

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

建立氣候變遷對環境與生態永續性衝擊預警指標與機制--  
子計畫三：建立氣候變遷對我國海域珊瑚衝擊預警指標與  
機制

研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型

計畫編號：NSC 95-EPA-Z-002-002-

執行期間：95年03月01日至95年12月31日

執行單位：國立臺灣大學海洋研究所

計畫主持人：戴昌鳳

計畫參與人員：碩士級-專任助理：吳岱穎

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年01月16日

95 年度「環保署/國科會空污防制科研合作計畫」  
成果完整報告

建立因應氣候變遷之環境預警機制與指標-

子計畫三：建立氣候變遷對我國海域珊瑚衝擊預警指標與  
機制

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC 95-EPA-Z-002-002

執行期間：95 年3 月1 日至95 年12 月31 日

總計畫主持人：童慶斌

計畫主持人：戴昌鳳

共同主持人：

計畫參與人員：吳岱穎

執行單位：台灣大學

中華民國95 年12 月31 日

## 中文摘要

珊瑚礁是海洋環境中非常重要的生態系之一，在全球氣候變遷的衝擊之下，它也是最易受到影響的生態系。本計畫的目標在於建立氣候變遷對我國海域珊瑚衝擊預警指標與機制，本期末報告包括四項成果：(一)蒐集整理國際間對於珊瑚礁預警系統的模式與架構，作為擬定我國海域設立預警系統的參考；由美國 NOAA 所主導建構的珊瑚礁早期預警系統，包含現場測站、資料庫及專家系統，並定期發布預警訊息，此系統已成為國際間主要的珊瑚礁預警系統，其運作模式值得參考。(二)整理過去國際間的文獻，找出珊瑚白化溫度閾值與緯度間的關係，進而推算我國海域中的珊瑚白化溫度門檻值；結果顯示，台灣北部海域的珊瑚白化溫度閾值為 29.2°C，澎湖海域為 29.3°C，南部海域則為 29.5°C。(三)整理自 1990 年迄今，台灣海域海表溫的變動資料，根據國際珊瑚白化預警指標，分析我國海域珊瑚面臨白化與死亡的危機，結果顯示珊瑚礁在此期間處於接近白化的水溫環境，當出現異常氣候現象（如 1997-98 年的聖嬰），就會導致珊瑚大量白化，觀測記錄則指出台灣南部海域在低於此指標值時，就已出現白化現象，可能是人為干擾和污染加速了珊瑚白化所致；(四)利用氣候模式 CGCM2 SRES A2 與 B2 情境所模擬的水溫變動資料，預測未來(至 2100 年)台灣海域出現珊瑚白化的機會；結果顯示，台灣海域的珊瑚礁在 SRES A2 情境下，2050 年以後可能面臨嚴重的白化與死亡危機；但是在 SRES B2 情境下，到 2070 年以後才可能會有零星的白化危機。顯示適度地控制溫室氣體排放，抑制全球暖化的程度，可以減緩珊瑚礁生態系的衰退。在因應策略方面，短期預警可透過管制海域活動或限制人為干擾以舒緩或降低珊瑚白化；長期因應策略則為設立海洋保護區、減少珊瑚礁區的人為干擾和污染，以及推動珊瑚保育研究。

**關鍵字：**珊瑚礁、珊瑚礁預警系統、珊瑚白化、氣候變遷

## Abstract

Coral reefs are among the most important and critical ecosystems in the world; they are also susceptible to the threats of global climate change. The purpose of this project is to establish the indicators and mechanism of coral reef warning system for the conservation of coral reefs. Four parts have been accomplished in this final report. Firstly, the scheme and operation of NOAA's coral reefs early warning system (CREWS) were reviewed as the reference of constructing coral reef warning system in Taiwan. CREWS is an integrated system including real-time data collecting and transferring systems, a long-term database, and an expert system. This system has been applied to the monitoring of Atlantic and Pacific coral reefs and its scheme and operation provides us a good reference for establishing the coral reef warning system in Taiwan. Second, by reviewing the published articles, we found the threshold of coral bleaching temperature has a good regressive relationship with latitude. We used this relation to calculate the thresholds of bleaching temperature around Taiwan: northern Taiwan is 29.2 °C 、Penhu Island is 29.3 °C 、southern Taiwan is 29.5 °C. Third, we analyzed the weekly variations of sea surface temperature (SST) from 1990 to 2006 at five stations around Taiwan. The results showed that the SSTs in this period were close to the threshold of coral bleaching. If extraordinary climatic events occurred, such as the strong El Niño in 1997-98, would induce mass bleaching of coral reefs. Coral bleaching occurred in southern Taiwan when the DHWs (degree heating weeks) was lower than the threshold set by the CREWS. This suggests that additional environmental factors such as anthropogenic threats and pollution would further enhance the temperature effects. Finally, the simulated SSTs from CGCM2 SRES A2 and B2 scenarios were used to evaluate the risk of coral bleaching from 2001 to 2100 based on the CREWS' criterion, i.e.,  $DHW > 8$ . The results showed that coral reefs in Taiwan would face severe threats of bleaching after 2050 under the SRES A2 scenario; however, under the SRES B2 scenario, coral bleaching would be occasional events even after 2070. The results suggest that lowering the greenhouse gas emission will reduce the threats of global warming on coral reefs and provide longer time for preventing coral reefs from degradation. The adaptive strategy for early warning is to control or reduce human impacts to coral reefs. For long-term conservation of coral reefs, the recommended strategies include establishment of marine protected areas, pollution control, management of marine activities, and the promotion of coral reef research.

**Key words:** coral reefs, coral reefs warning system, coral bleaching, climate change.

## 前言

珊瑚礁是海洋中生物多樣性最高、生產力最高、生物量也最高的生態系，它也是非常脆弱的生態系，容易受到氣候變遷和人為污染的影響(Hoegh-Guldberg, 1999; Wilkinson, 1999; Knowlton, 2001; Bellwood et al. 2004)。由於珊瑚礁的破壞往往代表著巨額的經濟、社會和環境損失，因此，全球氣候變遷對珊瑚礁的影響和因應策略，一直是各界關心的議題(如：Hoegh-Guldberg, 1999; Wilkinson, 1999; Knowlton, 2001; Roberts et al. 2002; Hughes et al. 2003)，而發展氣候變遷對珊瑚礁衝擊的預警系統則是近年來許多國家學者致力的方向之一(Berkelmans et al. 2002; Strong et al. 2004; Woodridge et al. 2005)。對於四面環海的台灣來說，珊瑚礁是我國海域的關鍵棲地，而保護珊瑚礁生態系，使其維持在健康狀態，是海洋資源永續的重要工作之一；歷年來的研究資料顯示，台灣海域珊瑚礁受到人為污染和氣候變遷的雙重衝擊，已呈現衰退和破壞的徵兆(Dai et al. 2002; Kimura et al. 2004)，在面對氣候變遷加速的衝擊之下，發展珊瑚礁預警系統，以保護珊瑚礁生態系的永續，是十分迫切的工作。本計畫的目標為擬定我國設立珊瑚礁預警系統的架構和機制，並建立適用於我國的珊瑚礁預警指標。

### 1. 珊瑚白化

珊瑚白化代表珊瑚面對環境壓迫的立即反應，也是珊瑚礁再氣候變遷衝擊之下，最早表現出來的徵兆。珊瑚白化是由於珊瑚失去體內的共生藻，導致珊瑚的組織呈現透明狀態，透過珊瑚透明的組織，顯現出珊瑚白色的骨骼。失去共生藻的白化珊瑚將無法再從共生藻行光合作用的產物獲得能量，這些能量同時也是珊瑚賴以維生最重要的來源。因此，白化的珊瑚將無法生存下去。Coles 與 Jokiel(1977)在夏威夷海域中，探討溫度對數種造礁珊瑚光合作用(P)與呼吸作用(R)比值(P:R ratio)的影響。他們發現，隨著溫度的上升(18°C-31°C)，P 與 R 的比值有下降的趨勢，且呈現負相關。在大堡礁 Lizard Island 取得的萼柱珊瑚(*Stylophora pistillata*)及尖枝列孔珊瑚(*Seriatopora hystrix*)兩種珊瑚，曝露在高溫環境下 7 小時後，也發現這兩種珊瑚的呼吸率上升，光合作用速率下降，P 與 R 的比值也下降；並且在 19 天後，這些數值才又回到溫度處理前的情況(Hoegh-Guldberg and Smith 1989)。在佛羅里達海域的珊瑚研究發現，溫度升高的處理會導致光合作用效率、P 與 R 比值都有下降的趨勢，較先前研究不同的是，在這個實驗中的呼吸率也呈現下降的現象(Porter et al. 1999)。除了溫度上升之外，溫度的下降也會影響造礁珊瑚的光合作用。經由研究 1999 年澳洲大堡礁的聖嬰、南方振盪(ENSO)現象造成的海水溫度下降對珊瑚的影響發現，海水溫度的下降也會使珊瑚的光合作用效率下降，其體內與光合作用相關的色素含量也會減少(Saxby et al. 2003)。一般認為，溫度對於造礁珊瑚光合作用的影響主要是發生在光合作用的機制層面，包括酵素或光系統的生化反應(Fitt et al.

2001)。

## 2. 珊瑚礁早期預警系統的概念發展

如前所述，許多文獻指出珊瑚白化與海水溫度異常有非常緊密的關聯，Jokiel and Coles(1990)提出一個判定珊瑚白化的溫度閾值的標準—水溫超過當地夏季最高溫 $1^{\circ}\text{C}$ ，此概念提供架設珊瑚礁早期預警系統的基礎。隨著衛星遙測技術的進展，全球海水表面溫度已可即時監測，因此，在結合全球海溫資料與珊瑚白化溫度閾值的概念後，Goreau and Hayes(1994)延伸出海洋熱點(ocean hot spots)的概念，他們建議當一地區海水表面月均溫高於長期平均溫度 $1^{\circ}\text{C}$ 以上時，此地點就被視為海洋熱點。當海洋熱點又同時發生在當地的夏季時，此地區就非常容易發生珊瑚白化事件。美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)便依據這些概念與衛星資料，提供所謂的熱點(HotSpot)資訊，作為早期在珊瑚礁白化預測與研究上的參考。熱點資訊在1998年後受到很大的重視，因為在1998年初，熱點資訊早在大堡礁海洋公園管理局(Great Barrier Reef Marine Park Authority, GBRMPA)與澳洲海洋科學研究所(Australian Institute of Marine Science, AIMS)發現珊瑚大規模白化之前，就已經顯示出當地珊瑚會有白化的危機。

## 3. 珊瑚白化預警指標

然而，熱點資訊的獲得，是以相對於當地月均溫的值來計算，但是發生珊瑚白化的時間尺度通常小於一個月，也就是說，利用月均溫求得的熱點資訊來預測珊瑚白化可能不夠靈敏。因此，NOAA當局發展出另一個時間尺度較小的珊瑚白化指標，稱為DHWs(Degree Heating Weeks)。這個指標的計算方式是利用當週及過去11週的海水表面溫度平均值，各自減去當地夏季最高溫度，假如此一數值大於 $1^{\circ}\text{C}$ ，就累加起來，如此可以考慮到每週的變化與更新，同時也考慮到溫度累加的效應。換句話說1DHWs就代表了海水表面溫度高於珊瑚白化溫度閾值 $1^{\circ}\text{C}$ 且持續一週，或是海水表面溫度高於珊瑚白化溫度閾值 $2^{\circ}\text{C}$ 且持續半星期。NOAA利用監測海水表面溫度與計算DHWs數值的方式，監控全球共24個珊瑚礁區的珊瑚白化危機(圖一)，作為珊瑚礁早期預警系統的基本架構。

在全球變遷的影響下，為了維持我國珊瑚礁資源的永續，珊瑚礁早期預警系統的建構是非常重要且基礎的工作。這樣的系統將提供必要的管理資訊，作為政府單位在擬定政策與實行管理時的重要參考。雖然我國在這方面尚無任何提供預警的指標，但是，NOAA發展出來的DHWs指標，在國際上不但已經受到認可，同時也有許多成功案例。因此，利用DHWs來作為我國發展珊瑚礁預警系統來預測珊瑚白化事件，是非常有利的基礎。然而，要以DHWs指標作為珊瑚礁白化預警的基礎，其中最重要的是珊瑚白化溫

度閾值的確定，才能根據這個閾值去計算我國海域珊瑚礁的DHWs變化。因此要將此一系統運用在我國珊瑚礁區，首要的重點是要確認在台灣四周海域珊瑚白化溫度的閾值。本研究首先針對台灣海域珊瑚礁白化閾值進行探討，並且利用DHWs指標檢視過去台灣海域溫度變化與珊瑚礁白化的情形。其次，我們利用國際上發展出的氣候模擬資料在氣候變化政府間專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)公佈的不同氣候變遷的情境下，台灣海域海水表面溫度的變化情形，加入我國海域珊瑚白化溫度閾值與DHWs數值，評估我國珊瑚礁在2001年到2100年間可能面臨的白化危機。最後，我們將針對如何建構台灣海域珊瑚礁預警系統以及在全球氣候變遷的影響下，如何維持我國珊瑚礁資源的永續，提出可行的因應對策。

<b>ATLANTIC OCEAN</b> Peak Season (N) Jul-Sep, (9) Jan-Mar		<b>PACIFIC OCEAN</b> Peak Season (N) Jul-Sep, (9) Jan-Mar		<b>INDIAN OCEAN</b> Peak Season (N) Jul-Sep, (9) Jan-Mar	
<b>BERMUDA</b> 32.0 N, 64.5 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 7.5(1998) CURRENT SST (C) 19.7 CLIMATOLOGY** 27.2	<b>MIDWAY ATOLL, US</b> 28.5 N, 177.5 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 4.6(1987) CURRENT SST (C) 20.0 CLIMATOLOGY** 26.9	<b>GUAM</b> 13.0 N, 144.5 E	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 5.1(1999) CURRENT SST (C) 28.3 CLIMATOLOGY** 29.5
<b>SOMBRERO REEF, FL</b> 25.0 N, 81.4 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 6.0(1998) CURRENT SST (C) 23.9 CLIMATOLOGY** 29.3	<b>OAHU-MAUI, HI</b> 21.0 N, 158.0 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 7.6(1996) CURRENT SST (C) 25.0 CLIMATOLOGY** 27.0	<b>ENEWETOK</b> 11.5 N, 162.0 E	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 2.5(2001) CURRENT SST (C) 27.9 CLIMATOLOGY** 29.1
<b>BAHAMAS, LEE STOCKING IS</b> 23.5 N, 76.5 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 7.8(1998) CURRENT SST (C) 25.5 CLIMATOLOGY** 29.3	<b>PALMYRA, ISL</b> 6.0 N, 162.0 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 6.0(1994) CURRENT SST (C) 28.0 CLIMATOLOGY** 28.7	<b>PALAU</b> 7.5 N, 134.0 E	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 10.4(1998) CURRENT SST (C) 28.8 CLIMATOLOGY** 29.5
<b>PUERTO RICO</b> 18.0 N, 67.5 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 6.8(1998) CURRENT SST (C) 27.1 CLIMATOLOGY** 28.5	<b>GALAPAGOS</b> 1.0 S, 90.0 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 34.4(1998) CURRENT SST (C) 26.7 CLIMATOLOGY** 26.5	<b>DAVIES REEF</b> 19.0 S, 147.5 E	12WK ACCUM TODAY 2.0 MAX 12 WK* 4.8(1987) CURRENT SST (C) 26.8 CLIMATOLOGY** 28.5
<b>VIRGIN ISLANDS, US</b> 18.0 N, 65.0 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 7.5(1998) CURRENT SST (C) 26.8 CLIMATOLOGY** 28.5	<b>AMERICAN SAMOA-OFU</b> 14.0 S, 170.0 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 7.4(1991) CURRENT SST (C) 29.8 CLIMATOLOGY** 29.3	<b>HERON ISLAND</b> 23.5 S, 152.0 E	12WK ACCUM TODAY 3.5 MAX 12 WK* 6.0(1987) CURRENT SST (C) 25.1 CLIMATOLOGY** 27.3
<b>GLOVERS, BELIZE</b> 16.5 N, 88.0 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 9.7(1998) CURRENT SST (C) 28.2 CLIMATOLOGY** 28.9	<b>TAHITI-MOOREA</b> 17.5 S, 150.5 W	12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 7.3(1991) CURRENT SST (C) 28.9 CLIMATOLOGY** 28.8	<b>FIJI-BEQA</b> 18.5 S, 178.5 E	12WK ACCUM TODAY 4.2 MAX 12 WK* 6.9(2000) CURRENT SST (C) 28.7 CLIMATOLOGY** 28.1
					<b>OMAN-MUSCAT</b> 24.0 N, 58.0 E
					12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 14.7(1996) CURRENT SST (C) 26.6 CLIMATOLOGY** 30.3
					<b>MALDIVES-MALE</b> 4.0 N, 73.0 E
					12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 10.5(1998) CURRENT SST (C) 30.2 CLIMATOLOGY** 29.9
					<b>SEYCHELLES-MAHE</b> 5.0 S, 56.0 E
					12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 4.5(1998) CURRENT SST (C) 29.5 CLIMATOLOGY** 29.5
					<b>COBOURG PARK</b> 10.5 S, 132.5 E
					12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 4.8(1987) CURRENT SST (C) 29.6 CLIMATOLOGY** 29.9
					<b>SCOTT REEF</b> 14.0 S, 122.0 E
					12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 13.3(1998) CURRENT SST (C) 29.4 CLIMATOLOGY** 30.1
					<b>NINGALOO, AU</b> 21.5 S, 114.0 E
					12WK ACCUM TODAY 0.0 MAX 12 WK* 11.3(1999) CURRENT SST (C) 28.3 CLIMATOLOGY** 28.2

