

# 利用 LANDSAT 和 NOAA 衛星遙測電廠 溫排水口附近海面溫度之研究

莊弘豪\* 曾若玄\*\*

## 摘 要

本研究利用 Landsat 衛星觀測電廠溫排水口附近海面溫度分佈情形，並應用兩種不同的方法修正因大氣吸收所產生的觀測誤差，再與實測水溫結果比較，研究地點主要在興達電廠溫排水口附近海域。研究結果顯示利用 Lowtran7 軟體求出大氣透射率及輻射量再配合大氣校正法可大幅提升 Landsat-TM 對海面溫度量測的準確度，未作大氣校正前所求出的海面亮度溫度與現場量測的海面溫度相差  $7^{\circ}\text{C}$  以上，經過大氣修正後準確度可提高至  $0.94^{\circ}\text{C}$ ；另外，本研究亦提出一利用 NOAA-AVHRR 校正 Landsat-TM 的方法，此法結合 NOAA-AVHRR 對海面溫度量測的高準確性及 Landsat-TM 的高解析度特性，而不須經過大氣校正過程，此法所求出之海面溫度與現場實測溫度比較，準確度達  $1.01^{\circ}\text{C}$ ；曾文溪口附近海域的海面溫度實測值亦被用來與衛星資料比較，準確度更高達  $0.62^{\circ}\text{C}$ 。由興達電廠溫排水口附近海域的實測值資料可知溫水擴散方向與當地潮流有密切關係，且有季節性的擴散特性。

**關鍵詞：**海面溫度、大氣修正、大地衛星

## 1. 前 言

海水表面溫度 ( *Sea Surface Temperature, SST* ) 是地球環境一個相當重要的參數，它被應用於大氣科學及物理海洋學方面，如大氣與海洋的熱收支問題、海洋和大氣的交互作用、長或短時間尺度的氣候變化等，亦是天氣預報模式、海洋環流模式所不可或缺的基本資料。在生物海洋學方面，海面溫度資料也被應用於漁訊預測及浮游生物分佈等。此外，海洋環境的保護日受重視，各種人為汙染不當的排入海中，是否會破壞海

\* 國立中山大學海洋資源學系碩士

\*\* 國立中山大學海洋資源學系副教授

收到日期：87.3.2

修正日期：87.4.28

接受日期：87.5.7

洋生態，必須要適當的監控評估，如電廠的溫排水即是一例，而我們可從海面溫度的觀測來瞭解溫排水的擴散情形。

傳統的海面溫度資料多來自船舶航線附帶量測水溫、浮標攜帶水溫計、及 CTD 定點量測等方式，此類方法較耗費人力器材，且觀測的資料多只是侷限於特定時間及有限測點的量測值，若考慮量測法不同，則所得的量測值亦不同，如汲水量溫度、量機艙入水口溫度、拖帶自記式溫度計量溫度等所量得的溫度值必有差別。利用衛星遙測技術求取海面溫度，可突破傳統量測上時間與空間的限制，因為衛星於高空觀測，可在短時間內觀測大範圍的區域。就 NOAA 系列衛星而言，可掃描的像幅寬是 2530km，從赤道到極區只要約 25 分鐘。

本研究以 NOAA 衛星與 Landsat 衛星資料來分析海表面溫度，其中 NOAA 系列衛星所裝載的極高解像度輻射儀 (Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR) 具有五個接收頻道，其中第一、二頻道分別是可見光 ( $0.58-0.68\mu\text{m}$ ) 與近紅外光 ( $0.725-1.10\mu\text{m}$ )，第三、四、五頻道則為熱紅外光波段 ( $3.55-3.93\mu\text{m}$ ,  $10.3-11.3\mu\text{m}$ ,  $11.5-12.5\mu\text{m}$ )，利用其具有兩個頻道以上熱紅外光的特性，再配合多頻道大氣修正所推衍出來的反演公式求出海水表面溫度，其解析度最佳為  $1.1 \times 1.1$  公里，適用於大範圍海域海表溫度之觀測，若作為沿岸（海陸交界）小區域的溫度觀測如電廠溫排水之監測，則嫌不足，但其所具的最大優點便是衛星通過同一地區的次數頻繁（每天兩次），可提供較多的觀測資料；Landsat 所搭載的主題測繪儀 (Thematic Mapper, TM) 具七個不同波段的頻道，其中六個為可見光 ( $0.45 \sim 0.69\mu\text{m}$ ) 到近紅外光 ( $0.76 \sim 2.35\mu\text{m}$ ) 頻道，地面解析度為  $30 \times 30$  公尺，第七個（一般稱第六頻道）為熱紅外光頻道，其波長範圍為  $10.5 \sim 12.5\mu\text{m}$ ，地面解析度為  $120 \times 120$  公尺，其較高解析度可彌補 NOAA-AVHRR 之不足，對於小範圍的溫排水分佈可予以分辨監測，唯其僅具單頻道紅外線波段，無法適用多頻道大氣修正，必須藉由外界資料（如大氣資料或現場溫度資料）才能予以準確的溫度校正。

