

高雄港船舶污染減量措施對鄰近地區 空氣品質提昇之效益評估

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
葉雨松 螢諮科技股份有限公司協理
許真瑜 螢諮科技股份有限公司副理

摘要

本文以 AERMOD 大氣擴散模式，模擬高雄港區域內遠洋船舶對空氣品質之實際影響，並評估遠洋船舶(商船)高壓岸電、切換低硫油對鄰近港區的高雄市區可以減少多少濃度的空氣污染。模擬貨櫃中心全面實施岸電結果，濃度年平均值並未明顯降低， NO_x 及 SO_2 年均值減量均低於 1ppb，僅 NO_x 小時值減量較明顯，約 15~20ppb；旅運中心郵輪使用岸電前後的污染年均值減量極微，但使用岸電後對 NO_x 及 SO_2 的小時值及 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均值減量明顯，以 NO_x 小時值可減量 112ppb 最顯著。在假設現有船舶皆使用重油的情況下，評估全面切換低硫油後，臨港地區 SO_2 年均值約可降低 4ppb。因此，應可朝推動切油政策努力。

關鍵詞：高雄港，空氣污染，排放清冊，
AERMOD 模式模擬、高壓岸電、切油

一、前言

商港區空氣污染物排放對區域空氣品質的影響，近年來引起重視。尤其是大型商船，除了是港區主要的排放源，由於使用大型柴油引擎，並且燃燒硫含量較高的重油，排放的氮氧化物、氧化物及懸浮微粒，成為環保單位亟欲降低的污染。近年國際間主要商港推動的大型商船空氣污染減量措施，主要有：(1) 商船靠岸時使用高壓岸電，停止船舶輔助引擎(發電機)運轉(2) 鼓勵或強制將燃料由重油(平均硫含量約 2.7%)切換為柴油(硫含量 <0.5%)(3) 港區鄰近海域要求商船航行減速。其中船舶減速形成的污染減量僅發生在港外，對陸地影響較小；而岸電及切油是在港區內實施，對鄰近陸地空氣品質改善較為明顯。

前述措施在國內雖有推動，但都屬於自願配合或試驗性質，對船公司並未有實質補貼獎勵或處分規定。其中高壓岸電由於投資金額高，目前僅

有高雄港部份碼頭完成岸電建置，包括第四貨櫃中心 115-116 碼頭有 4 座岸電、第六貨櫃中心 108-111 碼頭有 6 座岸電，以及中鋼專用的 96 碼頭有 1 座。岸電設施並非商船上的標準配備，國際間僅少數港口提供商船使用岸電，高雄港已是亞洲岸電碼頭最多的國際商港。但目前高雄港的岸電碼頭，僅中鋼碼頭提供特定貨輪持續使用岸電，其餘尚未全面商轉。

高雄港鄰近有三座環保署空氣品質測站(表 1)可監測大氣中的污染物濃度。環保署評估過前述三項措施可減少的空氣污染排放量 [1]。然而空氣污染濃度的減量幅度不見得與排放量削減一致，因為污染物從排放源排到大氣後，會受到排放高度、氣流、風速、風向、溫度、濕度、地面輻射、地形等各式環境條件的影響，造成污染物擴散、稀釋、移動或沉降而改變在空氣中的實際濃度。因此本文擬以大氣擴散模式，針對港區內主要的減量措施—岸電及切換低硫油進行情境模擬，評估在這些措施施行的情境下，對高雄港鄰近地區空氣品質的改善成效。

表 1 高雄港鄰近環保署測站 2013 年平均值

測站	NO _x (ppb)	SO ₂ (ppb)	PM10 (μg/m ³)	PM2.5 (μg/m ³)
前鎮	27.5	6.39	69.5	42.1
小港	31.6	8.48	72.3	42.1
復興	31.2	6.32	71.4	35.9

二、研究方法

高雄港周遭環繞多個空氣污染來源，空氣品質監測難以釐清各污染源的影響，亦無法預測污染改善措施對降低污染濃度的成效，因此需以模式進行模擬預測。本研究使用的是 AERMOD 空氣品質擴散模式，模擬已知的污染排放量，在受地形、氣象、氣候影響的情況下，對鄰近地區污染濃度造成的增量。由於假設前提為各污染物之間沒有化學反應，因此適合於小區域範圍內的模擬(假設小範圍內污染物擴散時間不足以產生大量反應產物)，故適用於高雄港及鄰近地區的模擬。

1. AERMOD 空氣品質擴散模式

AERMOD (AERmic MODeL) 模式涵蓋複雜地形的煙流運動、地表排放、建築物的煙流下洗、都會區的擴散問題等。2005 年 11 月美國 邦法 取代 ISC3 成為美國環保署推薦的法規模式，我國環保署隨後引進臺灣，並委託學者建立台灣地區的相關參數。

使用 AERMOD 模擬污染物排放情形，需要當地之氣象資料，包含地面及探空資料。本研究地面資料採用 2014 年氣象局高雄測站，而探空資料因高雄港地區採樣資料不足，因此在模擬全年度資料時，仍以其它資料為準。目前能找到最適合高雄的探空資