\* DERIVED BASED ON DHWs FROM 1985 ~ 2001

\*\* ALSO KNOWN AS THE MAXIMUM MONTHLY MEAN SST

圖一、NOAA監測全球24個珊瑚礁區的水溫與DHWs數值，並依照各地狀況發佈不同等級的預警。(取自: [http://www.osdpd.noaa.gov/PSB/EPS/CB\\_indices/coral\\_bleaching\\_indices.html](http://www.osdpd.noaa.gov/PSB/EPS/CB_indices/coral_bleaching_indices.html))

## 研究方法

### 一、國際珊瑚礁預警系統資料蒐集

目前國際上主要的珊瑚礁預警系統是由美國國家海洋暨大氣總署(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)所主導。我們利用 NOAA 架設之網站與其所發表之相關文獻，瞭解 NOAA 的珊瑚礁早期預警系統建構的背景，以及研究珊瑚礁早期預警系統的架構；最後探討這套系統發佈預警的方式。綜合以上資訊，同時再配合其他相關研究，全盤瞭解國際間珊瑚礁預警系統建構的方式，作為建立我國珊瑚礁預警系統在概念與架構上的參考。

### 二、分析台灣海域珊瑚白化閾值

我們回顧過去研究珊瑚白化閾值的文獻，並且配合各個研究地點的緯度，分析造成珊瑚白化的溫度閾值與緯度之間的關係，並且依據分析結果，找尋適合台灣海域各地點的白化溫度閾值。最後利用此結果，結合 NOAA 的珊瑚早期預警系統指標 DHWs (degree heating weeks)，進行後續分析。

### 三、台灣海域水溫資料分析與珊瑚礁危機評估

利用 NOMADS (NOAA Operational Model Archive Distribution System)所公開分享的全球水溫資料，獲取台灣海域四周五個代表地點(鹽寮、石梯坪、綠島、南灣、澎湖)，自 1990 至 2006 年 5 月的每週溫度平均資料進行分析，探討在珊瑚白化閾值之下，我國的珊瑚礁面臨白化危機的次數與等級。

在珊瑚礁危機的評估方面，利用 NOAA 所採行的標準- DHWs 作為指標，用以量化溫度變化造成珊瑚白化危機的程度。在珊瑚白化溫度的閾值設定上，我們利用珊瑚白化溫度與緯度關係，求取五個代表地點的珊瑚白化溫度閾值，各個地點的閾值分別是：鹽寮 29.2°C、石梯坪 29.3°C、綠島 29.4°C、南灣 29.5°C、澎湖 29.3°C。

### 四、氣候變遷模式溫度資料分析與珊瑚白化程度在不同氣候變遷情境下之評估

自 Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma)網站(<http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/>)，下載CGCM2 在不同IPCC情境下自 2001 至 2100 年的每日水溫資料，再換算成每週平均，並依據台灣各海域所設定的珊瑚白化溫度閾值(台灣北部 29.2°C、澎湖 29.3°C、台灣南部 29.5°C)作為計算DHWS的標準，推算在此期間的DHWS數值，進而評估在不同情境下，台灣海域珊瑚礁面臨白化的危機與其間的差異。由於CGCM2 在模擬空間尺度上的限制，台灣海域僅有三區資料：北部海域、澎湖海域及南部海域。情境的部分使用IPCC所公佈的不同氣候變遷情境，SRES A2 與B2，來評估我國海域珊瑚

礁生態在全球氣候變遷的衝擊之下會有如何的反應。

## 結果

### 一、珊瑚礁早期預警系統(Coral Reef Early Warning System, CREWS)

#### 1. 背景

1998 年 6 月，美國白宮公佈了編號第 13089 號的總統行政命令，”Coral Reef Protection”，並依據此一命令成立了美國珊瑚礁工作執行小組(U.S. Coral Reef Task Force)，負責統籌美國國內珊瑚礁保育、政策、科學研究等相關事宜。美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)是這個小組的成員之一，珊瑚礁早期預警系統的規劃與設計主要就是由 NOAA 的珊瑚礁監測計畫(Coral Reef Watch, CRW)負責執行。雖然當初這個系統是在美國國內開始發展，但是如今這套系統已運用在世界其他地方，例如大堡礁的 Myrmidon Reef (Hendee et al. 1999)。CRW 計畫的主要目標是希望找出海水表面溫度異常及持續時間與珊瑚白化、死亡的關係，同時提供現地的即時資訊，做為經營管理者與科學研究的參考資料，進而對珊瑚白化的危機提出建議與警告。為了執行此計畫，除了結合 NOAA 的各個部門共同執行，其中在海洋與大氣研究辦公室(Office of Oceanic and Atmospheric Research, OAR)之下的大西洋海洋與氣象實驗室 (Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory, AOML)，負責執行珊瑚健康與監測計畫(Coral Health and Monitoring Program, CHAMP)，而珊瑚礁早期預警系統(Coral Reef Early Warning System, CREWS)的建構便是隸屬於這個總計畫之中。

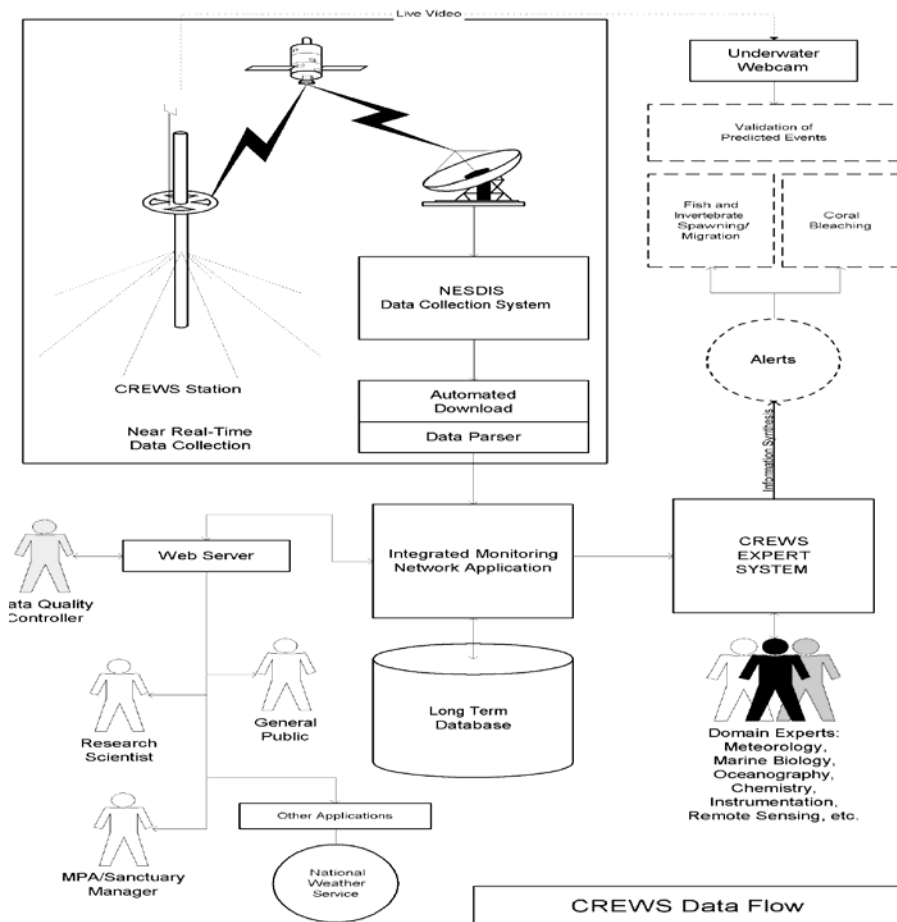
#### 2. 珊瑚礁早期預警系統的目標

CREWS 的主要目標是將珊瑚礁相關的知識、經驗與訊息分享給全世界，以此提供資訊給經營管理者做決策的參考；提供即時且長期的資料給科學家進行珊瑚礁保育的相關研究；最後進而教育民眾，提高社會大眾對珊瑚礁保育議題的認知與關切，共同維持珊瑚礁生態系及其資源的永續發展。

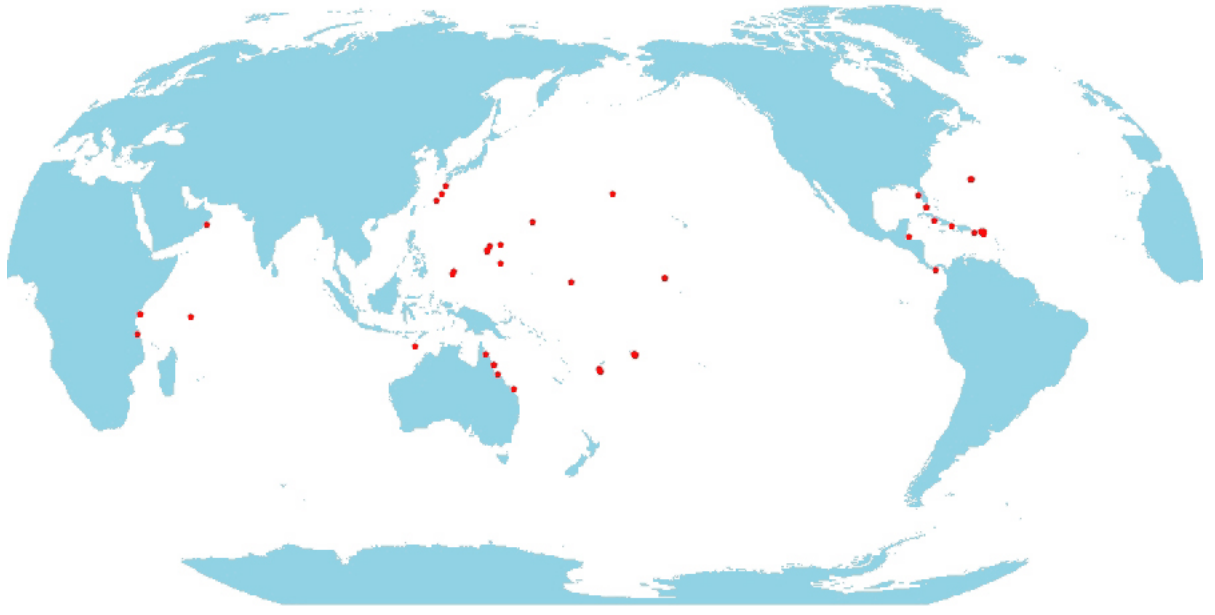
#### 3. 珊瑚礁早期預警系統的建構

CREWS 的主要架構是結合了海洋與大氣的研究測量裝置，並加入人工智慧軟體的運算，設計了一套對於資料收集、整合、運算、訊息傳遞及相關人員教育、改進與回饋的網絡機制(圖二)。CREWS 的雛型是在 1997 年由美國國家航空暨太空總署(NASA)與佛羅里達海洋研究所(Florida Institute of Oceanography)共同操作，設立在佛羅里達灣數個珊瑚礁附近的海洋監測站(NASA, 2004)。2001 年 5 月 25 日，第一個隸屬於 NOAA 的珊瑚

礁早期預警系統測站於巴哈馬的 Lee Stocking Island 開始啟用，2006 年年底完成位於 Puerto Rico 的第三個測站的架設與啟用，NOAA 並計畫在 2010 年將測量海洋與大氣相關參數的測站設置在美國及全球各個重要的珊瑚礁海域(圖三)。在每一測站上，設置有數個測量海洋與大氣相關參數的儀器(圖四)。在海洋資料方面，包括海表溫、鹽度、光照強度及紫外線強度等；在大氣資料方面，包括：氣溫、風速、風向、大氣壓力、日照強度、紫外線強度與二氧化碳分壓等。這些即時資料經由衛星傳遞到 NESDIS 的資料收集系統，經過監測網絡的整合與運算之後，進入長期資料儲存系統中保存下來。這些資料首先會被利用來計算海洋熱點 (HotSpot，圖五)，也就是海水表溫高於珊瑚白化閾值 1°C 以上的地點，系統會利用測站及衛星資料標出這些熱點。計算出熱點資訊以後，搭配使用 DHWs (degree heating weeks) 指標，描繪出全球海面的 DHWs 數值(圖六)。DHWs = 高於珊瑚白化閾值的溫度(°C) x 週數，因此，1 DHW = 高於珊瑚白化閾值的溫度 1°C x 1 週，或高於閾值 2°C x 持續 0.5 週。NOAA 依照過去在加勒比海的研究與經驗，將珊瑚白化的閾值設在 29.3°C (NASA, 2004)，同時，當 DHWs >1 時，會有累加的現象。依據歷年資料，NOAA 將不同的 DHWs 值設定為不同危機等級(表一)，其中，當 DHWs > 8，則該地點將會面臨嚴重的珊瑚白化與死亡。



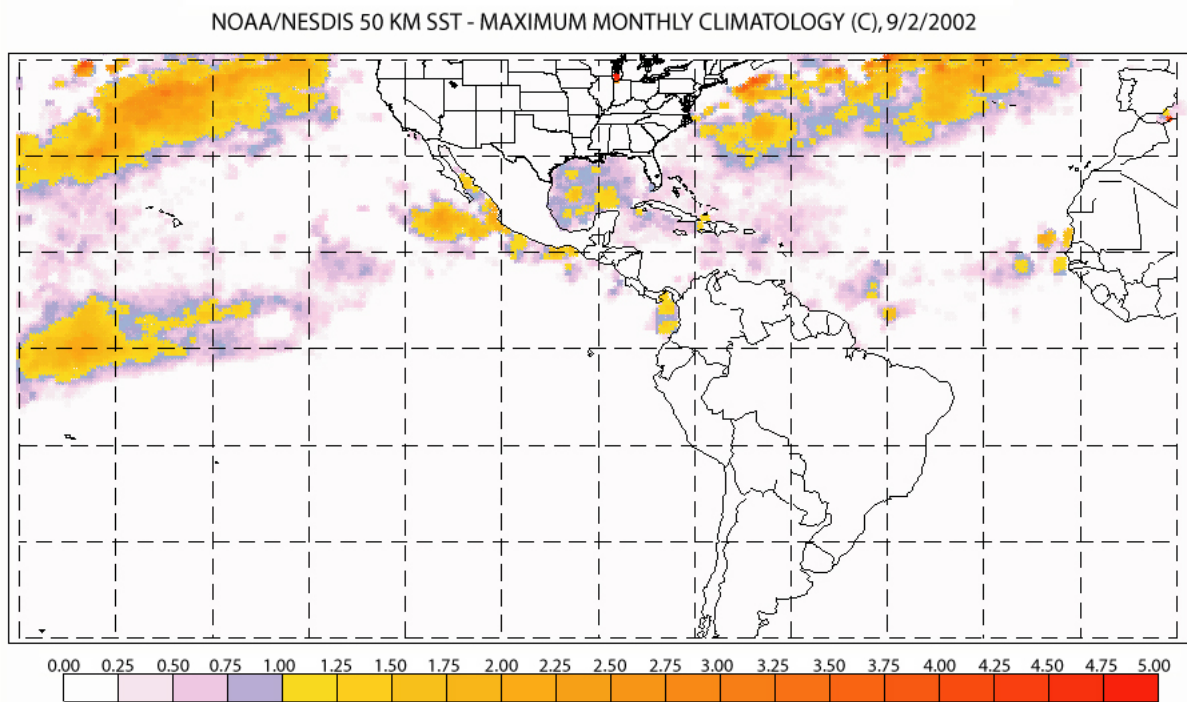
圖二、珊瑚礁早期預警系統網絡架構圖。(取自: <http://www.coral.noaa.gov/crw/process.shtml>)



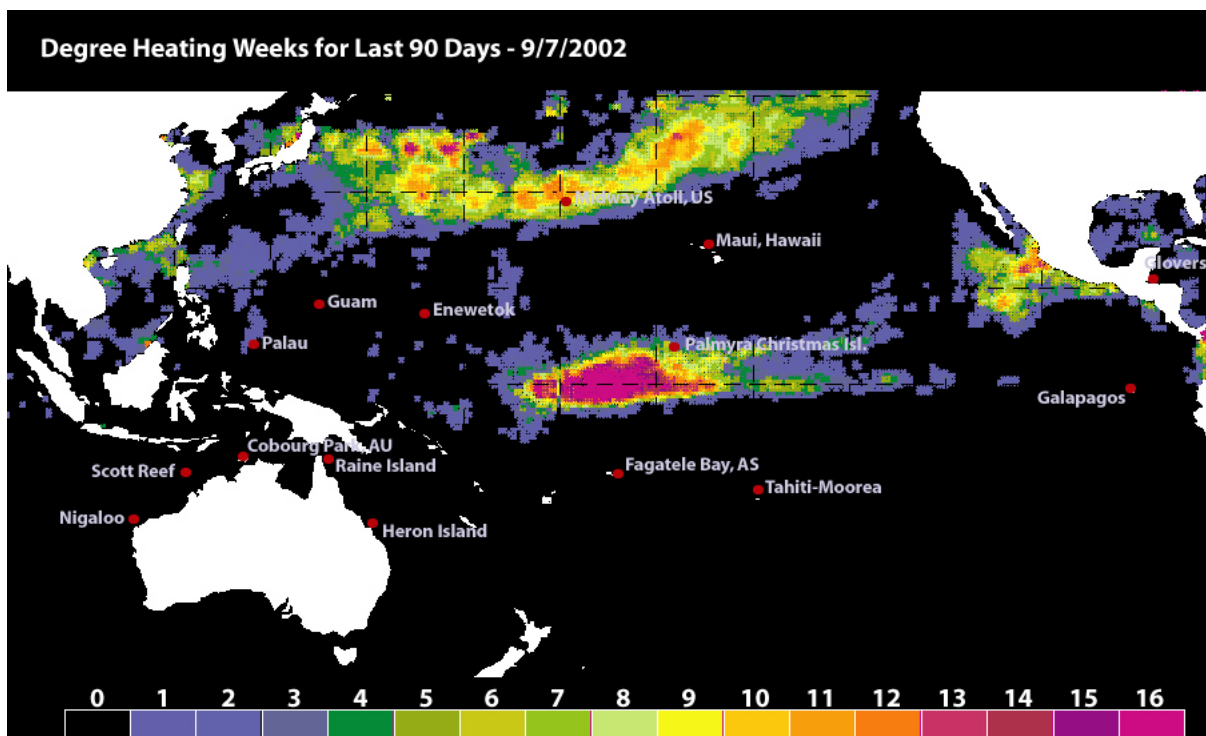
圖三、NOAA 預計架設之 CREW 測站地點。(取自: Skirving et al. 2006)