利用衛星遙測海面溫度已有 30 幾年的歷史，在眾多衛星量測法中較成熟及普遍的是利用 NOAA-AVHRR 多頻道特性配合多頻道大氣修正所推衍出來的反演公式，可讓 AVHRR 測得之海面溫度誤差在  $1^\circ\text{C}$  以下 (McMillin and Crosby, 1984; Bates and Diaz, 1991; Steyn-Ross et al., 1993)，但其反演公式是依當時當地的大氣結構、氣候條件等因素歸納推導出來的，所以理論上有“地區性”的限制。陳 (1986) 曾利用台灣地區的天氣資料，推導出適合台灣附近海域推算海表面溫度的反演公式，誤差值也在  $1^\circ\text{C}$  以下。

有關 Landsat-TM 的研究方面，Gibbons and Wukelic (1989) 利用 Landsat-TM 來觀測電廠的溫排水，其乃利用大氣校正法推算電廠溫排水口附近海表面溫度，所得的結果溫差為  $0.6^\circ\text{C}$  以內；國內 Liu and Kuo (1994) 也曾利用 Landsat-TM 觀測核三廠溫排水口之溫度分佈，配合大氣校正的方法推算海表面溫度，結果平均溫差為  $1.3^\circ\text{C}$ ；亦有其他人用此衛星來觀測湖泊、河口及海灣的溫度分佈 (Ritchie et al., 1990；



Lathrop and Lillesand, 1986)，他們是利用量取現場溫度資料與衛星灰階值或亮度溫度來迴歸，再以迴歸式校準衛星遙測溫度，結果都在  $1^{\circ}\text{C}$  誤差以內。

近年來利用結合兩種輻射計來作遙測的研究越來越多，Pereira and Setzer (1996) 利用 NOAA-AVHRR 及 Landsat-TM 偵測地面的森林大火，比較兩衛星之結果，並求出迴歸關係，以利於長期監測；Lyon et al. (1988) 亦結合 NOAA-AVHRR 及 Landsat-TM，應用在懸浮物濃度的偵測上，其結合衛星資料、現場實測與水流動力模型，並比較結果；在海表面溫度量測方面，Arbelo et al. (1996) 利用新裝設在 NOAA 衛星上的 TOVS 感應器結合 AVHRR 來遙測海表面溫度，其優點是 TOVS 可提供同步的大氣剖面資料，提高量測的準確度。

本研究的目的是想利用 Landsat-TM 的優點來觀測電廠溫排水口附近海表面溫度分佈，一方面參考國內外學者曾使用的方法（大氣校正法），另一方面則針對目前結合不同衛星遙測的趨勢，想利用 NOAA-AVHRR 的高準確度配合 Landsat-TM 的高解析度，發展一套不須經過大氣校正及現場實測溫度迴歸就能得到準確且高解析度的溫度分佈之方法。若此方法能成功使用，將可大大減少人、物資源的浪費，且簡化資料蒐集及處理的複雜性。

## 2. 基礎理論回顧

衛星量測海面溫度之原理是利用輻射計接收海面向上的輻射量，再反算衛星接收的輻射量而得海面溫度，但是當輻射通過大氣層到達衛星時，大氣中的水汽、臭氧及氣溶膠等分子會對輻射量有吸收及散射的作用，故衛星真正接收到的輻射量已非真正海面的輻射量，必須將大氣的吸收及散射的效應考慮進去才可得到較準確的海面溫度估測值。

### 2.1 大氣的吸收

在  $3 \sim 14\mu\text{m}$  波段的紅外光，大氣可能會吸收其輻射量並再以不同的波長釋放，不同的氣體分子有其不同波長的吸收特性，主要的吸收氣體有水汽、臭氧和二氧化碳等，而其中的水汽佔絕大部份。綜合全部吸收的結果，大致可找到  $3 \sim 5\mu\text{m}$ 、 $7 \sim 8\mu\text{m}$ 、 $9.5 \sim 13\mu\text{m}$  三個大氣“窗區”（atmospheric windows），被大氣的吸收量最少，但透射率也無法達 100%，所以我們利用紅外光偵測到的亮度溫度會比真正溫度低。NOAA-AVHRR 所使用的三個熱紅外光頻道分別為  $3.7\mu\text{m}$ 、 $11\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ ，其中  $3.7\mu\text{m}$  所受的大氣影響最小，但卻會受白天太陽光反射的影響，所以  $11\mu\text{m}$  與  $12\mu\text{m}$  兩頻道較常被使用來推算 SST。

