

臺灣周遭海域船舶排放量比較

吳義林 國立成功大學環境工程學系教授
楊榮元 國立成功大學環境工程學系研究助理
李俊穎 交通部運輸研究所港灣技術研究中心科長
蔣敏玲 交通部運輸研究所港灣技術研究中心研究員

摘要

本研究採用交通部運輸研究所港研中心介接航港局之船舶自動辨識系統(Automatic Identification System, AIS)資料以推估臺灣周遭海域船舶之排放量，依據 2013 年與 2016 年 AIS 資料顯示，航行於臺灣周遭海域之船舶數每日約 3,000 艘左右，其中以散裝船、貨櫃船與油輪等三種類型為主要船種，而總主引擎功率則約在 35GW ~ 40 GW 之間。

結合 AIS 資料中船舶之船舶識別碼、位置、即時船速與活動時間等資訊與勞氏資料庫，以每艘船舶軌跡線法計算推估臺灣周遭海域船舶之排放量，結果顯示 2013 年臺灣周遭海域船舶之平均每日粒狀物、硫氧化物與氮氧化物排放量分別為 264 噸、1,875 噸與 2,923 噸；2016 年結果則分別為 275 噸、1,943 噸與 2,997 噸。

一、前言

當前世界各國經濟活動互動頻繁且合作密切，遠洋船舶貨運肩負著在國際間交流的重任，因船舶貨運伴隨而來的空氣污染物排放問題也愈形嚴重。因而隨著近年來工業以及經濟快速的發展，經由船舶以及工業發展所排放的空氣污染物，已受到全球日益的關切。

然而國內港埠活動及船舶排放之空氣污染物，長期以來未被列入環保管制項目重點，但依據國內外研究顯示，港

區空氣污染物排放量對該區域污染排放總量的佔比頗高，尤其是硫氧化物(SO₂)與氮氧化物(NO_x)最為顯著。本研究目的即在進行 2013 年及 2016 年臺灣周遭海域船舶排放量比較與探討。

二、文獻回顧

根據環保署公告之全國空氣污染物排放清冊(TEDS)9.0 版，顯示港埠相關活動於 2013 年之懸浮微粒(PM₁₀)、細懸浮微粒(PM_{2.5})、硫氧化物(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、非甲烷碳氫化合物(NMHC)與一氧化碳(CO)排放量佔全國排放量之比例分別為 1.54%、2.66%、29.3%、7.91%、0.26%與 0.56%；又根據最新 TEDS10.0 版顯示，港埠相關活動於 2016 年之懸浮微粒、細懸浮微粒、硫氧化物、氮氧化物、非甲烷碳氫化合物與一氧化碳排放量佔全國排放量之比例依序為 2.28%、4.26%、26.2%、8.72%、0.21%與 0.51%。

依據 TEDS10.0 版資料顯示，港埠相關活動排放除了硫氧化物排放比例稍微降低，但依舊佔了全國排放比例約四分之一，而 NO_x與 PM_{2.5}等污染物排放則皆有增加。

為了因應細懸浮微粒之管制，環保署於 2012 年 5 月 14 日增訂細懸浮微粒周界空氣品質標準之 24 小時值與年平均值分別為 35 µg/m³與 15 µg/m³，又於 2015 年 11 月 17 日頒布「空氣品質嚴重惡化緊急防制辦法」部分修正。

三、研究方法

本研究透過臺灣海域船舶自動辨識系統(AIS)抓取船舶當時航行的軌跡訊息，利用該系統提供之船舶即時動態如船速、座標、航行狀態等資訊，應用洛杉磯港研究之船舶排放量計算公式，推估海域船舶之排放量資料。