圖四、CREWS 測站。(取自: Hendee et al. 2006)



圖五、NOAA 提供之全球 HotSpot 資訊。圖為 2002 年 9 月 2 日的情形。(取自: Skirving et al. 2006)



圖六、NOAA 提供之全球 DHWs 數值。圖為 2002 年 9 月 7 日的情形。(取自: Skirving et al. 2006)

#### 4. 珊瑚白化預警發佈

利用現地收集到的即時環境資料後，經由衛星將資料傳送到 NOAA 底下的衛星資料運算處理中心，這些資料一方面被送入長期資料庫中儲存，另一方面則送入 CREWS 的專家運算系統中計算珊瑚白化的危機程度。CREWS 的專家運算系統是經由許多科學研究成果所建立的人工智慧運算系統。在此系統中，各個領域的專家，包括氣候、海洋、化學、海洋生物等領域學者，經由長期研究累積的成果，設定了各項珊瑚可能遭受白化的環境因子及其他相關環境資料，當現地測站將資料傳輸進入此運算系統中，系統會對根據其計算結果判斷此地點的珊瑚礁是否有面臨白化的危機。假如運算結果顯示當地珊瑚有遭受白化的危機，系統會立即發佈預警，主要透過電子郵件寄發相關政府單位及專家學者的信箱中，同時也在 NOAA 的網站上公佈。

## 二、台灣海域珊瑚白化溫度閾值分析

### 1. 文獻回顧

我們依據文獻回顧，整理出國際間針對珊瑚白化溫度閾值的研究(Coles et al. 1976 ; Glynn and D’Croz 1990 ; Cohen et al. 1997 ; Wellington et al. 2001 ; Brown et al. 1996 ; Brown 1997 ; Edwards et al. 2001 ; Bruno et al. 2001 ; Cook et al. 1990 ; Hoegh-Guldberg and Smith 1989 ; Jokiel and Coles 1990 ; Celliers and Schleyer 2002 ; Aronson et al. 2002 ; Davies et al. 1997 ; Winter et al. 1998)，共 15 個地點。整理各地點的緯度與珊瑚白化溫度閾值如表二。

### 2. 回歸分析結果

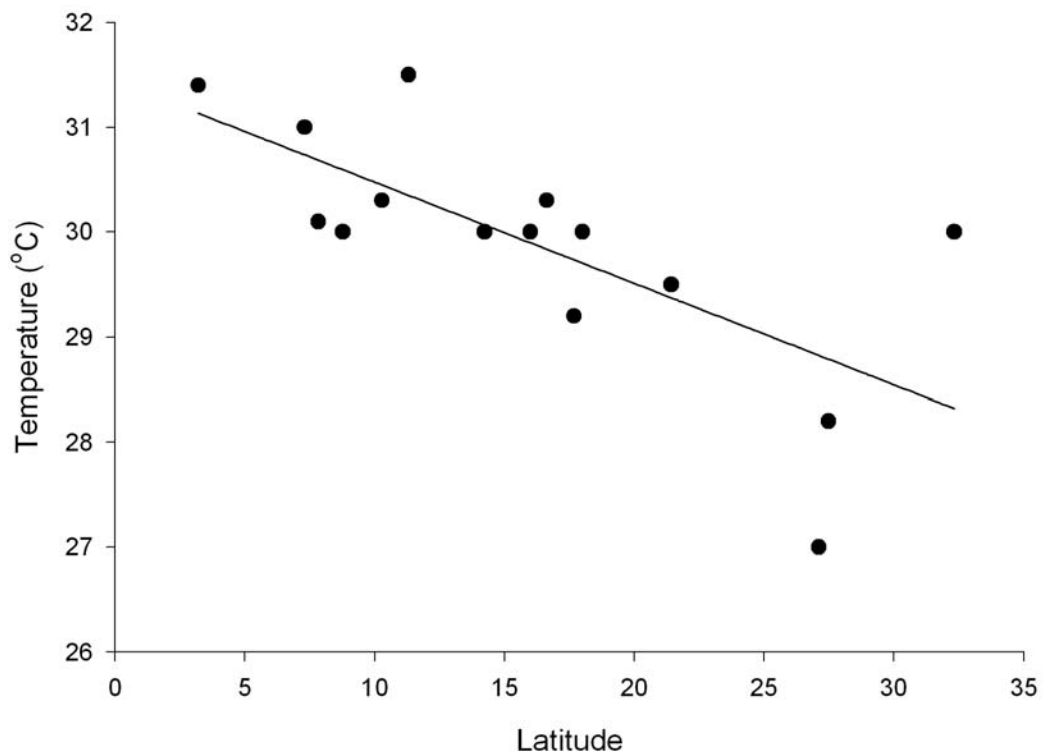
利用線性回歸分析珊瑚白化溫度閾值與緯度間的關係(圖七)，結果可得一線性方程式： $y = -0.085x + 31.317$ 。其中， $y$  代表珊瑚白化溫度閾值， $x$  代表緯度。此回歸方程式極顯著( $r^2 = 0.51, p < 0.005$ )。

表一：DHWs 數值與珊瑚白化危機等級。

Stress Level	Definition
No Stress	DHWs = 0
Bleaching Watch	0 < DHWs < 1
Bleaching Warning	1 < DHWs < 4
Bleaching Alert Level 1	4 < DHWs < 8
Bleaching Alert Level 2	8 < DHWs

表二：國際間珊瑚白化溫度閾值與其相對應之緯度。

Location	Threshold(°C)	Latitude
Easter Island	27	27.01
Sodwana Bay	28.2	34.05
Hawaii	29.5	21.38
Panama	30	8.97
Bermuda	30	32.32
Tahiti	29.5	17.68
Johnston Atoll	30	21.3
Puerto Rico	30	18.18
Enewetak	31.5	10.08
Lizard Island	30	14.67
Papua, New Guinea	30.3	6.37
Phuket	30.1	7.97
Belize	30.3	17
Palau	31	6.5
Maldives	31.4	3.2



圖七、珊瑚白化溫度閾值與緯度回歸關係圖。

### 3. 台灣海域四周的珊瑚白化溫度閾值

利用求得的方程式，帶入台灣五個代表地點的緯度，分別是：鹽寮 25.05 °N、石梯坪 23.50 °N、綠島 22.65 °N、南灣 21.93 °N、澎湖 23.61 °N，可求得各個地點的珊瑚白化溫度閾值，依序是：29.2°C、29.3°C、29.4°C、29.5°C、29.3°C。

### 三、1990-2006 年台灣四周海域水溫變化與珊瑚白化預警指標(DHWs)的驗證

整理從 NOMADS 所得到台灣海域周周五個地點，鹽寮(圖八)、石梯坪(圖九)、綠島(圖十)、南灣(圖十一)、澎湖(圖十二)，自 1990 到 2006 年五月的每週水溫平均資料，並以上述珊瑚白化溫度閾值作圖。結果顯示台灣海域各地點，在此期間都有水溫超過此閾值的情形。尤其在南灣，溫度超過的次數最多，但在大多數的情況中，超過的溫度都不到 1°C，也就是尚未達到 NOAA 標準下的溫度累積效應，因此在大多數年份中，各個地點的 DHWs 數值都沒有超過 1，尤其是澎湖與鹽寮，都處在 NOAA 分類標準下的”Bleaching Watch”。其中最值得注意的是，南灣、綠島與石梯坪在 1998 年的 DHWs 值都特別高，其中綠島與石梯坪的白化危機程度升高到”Bleaching Warning”的階段(DHWs=3.7 與 2.2)，南灣則進入”Bleaching Alert Level 1”階段(DHWs=4.7，表三)。

### 四、台灣海域在 2001-2100 年間的珊瑚白化危機

#### 1. CGCM2 模式資料

CGCM2(The Second Generation Coupled Global Climate Model)是由加拿大氣候模擬與分析中心發展出來的第二版本的氣候模擬模式。使用此一模式的好處在於，這個模式所提供的資料是模擬預測到 2100 年每日的海水表面溫度。這樣的尺度適合用來計算 DHWs 數值，同時也適合適用在評估珊瑚白化發生的時間尺度。

#### 2. 不同氣候情境：SRES A2 與 B2 比較

分別整理 CGCM2 中 SRES A2 與 B2 情境下，台灣三處海域(北部、澎湖和南部)，至 2100 年的海表溫度預測資料，並利用緯度與珊瑚白化溫度閾值的關係，設定這三個區域的為珊瑚白化閾值，分別為：29.2、29.3 與 29.5°C(圖十四到圖十九)。依據 IPCC 第三次評估報告，SRES A2 情境主要是模擬在 2100 年時，全球人口成長到 15 億；SRES B2 則是在較注重環保的狀態下，2100 年的人口大約為 10.4 億，因此兩種情境下的二氧化碳排放量也有所差異(附表三)。其次，結合海表溫度資料與溫度閾值，計算出兩個情境之下的 DHWs 數值的變化。

### 3. CGCM2-SRES A2 情境下的珊瑚礁危機

根據 CGCM2 SRES A2 的模擬資料預測，在 2050 年之前，台灣海域的珊瑚白化危機較小，各海域的 DHWs 數值都未達到導致珊瑚大量白化的程度。但是值得重視的是，在 2050 年之前，海水表面溫度的變化，就開始出現超過珊瑚白化閾值的情況，大約在 2030 年，台灣海域的溫度將逐漸出現超過閾值的現象，只是此階段超過的溫度仍在 1°C 以下，且每年超過次數約五次。雖然這樣的狀況尚不至於導致珊瑚大規模白化與死亡，但是這樣的警訊顯示出珊瑚礁在這段期間可能面臨低度的白化危機，如果環境條件良好，珊瑚仍有機會恢復健康。進入 2040 年以後，這種現象的發生頻率，每年將高達十次以上。雖然依舊不至於導致珊瑚大量白化或死亡，但是珊瑚卻面臨高度的白化危機，尤其針對某些耐受性較低的珊瑚種類，可能會在此階段面臨重大的白化與死亡事件。同時，這樣的溫度變化也預示了在 2050 年以後即將產生的珊瑚大量白化與死亡。特別值得注意的是，根據模擬資料結果顯示，高溫發生的頻率越頻繁，相對能讓珊瑚恢復的低溫時間越來越短，也就是說台灣南部海域的珊瑚很可能因為連續多年的高溫現象，使得台灣南部珊瑚礁生態在 2050 年以前就面臨極大危機。若以 DHWs 值來評估，在 2050 年以前，各地的數值都未超過 1，然而在 2050-2060 年間，DHWs 值快速上升，南部海域甚至達到 6.63(圖十六)，危機評估落點從 2050 年的”Bleaching Watch”躍升到”Bleaching Alert Level 1”，也就是超過 1998 年數值將近兩個單位，顯示出在此階段珊瑚白化及死亡的危機將更嚴重。到了 2080 年以後，無論是北部、南部或是澎湖海域，DHWs 數值幾乎年年都會超過 8，珊瑚在這樣的狀態下將無法繼續生存。及至 2100 年，DHWs 值接近 30，珊瑚存續的機會趨近於零。

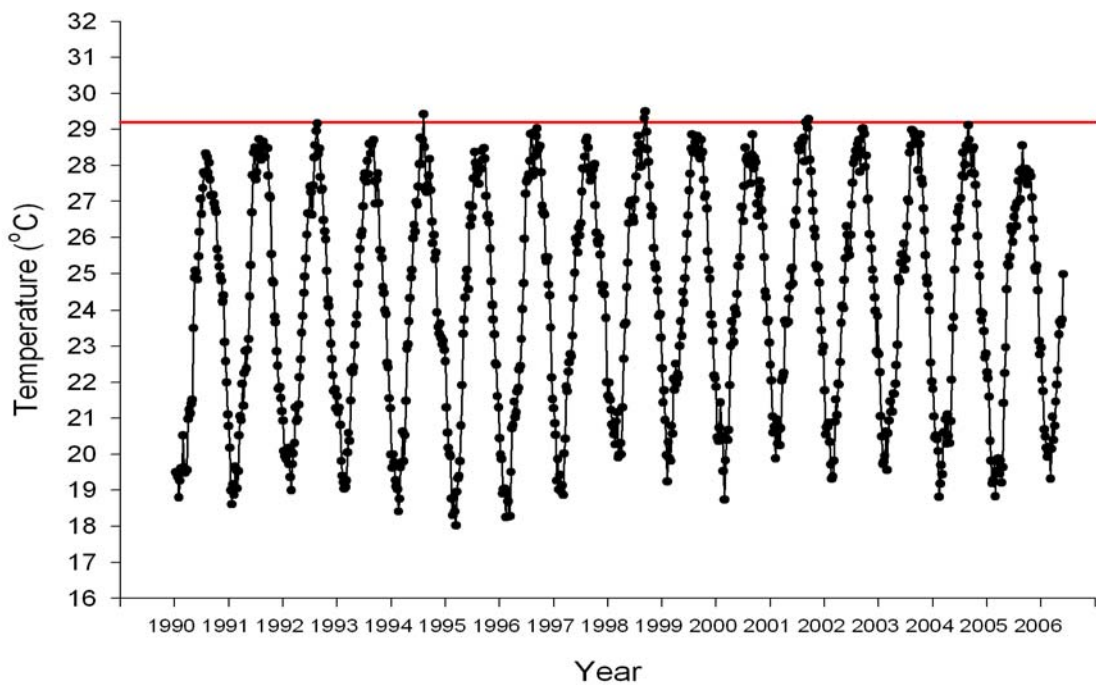
### 4. CGCM2-SRES B2 情境下的珊瑚礁危機

在 CGCM2 SRES B2 情境下的模擬結果與 SRES A2 的結果有很大的差異。依兩者的結果來看，雖然從 2010 年以後開始，在 SRES B2 情境下，海水表面溫度就開始偶而超過白化的閾值，情形如同 SRES A2 在 2030 年以後所呈現的現象。然而，在 SRES B2 情境下，這樣的狀況沒有隨著時間的演進而有更劇烈的改變，也因此在此 SRES B2 的情境下，台灣南部海域到了 2070 年左右，DHWs 數值才有升高的趨勢，並且其數值低於 4.0，甚至隔年的 DHWs 值又回到 0，甚至到了 2100 年，期間也只發生過兩三次的高溫事件，導致 DHWs 數值超過 8。這樣的狀況說明了在這個情境之下，不但高溫現象的出現是零星的，同時珊瑚在面臨白化危機之後，仍有讓珊瑚喘息與恢復的時間。

表三：1990-2005 年，南灣、綠島、石梯坪四個地點的年度最高 DHWs 值。

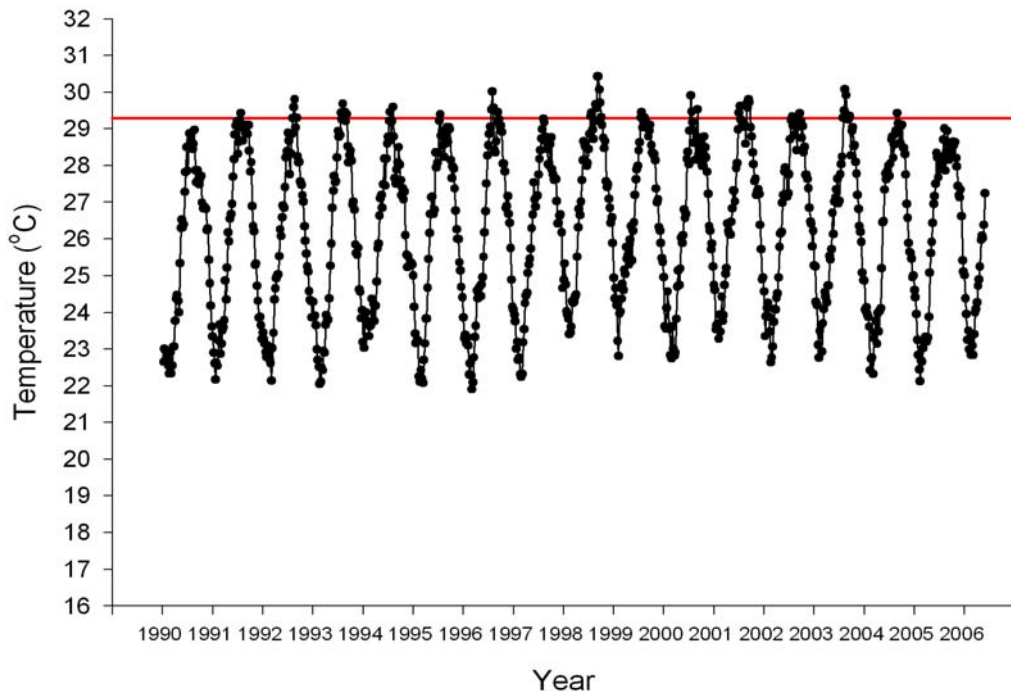
南灣			綠島			石梯坪		
Year	次數	maxDHWs	Year	次數	maxDHWs	Year	次數	maxDHWs
1990	0	0	1990	0	0	1990	0	0
1991	0	0	1991	0	0	1991	0	0
1992	0	0	1992	0	0	1992	0	0
1993	0	0	1993	0	0	1993	0	0
1994	0	0	1994	0	0	1994	0	0
1995	0	0	1995	0	0	1995	0	0
1996	1	1	1996	1	1	1996	0	0
1997	0	0	1997	0	0	1997	0	0
1998	5	4.7	1998	4	3.7	1998	3	2.2
1999	0	0	1999	0	0	1999	0	0
2000	0	0	2000	0	0	2000	0	0
2001	0	0	2001	0	0	2001	0	0
2002	0	0	2002	0	0	2002	0	0
2003	0	0	2003	0	0	2003	0	0
2004	0	0	2004	0	0	2004	0	0
2005	0	0	2005	0	0	2005	0	0