料為板橋測站，同時將 2015 年 1 月及 4 月高雄港兩次採樣期間（共 6 天）之風速、風向、溫度、溼度等實測資料，替換 2014 年同時段之氣象資料。並依據張艮輝等人 (2011)[2] 所製作之土地分類之相關地表參數，將模擬範圍區分為城市及水體兩個區域，其中高雄市區域採用反照率 0.16、包溫比 0.8 及地表粗糙度 1.2；高雄港外水體區域則採用反照率 0.10、包溫比 0.2 及地表粗糙度 0.0001，藉以製作模式需要之氣象資料。

地形資料則是運用交通部運輸研究所 102 年度 UAV 攝影測量所得之地表高程資料，初始網格間距為 5m*5m，且僅包含高雄港區域，故利用內差及外差的方式修正為 100m*100m 網格，並擴展到模式模擬的高雄市區範圍。

AERMOD 模式係模擬增量，預定模擬高雄港範圍內之污染增量造成的空氣品質影響。模擬的影響範圍，約為 12 公里 × 13 公里，涵蓋整個主要高雄港區，以及高雄市主要市區之範圍。模擬時採用的排放量分佈範圍如下，此範圍之外則未計入排放量：

陸域：限定於高雄港行政管轄範圍。

海域：以 22°37'01"N, 120°15'25"E 為圓心，20 哩範圍之海域。

高雄港內排放源的位置，依據高雄港務局 (<http://kh.twport.com.tw/>) 所提供之港區總圖，可以得知高雄港內各碼頭的相關位置。將 2014 年度各碼頭停放的船隻數，依船隻數量做煙囪高度之權重平均，獲得該碼頭之船隻煙囪排放高度，而排放速度、溫度及煙囪內徑等則依照 Rich Mason(2008)[3] 等人之文獻值代入，並將各碼頭對應該年度之排放量，最後將年度模擬結果，依 NO_x、SO₂、PM10 及 PM2.5，繪製等濃度圖。

高雄港外 20 哩排放資料採用 2013 年 AIS 資料，網格間距使用 1000 m 間隔，統計該網格內之船隻資料筆數，計算網格內資料點佔港外所有資料筆數之百分比，刪除比例過低的網格，以節省模式運算時間。先選取港外佔比大於 0.0002 的網格點（資料筆數佔港外總資料筆數之 90.3%），再拿掉不屬高雄港之資料（行經高雄港 20 哩範圍但未入港之船舶），則高雄港外最後使用之資料筆數佔全部原始資料之 82.8%。模擬時，將港外區域劃分為 <3 海哩、3~5 海哩、5~10 海哩及 >10 海哩等 4 個區域。煙囪高度、排放速度、溫度及煙囪內徑等參數設定採用 Rich Mason(2008)[3] 等人之文獻值代入（如表 2）。

表 2 船舶排放模式模擬參數設定值

參數	設定值
煙囪直徑 (Stack Diameter)	0.8m (2.625 feet)
煙流速度 (Stack Velocity)	25 m/s (82.05 feet/sec)
排煙溫度 (Stack Gas Exit Temperature)	282oC (539.6 oF)
資料來源：Rich Mason, et al.,(2008)[3]	

2. 排放量及削減量推估

AERMOD 運算需輸入污染排放量，若代入負排放量則模擬結果為減量。因此可以計算出各種不同情境下的排放量，計算出與現有排放量的差值，代入模式模擬，即可得出該情境下空氣中的污染濃度減量情形。推估方式依據「港區溫室氣體及空氣污染排放量調查作業手冊」2.0 版(2015)[4]。

遠洋船舶上的空氣污染來源包括主引擎、輔助引擎及鍋爐，每艘船都需分別推估排放量。在大海上行駛時，僅開啟主引擎，除提供船舶前進動力外，可同時供電與供熱。進港停泊後，主引擎關閉，因此需開啟輔助引擎及鍋爐，作為船上的電源及熱源，一般在進港前就會先開啟。因此推估排放量時，分為三個部份：港外時及調度（港內行駛）期間的主引擎、輔助引擎、調度及停泊期間的鍋爐排放量。

排放量估算的基本公式為：

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

其中，E：指引擎的排放量（此處單位為公克，統計時轉換為公噸）。

Energy：指所需要的能量，以 kW · h 表示。

EF：排放係數，以 g/kW · h 表示。

FCF：燃料校正係數。

其中能量需求項與各港口的實際運作有相當大的關聯性，它可以由以下公式計算：

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

其中，MCR：指最大引擎動力，以 kW 表示。

LF：指負載係數，無單位。

Act：指活動量，以小時數表示。

計算港外時依據 AIS 的時間紀錄，港內則依據高雄港提供的船舶動態資料中之時間計算。

1. 主引擎

船舶負載資料與船舶行進速度有密切關聯性，一般在 20%~80% 的負載時，可估計為實際船速與最大船速比值的 3 次方值 (Propeller Law)：

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

其中：AS 為實際船速，MS 為最大船速，單位均為節。實際船速可由臺灣海域船舶動態資訊系統的 AIS 資料獲得，最大船速則查詢勞氏船籍資料，或以同類型船舶平均值給定。活動強度指船舶航行的小時數，亦由 AIS 資料獲得。主引擎排放係數參考