3.1 排放量推估

船舶污染物排放與能量消耗有一定的關係，依據洛杉磯港研究之遠洋船舶排放量推估公式如下：

$$E = \text{Energy} \times EF \times FCF \dots\dots\dots (1)$$

式中 E 為引擎的排放量(g)；Energy 為所需要的能量(kW·h)；EF 為排放係數(g/kW·h)；FCF 為燃油校正係數(無單位)。

其中，所需要的能量亦可藉由下列公式推估之：

$$\text{Energy} = \text{MCR} \times \text{LF} \times \text{Act} \dots\dots\dots (2)$$

式中 MCR 為最大引擎動力(kW)；LF 為負載係數；Act 為活動時間(hr)。

船舶航行期間，負載一般介於 20%~80%之間，可藉由以下公式表示之：

$$\text{LF} = (\text{AS} / \text{MS})^3 \dots\dots\dots (3)$$

式中 AS 為船舶實際船速(節)；MS 為船舶最大船速(節)。

3.2 排放係數

主引擎的排放係數與引擎的製造年份、引擎種類以及引擎轉速的快慢有關，如表 1 及表 2。柴油引擎依照引擎的製造年份，由於 2000 年以前國際海事

組織(International Maritime Organization, 簡稱 IMO)並未規範船舶引擎的環保標準，此為 0 期引擎(Tier 0)，以 2000 年至 2010 年間生產的引擎為 1 期引擎(Tier 1)，而 2011 年至 2015 年生產的引擎則為 2 期引擎(Tier 2)，共區分為 3 個期別。

依照引擎的最大轉速又可區分為轉速低於 130 rpm 的慢速引擎(Slow Speed Diesel)以及轉速大於 130 rpm 的中速引擎(Medium Speed Diesel)，一般轉速介於 400~2000 rpm 之間。

另外，亦區分出氣體渦輪機引擎(Gas Turbine)及蒸汽渦輪引擎(Steam Turbine)兩種。一般船舶使用含硫量 2.7% 之重油(HFO)的排放係數，若船舶進港之前即將重油切換為低硫柴油，則需使用低硫油之係數，另外再根據硫含量以不同的油料校正係數以校正之。

表 1 含硫量 2.7%排放係數(g/kW·h)

引擎種類	期別	出廠年份	NOx	SOx	PM _{2.5}
慢速引擎	Tier 0	≤ 1999	18.1	10.5	1.20
中速引擎	Tier 0	≤ 1999	14.0	11.5	1.20
慢速引擎	Tier 1	2000~2010	17.0	10.5	1.20
中速引擎	Tier 1	2000~2010	13.0	11.5	1.20
慢速引擎	Tier 2	2011~2015	15.3	10.5	1.20
中速引擎	Tier 2	2011~2015	11.2	11.5	1.20
氣體渦輪	-	all	6.1	16.5	0.04
蒸汽渦輪	-	all	2.1	16.5	0.64
輔助引擎	Tier 0	≤ 1999	14.7	12.3	1.20
	Tier 1	2000~2010	13.0	12.3	1.20
	Tier 2	2011~2015	11.2	12.3	1.20
鍋爐	-	-	2.1	16.5	0.64

資料來源：Aldrete et al. (2013)。

表 2 含硫量 0.5%排放係數(g/kW·h)

引擎種類	期別	出廠年份	NOx	SOx	PM _{2.5}
慢速引擎	Tier 0	≤ 1999	17.0	1.9	0.35
中速引擎	Tier 0	≤ 1999	13.2	2.1	0.35
慢速引擎	Tier 1	2000~2010	16.0	1.9	0.35
中速引擎	Tier 1	2000~2010	12.2	2.1	0.35
慢速引擎	Tier 2	2011~2015	14.4	1.9	0.35
中速引擎	Tier 2	2011~2015	10.5	2.1	0.35

引擎種類	期別	出廠年份	NO _x	SO _x	PM _{2.5}
氣體渦輪	-	all	5.7	3.1	0.01
蒸氣渦輪	-	all	2.0	3.1	0.18
輔助引擎	Tier 0	≤ 1999	13.8	2.3	0.35
	Tier 1	2000~2010	12.2	2.3	0.35
	Tier 2	2011~2015	10.5	2.3	0.35
鍋爐	-	-	2.0	3.1	0.18