鹽寮



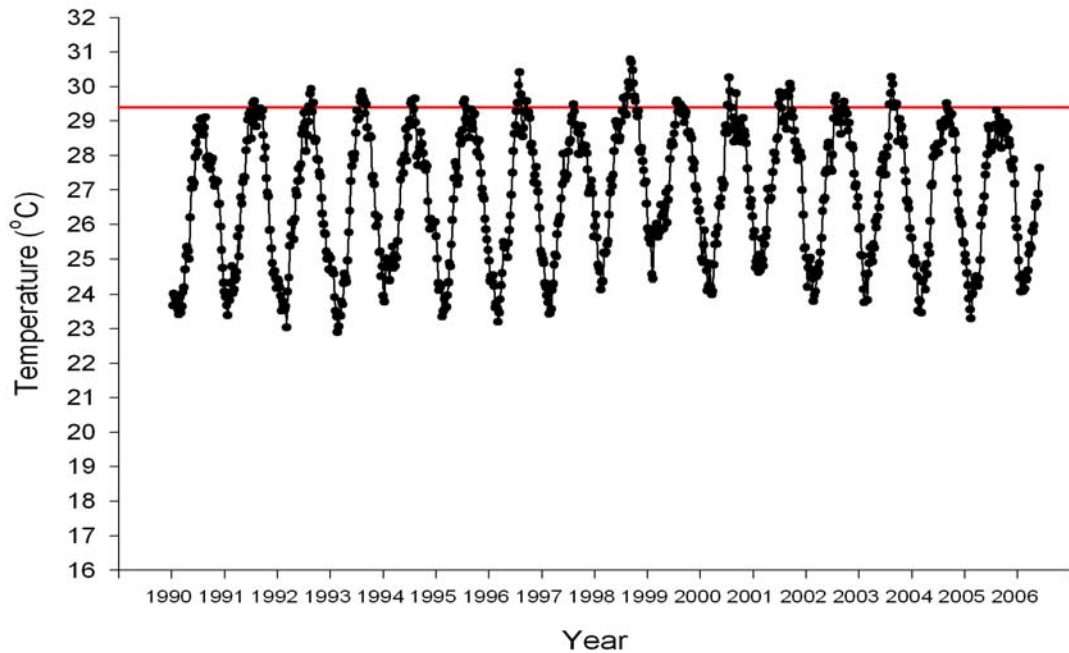
圖八、1990-2006 鹽寮海域海水表面溫度變化圖。紅線為珊瑚白化溫度閾值，29.2°C。

石梯坪 g



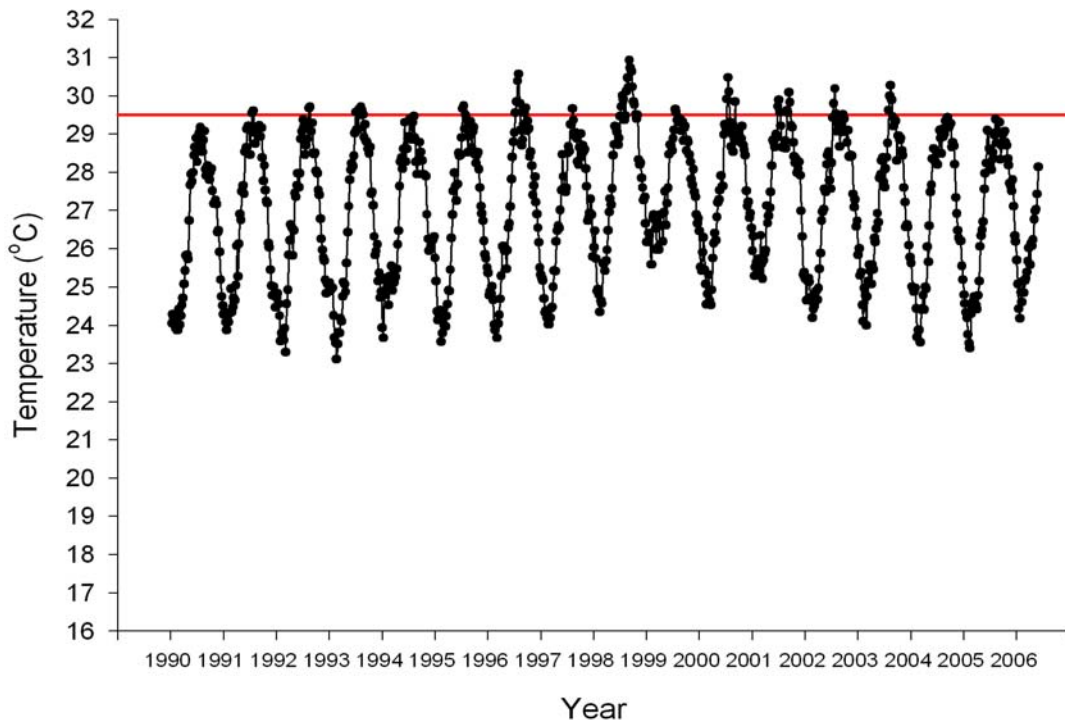
圖九、1990-2006 石梯坪海域海水表面溫度變化圖。紅線為珊瑚白化溫度閾值，29.3°C。

綠島 d



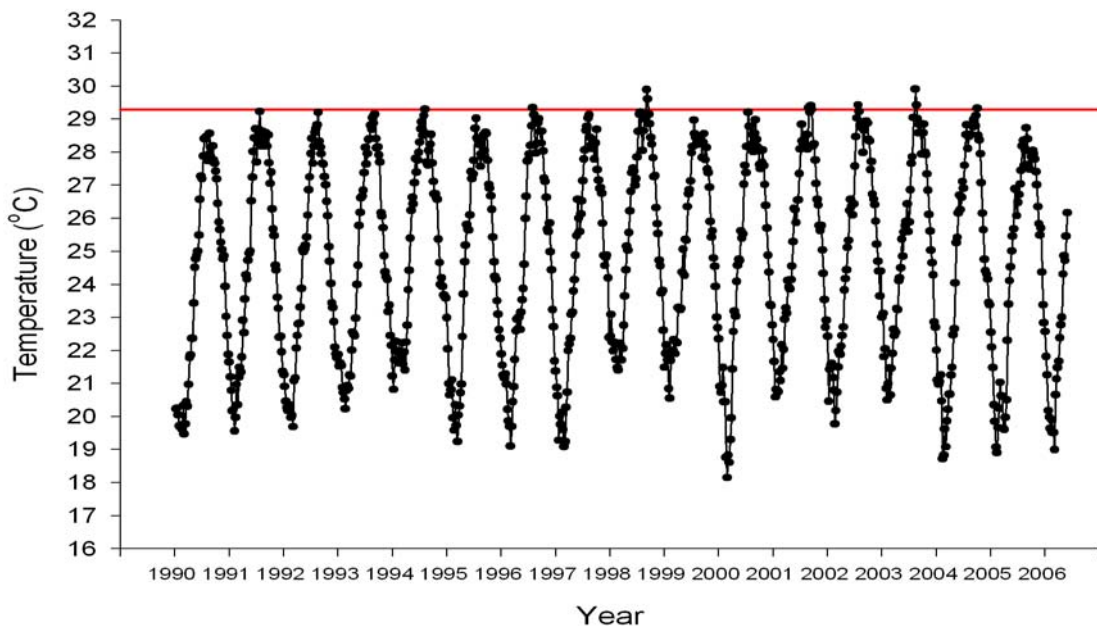
圖十、1990-2006 綠島海域海水表面溫度變化圖。紅線為珊瑚白化溫度閾值，29.4°C。

南灣 Nan Wan



圖十一、1990-2006 南灣海域海水表面溫度變化圖。紅線為珊瑚白化溫度閾值，29.5°C。

澎湖群島 I

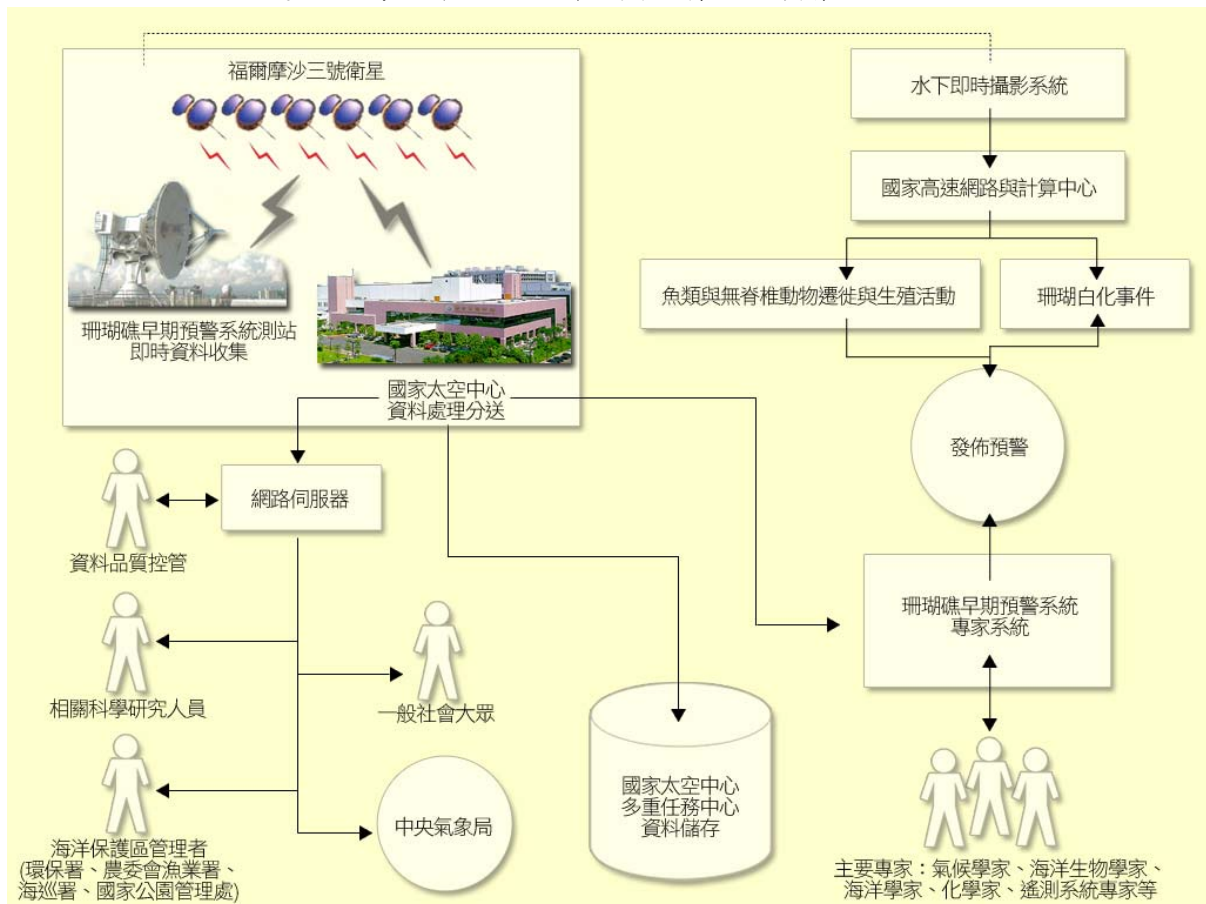


圖十二、1990-2006 澎湖海域海水表面溫度變化圖。紅線為珊瑚白化溫度閾值，29.3°C。

## 討論

### 一、台灣珊瑚礁早期預警系統的發展

目前台灣尚無珊瑚礁早期預警系統的建構，但是在基礎研究與設施上，已略有所成。參考 NOAA 的架構模式，未來若能整合目前分散在各單位的研究設備，並選擇重要海域(如:墾丁、綠島、澎湖)設立即時海象監測與珊瑚礁監測裝置，將現場蒐集的資料透過福爾摩沙衛星系統傳送至資料儲存系統(設立於國家太空計畫室或其他機構)，即可建立台灣的珊瑚礁預警系統(圖十三)，提供珊瑚白化的早期預警，同時可將此系統與 NOAA 的 CREWS 連結，為全球珊瑚礁研究與保育做出貢獻。



圖十三、我國珊瑚礁預警系統建議架構圖。

#### 1. 國家太空中心

在 NOAA 所建構的珊瑚礁早期預警系統中，衛星資料的收集與匯整是由 NOAA 所屬的國家環境衛星資料資訊局(National Environmental Satellite, Data, and Information Service, NESDIS)負責。在我國的相對應機構則是國家太空中心。我國的國家太空中心(National Space Organization, NSPO)成立於 1991 年 10 月，是因應「國家太空科技發展長程計畫」所設立，並成為我國太空計畫的執行單位。國家太空中心以執行衛星計畫為主

軸，適合做為我國珊瑚礁區現地監測衛星的資料收集與數據處理中心。因此，結合國家太空中心的相關系統與資源，將是建構我國珊瑚礁預警系統的重要基礎。

## 2. 福爾摩沙衛星三號

在珊瑚礁預警系統中，衛星資料的取得是關鍵之一。福爾摩沙衛星三號於 2006 年 4 月自美國范登堡基地發射成功後，對於我國未來海域資料的蒐集與監測，將可提供極大助益。福爾摩沙衛星三號計畫是一個大型的國際合作計畫，由我國的國家太空中心與美國大學大氣研究聯盟(University Corporation for Atmospheric Research, UCAR)共同合作執行。福衛三號共有六顆微衛星，分佈於地球表面 700~800 公里高之不同軌道中，圍繞著地球運轉，組成涵蓋全球的低軌道微衛星星系，可接收美國 24 顆全球定位衛星(GPS)所發出的訊號。資料均勻分佈於全球，且約每三小時可完成全球氣象資料蒐集及計算分析，約每 90 分鐘更新一次。此系統在設計上可用於長時間氣候變遷現象的相關科學研究，如果能夠於我國重要的珊瑚礁區設立現地浮球測站，持續收集海域環境資訊，做為監測依據，不但對維持我國珊瑚礁資源或海洋生態資源是一大利器，同時也能夠提昇我國在這方面的國際地位，在珊瑚礁或海洋環境上做出重要貢獻。而且，相關資料的累積與長期監測，對於增進我國珊瑚礁海洋生態與保育研究，更是一項不可或缺的條件。

## 3. 國家高速網路與計算中心

在整個珊瑚礁預警系統的架構中，具核心地位的專家系統，是依靠大量的現地即時資料與儲存的歷史資料，配合人工智慧系統運算來提出珊瑚礁白化預警危機。這樣的資料處理與運算皆須要國家高速網路與計算中心的技術支援，而國家高速網路與計算中心的加入，也對於這個系統的運作很有幫助。國家高速網路與計算中心成立於 1991 年，2003 年正式轉制為財團法人，隸屬於國家實驗研究院，簡稱為「國網中心」，其主要任務在於負責高效能計算、儲存、網路、平台整合的前瞻技術。國網中心的技術可提供做為整合珊瑚礁區的環境資料與專家運算系統的平台，也可當作珊瑚白化預警的消息發佈的窗口，都是非常重要且關鍵的。國網中心在承接了「挑戰 2008 六年國發計畫」之後，以建置台灣高品質學術研究網路(TaiWan Advanced Research and Education Network, TWAREN)，並推動台灣知識格網(Knowledge Innovation National Grid, KING)為其主要目標，並希望能夠塑造台灣成為亞太地區知識匯流的核心據點。

## 4. 水下監測系統

水下監測系統可提供即時的珊瑚礁影像，做為判斷珊瑚礁現況的依據，我國目前已

有此系統的設置。2004年10月，中央研究院生物多樣性中心、國家高速網路與計算中心、國立海洋生物博物館及台電公司合作建置了一套水下監測系統。整套系統共有三部水下攝影機組，分設在核三廠南灣入水口水深七至八公尺的海底，每套機組由三部攝影機組成，可即時傳送水下影像，透過國網中心處理，可全天候即時監測當地的珊瑚礁生態現況。此監測系統可及時發現珊瑚礁海域發生的危機或異常狀況，例如珊瑚礁生物的健康情形、珊瑚白化徵兆、海水水質變動等，並且於必要時立即加以處置。同時，這個系統也讓研究人員可以隨時觀察水下生物的活動與交互作用，對於科學研究或水下監測工作的進行非常有幫助，此系統可以做為建構我國珊瑚礁預警系統的環節之一。

我國海域的珊瑚礁資源豐富，相關的研究成果與科技運用在國際間也具有相當高的水準，若能整合這些技術與資源來建構我國的珊瑚礁預警系統，對於保育我國珊瑚礁生態系與維持海域資源的永續利用，具有重要意義。

## 二、台灣海域珊瑚白化溫度閾值的探討

本研究結果顯示，珊瑚白化溫度與緯度之間，存在著良好的回歸關係，依此關係求得的珊瑚白化閾值，比照歷史紀錄也非常合理。例如，以南灣海域在1998年發生的白化事件為例，利用我們求得的 $29.5^{\circ}\text{C}$ 作為閾值（較NOAA的標準高 $0.2^{\circ}\text{C}$ ），配合當年海水溫度得到 $\text{DHWs} = 4.7$ ，落點在珊瑚白化危機評估中的“Bleaching Alert Level 1”。此標準與實際發生白化的現象非常吻合。然而，未來我們仍需要再對此一標準進行詳盡的檢驗，以求更精準地預測或評估我國海域珊瑚礁在全球暖化的趨勢之下，所面臨的危機。