洛杉磯港使用之係數 [5]。當負載小於 20% 時 (主要為調度期間)，上述方程式會有誤差，需另乘上低負載調整因子，修正方式詳見文獻 [4-5]。

2. 輔助引擎

輔助引擎與主引擎排放量推估方法大致相同，僅操作時數與相關係數取得方式有異，排放係數亦參考文獻 [4-5]。船舶註冊資料中僅少數登記輔助引擎資料，故需由文獻中各類船型的輔助引擎馬力與年份的平均值，作為無資料船舶的預設值。而輔助引擎的活動量是以船舶的航行、調度加上停泊的時間作為其活動量係數。負載因子則需要由文獻中查得一般船舶柴油引擎的操作負荷。

3. 鍋爐

船舶註冊資料完全未登錄鍋爐資料，因此根據文獻中 [4-5] 的排放係數及能量消耗預設值來推估其排放量。

三、結果與討論

研究設定的情境有三，包括貨櫃碼頭全面使用岸電、未來設置旅運中心後的郵輪碼頭使用岸電前後、以及在離港不同距離切換低硫油。分別計算出各情境下的空氣污染排放量減量，再以模式模擬後，繪成濃度減量的等量線圖與圖 1~ 圖 5，圖中 Δ 表示環保署測站位置，說明如下。

1. 貨櫃碼頭岸電

假設高雄港所有貨櫃碼頭皆裝設岸電設施，所有靠港貨櫃輪皆使用岸電的情況下，靠岸期間輔助引擎排放量皆降至 0，僅剩鍋爐的排放量，設定此狀態為貨櫃輪使用岸電之最大可能減量，並依據 2013 年船舶進出資料計算各污染物之減量 (表 3)，分析結果繪成圖 1 及圖 2。

圖 1 是年均值削減量，環保署所在測站範圍的減量， NO_x 約在 0.5~1.0

表 3 貨櫃輪全面使用岸電之減量推估

單位：公噸 / 年

貨櫃中心	碼頭	NO_x	SO_2	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$
第 1 貨櫃中心	#42~#43	22.6	22.6	2.8	2.2
第 2 貨櫃中心	#63~#66	230.6	220.4	26.9	21.5
第 3 貨櫃中心	#68~#70	147.1	142.1	17.3	13.9
第 4 貨櫃中心	#115 ~ #122	223.1	207.8	25.3	20.3
第 5 貨櫃中心	#75 ~ #81	326.9	306.4	37.4	29.9
第 6 貨櫃中心	#108~#110	123.3	119.5	14.6	11.7
合計		1,073.6	1,018.7	124.2	99.4

ppb， SO_2 約在 0.3~0.6 ppb，而 $\text{PM}_{2.5}$ 以及 PM_{10} 減量濃度皆在 $0.1\sim0.2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間，與測站的年均值(表 1)相較，佔比很小。

圖 2 顯示短時間內(日均值或小時值)之影響。於環保署所在測站範圍內， NO_x 的小時值最大濃度減量約在 15~20ppb， SO_2 約在 8~12 ppb；而 $\text{PM}_{2.5}$ 的 24 小時值減量濃度在 $0.6\sim0.9\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間， PM_{10} 在 $0.8\sim1.2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間。顯示即使是短時間的影響， $\text{PM}_{2.5}$

及 PM_{10} 還是很小，僅 NO_x 及 SO_2 較顯著。

2. 郵輪碼頭(旅運中心)

郵輪部分，根據高雄港到港郵輪統計 2009 年~2014 年，加上 2015 年預報船舶 52 艘的預定時間，統計出每次平均停泊時間為 9.4 小時。以 POLA 建議 [5] 的郵輪靠泊時輔助引擎負載功率 5,104 kW，鍋爐負載功率 1,393kW 進行排放量推估，結果一併列於表 4