資料來源：Aldrete et al. (2013)。

當船舶使用不同的引擎燃油時，其污染物的排放量便會隨之變化，主要係油品含硫量的差異會造成 SO₂ 排放量不同所致；前述之主引擎、輔助引擎及鍋爐的排放係數，均為含硫量 2.7% 的重油或 0.5% 的柴油為基準，故使用低硫燃油時，需乘上燃油校正係數，如表 3 所示。

若計算時採用排放係數表中含硫量 2.7% 的係數，則切換為低硫柴油時，直接乘上校正係數表中相對應的燃油校正係數即可；以含硫量 1.0% 之計算方式為例，如 NO_x 輔助引擎 2.7% 時為 14.7，0.5% 時為 13.8，則換算 1.0% 時即為 14.4；SO_x 輔助引擎 2.7% 時為 12.3，0.5% 時為 2.3，則換算 1.0% 時即為 4.6，此時再乘上燃油校正係數之 NO_x 為 1.0，SO_x 則為 0.370，即為該船舶使用 1.0% 含硫量之排放量。

表 3 燃油校正係數

硫含量(%)	NO _x	SO _x	PM
2.70	1.00	1.000	1.00
1.00	1.00	0.370	0.73
0.50	0.94	0.185	0.25
0.10	0.94	0.037	0.17

資料來源：Aldrete et al. (2012、2013)。

一般來說，柴油引擎在低負載或非常高的負載時，其引擎效率並不好，若船舶引擎負載小於 20% 時，則上述方程式會有少許誤差，故需另外乘上一個低負載係數加以修正。EEIA(Energy and

Environmental Analysis, Inc.)在其研究報告中建置一個計算柴油引擎在低負載運轉時，例如在港區內的移動及調度時引擎的排放係數校正公式。由於柴油引擎在低負載時比較沒有效率，故雖然引擎廢氣單位時間的總排放量在低負載時較低，然而排放係數實際上卻是增加的。

為方便推估時使用，故將此公式推估出 1% ~ 20% 的值，再除以 20% 時的值，以作為低負載時的校正係數(LLA, Low-Load Adjustment foactor)，實際計算時，只要將結果再乘以校正係數即可得到正確的推估值。低負載校正係數如表 4，由於主引擎的負載下限訂為 2%，因此表中僅列出 2% ~ 20% 之間的係數。

表 4 低負載校正係數

Load	NO _x	SO _x	PM	Load	NO _x	SO _x	PM
20%	1.00	1.00	1.00	10%	1.22	1.00	1.38
19%	1.01	1.00	1.02	9%	1.27	1.00	1.48
18%	1.02	1.00	1.04	8%	1.35	1.00	1.61
17%	1.03	1.00	1.06	7%	1.45	1.00	1.79
16%	1.05	1.00	1.08	6%	1.60	1.00	2.04
15%	1.06	1.00	1.11	5%	1.83	1.00	2.44
14%	1.08	1.00	1.15	4%	2.21	1.00	3.09
13%	1.11	1.00	1.19	3%	2.92	1.00	4.33
12%	1.14	1.00	1.24	2%	4.63	1.00	7.29
11%	1.17	1.00	1.30				

資料來源：Aldrete et al. (2013)。

四、排放量比較

本研究預設船舶主引擎使用含硫量 2.7% 之 HFO 重油，輔助引擎及鍋爐則使用 0.5% 之 MDO 柴油，使用 2013 年 365 天及 2016 年 366 天之 AIS 資料，計算臺灣周遭海域船舶污染物之排放量推估。由於大部分漁船均無裝置 AIS 系統，故 AIS 排放量計算部分並未包含無 AIS 裝置之船舶載具。