### 2.2 大氣校正

窗區頻道輻射計所觀測到的亮度溫度，並不是視場內輻射表面（如海面）的溫度。

由於輻射表面和衛星間大氣的削弱作用，亮度溫度和輻射表面溫度有一定的差異。大氣校正就是對觀測到的亮度溫度中受大氣削弱的部份加以訂正，以期得到輻射表面真正的溫度。

### 2.2.1 單頻道大氣校正

紅外線傳遞方程式（曾，1988）：

$$I_v = B_v(T_s)\tau_s + \int_{\tau_s}^1 B_v(T_p)d\tau_p \quad (1)$$

其中  $I_v$  為輻射強度， $B_v$  為普朗克函數， $T_s$  為地面溫度， $\tau_s$  為地面到衛星間之大氣穿透率， $T_p$  和  $\tau_p$  分別為壓力  $p$  之下的溫度及大氣穿透率。將(1)式數值化如下形式：

$$\begin{aligned} I_v &= B_v(T_s)\tau_s + \sum_{i=1}^n B_v(T_i)\Delta\tau_i \\ &= B_v(T_s)\tau_s + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}[B_v(T_i) + B_v(T_{i+1})](\tau_i - \tau_{i+1}) \end{aligned} \quad (2)$$

$i=1, \dots, n$  為整個大氣之層數

若(2)式中之大氣溫度剖面及穿透率剖面已知，則可求得表面溫度：

$$T_s = B_v^{-1} \left[ \left[ I_v - \sum_{i=1}^n \frac{1}{2}[B_v(T_i) + B_v(T_{i+1})](\tau_i - \tau_{i+1}) \right] / \tau_s \right] \quad (3)$$

(3)式所得之表面溫度  $T_s$  為經過大氣校正之表面溫度。

### 2.2.2 多頻道大氣校正

NOAA-AVHRR 具有兩個以上的熱紅外光頻道，其溫度估算公式是由多頻道大氣校正方法所推演出來，多頻道之大氣校正法亦由單頻道推演而來。利用(2)式可推衍出多頻道的溫度推算公式如下（McMillin, 1975；McMillin and Crosby, 1984）：

$$T_s - T_1 = a_0 + a_1(T_1 - T_2) + a_2(T_1 - T_2)^2 + \dots \quad (4)$$

再利用大量的  $(T_1 - T_2)$  及  $T_s$  資料，迴歸出係數即可得到一溫度推演公式，即為一般常見的多窗區頻道的溫度推算公式。

## 3. 現場實測與衛星資料取得

### 3.1 現場實測資料



本研究主要地點在興達火力發電廠溫排水口附近海域（圖 1）。共有四次現場實測資料，日期分別是民國 85 年 6 月 27 日、85 年 11 月 18 日、85 年 12 月 4 日、86 年 1 月 5 日，皆是於 *Landsat* 衛星通過時僱用漁船作現場水溫測量，測量時間在上午 8:50 至 10:50，衛星通過台灣上空的時間約在上午 9:20 至 9:40。在現場實測方面是以 CTD 量測海面下 1 公尺以內的溫度值，儀器誤差為  $\pm 0.01$  °C，量測點以 DGPS 定位，其誤差在 3 公尺以內。由於天候及 *Landsat* 衛星接收問題等因素影響，僅取得 85 年 6 月 27 日的 *Landsat* 衛星資料可與現場實測溫度比較。

另外為瞭解 NOAA-AVHRR 對海表面溫度遙測的準確度，特利用多次海研三號及一次海研一號例行航次量取海面溫度資料（表 1），海研三號航次的量測區域多分佈在臺灣西南海域，海研一號航次則達南海海域。方法是以自記式水溫計直接量取船底抽水馬達所抽出的海水溫度，溫度計準確度為 0.025 °C。又在 85/08/30（C232）、85/10/21（C253）、85/11/23（C269）等海研三號航次利用水桶汲水量取海面溫度，用以校準抽水馬達水溫的誤差。

由於考慮興達電廠的 *Landsat* 衛星及現場資料略不足，特利用 85 年 6 月 11 日在曾文溪河口附近海域所量測的海面溫度資料（中山大學海地化所劉祖乾教授所提供），與當天 *Landsat* 衛星資料比較。其量測與定位皆與興達外海所用的方法相同，測點分佈於曾文溪口周圍海域，共 21 個測點。

### 3.2 衛星影像資料

*Landsat-TM* 衛星影像資料來自中央大學太空暨遙測研究中心，取得 level 10 之  $25m \times 25m$  解析度資料，但經過重新取樣（*resample*）。本研究只取興達電廠溫排水口附近海域  $70 \times 70$  像元的區域分析，本實驗共使用包含興達電廠範圍（85 年 6 月 27 日及 85 年 12 月 20 日）及曾文溪口範圍（85 年 6 月 11 日）的三張衛星影像資料。

NOAA-AVHRR 的影像資料，取自中山大學海洋資源學系與臺大海研所共同設立之 NOAA/HRPT（*High Resolution Picture Transmission*）衛星接收站。此接收站目前接收 NOAA-14 及 NOAA-12 的 HRPT 資料，每個衛星每天可拍攝同一地點的資料 2 ~ 4 次，本接收站可接收的影像範圍最北可達渤海灣及遼東半島，最南可達赤道，西可達泰國西岸，東到 135°E。