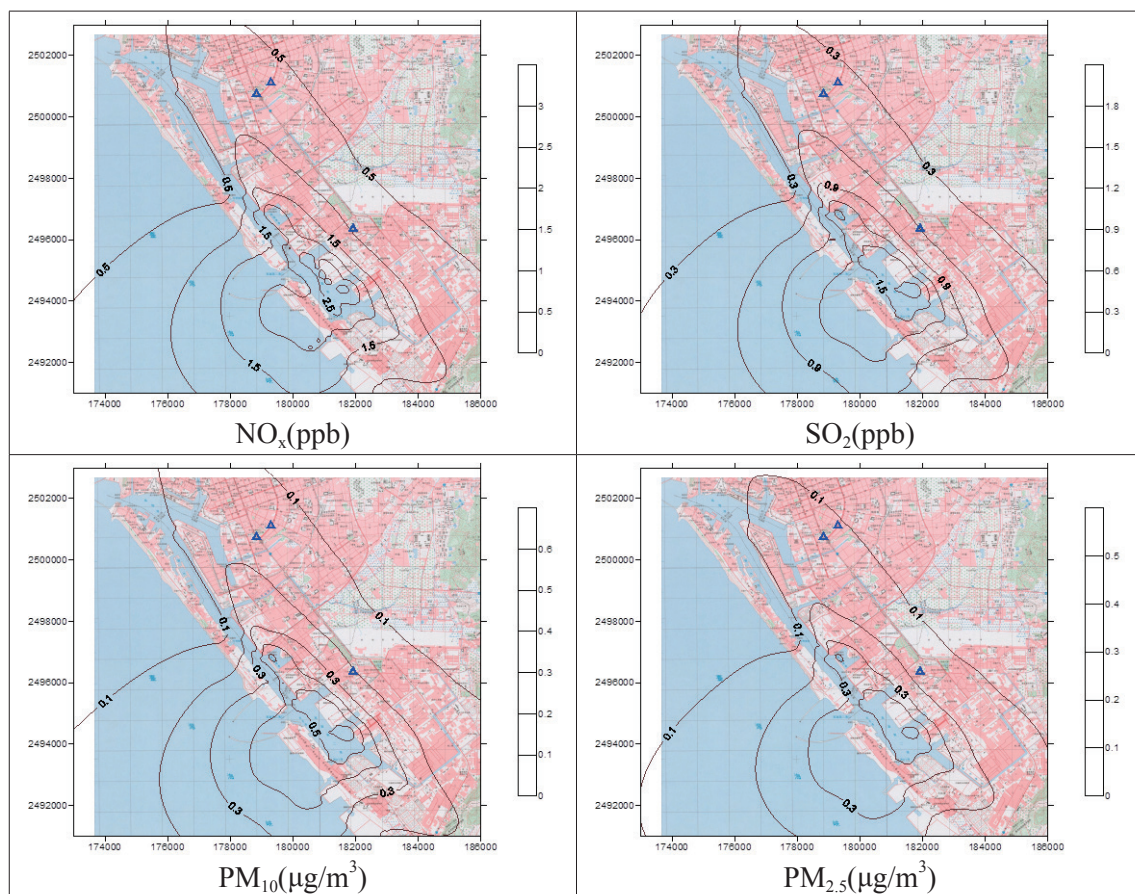


圖 1 高雄港貨櫃中心全面使用岸電後模擬結果(年均濃度削減)

中。使用岸電後，輔助引擎可以全部關閉，因此表中郵輪的排放量相當於僅剩鍋爐的排放量。

郵輪所在地的旅運中心尚未建置，因此分別模擬使用岸電與未使用岸電情形下，污染增量的情形。若以

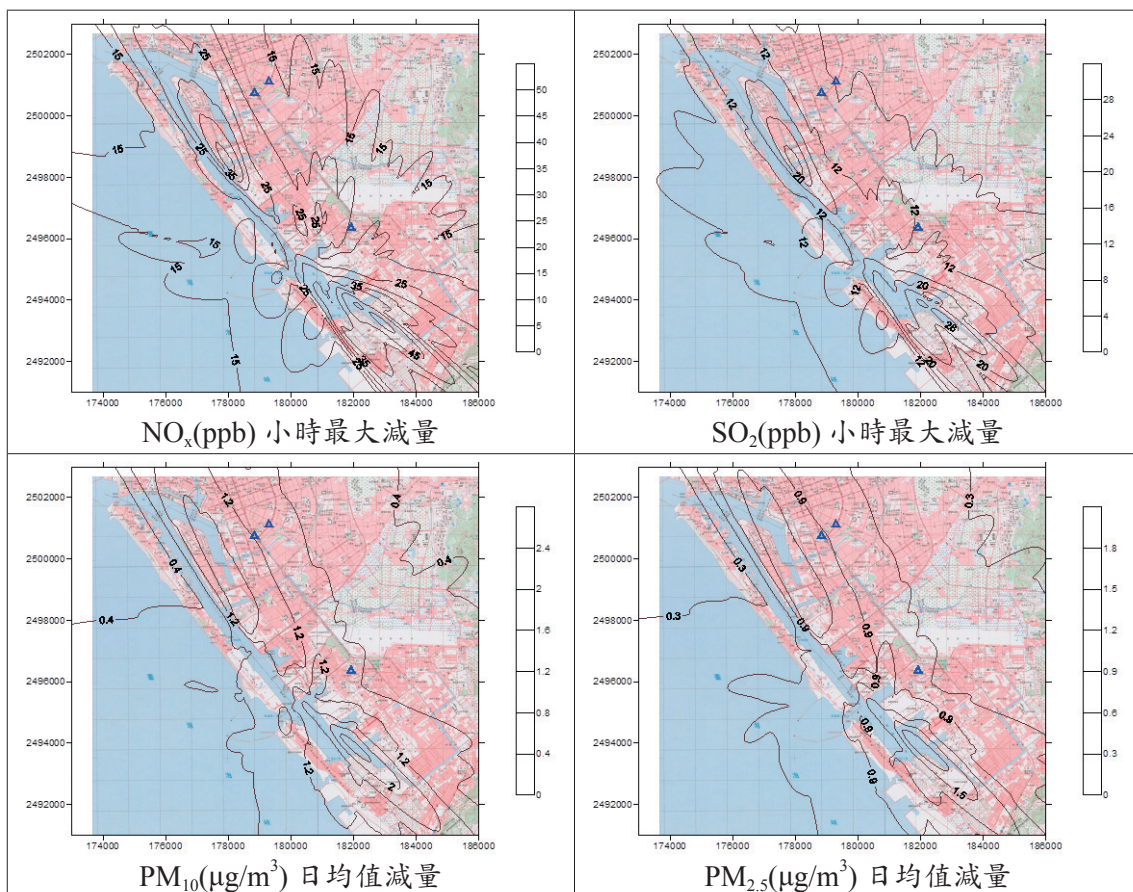


圖 2 高雄港貨櫃中心全面使用岸電後模擬結果 (日 / 小時)