4.1 船舶種類分布

若將海域船舶種類分成散裝船、貨櫃船、一般貨輪、其他、冷藏船、滾裝滾卸船、油輪、近海船、渡輪及混和船等十個船種，統計 2013 年與 2016 年 AIS 船舶每日平均的船種分布狀態，其結果如圖 1 所示。

在各船舶種類中，2013 年日平均船舶數最高的船舶種類為散裝船 828.6 艘，其次為貨櫃船 706.9 艘，第三高則為油輪 693.8 艘，各船種日平均船舶數總和則為 2,893.4 艘；2016 年日平均船舶數最高的船舶種類為散裝船 831.9 艘，與 2013 年相比船舶數增加百分比 0.4%，其次為貨櫃船 765.7 艘，船舶數百分比增加 8.3%，第三高則為油輪 746.4 艘，船舶數百分比增加 7.6%，各船種日平均船舶數總和則為 3,062.8 艘，船舶數百分比增加 5.9%。

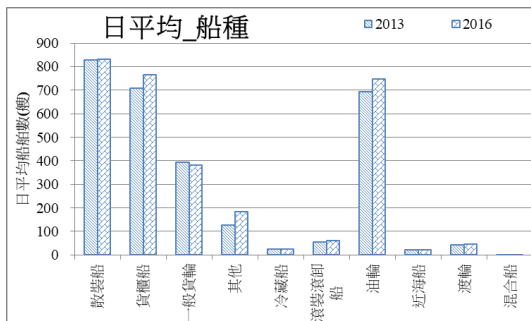


圖 1 船舶種類分布

依據洛杉磯港研究，船舶排放量公式中，船舶引擎功率為排放量計算之主要參數；而船速影響負載，航行距離則影響活動強度，皆於排放量計算式中表現其影響高低。若同前述船種分布，將船舶種類分成散裝船、貨櫃船、一般貨輪、其他、冷藏船、滾裝滾卸船、油輪、近海船、渡輪及混和船等十種，統計 2013 年與 2016 年 AIS 每日船舶的引擎

功率分布狀態，將每日各船種之引擎功率加總並平均，其結果如圖 2 所示。

2013 年日平均引擎功率最高的船舶種類為貨櫃船 19.01GW，其次為散裝船 7.88GW，第三高則為油輪 5.28GW，各船種日平均引擎功率總和則為 35.4GW；2016 年日平均引擎功率最高的船舶種類為貨櫃船 20.83GW，與 2013 年相比引擎功率百分比增加 9.6%，其次為散裝船 8.30GW，船舶數百分比增加 5.3%，第三高則為油輪 5.44GW，船舶數百分比增加 3.0%，各船種日平均引擎功率總和則為 38.2GW，引擎功率百分比增加 8.0%。

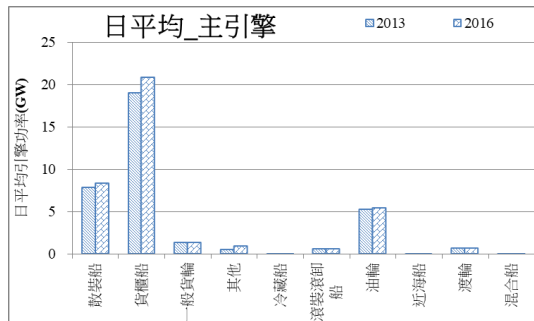


圖 2 主引擎功率分布

4.2 船舶排放量

若船舶於海上航行使用到主引擎時，使用含硫量 2.7%(HFO)之燃油，而於港區行進使用輔助引擎及鍋爐時，則使用含硫量 0.5%(MDO)之燃油，應用洛杉磯港與美國環保署報告中提供之排放係數、負載、燃油校正係數等參數，計算推估 2013 年全年船舶排放 NO_x 、 SO_x 及 PM 總排放量依序為 1,052,219 噸、675,027 噸及 95,098 噸，日平均排放量則為 2,923 噸、1,875 噸及 264 噸。2016 年資料則依序為 1,088,681 噸、705,843 噸及 99,756 噸，日平均推估排放量則為 2,997 噸、1,943 噸及 275 噸。