### 3.3 探空資料

探空資料係向空軍東港探空站所取得，包含從地面到 24 公里高空的 19 層壓力、氣溫、露點溫度等資料。

## 4. 資料處理過程

### 4.1 Landsat-TM 資料處理過程

大氣校正法流程說明如下：

- (1) 將衛星影像定位，賦於影像上每個像元 ( *pixel* ) 經緯座標。
- (2) 選取興達港附近海域  $70 \times 70$  個像元的範圍作分析。
- (3) 將該範圍之 *Landsat-5 TM* 第六頻道的灰階值 ( *digital count* ) 從影像資料出來，代入以下(5)式與(6)式 ( *Schott and Volchok, 1985* ; *Gibbons and Wukelic, 1989* )，可算出未經大氣校正的輻射量及溫度。

$$R_u = \alpha (DN) + \beta \quad (5)$$

$R_u$  : 衛星量測的輻射強度值  $mW\ cm^{-2}\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$

$DN$  : 灰階值

$\alpha$  :  $0.005632\ mW\ cm^{-2}\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$

$\beta$  :  $0.1238\ mW\ cm^{-2}\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$

$$T_u = \left\{ \frac{k_2}{\ln\left[\left(\frac{k_1}{R_u}\right) + 1\right]} \right\} \quad (6)$$

$T_u$  : 未校正的溫度值  $K$

$k_2$  :  $1260.56K$

$k_1$  :  $60.776\ mW\ cm^{-2}\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$

若忽略輻射量在大氣中的吸收及散射效應，並假設海水為一黑體，則  $T_u$  可當成真正海面溫度。但由 *Liu and Kuo (1994)* 及本研究的推算結果， $T_u$  與現場量測溫度，誤差值在  $7^\circ C$  以上，可見大氣效應是不能忽略的。

- (4) 再以東港探空站的探空資料，包括氣壓、氣溫、露點溫度 (相對濕度) 在大氣中的垂直分布資料，輸入 *Lowtran7* 軟體 ( *Kneizys et al., 1988* )，算出大氣的輻射量及透射率，可代入以下公式 ( *Gibbons and Wukelic, 1989* ) 得到校正過後的輻射量  $R_c$  :

$$R_c = \left\{ \frac{(R_u - R_a)}{\epsilon \tau} \right\} - \left\{ \frac{1}{\epsilon} - 1 \right\} R_{sky} \quad (7)$$

$\epsilon$  : 水的放射率 0.986

$\tau$  : 大氣透射率

$R_a$  : 向上的大氣輻射量

$R_{sky}$  :  $10.5\mu m$  到  $12.5\mu m$  的天空輻射強度, 其經驗公式如下

$$R_{sky} = f\sigma T_A^4 \left\{ 1 - 0.26 \exp \left[ -7.77 \times 10^{-4} (273 - T_A)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

$T_A$  : 地表的絕對溫度

$\sigma$  : 史蒂芬常數  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

$f$  :  $10.44\mu m$  到  $12.42\mu m$  的熱輻射分數, 其值為 0.3187

當  $R_c$  求得, 可代入 (6) 式反算出校正後的溫度。

- (5) 最後將 *Landsat-TM* 影像資料中之第五頻道灰階值讀出, 判斷海陸交界 (海岸線), 因為海水跟陸地在此頻道的灰階值相差很大, 設定 20 為海陸交界 (圖 2), 再將陸地部份的灰階值設為 0, 海洋部份設為 1, 再將此矩陣與溫度分佈矩陣相乘 (像元對像元) 即可將陸地溫度濾掉。

## 4.2 NOAA-AVHRR 資料處理過程

### 4.2.1 SST 的推算

*NOAA-AVHRR* 的溫度推算法, 係由 *MAPIX - OCEAN* 軟體直接讀取原始衛星資料, 經過內部設定的溫度公式推算出海面溫度。公式如下:

(白天)

$$MCSST = 0.979224(T_4) + 2.3617430(T_4 - T_5) + 0.33084(T_4 - T_5) * (SECZ - 1.0) - 267.029 \quad (9)$$

$$SST = 0.92323(T_4) + 0.82523(T_4 - T_5) * MCSST + 0.463039(T_4 - T_5)(SECZ - 1.0) - 250.109 \quad (10)$$

(夜晚)

$$MCSST = 0.978971(T_4) + 2.593454(T_4 - T_5) + 0.623203(T_4 - T_5) * (SECZ - 1.0) - 267.542 \quad (11)$$

$$SST = 0.899907(T_4) + 0.091549(T_4 - T_5) * MCSST + 0.647912(T_4 - T_5)(SECZ - 1.0) - 243.821 \quad (12)$$

$T_n$  : 第  $n$  頻道的亮度溫度

$SECZ$  :  $SEC$  (衛星天頂角)



### 4.3 利用 NOAA-AVHRR 校正 Landsat-TM

假設 NOAA-AVHRR 所量測的海面溫度較準確，且每一像元的溫度為該區域內所有小區域溫度的平均，即：

$$T_p = \frac{\int T_d dA}{\int dA} \quad (13)$$

其中  $T_p$  為 NOAA-AVHRR 每個 pixel 的溫度， $T_d$  為 pixel 內各小區域的溫度， $A$  為 pixel 內各小區域的面積。