表 4 郵輪岸電前後之污染排放量推估

設定情境	進港 郵輪數	停留 時數 (h)	NO _x (公噸 / 年)	SO ₂ (公噸 / 年)	PM ₁₀ (公噸 / 年)	PM _{2.5} (公噸 / 年)	位置
沒有使用 岸電之 排放量	50	470	32.56	40.31	4.12	3.30	22°17'33.3"N, 120°36'38.7"E
	100	940	65.12	80.62	8.24	6.60	
	150	1410	97.68	120.93	12.37	9.89	
全部使用 岸電之 排放量	50	470	1.37	10.80	0.52	0.42	
	100	940	2.75	21.61	1.05	0.84	
	150	1410	4.12	32.41	1.57	1.26	

年到港 50 艘次郵輪計，使用岸電後，高雄港區一年可以減少 31.19 公噸 NO_x ，29.51 公噸 SO_2 ，3.60 公噸 PM_{10}

或 2.88 公噸 $\text{PM}_{2.5}$ 。旅運中心 18~20 號碼頭預定設置 2 座郵輪碼頭，因此設定年到港艘次達 150 艘郵輪的情形，

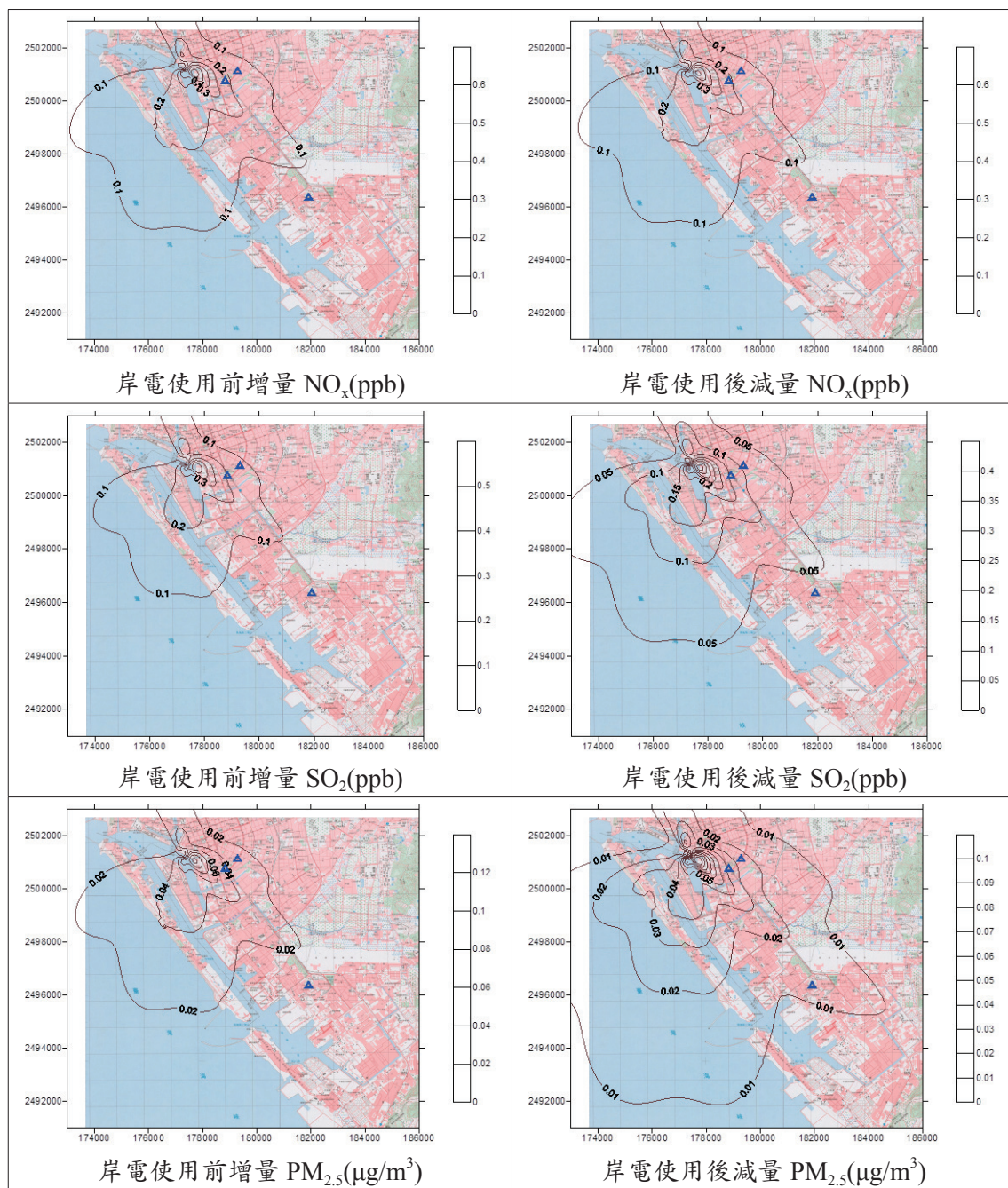


圖 3 旅運中心岸電使用前後年均濃度增量模擬情形 (150 艘 / 年)