依照 2013 年與 2016 年排放量推估結果，統計日平均排放量，顯示 2016 年 NO_x 、 SO_x 及 PM 排放量依序增加 2.5%、3.6% 及 4.0%，如表 5，各污染物種增加之比例均未超過 5%。

表 5 日平均排放量增加百分比

	NO_x	SO_x	PM
2013 年	2923	1875	264
2016 年	2997	1943	275
增加百分比	2.5%	3.6%	4.0%

4.2.1 逐日排放量

如前述排放量計算方式，計算 2013 年臺灣海域船舶之全年每日排放量，如圖 3 所示，其中 NO_x 推估之排放量介於 798.5 ~ 5,283.3 噸之間，最高為 1 月 29 日之 5,283.3 噸，次之為 8 月 20 日之 4,928.6 噸，第三高則為 8 月 27 日之 4,805.0 噸； SO_x 推估排放量介於 460.3 ~ 3,511.2 噸之間，最高為 1 月 29 日之 3,511.2 噸，次之為 8 月 27 日之 3,179.5 噸，第三高則為 8 月 20 日之 3,160.4 噸；PM 推估排放量介於 67.7 ~ 488.6 噸之間，最高為 1 月 29 日之 488.6 噸，次之為 8 月 20 日之 447.3 噸，第三高則為 8 月 27 日之 438.2 噸。

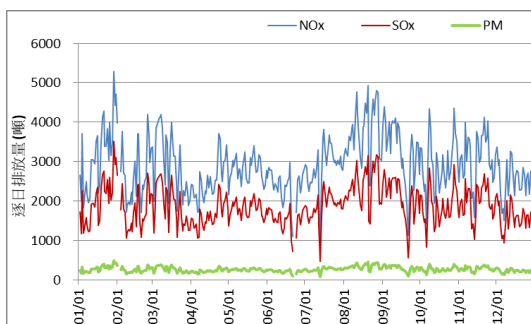


圖 3 2013 年逐日排放量變化

同 2013 年排放量計算方式，計算 2016 年臺灣海域船舶之全年每日排放

量，如圖 4 所示，其中 NO_x 推估之排放量介於 500.7 ~ 5,322.0 噸之間，最高為 11 月 17 日之 5,322.0 噸，次之為 9 月 29 日之 5,098.1 噸，第三高則為 8 月 10 日之 5,030.7 噸； SO_x 推估排放量介於 341.2 ~ 3,474.0 噸之間，最高為 11 月 17 日之 3,474.0 噸，次之為 8 月 10 日之 3,440.6 噸，第三高則為 9 月 29 日之 3,312.9 噸；PM 推估排放量介於 45.1 ~ 494.8 噸之間，最高為 11 月 17 日之 494.8 噸，次之為 9 月 29 日之 474.5 噸，第三高則為 8 月 10 日之 471.3 噸。

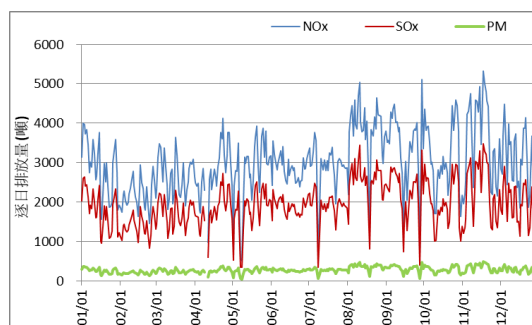


圖 4 2016 年逐日排放量變化

4.2.2 一周每日平均變化

將 2013 年 365 天中所有的星期一數值加總並平均，同理，依序加總並平均一周內每一天的數值，彙整成一周之變化並將一周排放量變化繪製如圖 5 所示。其中 NO_x 推估之排放量介於 2,688.4 ~ 3,180.7 噸之間，最高為星期二之 3,180.7 噸，次之為星期一之 3,082.3 噸，第三高則為星期日之 2,940.6 噸； SO_x 推估排放量介於 1,717.6 ~ 2,045.6 噸之間，最高為星期二之 2,045.6 噸，次之為星期一之 1,977.7 噸，第三高則為星期日之 1,885.9 噸；PM 推估排放量介於 242.5 ~ 288.3 噸之間，最高為星期二之 288.3 噸，次之為星期一之 279.0 噸，第三高則為星期日之 265.3 噸。