由 Landsat-TM 所算出的亮度溫度雖然不準確，但其溫度分佈的趨勢仍然存在，我們利用矩陣運算僅取其分佈趨勢，即：

$$P(i) = \frac{L(T_i)}{\bar{T}} \quad (14)$$

其中  $P(i)$  為所選定範圍之矩陣分佈特性， $L(T_i)$  為選定範圍的溫度分佈矩陣， $\bar{T}$  是該區域內所有溫度的平均值，將  $L(T_i)$  除以平均溫度 ( $\bar{T}$ ) 後，可得到分佈特徵矩陣  $P(i)$ ，以 85 年 6 月 27 日興達電廠附近海域  $70 \times 70$  像元區域為例，以上述過程計算出之分佈特徵矩陣如圖 3 所示。

再將同樣區域的 NOAA-AVHRR 溫度值代入此特徵矩陣：

$$P(T_i) = T_p \times P(i) \quad (15)$$

所得的  $P(T_i)$  即為包含 NOAA-AVHRR 的溫度及 Landsat-TM 細部溫度分佈特性的溫度分佈矩陣，再依前述方法將陸地溫度濾除，便可得完整的海面溫度分佈圖。

## 5. 結 果

### 5.1 NOAA-AVHRR 與船測溫度比較

海研三號與海研一號的水桶打水及馬達抽水水溫比較的結果，發現馬達抽上的水普遍比水桶汲水的水溫高。對海研三號而言，其溫度差最高為  $1.18^\circ\text{C}$ ，最低為  $0^\circ\text{C}$ ，平均溫差為  $0.53^\circ\text{C}$ ，溫差的 RMS (root mean square) 為  $0.64^\circ\text{C}$ ；對海研一號而言，溫度差最高為  $0.85^\circ\text{C}$ ，最低為  $0.03^\circ\text{C}$ ，平均溫差為  $0.38^\circ\text{C}$  ( $\text{RMS}=0.40^\circ\text{C}$ )。為增加現場溫度量測的準確性，分別將兩者作一迴歸關係，由關係圖判斷其為一次的線性關係，所求之關係式分別為：



$$\text{海研一號：} T_b = 0.9592 T_p + 0.7433 \quad (16)$$

$$\text{海研三號：} T_b = 1.1879 T_p - 5.7091 \quad (17)$$

$T_b$  是指水桶汲水法所量的溫度； $T_p$  是抽水馬達抽取海水所量的水溫。(16)式中  $T_b$  與  $T_p$  的相關係數  $r = 0.98$ ；(17)式  $T_b$  與  $T_p$  的相關係數  $r = 0.99$ 。再將馬達抽水的水溫迴歸成水桶汲水的水溫，圖 4 為經迴歸後的現場實測與相對應日期時間的 NOAA 衛星遙測溫度的相關圖，計算其  $r$  值為 0.92，兩者平均差為 0.84 °C，由圖中可約略看出 NOAA-12 的資料普遍偏移較多，因此將 NOAA-12 與 NOAA-14 衛星分開來分析，發現 NOAA-12 所推算出的水溫確實比船測水溫相差較大，平均差約 1.14 °C， $RMS = 1.29$  °C， $r = 0.93$ ；而 NOAA-14 的結果則較好，平均差約 0.62 °C， $RMS = 0.80$  °C， $r = 0.94$ 。而我們所用與 Landsat-TM 衛星比較的是 NOAA-14 衛星，故準確性應該會較高。

## 5.2 Landsat-TM 大氣校正的結果

表 2 是 6 月 27 日 Landsat-TM 的資料分析統計結果，可看出未考慮大氣效應所得的輻射量 ( $R_u$ ) 比校正過的輻射量 ( $R_c$ ) 低， $R_u$  反算出的溫度 ( $T_u$ ) 與現場實測溫度值比較，兩者相差在 7 °C 以上，亮度溫度值偏低，這與輻射量被大氣吸收有關。若與經大氣校正後所導出的輻射量  $R_c$  所反算出的溫度值 ( $T_c$ ) 比較，誤差減少到 0.01 °C ~ 3.23 °C 不等，平均溫度差為 0.94 °C ( $RMS = 1.22$  °C)。實測溫度最高溫該點 (出水口附近) 與校正過的衛星觀測溫度相差 0.71 °C。圖 5 為現場實測與遙測所得水溫之關係圖，其相關係數為 0.78，約有三分之一的點其偏差超過 1 °C，其餘都在 1 °C 以內。將校正後的溫度繪成彩色溫度分布圖 (圖 6)，都可清楚看出溫排水的擴散情形，由圖上可看出溫排水有往南擴散的情形，此結果與現場實測值所繪出之等溫線圖 (圖 7) 分佈情形非常相近。表 3 則為 12 月 20 日的 Landsat-TM 資料統計表，所算出的  $R_u$  一樣比  $R_c$  低，未作大氣校正與大氣校正後的溫差為 6.56 °C，由於此次並無現場實測值提供比對，所以無法嚴格地判斷其準確性，而出水口附近最高溫度值約為 32.09 °C，附近海面溫度最低為 25.02 °C，由彩色溫度分佈圖 (圖 8) 來看，可清楚的看到溫水的擴散趨勢為往西稍為偏南，若對照潮汐表可知當時為漲潮時段，若與四次現場實測值所繪的等溫線圖比較，其中第二次 (85 年 11 月 18 日) 及第三次 (85 年 12 月 4 日) 亦為漲潮時段，可發現其溫度分佈趨勢很相似，而有別於另兩次退潮時段的往南趨勢，且此次為冬季資料，若看現場實測溫度分佈圖可發現溫排水最高溫會集中在排水口西方數百公尺處，此現象也可在 Landsat 衛星推算所得的溫度分佈圖中發現，故就定性而言，Landsat 衛星所量測的結果是很好的。又與夏天的資料比起來，冬天的溫度低約 4 °C (溫排水口附近)。