並挑選排放量最大的 NO_x 、 SO_2 ，以方便比較。

模擬結果，旅運中心設置後在未

使用岸電的情況下， NO_x 及 SO_2 在碼頭以外地區的年平均增量都在 1ppb 以下， $\text{PM}_{2.5}$ 增量約在 $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下（圖

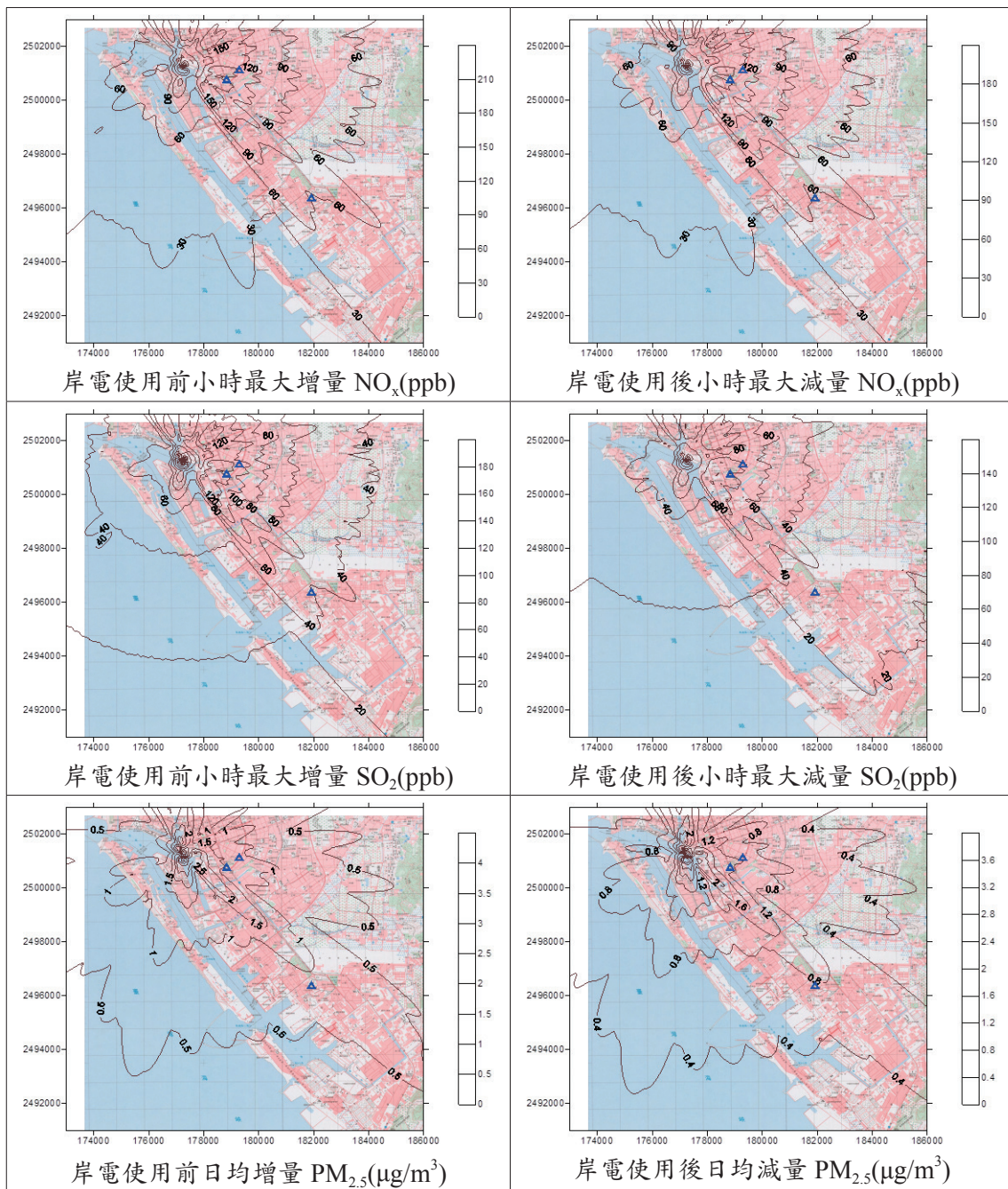


圖 4 旅運中心岸電使用前後短期濃度增量模擬情形 (150 艘 / 年)