## 三、台灣海域歷年珊瑚白化危機與預警模式評估

在1990-2006年間，台灣南部的南灣海域是受到溫度衝擊影響最大的區域，尤其是夏季，此區域的每週平均溫度都非常接近珊瑚白化危機的臨界值。值得注意的是，在1998年台灣各海域的水溫都偏高， $\text{DHWs}$ 值也比其他年份大，尤其是南灣地區高達4.7。雖然依照NOAA所設定的危機等級標準，當 $\text{DHWs} > 8$ ，珊瑚才面臨高度的白化與死亡危機([www.osdpd.noaa.gov/PSB/EPS/SST/methodology.html](http://www.osdpd.noaa.gov/PSB/EPS/SST/methodology.html))，但是，根據台灣海域在1998年的記錄，當時仍發生珊瑚大量白化的現象(宋克義等，2000)，這代表未來在台灣海域進行珊瑚礁白化的監測與預警時，應該在不同等級的白化危機都發佈不同程度的預警，提高環保或管理當局與民眾的警覺，並且訂立因應各層級危機的行動與處置準則，以求在珊瑚礁白化與死亡之前，達到預防的目標。

1998年的珊瑚白化較嚴重，主因1997-98年為聖嬰高峰年，該年全球熱帶海域水溫普遍偏高，使得珊瑚受到嚴重衝擊，這個現象在世界各地都有記錄(Hoegh-Guldberg, 1999; Wilkinson, 1999)。此一歷史事件顯示，異常氣候型態導致海水溫度劇烈變化，對於珊瑚

的生存將是重大衝擊，而在全球暖化的影響之下，異常氣候對珊瑚礁的衝擊將更為明顯。因此，建立珊瑚礁早期預警系統，以期及早發現珊瑚礁面臨的危機，適時做出處置與因應，是十分迫切的工作。

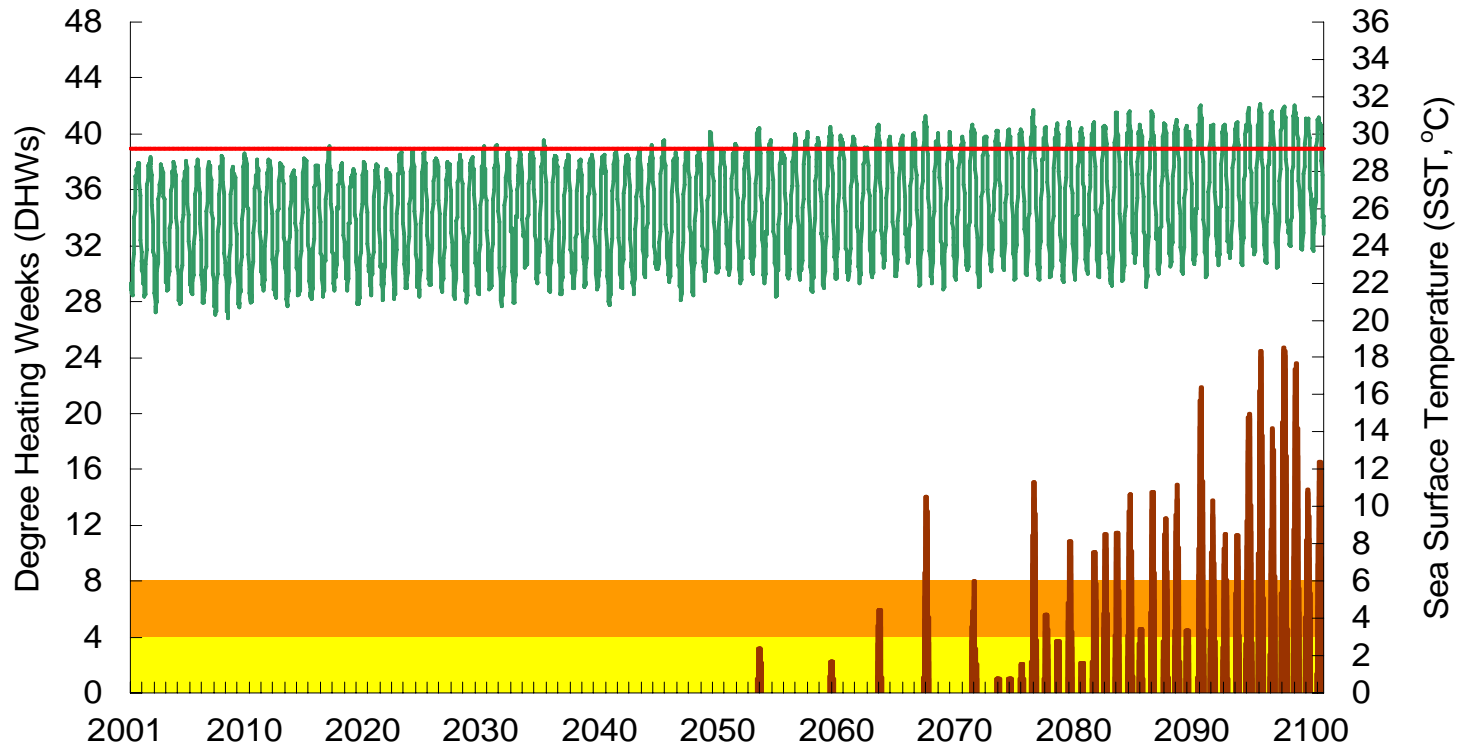
#### 四、台灣海域未來的珊瑚礁危機

影響全球氣候變遷的因素繁多，導致未來的改變充滿許多不確定性。這樣的狀況會造成氣候變遷對環境影響的差異，因此，未來全球氣候變遷對於我國珊瑚礁生態的衝擊，也會因為環境變遷的劇烈程度或是人為控制各種與氣候變遷相關的因子而有所不同。在這樣的前提下，結合 IPCC 的任務-評估人類所引起的氣候變化有關之科學、技術和社會經濟的資訊，以了解其所產生的風險，來探討氣候變遷對我國海域生態的衝擊，以期能夠找出適當管理策略，進而保護我國海洋環境。因此，利用 IPCC 第三次評估報告中所公佈的不同氣候變遷情境-SRES A2 與 B2，來評估我國海域珊瑚礁生態在全球氣候變遷的衝擊之下會有如何的反應，提示了我們可能的作為。SRE A2 與 B2 情境模擬上的差異，最主要是在全球人口成長與二氧化碳的排放(附表三)。

本研究結果說明了無論在哪一個情境之下，我國海域珊瑚礁在未來的 50-70 年，將會遭受到無法恢復的大規模白化。珊瑚礁一旦無法從白化的狀態恢復正常，隨之而來的便是大量的珊瑚死亡，許多依靠珊瑚礁生長的無脊椎動物、魚類等生物也將無法生存下去。除了生物多樣性的消失，依賴捕撈珊瑚礁經濟魚種維生的漁民，將無魚可捕；珊瑚礁吸引觀光遊客從事休閒活動與相關產業將會流失；深藏在珊瑚礁生物體內的未來藥物成分將無法被發現。珊瑚礁的白化與死亡，最終會導致珊瑚礁生態系與仰賴珊瑚礁的經濟活動瓦解，無論對於生態本身或是我國人民的生活，都是非常嚴重的問題。

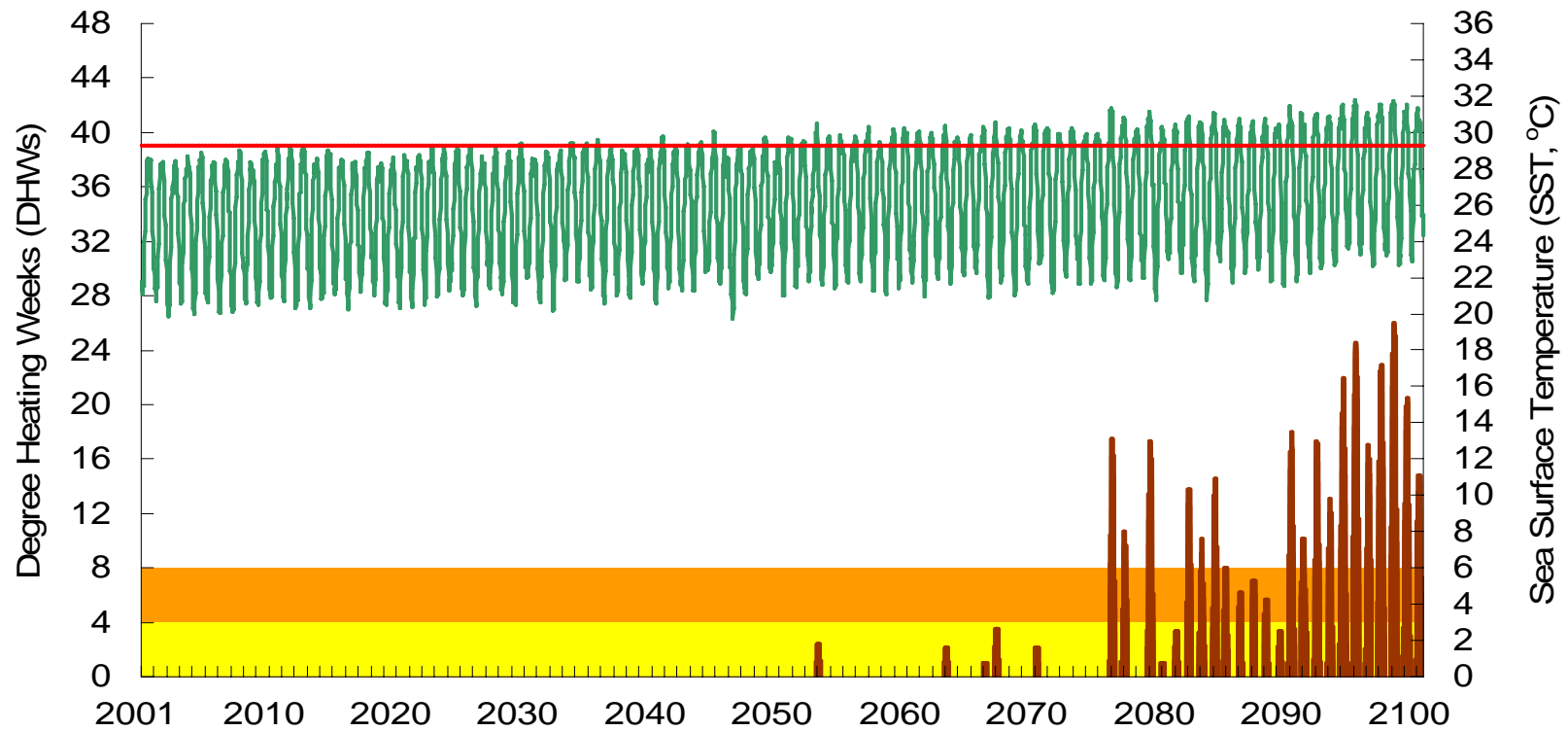
然而，分析結果可以看出在 SRES B2 情境下的珊瑚白化與死亡的危機較為緩和，主要原因是在這個情境下的人口成長較緩慢與二氧化碳的排放量較低，顯示出人為活動對於珊瑚礁生態系的存續扮演著關鍵角色，也看出適當的人口政策與二氧化碳排放量的控制，可以有效地減緩珊瑚礁生態系在未來將面臨的危機。除了人口成長與二氧化碳排放的限制之外，若能在其他影響珊瑚健康或導致珊瑚白化的因子有所控制，珊瑚礁生態系的永續是可令人期待的。因此，訂定海洋保育相關法規，確實執行海洋保育相關管理與執法，研擬涵蓋陸域與海域的完整性保育政策，是當前我國在面臨全球環境變遷的威脅之下，必須加緊完成的目標。

The Changes of SST & DHWs in Northern Taiwan (2001-2100)



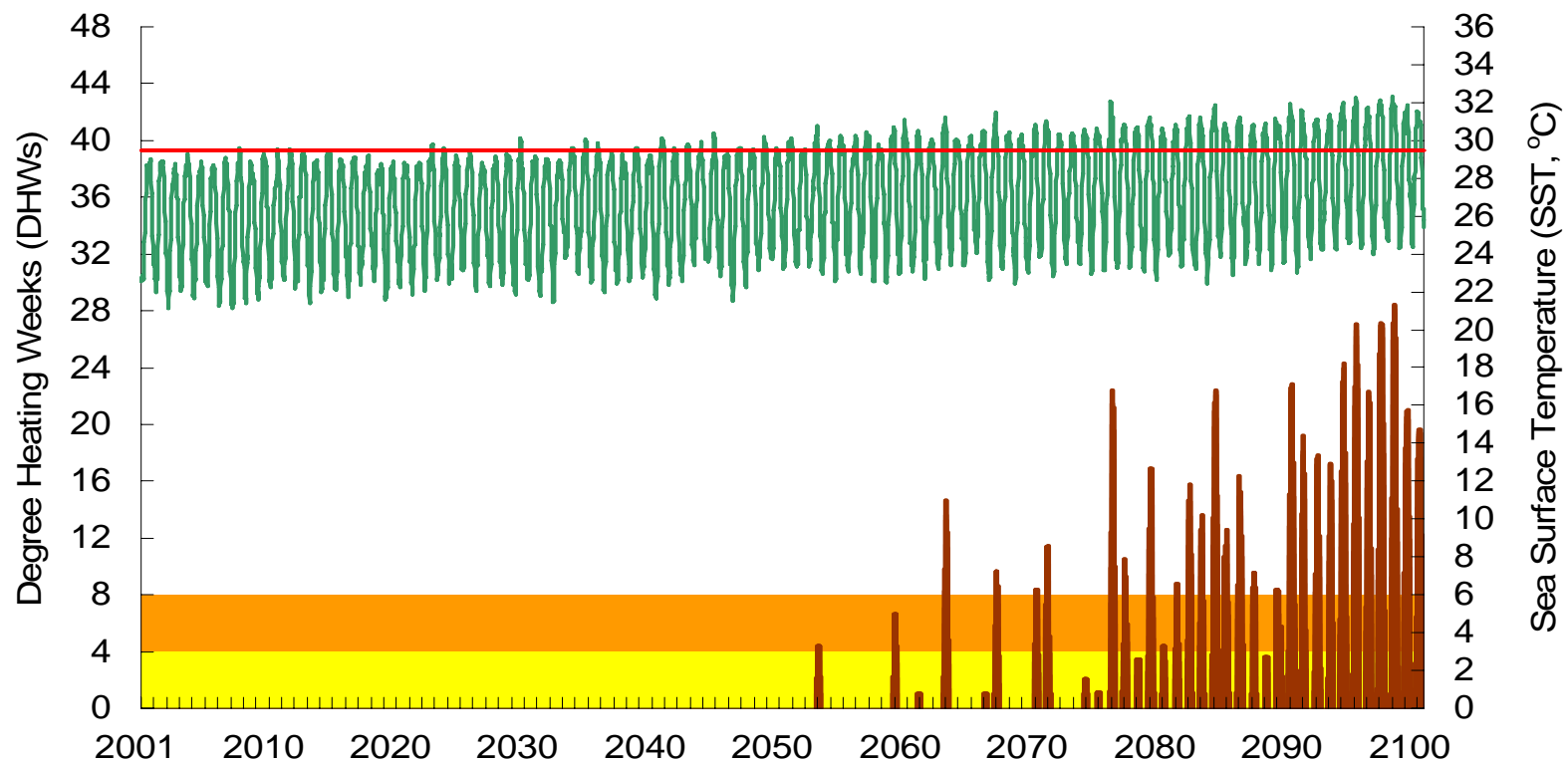
圖十四、台灣北部海域之海水表面溫度在 SRES A2 情境下 2001-2100 年的變化情形(圖中綠色線條)、珊瑚白化溫度閾值(紅色橫線)與 DHWs 數值(咖啡色直方圖)。黃色背景表示珊瑚白化危機層級在”No Stress”到”Bleaching Warning”；橘色背景表示珊瑚白化危機層級為”Bleaching Alert Level 1”；超過橘色部分的危機層級則是”Bleaching Alert Level 2”。

The Changes of SST & DHWs in Peng-hu (2001-2100)