## 5.3 利用 NOAA-AVHRR 校正 Landsat-TM 的結果

我們分析 6 月 27 日當天約 13:00 左右通過臺灣上空的 NOAA-14 衛星資料並選取



興達海域附近的範圍，依 4.3 節所提出的方法，先在 *NOAA-AVHRR* 溫度分佈影像上找出與 *Landsat-TM* 分析區域相同地理位置的像元，因為 *Landsat-TM* 分析區域為  $70 \times 70$  個像元，約相當於 *NOAA-AVHRR*  $2 \times 2$  個像元大小，又從定位過之衛星圖可知 *Landsat-TM* 分析區域的中心位置約在東經 120 度 10 分 42.46 秒，北緯 22 度 51 分 33.87 秒，對照相同區域之四像元溫度分別為  $31.10^\circ\text{C}$ 、 $31.52^\circ\text{C}$ 、 $33.70^\circ\text{C}$ 、 $34.42^\circ\text{C}$ ，平均溫度為  $32.44^\circ\text{C}$ 。以該溫度來修正同一天的 *Landsat-TM* 未經大氣修正的亮度溫度，所求出排水口附近的溫度分佈，與當天所量得的實測資料比較結果如表 4 所示，平均差約  $1.01^\circ\text{C}$ ， $RMS = 1.18^\circ\text{C}$ ，以相關圖來看可發現其相關性不錯（圖 9）， $r = 0.86$ ，水溫分佈趨勢亦與大氣校正的結果相似（圖 10），唯最高水溫該點與實測值溫度相差較大，差約  $1.51^\circ\text{C}$ ；12 月 20 日 *NOAA-14* 之 *AVHRR* 像元溫度值，所定出相同地理位置之四像元溫度分別為  $21.88^\circ\text{C}$ 、 $21.88^\circ\text{C}$ 、 $21.88^\circ\text{C}$ 、 $22.71^\circ\text{C}$ ，平均溫度為  $22.09^\circ\text{C}$ 。依上述的方法所得的 *Landsat-TM* 修正結果如圖 11。

依同樣的方法將 85 年 6 月 11 日之曾文溪口 *Landsat-TM* 以 *NOAA-AVHRR* 校正之，溫度範圍約為  $28^\circ\text{C} \sim 32^\circ\text{C}$ ，由於此處不似溫排水口有明顯的水溫差，故等溫線並無明顯特定的趨勢，但大致愈近岸溫度愈高。因為曾文溪口的量測點分佈範圍較廣，故本文未採用全部測點的量測結果，只取靠近溪口的 11 個測點作比較，即 *Landsat-TM* 影像於曾文溪口  $100 \times 100$  像元範圍內的測點，其中心位置約為東經 120 度 3 分 4.47 秒，北緯 23 度 2 分 23.46 秒。比較結果如表 5，溫度偏差最大  $1.24^\circ\text{C}$ ，最小  $0.06^\circ\text{C}$ ，平均溫差為  $0.62^\circ\text{C}$ ， $RMS = 0.73^\circ\text{C}$ 。由此結果可得到，利用 *Landsat-TM* 來觀察沿近岸的溫度分佈情形亦可行，誤差也很小。

## 6. 討 論

### 6.1 大氣校正法的探討

由本研究結果可知 *Landsat-TM*，適合用來作為沿岸及電廠溫排水口附近海面溫度的觀測，且經過大氣校正後的效果不錯，誤差  $0.01^\circ\text{C} \sim 3.23^\circ\text{C}$ ，平均偏差  $0.94^\circ\text{C}$ ，有些誤差超過  $1^\circ\text{C}$ ，不排除是實驗上的誤差所造成的，可能的原因如下：

- (1) 儀器誤差：東港氣象站所提供的大氣探空資料存在有固定之系統誤差（*Liu and Kuo, 1994*），此外原始探空資料不全，作者以內差方法將資料補齊，必有誤差存在。
- (2) 時空的差距：東港氣象站距離興達電廠有 35 公里遠，且探空氣球施放時間為每日上午 8:00，可適當的懷疑兩地兩時的大氣條件不同。現場溫度量測時間與衛星通過時間最多也相差 1 小時以上，嚴格地說在時間上的偏移亦會造成誤差。
- (3) 溫度量測方法：本研究量測的現場溫度是水面下數十公分到一公尺深的水溫，但就