3)，因此使用岸電後可以減少的量也在此水準以下。

若模擬日或小時等短時間的影響，則較為明顯(圖4)。在鄰近碼頭的市區部份(中華四路~成功一路範圍)， NO_x 小時最大增量可以高達150ppb， SO_2 可達120ppb， $\text{PM}_{2.5}$ 的日增量則可以達到 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上。使用岸電後，環保署測站範圍內， NO_x 小時最大減量約在60~150ppb， SO_2 約在20~80 ppb，而 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均值減量濃度在 $0.8\sim 1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之間。 NO_x 降幅較大的原因，是使用岸電後，郵輪僅開啟鍋爐供熱，而鍋爐的 NO_x 排放量較低；但因未使用低硫油，所以 SO_2 排放仍高。

因此就本研究模式模擬結果，郵輪碼頭開通後，因為增加的排放量有限，因此對鄰近地區的年平均污染濃度未見明顯的影響，使用岸電也未有明顯減量效益；但在郵輪靠泊的期間，鄰近地區的小時(日)平均污染濃度則會明顯增加，使用岸電的效益較明顯。

3. 切換低硫油

切換低硫油的減量推估是將各污染102年的遠洋船舶年度排放量，再乘上燃油校正係數。原推估所使用的排放係數是假設使用重油，硫含量為2.7%；切油後使用柴油，硫含量降為0.5%，因此各污染物需再乘上修正係數，結果列於表5中。表中分別列出

以20海浬、10海浬、5海浬、3海浬為切油點的情境，再加上進港後才需切油的狀況，依據AIS的經緯度資料區分出各種不同階段的排放量。從表中可以看出，若在20海浬即切油，則每年 NO_x 可以降低598公噸， SO_2 可以降低10,726公噸， PM_{10} 可以降低1,130公噸， $\text{PM}_{2.5}$ 降低905公噸。若要求進港後才切油，則 NO_x 減量僅有250公噸，為20海浬內切油的41.8%；但是 SO_2 在港內切油的削減量即可達8,843公噸，比例已達20海浬即切油的82.4%。就管制角度而言，20海浬範圍內仍有可能是路過而為入港的船舶，不易管制；但入港後航港局可以隨時上船檢查，而且遠洋船舶排放最大的污染物 SO_2 已可降低絕大部分，限制入港後需切油為最單純的管制作法。

AERMOD 模擬結果，切油後，不論是在20海浬還是在3海浬切油，高雄港東岸陸地臨港部分 SO_2 都可以有4ppb以上的降幅(圖5)，相對於這個地區的測站 SO_2 年平均僅有約10ppb，此為相當大的降幅。船舶在20海浬或3海浬時切油，對港外污染濃度的影響差異較明顯，但是對陸上地區的影響大致相同，主要是因為原本的排放量超過80%集中在港內，加上緊鄰陸地，因此陸上受港內排放影響大，受港外影響小。

表 5 高雄港推動船舶切換低硫燃油減量推估

單位：公噸／年

切油情境	NO _x	SO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
港內	250	8,843	557	446
<3 海浬	310	9,190	661	529
<5 海浬	409	9,709	834	667
<10 海浬	590	10,674	1,118	894
<20 海浬	598	10,726	1,130	905

目前石油輸出國組織為了保持市場佔有率以對抗美國的油頁岩，持續維持原油生產量；且伊朗禁運解禁，生產的原油亦將投入國際市場，現有原油存量持續增加。加上目前全球經濟趨緩，供應量明顯大於需求量，估計現有存量，仍要數年才能消化，因此低油價必將持續。此時切換低硫油進港，對航商而言，增加的成本較少（目前低硫油的價格約為先前高硫的重油之價格），應為推動的好時機。