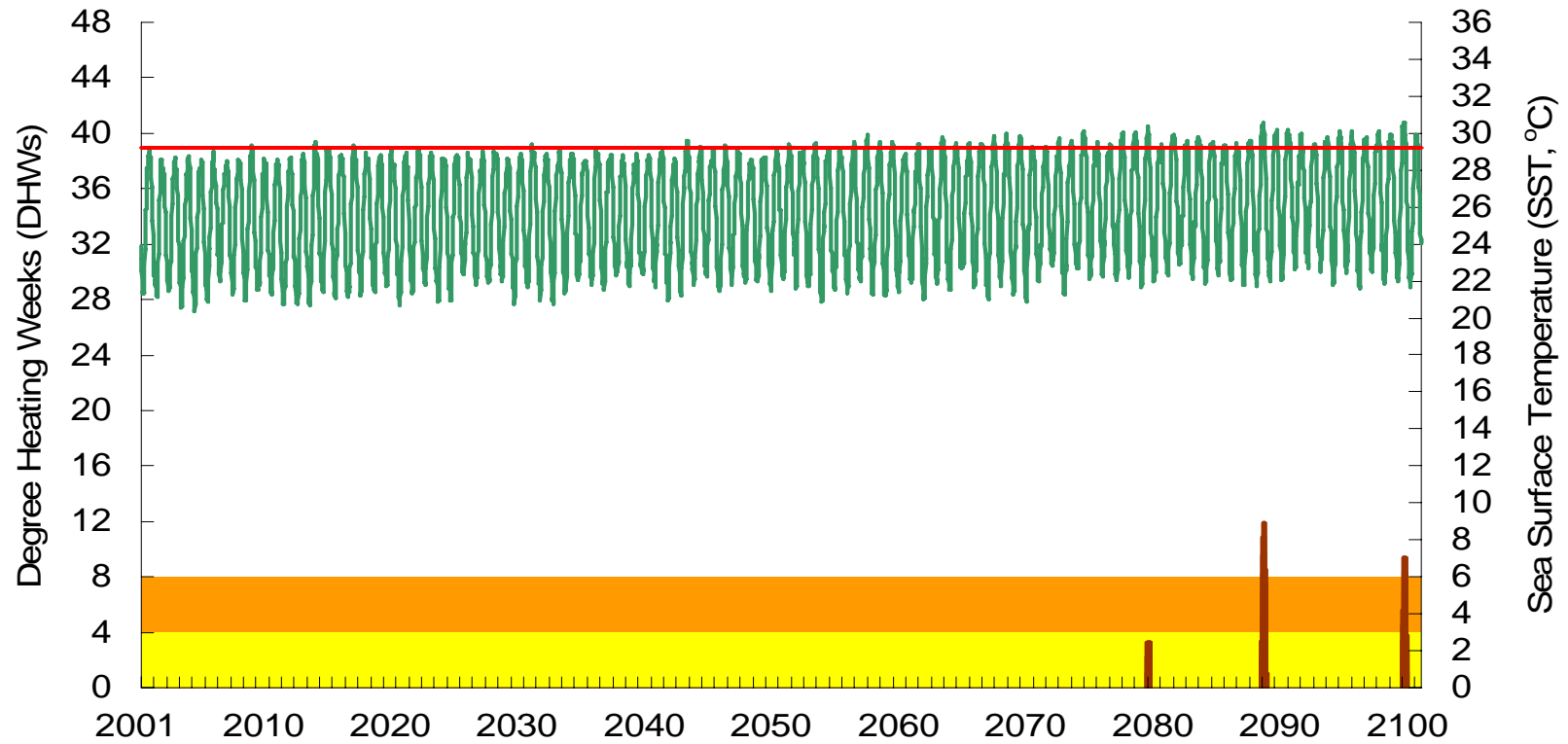
圖十五、台灣澎湖海域之海水表面溫度在 SRES A2 情境下 2001-2100 年的變化情形(圖中綠色線條)、珊瑚白化溫度閾值(紅色橫線)與 DHWs 數值(咖啡色直方圖)。黃色背景表示珊瑚白化危機層級在”No Stress”到”Bleaching Warning”；橘色背景表示珊瑚白化危機層級為”Bleaching Alert Level 1”；超過橘色部分的危機層級則是”Bleaching Alert Level 2”。

The Changes of SST & DHWs in Southern Taiwan (2001-2100)



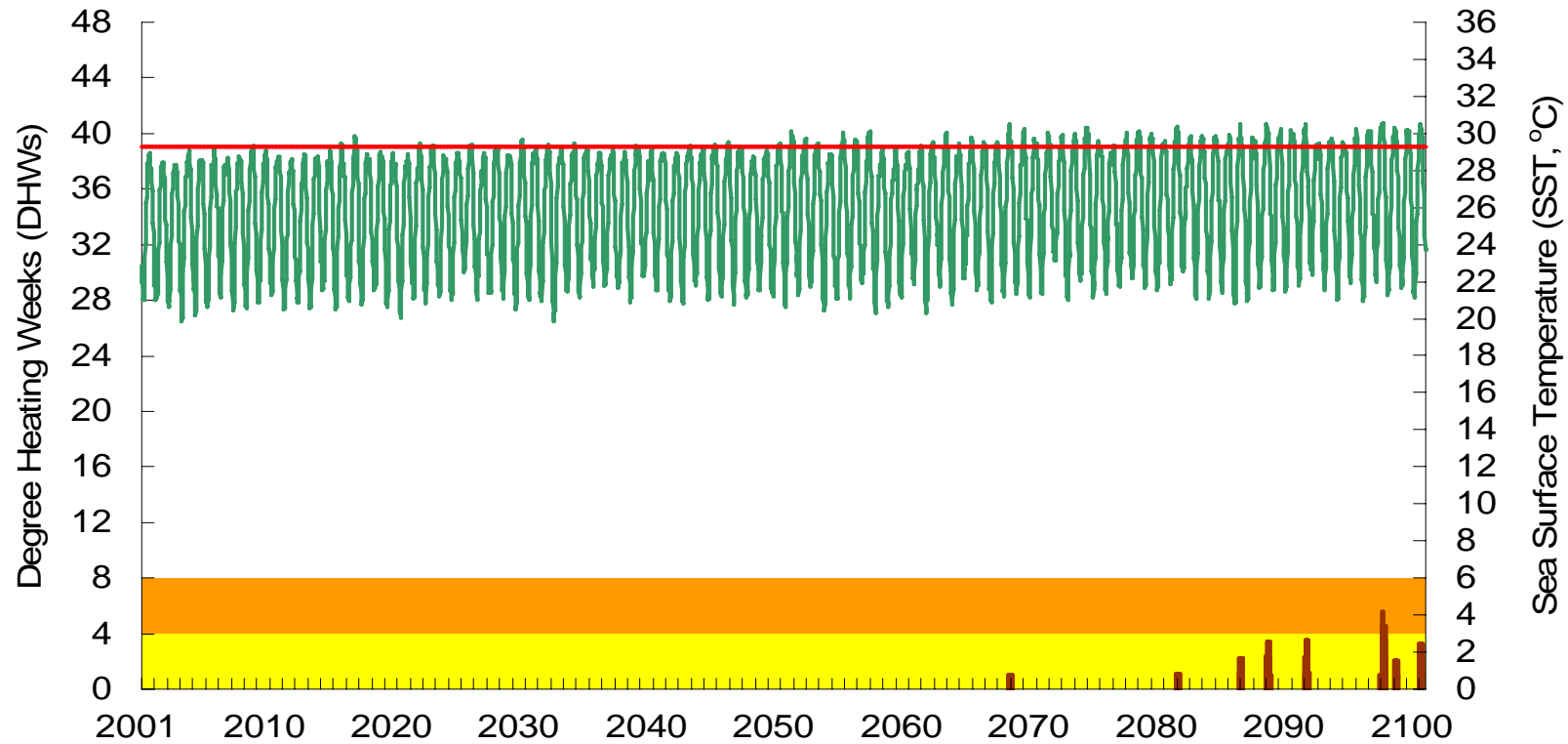
圖十六、台灣南部海域之海水表面溫度在 SRES A2 情境下 2001-2100 年的變化情形(圖中綠色線條)、珊瑚白化溫度閾值(紅色橫線)與 DHWs 數值(咖啡色直方圖)。黃色背景表示珊瑚白化危機層級在”No Stress”到”Bleaching Warning”；橘色背景表示珊瑚白化危機層級為”Bleaching Alert Level 1”；超過橘色部分的危機層級則是”Bleaching Alert Level 2”。

The Changes of SST & DHWs in Northern Taiwan (2001-2100)



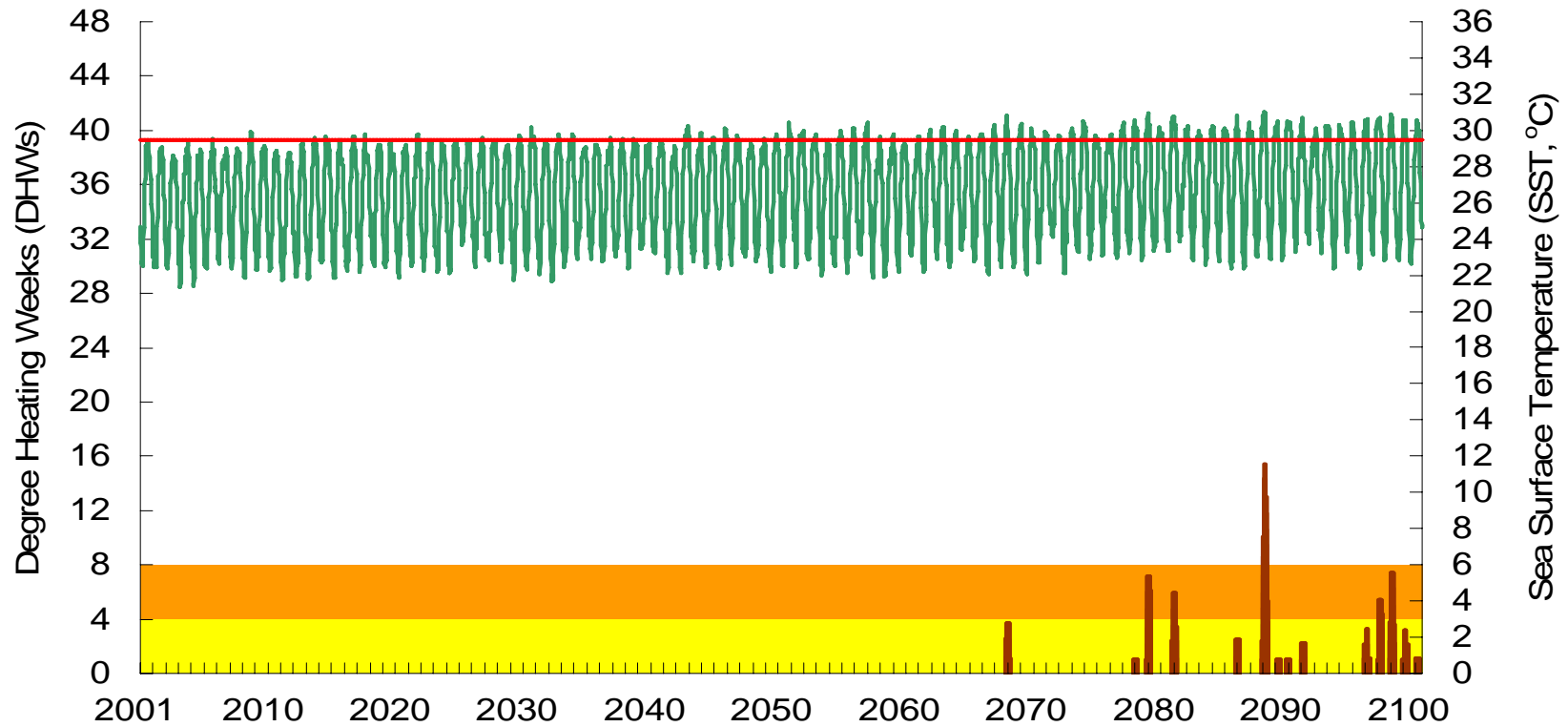
圖十七、台灣北部海域之海水表面溫度在 SRES B2 情境下 2001-2100 年的變化情形(圖中綠色線條)、珊瑚白化溫度閾值(紅色橫線)與 DHWs 數值(咖啡色直方圖)。黃色背景表示珊瑚白化危機層級在”No Stress”到”Bleaching Warning”；橘色背景表示珊瑚白化危機層級為”Bleaching Alert Level 1”；超過橘色部分的危機層級則是”Bleaching Alert Level 2”。

The Changes of SST & DHWs in Peng-hu (2001-2100)



圖十八、台灣澎湖海域之海水表面溫度在 SRES B2 情境下 2001-2100 年的變化情形(圖中綠色線條)、珊瑚白化溫度閾值(紅色橫線)與 DHWs 數值(咖啡色直方圖)。黃色背景表示珊瑚白化危機層級在”No Stress”到”Bleaching Warning”；橘色背景表示珊瑚白化危機層級為”Bleaching Alert Level 1”；超過橘色部分的危機層級則是”Bleaching Alert Level 2”。

The Changes of SST & DHWs in Southern Taiwan (2001-2100)



圖十九、台灣南部海域之海水表面溫度在 SRES B2 情境下 2001-2100 年的變化情形(圖中綠色線條)、珊瑚白化溫度閾值(紅色橫線)與 DHWs 數值(咖啡色直方圖)。黃色背景表示珊瑚白化危機層級在”No Stress”到”Bleaching Warning”；橘色背景表示珊瑚白化危機層級為”Bleaching Alert Level 1”；超過橘色部分的危機層級則是”Bleaching Alert Level 2”。

## 五、氣候變遷的珊瑚礁保育策略

在全球氣候變遷的衝擊之下，全世界的珊瑚礁都面臨了重大危機，台灣的珊瑚礁也不例外。其實，在珊瑚礁面臨的危機中，還是以人為破壞和污染為首要因子。而人為因子的影響可經由適當的管理和污染防治來減輕，由於氣候變遷牽涉的層面較廣，管制上也難有立竿見影的效果，因此世界各國皆致力於減緩人為因子對珊瑚礁的影響。

### 1. 短期調適策略

在短期預警的調適策略方面，當珊瑚礁面臨白化危機的預警發佈時，應即針對該礁區採取停止或減少人為活動的方式，如關閉海水浴場、停止潛水活動等，減少珊瑚礁生物承受的額外壓迫，使其獲得喘息機會。台灣海域的主要珊瑚礁區皆位於國家公園或國家風景區之內，夏季期間的遊憩活動很頻繁，例如：墾丁國家公園每年的遊客就超過三百萬人次，如此眾多的遊客會給墾丁海域的珊瑚礁帶來龐大壓力，海灘戲水、浮潛、水肺潛水、任何水域活動、甚至旅館及飯店的廢水排放，對會對珊瑚礁生態系帶來額外的壓力與負擔，導致其抵抗溫度升高的能力降低。因此，若在預警發佈時，適時停止海域活動或限制旅遊活動，將可大幅減輕水溫上升對珊瑚礁的衝擊，提高珊瑚存活的機會。這樣的限制也可以配合不同等級的白化危機(Bleaching Watch 到 Bleaching Alert Level 2)，制定不同的危機處理程序與準則，以期讓珊瑚礁生態系與民眾社會經濟活動的損失都降至最低。因此，總結因應氣候變遷對珊瑚礁生態系之衝擊的短期調適策略要點如下：

- (1) 建立珊瑚礁早期預警系統。
- (2) 研擬不同珊瑚白化預警程度之相關海岸管理配套措施。
- (3) 規劃珊瑚白化救援行動準則。
- (4) 確實落實預警、管理與執法程序。

### 2. 中期調適策略

除了遊憩活動對珊瑚礁的影響之外，人為的土地開發利用，包括興建觀光旅遊設施、建造公路等工程，若沒有妥善的規劃與防護措施，非常容易導致水土保持不良，使得過多沉積物沖刷到海中，覆蓋珊瑚的結果會造成珊瑚窒息死亡。因此，中期的調適策略可針對土地開發利用的相關水土保持措施，訂定明確規範，並且徹底實施、執行與檢驗，以防範在溫度上升的環境中，珊瑚遭受沉積物的影響而死亡。

另外，污水處理設施的興建可以防止過多的營養鹽與有毒物質輸入珊瑚礁區。海域中過高的營養鹽會導致藻類大量生長，藻類不但會與珊瑚競爭棲地，甚至可能會覆蓋珊瑚，導致其死亡；營養鹽過高同時也會造成細菌的滋生，影響珊瑚的健康狀況；有毒物

質的輸入，也會降低珊瑚的健康與珊瑚抵抗溫度變化的能力。因此，興建污水處理設施也能夠降低珊瑚礁生態系在全球暖化的影響下的環境壓力。

加強台灣海域四周的珊瑚礁調查，瞭解我國珊瑚礁資源的現況，建立未來相關研究與資料的基礎，也是在中程調適策略之一。唯有對我們擁有的資源具備完整的認識，才有未來妥善規劃管理與永續發展的可能。這樣的工作需要大量人力的投入，因此，宣導正確觀念，廣泛招募具相關技術志工，讓更多人關心珊瑚礁問題，進而使其自發性參與珊瑚礁資源調查與監測，是保育珊瑚礁生態的重要關鍵。因此，因應氣候變遷對珊瑚礁生態系衝擊的中期調適策略要點如下：

- (1) 制定土地開發規範，減少輸入珊瑚礁區的沉積物。
- (2) 建設下水道與污水處理廠，減少輸入珊瑚礁區的營養鹽與有毒物質。
- (3) 加強我國海域珊瑚礁資源調查。
- (4) 宣導正確珊瑚礁保育知識，吸引志工加入保育行列。

### 3. 長期調適策略

在長期調適策略方面，應針對重要珊瑚礁區設立海洋保護區。成立以珊瑚礁生態系為主的海洋保護區，主要是運用棲地保育的觀念，以維持一生態系統的穩定及讓生態系能永續提供其資源。同時，如果從世界保育聯盟(IUCN)針對保護區應達到的管理目標-荒野保護、科學研究、保存物種及基因多樣性、維持環境功能、教育、觀光遊憩、特定自然文化特色的保護、自然資源的永續利用、傳統文化的維繫等，來檢視設立保護區的價值與功效，對於成立珊瑚礁專屬的海洋保護區，並且透過有效的執法與管理，不但對於依靠珊瑚礁區資源維生的民眾是一保障，對於科學教育文化的發展，也是極具意義，因此，在人類活動與海洋保護行動之間，便構成一良性的回饋機制，這也是永續發展的契機。

由於珊瑚礁是我國海域的重要生態系，也代表著重要資源，因此我國在面對全球氣候變遷的威脅下，設立以珊瑚礁為主體的海洋保護區是迫切且急需的。在設立保護區的同時，除了要以上述的經營管理目標為主要方向，同時需要針對保護區的大小、形狀與邊界作詳細研究規劃；考慮設置海洋保護區當地的海流狀況與生物幼苗可散佈距離；規劃國家整體的保護區總面積；加強教育宣導，提升建立海洋保護區的概念；保護區劃設的優先順序評估；加強管理與執法；力求政府與民間共同合作等，都是在設立海洋保護區時所應考量的原則。