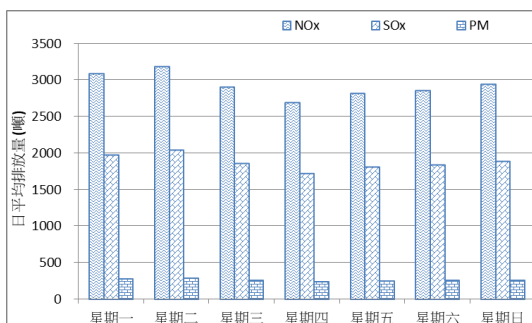


圖 5 2013 年一周逐日變化

如前述，將 2016 年一周排放量變化繪製如圖 6 所示，其中 NO_x 推估之排放量介於 2,915.4 ~ 3,074.9 噸之間，最高為星期四之 3,074.9 噸，次之為星期三之 3,067.6 噸，第三高則為星期五之 3,027.2 噸；SO_x 推估排放量介於 1,906.9 ~ 1,994.3 噸之間，最高為星期四之 1,994.3 噸，次之為星期五之 1,962.1 噸，第三高則為星期三之 1,959.2 噸；PM 推估排放量介於 267.0 ~ 281.6 噸之間，最高為星期四之 281.6 噸，次之為星期三之 279.9 噸，第三高則為星期五之 277.7 噸。

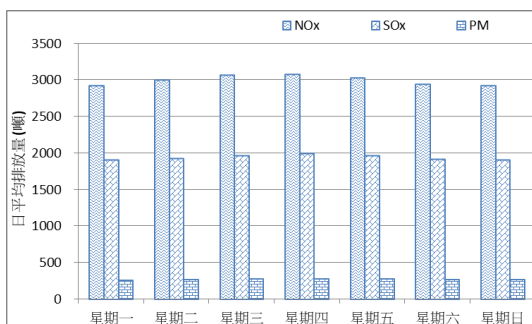


圖 6 2016 年一周逐日變化

4.2.3 逐月日平均變化

將前述兩年之船舶污染物排放量，逐月將每一個月之數值加總並平均，彙整成逐月變化，並將 2013 年逐月排放量變化繪製如圖 7 所示，其中 NO_x 推估之排放量介於 2,362.9 ~ 3,742.5 噸之間，最

高為八月之 3,742.5 噸，次之為九月之 3,241.0 噸，第三高則為一月之 3,181.8 噸；SO_x 推估排放量介於 1,520.9 ~ 2,396.8 噸之間，最高為八月之 2,396.8 噸，次之為九月之 2,066.5 噸，第三高則為一月之 2,038.2 噸；PM 推估排放量介於 212.9 ~ 336.9 噸之間，最高為八月之 336.9 噸，次之為九月之 292.0 噸，第三高則為一月之 288.3 噸。