熱輻射觀點而言，衛星所觀測到的溫度卻只是水面數毫米內的溫度，在海氣交互作用下，此層的溫度也往往有別於數公分至數公尺以下的水溫，其數量級也高達攝氏十分之幾度（*Schluessel, 1990*），是謂“*cool skin*”。水溫在空間上的變化亦須被考慮，雖然 *Landsat-TM* 的解析度很高，但其畢竟是  $120m \times 120m$  為一點，比起我們在小船上所量測的“點”大得多了，在溫度變化如此大的電廠溫排水口，在  $120m$  內溫度可能會超過  $1^{\circ}\text{C}$ （見圖 7）。

依上述，若欲增加衛星量測的準確度，改善探空資料的品質是較可行的，可在當地以施放探空氣球的方式得到較合時合地的探空資料。若要縮短時間偏差，將減少測點數或增加船隻數，並不可行。空間上所造成的誤差亦不易去除，因為衛星的解晰度是固定的，雖然設計非常密集的測點可修正，但如此將會增加量測時間，造成時間偏差更甚。“*cool skin*”效應的誤差，雖可利用輻射式的溫度計改善，但該類溫度計會隨量測高度及量測角度而改變量測值，故可行性亦不高。

## 6.2 利用 NOAA-AVHRR 校正 Landsat-TM 方法的探討

以 NOAA-AVHRR 校正 *Landsat-TM* 的方法應用於電廠溫排水口附近海域所得的結果亦不錯，誤差為  $0.02^{\circ}\text{C} \sim 2.72^{\circ}\text{C}$ ，平均為  $1.01^{\circ}\text{C}$ ，其特色是結合兩種衛星的優點，免去複雜的大氣校正過程，運用簡單的運算過程即可得到不錯的細部海面溫度分佈情形，其缺點是在同一像幅中的高低溫處誤差較大，而其誤差來源主要有 NOAA-AVHRR 本身的量測誤差，即 NOAA-AVHRR 所推算出的海面溫度與實測溫度有些許誤差，在運算過程中有可能使誤差值增大；現場量測誤差（包括“*cool skin*”效應）；時間及空間的誤差等。其中影響較大的誤差可能是時間的差異，因為 *Landsat* 衛星通過臺灣上空的時間約在上午 9:20 ~ 9:40 之間，而我們所用以校正的 NOAA-14 衛星是在下午 1:00 ~ 2:00 之間不定，在這 2 ~ 3 小時之間，海面吸收或釋放熱能必會有溫度上的差異。此外 NOAA-AVHRR 本身的誤差亦是要探討的一點，在結果中可知 NOAA-14 上的 AVHRR 誤差約  $0.62^{\circ}\text{C}$ ，若能更進一步地校準 NOAA-AVHRR 量測海面溫度的準確性，如實際推算出適合於臺灣附近海域使用的多窗區頻道公式，此法所求出的誤差必會減低。在定位方面亦有值得改進的地方，由於 *mapix ocean* 軟體所提供的定位方式是僅以目視方式在影像上找出明顯的點（如小島）與其內置的海岸線資料作疊合，若以大範圍的海洋而言，其誤差是可忽略的，但就小範圍的沿岸地區，其 1 ~ 2 像元的位置誤差，將會影響到小範圍海域的觀測結果。

以 NOAA-AVHRR 校正 *Landsat-TM* 的方法應用於一般沿岸及河口海域（如曾文溪口）所得的結果較溫排水口附近海域好。由於曾文溪口的測點原先是設計用於量測曾文溪口濁度分佈情形，故其測點分佈比起興達海域所設計的測點廣。礙於記憶體及計算時間的考慮，僅取溪口附近  $100 \times 100$  像元的範圍，包含 11 個測點的溫度分佈作分析，發現其結果比興達海域的結果都好（平均溫差  $0.66^{\circ}\text{C}$ ），討論其主要原因是該海域的溫度變化不像電廠出水口附近海域那麼大，所以 NOAA-AVHRR 對溫度的空間變

化消弱效應在該區影響不顯著。所以預期將此法應用在沿近岸或大面積河川、湖泊的水表溫度觀測是相當可行的。

## 7. 結論與建議

本研究利用 *Landsat-TM* 的高解析度應用在遙測電廠溫排水口附近海面溫度上，因為僅具單頻道熱紅外光的 *TM* 輻射計會產生較大誤差，故本研究應用兩種方法來校正其誤差。一則藉大氣校正法來校準其因大氣吸收所造成的誤差，乃沿習 *Gibbons and Wukelic(1989)* 的方法。一則利用 *NOAA-AVHRR* 經過多窗區頻道推算的海表面溫度來校正 *Landsat-TM* 的誤差，研究結果獲得以下數點結論：