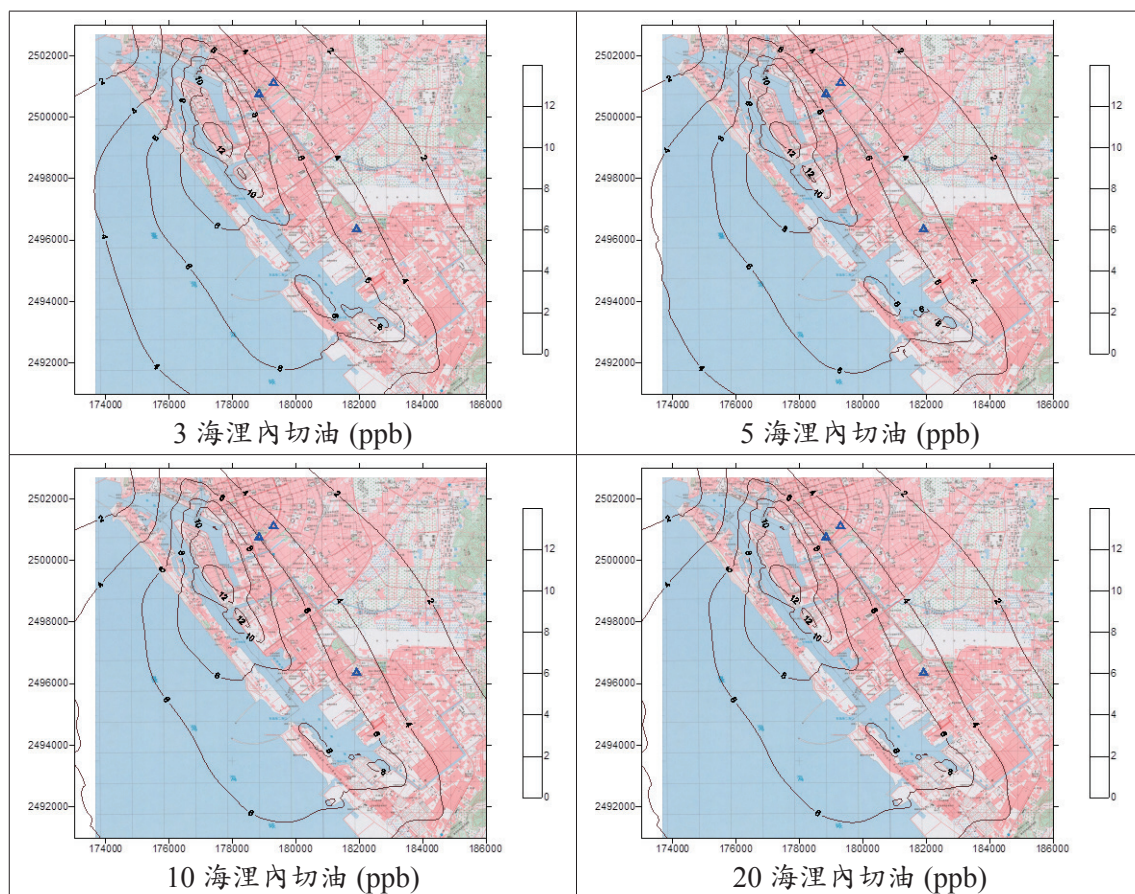


圖 5 切油後 SO₂ 濃度削減模擬情形 (年均值)

四、結論與建議

根據本研究模式模擬顯示，高雄港區大規模設置與推廣貨櫃輪使用岸電，對改善陸上民宅集中地區的空氣品質效益並不顯著。旅運中心設置郵輪碼頭後，對鄰近住宅密集地區 NO_x 及 SO_2 年平均增量皆小於 1ppb， $\text{PM}_{2.5}$ 小於 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，因此設置岸電亦沒有明顯改善效益。但 NO_x 及 SO_2 產生的最大小時值皆超過 120ppb，佔小時平均值標準的一半 (250ppb)，影響顯著；而使用岸電後對 NO_x 及 SO_2 小時值的減量非常明顯， $\text{PM}_{2.5}$ 的日均值增量則可以由 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 降到 $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下。

若所有遠洋船舶皆使用重油，則切換低硫油後，陸上鄰近高雄港的環保署測站 SO_2 年均值可再降低約 4ppb 的 (現年均值約 10ppb)。但因目前已有部份船舶進港時會切油，此部份切油效果應已反應在實際測值上，因此可再降低的空間實際低於 4ppb。

以船舶在 20 海浬開始切換低硫油估算，港內的 SO_2 削減量即佔了 82.4%。由於港外僅佔 17.6%，且離陸地較遠，因此設定從不同距離切油的情境模擬結果中，陸上 SO_2 濃度降低的幅度皆與進港後才切油沒有顯著差異。

由於岸電效益評估並不顯著，建議現階段可先暫停擴充貨櫃碼頭之岸

電設施，而在各碼頭翻修或新建時先預留未來鋪設岸電管路的空間，視國際間發展趨勢，再於適當時機擴大陸上的岸電建設。現有岸電設施則以提高使用率，建立岸電使用經驗為首要。

郵輪停靠時會造成瞬間的空氣污染高峰值，岸電能有效減少短時間內的污染濃度增量，且鄰近市區，建議仍應推動設置郵輪碼頭岸電。

依據國外經驗，成功的岸電推動有幾種方式：法規強制、政府補貼、定點定時運輸船舶使用岸電。定點定時運輸船舶數量有限，在不以法規強制的情況下，建議利用補貼，使岸電費率接近燃油發電成本。

然而因目前油價處於近年來新低點，使用岸電與燃油的價差擴大，不利推動岸電，但卻是推動切油的好時機。與二年前相較，目前柴油的油價約相當於當時的重油油價。中國大陸 2016 年擬推船舶排放控制區，兩岸應共同推動船舶排放控制區，限制於控制區內僅可使用低硫含量柴油。

致謝

本文係「高雄港區空氣污染擴散與監測規劃之研究」的部份成果，承蒙臺灣港務公司高雄港務分公司補助經費及提供相關資料，使本研究得以順利完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. 行政院環境保護署，「港區空氣污染物減量策略推動與成效評估計畫」期末報告，民國 102 年。
2. 張艮輝、張能復等，「空氣品質模式技術及對策支援計畫(二)」，行政院環保署(EPA-998-FA11-03-A079)，2011
3. Rich Mason, et al., “Emissions Processing and Sensitivity Air Quality Modeling of Category 3 : Commercial Marine Vessel Emissions”, 17th Annual International Emission Inventory Conference "Inventory Evolution - Portal to Improved Air Quality" ,(2008)(<http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei17/session6/mason.pdf>)
4. 「港區溫室氣體及空氣污染排放量調查作業手冊」2.0 版，交通部運輸研究所，民國 104 年 7 月
5. Port of Los Angeles(POLA),“ Port of Los Angeles Inventory of Air Emissions 2012”(2013).