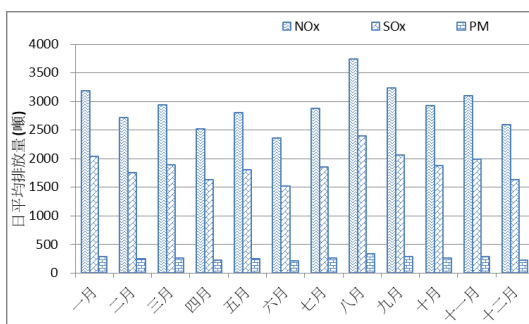


圖 7 2013 年逐月變化

如前述，將 2016 年逐月排放量變化繪製如圖 8，其中 NO_x 推估之排放量介於 2,190.8 ~ 3,786.4 噸之間，最高為八月之 3,786.4 噸，次之為十一月之 3,582.3 噸，第三高則為九月之 3,364.2 噸；SO_x 推估排放量介於 1,392.0 ~ 2,509.3 噸之間，最高為八月之 2,509.3 噸，次之為十一月之 2,311.4 噸，第三高則為九月之 2,209.8 噸；PM 推估排放量介於 198.4 ~ 352.6 噸之間，最高為八月之 352.6 噸，次之為十一月之 328.3 噸，第三高則為九月之 311.7 噸。

綜合兩年資料顯示，12 月、1 月至 7 月期間，NO_x 排放量約低於 3,000 噸，8 月至 11 月則約高於 3,000 噸，有較高之排放量，研判與周遭國家之經濟活動有相關。

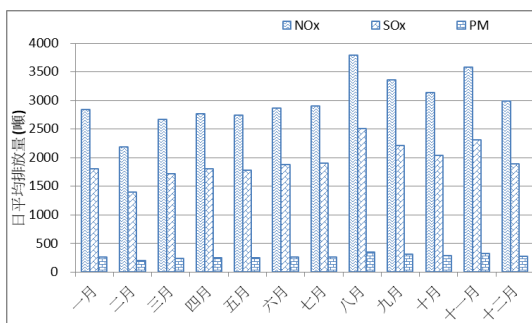


圖 8 2016 年逐月變化

五、結論

經統計 2013 年及 2016 年兩年之船舶數與引擎功率，其增加之比例總合介於 5%~10% 之間，且各污染物種排放量亦有微幅上升之趨勢，但其增加之比例卻均未超過 5%。

顯示近年來因為經濟發展因素，船舶的噸位相較於先前的船隻有越來越大的趨勢，使航行所需的引擎功率也相對的增加；雖然航行於海上的船舶數增加，但由於新船引擎的燃燒效率更好，故近年來船舶數雖然增加，但船舶污染物排放量並未隨著船舶數等比例增加。

將臺灣周遭海域船舶排放量資料搭配最新之全國空氣污染物排放清冊，建置空氣品質模式，如三維網格 CMAQ 模擬之排放源基本資料，透過排放量預測係數機制，未來將可預測空氣品質的變化情形，以因應事先預防之對策，供交通部、航港局、臺灣港務公司、環保署與縣市政府等機關參考，以改善因船舶及港區活動造成之空污影響，擬定相關長期防制對策與短期因應措施。

參考文獻

1. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2007) Port of L

os Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2005. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.

2. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Kristiansson, J., and Wells, S. (2007) Puget Sound maritime air emission inventory. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
3. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2011) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2010. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
4. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2012) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2011. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
5. Aldrete, A., Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Muller, R. (2012) 2011 PUGET SOUND MARITIME AIR EMISSIONS INVENTORY. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
6. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., and Agrawal, A. (2013) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2012. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
7. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2014) Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions for Calendar Year 2013. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
8. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015) Port of Los Angeles Inventory of

- f Air Emissions for Calendar Year 2014. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
9. Aldrete, G., Anderson, B., Ray, J., Muller, R., and Agrawal, A. (2015) Port of Los Angeles Inventory Highlights 2014. Starcrest Consulting Group, LLC, Poulsbo, WA, 98370.
 10. US EPA (2020) Methodologies for Estimating Port-Related and Goods Movement Mobile Source Emission Inventories. Office of Transportation Air Quality, EPA-420-D-20-001.
 11. 葉雨松、林清和、許真瑜(2015),「高雄港區空氣污染擴散與監測系統規畫之研究」,交通部運輸研究所,MO TC-IOT-103-HIEB002。
 12. 環保署(2019),「全國空氣污染物排放量清冊資訊系統」, https://teds.epa.gov.tw/TEDS_10_0.aspx。