以永續經營的角度而言，推廣海洋環境教育是讓海洋保護的觀念向下紮根的最佳途徑。透過教育活動可以讓社會大眾瞭解海洋保護的重要性，瞭解環境在全球變遷的影像

下是非常脆弱的，同時更可以提高民眾的參與以及民眾的警覺心，這樣的做法才是未來改善台灣海洋環境最有效且根本的做法。因此，因應氣候變遷對珊瑚礁生態系之衝擊的長期調適策略要點如下：

- (1) 設立海洋保護區。
- (2) 明確設定海洋保護區之經營理念與目標。
- (3) 制定海洋保護相關法律，建立法源基礎。
- (4) 成立海洋事務專責機構，整合各項事務，以求迅速危機處理。
- (5) 落實管理與執法。
- (6) 結合政府與民間力量，共同投入珊瑚礁生態保育。
- (7) 推廣海洋環境教育，深植保育概念。
- (8) 進行長期生態監測，建立資料庫。

因此，面對全球環境與氣候變遷的趨勢下，除了短期的預警系統建立外，考慮中長期的調適策略，是永續發展所必要的。成立海洋保護區網路，加強教育與宣導，結合政府與民間共同力量，設立專責機構規劃管理，透過立法程序給予適當保護，配合公正且嚴格地執法，排除人為活動的不當干擾，以保育珊瑚礁生物族群和多樣性，最終期能在海洋保護區促成更豐富的珊瑚礁海洋生物多樣性的研究與探討，深入了解海洋生物在面臨全球變遷壓迫下的可能反應，形成一回饋機制，讓保育與研究相輔相成，作為未來擬定保育策略的參考與深入研究的基礎。

## 六、各子計畫間的橫向關係連結

本子計畫利用總計畫提供之氣候模式的溫度模擬資料，探討台灣海域的珊瑚礁生態系在面臨未來 100 年之中，全球暖化對於珊瑚礁白化死亡的衝擊和長期預警機制。同時，我們也比較了在 IPCC 第三次評估報告中公佈的不同全球環境變遷情境，探討針對全球氣候變遷所採取的行動，對於珊瑚礁生態系的衰退有何影響。

本子計畫與其他子計畫都是基於同一個氣候模擬條件之下，探討全球氣候變遷對於台灣地區各個層面的影響，在各子計畫的橫向連結上，除了資料的互相流通之外，預警系統的運作機制也有互相影響。例如，本子計畫中的珊瑚白化預警指標 DHWs 就是基於水溫及氣象資料(如光照、氣溫)而建立的，同時大氣中的 CO<sub>2</sub> 濃度也對珊瑚礁的鈣化作用有重大影響。水資源子計畫的研究成果則對珊瑚礁保育的因應策略有參考價值，由於台灣珊瑚礁承受河川帶來的陸源沉積物影響甚大，因此河川水資源的管理也有助於珊瑚

礁保育。

## 七、未來工作重點

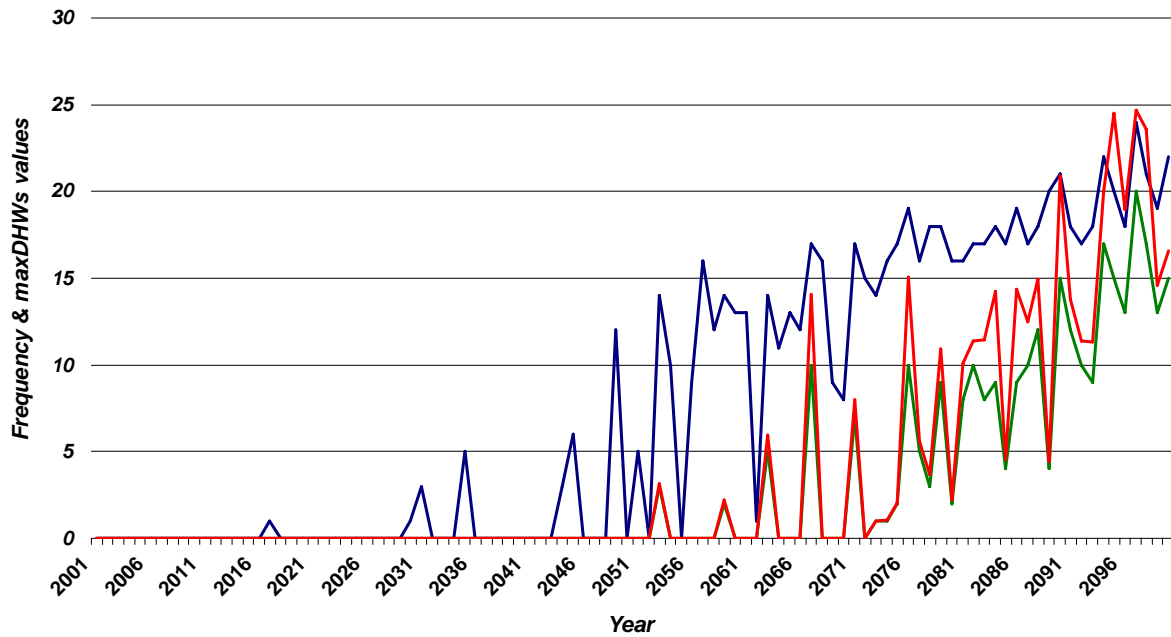
未來我們將針對本年度所研究分析的結果，配合歷史資料的統計，檢驗這些預警指標的準確度以及可行性。同時，研擬在短時間的尺度上(每週、每月或每季)，發布珊瑚礁白化預警的時機與機制，並且探討預警更新的可能性，此外，綜合探討長期與短期預警機制的關係，利用此關係建構調適性的預警模式，針對我國海域的珊瑚礁生態系在未來氣候變遷的趨勢之下，研討可行的因應與作為。

除了外在因子對珊瑚存續的影響之外，珊瑚在遭遇環境因子改變時所對應產生的生理調適，對於珊瑚礁本身是否能在氣候變遷的壓迫下適應並且存續下去，扮演著關鍵的角色，同時也是在保育珊瑚策略擬定上，必須考量的重要因素。

在整個珊瑚礁預警系統的架構中，牽涉了許多政府相關的部門。在未來的工作上，期能釐清珊瑚礁預警系統中各部分所需要的資源與建構方法，配合政府相關特定部門，共同合作與研究我國珊瑚礁預警系統的發展與更新。

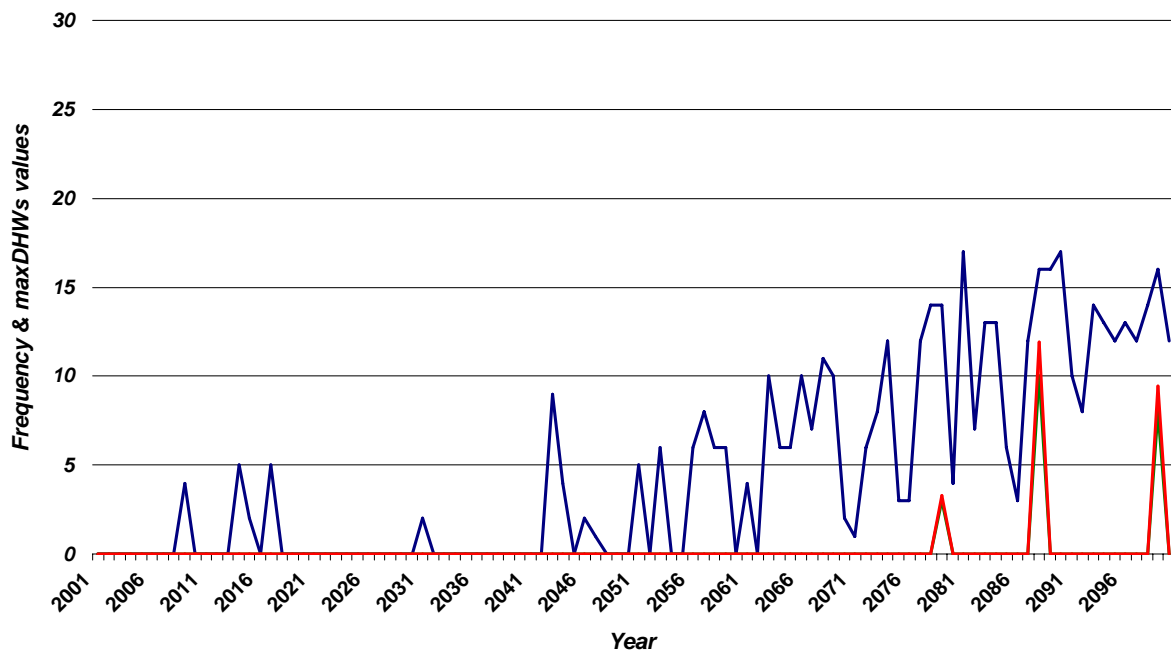
最後，自從 IPCC 於 1990 年公佈了第一次的評估報告到 2001 年的第三次評估報告以來，這之間經過了許多國際上政策的改變，像是京都議定書的生效，以及專家學者對於未來氣候變遷的討論，IPCC 即將在最近公佈第四次的評估報告，屆時，對於全球環境變遷的趨勢與情境也將會有所修改。所以持續追蹤全球氣候變遷趨勢的發展與國際間對於氣候變遷對珊瑚礁生態系的衝擊影響的研究，對於未來我國珊瑚礁生態系的保育與永續發展是必須進行的課題。

### SRES A2 Northern Taiwan



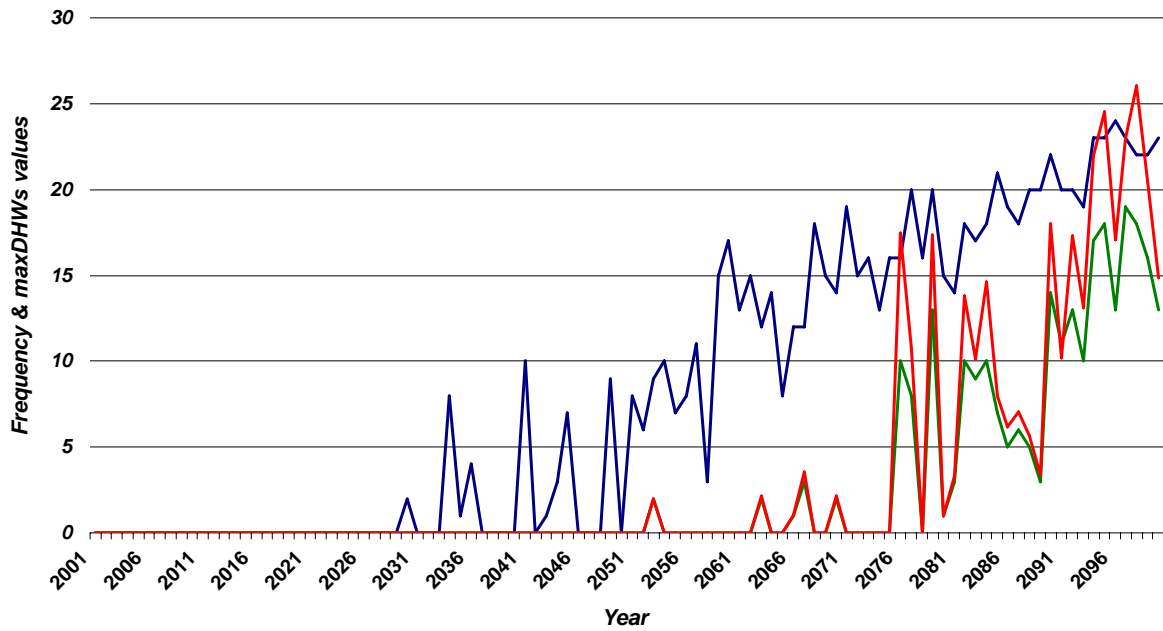
圖二十、CGCM2 模擬 SRES A2 情境的水溫預測值，評估自 2001 至 2100 年，台灣北部海域的 DHWs 值(紅線)、超過水溫閾值次數(藍線)與超過閾值 1°C 以上次數(綠線)。

### SRES B2 Northern Taiwan



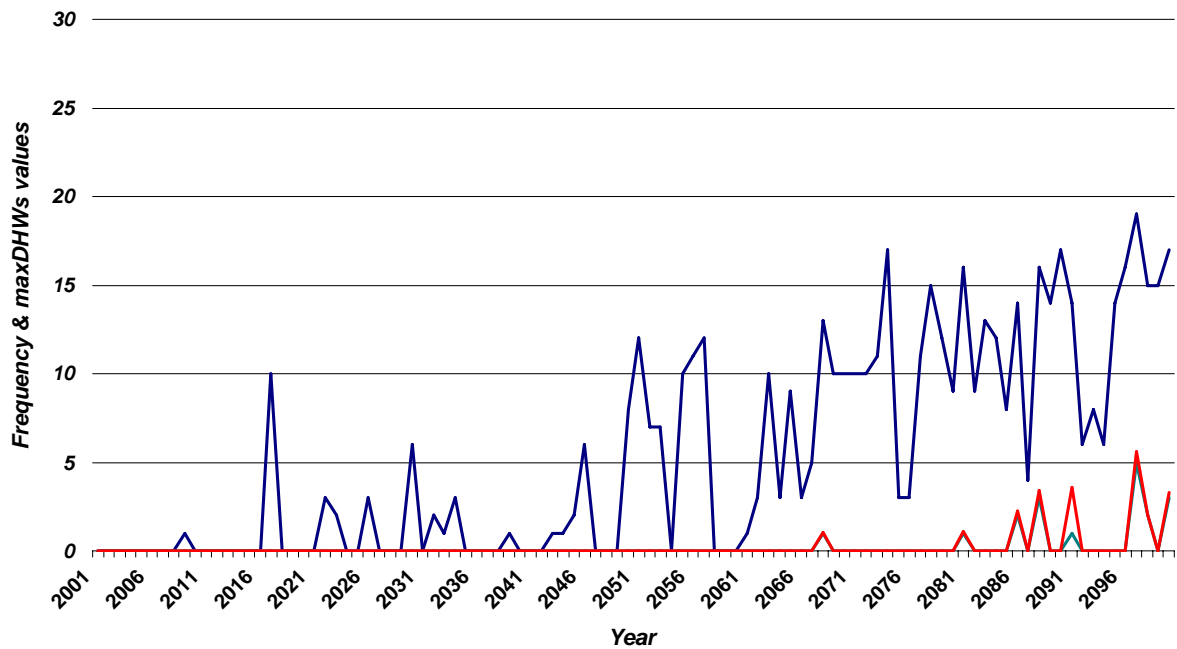
圖二十一、CGCM2 模擬 SRES A2 情境的水溫預測值，評估自 2001 至 2100 年，台灣北部海域的 DHWs 值(紅線)、超過水溫閾值次數(藍線)與超過閾值 1°C 以上次數(綠線)。

### SRES A2 Penghu Island



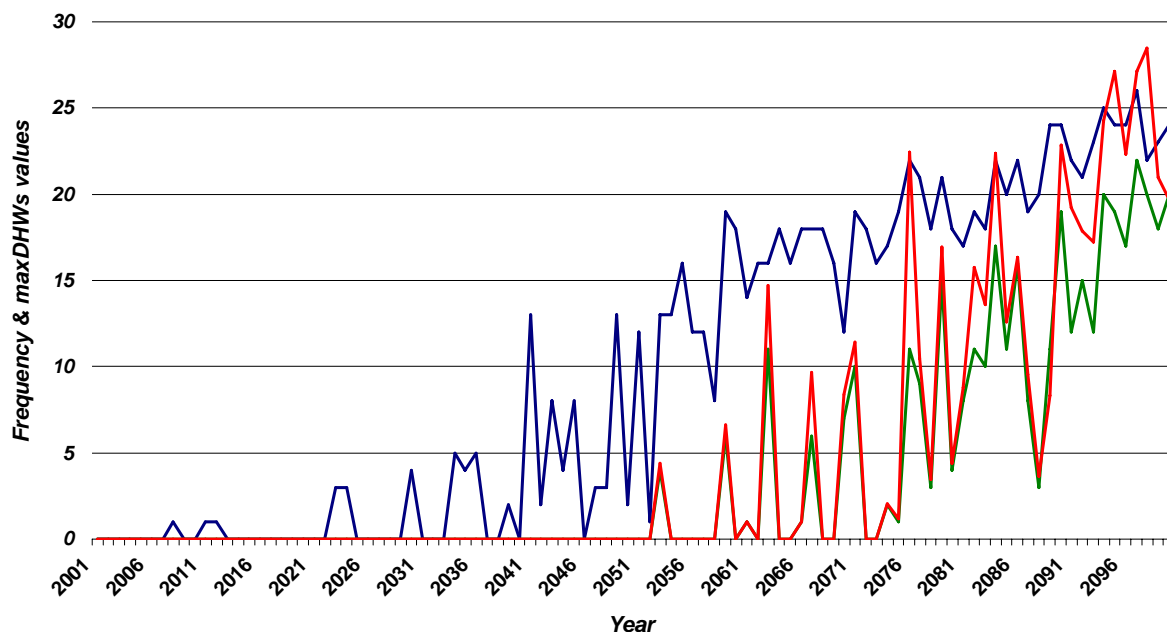
圖二十二、CGCM2 模擬 SRES A2 情境的水溫預測值，評估自 2001 至 2100 年，台灣澎湖海域的 DHWs 值(紅線)、超過水溫閾值次數(藍線)與超過閾值 1°C 以上次數(綠線)。