- (1) *Landsat-TM* 的高解析度適合用於觀測沿近岸小範圍之海表面溫度分佈，尤其是應用在電廠溫排水口附近之海表面溫度分佈監測可得不錯的結果。
- (2) *Landsat-TM* 第六頻道所推算出的亮度溫度與實際溫度有一段差距，可見大氣效應的影響是存在的，若以適當的方法校正大氣影響，將可得較準確的觀測值。
- (3) 利用大氣校正法校正 *Landsat-TM* 對海表面溫度量測的誤差可減低到  $1^{\circ}\text{C}$ （平均）以內，是不錯的結果，且在溫度分佈趨勢方面與現場實測結果相當吻合，可再改善探空資料的品質以減小誤差。
- (4) 利用 *NOAA-AVHRR* 校正 *Landsat-TM* 的方法，可結合 *AVHRR* 與 *TM* 的特性，簡化溫度推算的過程，與實測溫度比較結果不錯，可知此法可行性很高。若針對 *NOAA-AVHRR* 本身誤差及時間差異誤差作修正，預期可得更好的結果，另外在定位方面若能找出更嚴謹的方法減少分析區域的偏移，將使此法更完整。
- (5) *Landsat-TM* 尚有一缺點，即每 16 天才通過同一地點一次，且易受天候影響其對海面（或陸地）的觀測，若要對某地作高頻度的觀測，則此衛星將無法勝任。
- (6) 由四次現場實測值所得結果，可知興達火力發電廠溫排水擴散方向與當地潮流有密切的關係。漲潮時溫水擴散方向大致是往西稍偏北；退潮時則明顯往南擴散。

## 8. 參考文獻

1. 曾忠一，1988，大氣衛星遙測學，渤海堂文化事業公司，台北市。
2. 陳萬金，1986，利用氣象衛星遙測海面溫度，國立臺灣大學大氣科學研究所碩士論文。74頁。
3. Arbelo, M., F. Herrera, F. J. Exposito, V. Caselles and C. Coll, 1996, Determination of Sea Surface Temperature Using Combined TOVS and AVHRR Data. Application to The Canary Islands Area, Spain. *Int. J. Remote Sensing* 17(2):359-371.



4. Bates, J. J. and H. F. Diaz ,1991, Evaluation of Multichannel Sea Surface Temperature Product Quality for Climate Monitoring: 1982-1988. *J. Geophys. Res.* 96(c11): 20,613-20,622.
5. Gibbons, D. E. and G. E. Wukelic ,1989, Application of Landsat Thematic Mapper Data for Coastal Thermal Plume Analysis at Diablo Canyon. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 55(6): 903-909.
6. Kneizys, F. X., E. P. Shettle, L. W. Abreu, J. H. Chetwynd, G. P. Anderson, W. O. Gallery, J. E. A. Selby and S. A. Glough ,1988, Users Guide to LOWTRAN7. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, MA 01731.
7. Lathrop, R. G. and T. M. Lillesand ,1986, Use of Thematic Mapper Data to Assess Water Quality in Green Bay and Central Lake Michigan. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 52(5): 671-680.
8. Lyon, J., K. W. Bedford, C. J. Yen, D. H. Lee and D. J. Mark ,1988, Determination of Suspended Sediment Concentrations from Multiple Day Landsat and AVHRR Data. *Remote Sensing of Environment* 25, 107-115.  
Liu, G. -R. and T. -H. Kuo ,1994, Improved Atmospheric Correction Process in Monitoring SST Around The Outfall of A Nuclear Power Plant. *Int. J. Remote Sensing* 15(13): 2627-2636.
10. McMillin, L. M. ,1975, Estimation of Sea Surface Temperature From Two Infrared Window Measurements With Different Absorption. *J. Geophys. Res.* 80(36): 5113-5117.
11. McMillin, L. M. and D. S. Crosby ,1984, Theory and Validation of The Multiple Window Sea Surface Temperature Technique. *J. Geophys. Res.* 89(c3): 3655-3661.
12. Pereira, Jr., A. C. and A. W. Setzer ,1996, Comparison of the Fire Detection in Savannas Using AVHRR's Channel 3 and TM Image. *Int. J. Remote Sensing* 17(10):1925-1937.
13. Ritchie, J. C., C. M. Cooper, and F. R. Schiebe,1990, The Relationship of MSS and TM Digital Data with Suspended Sediments, Chlorophyll, and Temperature in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sensing of Environment* 33, 137-148.
14. Schluessel, P., W. J. Emery, H. Grassl, and T. Mammen ,1990, On The Bulk-Skin Temperature Difference and Its Impact on Satellite Remote Sensing of Sea Surface Temperature. *J. Geophys. Res.* 95(c8): 13,341- 13,356.
15. Schott, J. R. and W. J. Volchok, 1985, Thematic Mapper Infrared Calibration. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 1351-1357.
16. Steyn-Ross, M. L., D. A. Steyn-Ross, P. J. Smith, and J. D. Shepherd, 1993, Water Vapor Correction Method for Advanced Very High Resolution Radiometer Data. *J. Geophys. Res.* 98(c12): 22,817- 22,826.