
- [4] 中華民國國家標準 CNS 14122：金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕-試片腐蝕生成物清除法，2017。

- [5] 中華民國國家標準 CNS14123：金屬及合金之腐蝕-大氣腐蝕測試(現場測試之一般要求)，2006。
- [6] “Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel”, A. R. Mendoza and F. Corvo, *Corrosion Science*, 41 (1999) pp. 75-86.
- [7] R. A. Legault and V. P. Pearson, in: *Atmospheric factors affecting the corrosion of engineering metals* ASTM STO, 646 (American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1978).
- [8] M. Pourbaix, *The Linear Bilogarithmic Law for Atmospheric Corrosion in Atmospheric Corrosion*, W.H. Ailor, Ed., John Wiley & Sons, 1982.
- [9] “Atmospheric corrosion in subtropical areas: Statistic study of the corrosion of zinc plates exposed to several atmospheres in the province of Santa Cruz de Tenerife (Canary Islands, Spain)”, J. Morales, F. Díaz, J. Hernández-Borges, S. González, and V. Cano, *Corrosion Science*, 49 (2007) pp. 526-541.
- [10] Su, F. R., “Investigate the corrosion relationship of atmosphere and metal”, master thesis, Department of Environmental Engineering, National Taiwan University, 1988.
- [11] K. J. Tsai, “Electricity atmospheric corrosion testing and related materials database set up summary report”, Industrial Technology Research Institute, Taiwan Power Research Institute, 1993.
- [12] “A Regression Model for Predicting the Corrosion Rate of Zinc in Taiwan”, S. F. Chou, C. J. Wang, J. S. Luo, Y. F. Chiu, K. C. Chen, and J. L. Ko, *Journal of Chinese Corrosion Engineering*, 25 (2011) pp. 219-230.
- [13] C. M. Lo, L. H. Tsai, M. D. Lin, “Correlation between carbon steel corrosion and Atmospheric factors in Taiwan”, *Proceedings of the 19th International Corrosion Congress*, Jeju Korea, 2014.
- [14] 吳明隆，in：`SPSS統計應用實務`，松岡電腦圖書資料股份有限公司（臺灣，高雄，2000）。