### SRES B2 Penghu Island



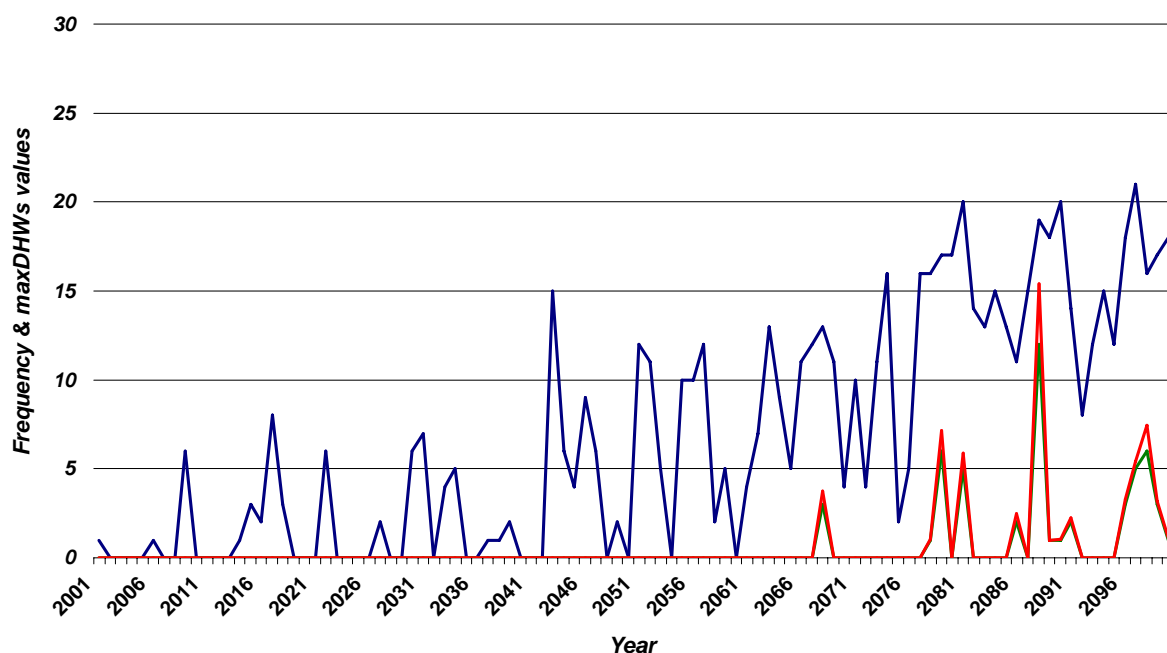
圖二十三、CGCM2 模擬 SRES A2 情境的水溫預測值，評估自 2001 至 2100 年，台灣澎湖海域的 DHWs 值(紅線)、超過水溫閾值次數(藍線)與超過閾值 1°C 以上次數(綠線)。

### SRES A2 Southern Taiwan



圖二十四、CGCM2 模擬 SRES A2 情境的水溫預測值，評估自 2001 至 2100 年，台灣南部海域的 DHWs 值(紅線)、超過水溫閾值次數(藍線)與超過閾值 1°C 以上次數(綠線)。

### SRES B2 Southern Taiwan



圖二十五、CGCM2 模擬 SRES A2 情境的水溫預測值，評估自 2001 至 2100 年，台灣南部海域的 DHWs 值(紅線)、超過水溫閾值次數(藍線)與超過閾值 1°C 以上次數(綠線)。

## 參考文獻

- 宋克義、戴昌鳳、黃將修、陳昭倫、樊同雲，2000。台灣海域珊瑚礁現況調查。
- Aronson, R.B., Precht, W.F., Toscano, M.A., and Koltjes, K.H., 2002, The 1998 bleaching event and its aftermath on coral reef in Belize. *Mar. Biol.*, 141, 435-447.
- Bellwood, D.R., Hughes, T.P., Folke, C. and Nyström, M., 2004, "Confronting the coral reef crisis", *Nature*, 429, 827-833.
- Berkelmans, R., Hendee, J.C., Marshall, P.A., Ridd, P.V., Orpin, A.R. and Irvine, D., 2002, "Automatic weather stations: tools for managing and monitoring potential impacts to coral reefs", *Mar. Technol. Soc. J.*, 36, 29-38.
- Brown, B.E., Dunne, R.P., and Chansang, H., 1996, Coral bleaching relative to elevated seawater temperature in the Andaman Sea (Indian Ocean) over the last 50 years. *Coral Reefs*, 15, 151-152.
- Brown, B.E., 1997, Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs*, 16, S129-S138.
- Bruno, J.F., Siddon, C.E., Witman, J.D., Colin, P.L., and Toscano, M.A., 2001, El Nino related coral bleaching in Palau, Western Caroline Islands. *Coral Reefs*, 20, 127-136.
- Celliers, L., and Schleyer, M.H., 2002, Coral bleaching on high-latitude marginal reefs at Sodwana Bay, South Africa. *Mar. Poll. Bull.*, 44, 1380-1387.
- Coles, S.L., Jokile P.L., and Lewis C.R., 1976, Thermal tolerance in tropical versus subtropical Pacific reef coral. *Pac. Sci.*, 30, 159-166.
- Coles, S.L., and Jokiel, P.L., 1977, Effects of temperature on photosynthesis and respiration in hermatypic corals. *Mar. Biol.*, 43, 209-216.
- Cohen, A.L., Lobel, P.S., and Tomasky, G.L., 1997, Coral bleaching on Johnston Atoll, Central Pacific Ocean. *Biol. Bull.*, 193, 276-279.
- Cook, C.B., Logan, A., Ward, J., Luckhurst, B., and Berg Jr., C.J., 1990, Elevated temperatures and bleaching on a high latitude coral reef: the 1998 Bermuda event. *Coral Reefs*, 9, 45-49.
- Dai, C.F., Chen, G., Inaba, M., Iwao, K., Iwase, F., Kakuma, Y., Kajiwara, K., Kimura, T., Nomura, K., Oki, K., Sakai, K., Shibuno, T., Yamano, H. and Yoshida, M. 2002, "Status of coral reefs in East Asia: China, Japan, Korea and Taiwan", In: Wilkinson, C. (ed) *Status of Coral Reefs of the World: 2002*, p. 153-162, Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, Australia.
- Davies, J.M., Dunne, R.P., and Brown, B.E., 1997, Coral bleaching and elevated sea-water

- temperature in Milne Bay Province, Papua New Guinea, 1996. *Mar. Freshwater Res.*, 48, 513-516.
- Edwards, A.J., Clark, S., Zahir, H., Rajasuriya, A., Naseer, A., and Rubens, J., 2001, Coral bleaching and mortality on artificial and natural reefs in Maldives in 1998, sea surface temperature anomalies and initial recovery. *Mar. Poll. Bull.*, 42, 7-15.
- Ferrier-Pages, C., Gattuso, J.P., Jaubert, J., 1999, Effect of small variation in salinity on the rates of photosynthesis of zooxanthellate coral *Stylophora pistillata*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 181: 309-314.
- Fitt, W.K., Brown, B.E., Warner, M.E., and Dunne, R.P., 2001, Coral bleaching: interpretation of thermal tolerance limits and thermal thresholds in tropical corals. *Coral Reefs*, 20, 51-65.
- Glynn, P.W., D'Croz, L., 1990, Experimental evidence for high temperature stress as the cause of El Nino-coincident coral mortality. *Coral Reefs*, 8, 181-191.
- Goreau, T.J., and Hayes, R.L., 1994, Coral bleaching and ocean hot spots. *AMBIO*, 23, 176-180.
- Hendee, J.C., Berkelmans, R., Sweatman, H., Coleman, G. and Gill, E., 1999, "Expert system generated coral bleaching alters for Myrmidon Reef, Great Barrier Reef", [www.coral.noaa.gov/isess/isess99a.pdf](http://www.coral.noaa.gov/isess/isess99a.pdf)
- Hendee, J.C., Stabenau, E., Florit, L., Manzello, D., and Jeffris, C., 2006, Infrastructure and capabilities of a near real-time meteorological and oceanographic in situ instrumented array, and its role in marine environmental decision support. In: Richardson, L.L., and LeDrew, E.F. (ed), "Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes", p. 135-156, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Hoegh-Guldberg, O., and Smith, G.J., 1989, The effect of sudden changes in temperature, light and salinity on the population density and export of zooxanthellae from the reef corals *Stylophora pistillata* Esper and *Seriatopora hystrix* Dana. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 129, 279-303.
- Hoegh-Guldberg, O., 1999, "Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs", *Mar. Freshwater Res.*, 50, 839-866.
- Hughes, T.P., Baird, A.H., Bellwood, D.R., Card, M., Connolly, S.R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J.B.C., Kleypas, J., Lough, J.M., Marshall, P., Nyström, M., Palumbi, S.R., Pandolfi, J.M., Rosen, B. and Roughgarden, J., 2003, "Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs", *Science*, 301, 929-933.

- Jokiel, P.L., and Coles, S.L., 1990, Response of Hawaiian and other Indo-Pacific reef corals to elevated temperature. *Coral Reefs*, 8, 155-162.
- Kimura, T., Dai, C.F., Pae, S., Huang, H., Ang, P.O., Jong, G.J. and Choyce, C., 2004, "Status of coral reefs in east and north Asia: China, Hong Kong, Taiwan, Korea and Japan", In: Wilkinson, C. (ed), "Status of Coral Reefs of the World: 2004", p. 277-301, Australian Institute of Marine Science, Townsville, Queensland, Australia.
- Knowlton, N. 2001, "The future of coral reefs", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 98, 419-5426.
- Porter, J.W., Lewis, S.K., and Porter, K.G., 1999, The effect of multiple stressors on the Florida Keys coral reef ecosystem: A landscape hypothesis and a physiological test. *Limnol. Oceanogr.*, 44, 941-949.
- Roberts C.M., McClean, C.J., Veron, J.E.N., Hawkins, J.P., Allen, G.R., McAllister, D.E., Mittermeier, C.G., Schueler, F.W., Spalding, M., Wells, F., Vynne, C. and Werner, T.B., 2002 "Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs", *Science*, 295, 1280-1284.
- Saxby, T., Dennison, W.C., and Hoegh-Guldberg, O., 2003, Photosynthetic responses of the coral *Montipora digitata* to cold temperature stress. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 248, 85-97.
- Skirving, W., Strong, A.E., Liu, G., Arzayus, F., Liu, C., and Sapper, J., 2006, Extreme events and perturbations of coastal ecosystems. In: Richardson, L.L., and LeDrew, E.F. (ed), "Remote Sensing of Aquatic Coastal Ecosystem Processes", p. 11-25, Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Strong, A.E., Liu, G., Meyer, J., Hendee, J.C. and Sasko, D., 2004, "Coral Reef Watch 2002" *Bull. Mar. Sci.*, 75, 259-268.
- Wellington, G.M., Glynn, P.W., Strong, A.E., Nauarrete, S.A., Wieters, E., and Hubbard, D., 2001, Crisis on coral reefs linked to climate change. *EOS*, 82, 1-7
- Wilkinson, C.R., 1999, "Global and local threats to coral reef functioning and existence: review and predictions" *Mar. Freshwater Res.*, 50, 867-878.
- Winter, A., Appeldoorn, R.S., Bruchner, A., Williams, E.H., and Goenaga, C., 1998, Sea surface temperatures and coral reef bleaching off La Parguera, Puerto Rico (northeastern Caribbean Sea). *Coral Reefs*, 17, 377-382.
- Wooldridge, S., Done, T., Berkelmans, R., Jones, R. and Marshall, P. 2005, "Precursors for resilience in coral communities in a warming climate: a belief network approach" *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 295, 157-169.

附表一、CGCM2 SRES A2 情境下，2001-2100年，台灣北部、澎湖與南部海域海水表面溫度超過珊瑚白化溫度閾值1°C的次數與該年DHWs最大值。

Northern Taiwan(A2)			Penghu Island(A2)			Southern Taiwan(A2)		
	次數	DHWs		次數	DHWs		次數	DHWs
2001	0	0	2001	0	0	2001	0	0
2002	0	0	2002	0	0	2002	0	0
2003	0	0	2003	0	0	2003	0	0
2004	0	0	2004	0	0	2004	0	0
2005	0	0	2005	0	0	2005	0	0
2006	0	0	2006	0	0	2006	0	0
2007	0	0	2007	0	0	2007	0	0
2008	0	0	2008	0	0	2008	1	0
2009	0	0	2009	0	0	2009	0	0
2010	0	0	2010	0	0	2010	0	0
2011	0	0	2011	0	0	2011	1	0
2012	0	0	2012	0	0	2012	1	0
2013	0	0	2013	0	0	2013	0	0
2014	0	0	2014	0	0	2014	0	0
2015	0	0	2015	0	0	2015	0	0
2016	0	0	2016	0	0	2016	0	0
2017	1	0	2017	0	0	2017	0	0
2018	0	0	2018	0	0	2018	0	0
2019	0	0	2019	0	0	2019	0	0
2020	0	0	2020	0	0	2020	0	0
2021	0	0	2021	0	0	2021	0	0
2022	0	0	2022	0	0	2022	0	0
2023	0	0	2023	0	0	2023	3	0
2024	0	0	2024	0	0	2024	3	0
2025	0	0	2025	0	0	2025	0	0
2026	0	0	2026	0	0	2026	0	0
2027	0	0	2027	0	0	2027	0	0
2028	0	0	2028	0	0	2028	0	0
2029	0	0	2029	0	0	2029	0	0
2030	1	0	2030	2	0	2030	4	0
2031	3	0	2031	0	0	2031	0	0
2032	0	0	2032	0	0	2032	0	0
2033	0	0	2033	0	0	2033	0	0
2034	0	0	2034	8	0	2034	5	0
2035	5	0	2035	1	0	2035	4	0
2036	0	0	2036	4	0	2036	5	0
2037	0	0	2037	0	0	2037	0	0
2038	0	0	2038	0	0	2038	0	0
2039	0	0	2039	0	0	2039	2	0
2040	0	0	2040	0	0	2040	0	0
2041	0	0	2041	10	0	2041	13	0
2042	0	0	2042	0	0	2042	2	0
2043	0	0	2043	1	0	2043	8	0
2044	3	0	2044	3	0	2044	4	0
2045	6	0	2045	7	0	2045	8	0
2046	0	0	2046	0	0	2046	0	0
2047	0	0	2047	0	0	2047	3	0
2048	0	0	2048	0	0	2048	3	0
2049	12	0	2049	9	0	2049	13	0
2050	0	0	2050	0	0	2050	2	0

續附表一

2051	5	0	2051	8	0	2051	12	0
2052	0	0	2052	6	0	2052	1	0
2053	14	3.17	2053	9	0	2053	13	4.40
2054	10	0	2054	10	0	2054	13	0
2055	0	0	2055	7	0	2055	16	0
2056	9	0	2056	8	0	2056	12	0
2057	16	0	2057	11	0	2057	12	0
2058	12	0	2058	3	0	2058	8	0
2059	14	2.24	2059	15	0	2059	19	6.63
2060	13	0	2060	17	0	2060	18	0
2061	13	0	2061	13	0	2061	14	1.00
2062	1	0	2062	15	0	2062	16	0
2063	14	5.95	2063	12	2.18	2063	16	14.68
2064	11	0	2064	14	0	2064	18	0
2065	13	0	2065	8	0	2065	16	0
2066	12	0	2066	12	1.03	2066	18	1.00
2067	17	14.07	2067	12	3.54	2067	18	9.64
2068	16	0	2068	18	0	2068	18	0
2069	9	0	2069	15	0	2069	16	0
2070	8	0	2070	14	2.18	2070	12	8.40
2071	17	7.98	2071	19	0	2071	19	11.42
2072	15	0	2072	15	0	2072	18	0
2073	14	1.01	2073	16	0	2073	16	0
2074	16	1.03	2074	13	0	2074	17	2.03
2075	17	2.05	2075	16	0	2075	19	1.15
2076	19	15.07	2076	16	17.48	2076	22	22.43
2077	16	5.59	2077	20	10.73	2077	21	10.48
2078	18	3.66	2078	16	0	2078	18	3.46
2079	18	10.89	2079	20	17.34	2079	21	16.91
2080	16	2.19	2080	15	1.01	2080	18	4.40
2081	16	10.12	2081	14	3.33	2081	17	8.81
2082	17	11.38	2082	18	13.81	2082	19	15.75
2083	17	11.47	2083	17	10.14	2083	18	13.62
2084	18	14.25	2084	18	14.60	2084	22	22.38
2085	17	4.58	2085	21	7.99	2085	20	12.60
2086	19	14.38	2086	19	6.17	2086	22	16.35
2087	17	12.47	2087	18	7.06	2087	19	9.58
2088	18	14.93	2088	20	5.65	2088	20	3.64
2089	20	4.45	2089	20	3.35	2089	24	8.34
2090	21	20.92	2090	22	17.99	2090	24	22.84
2091	18	13.79	2091	20	10.20	2091	22	19.22
2092	17	11.40	2092	20	17.28	2092	21	17.85
2093	18	11.29	2093	19	13.13	2093	23	17.20
2094	22	20.01	2094	23	21.98	2094	25	24.28
2095	20	24.49	2095	23	24.54	2095	24	27.10
2096	18	18.98	2096	24	17.05	2096	24	22.31
2097	24	24.71	2097	23	22.95	2097	26	27.13
2098	21	23.59	2098	22	26.01	2098	22	28.46
2099	19	14.58	2099	22	20.49	2099	23	20.99
2100	22	16.58	2100	23	14.83	2100	24	19.69

附表二、CGCM2 SRES B2 情境下，2001-2100年，台灣北部、澎湖與南部海域海水表面溫度超過珊瑚白化溫度閾值1°C的次數與該年DHWs最大值。

Northern Taiwan(B2)			Penghu Island(B2)			Southern Taiwan(B2)		
	次數	DHWs		次數	DHWs		次數	DHWs
2001	0	0	2001	0	0	2001	1	0
2002	0	0	2002	0	0	2002	0	0
2003	0	0	2003	0	0	2003	0	0
2004	0	0	2004	0	0	2004	0	0
2005	0	0	2005	0	0	2005	0	0
2006	0	0	2006	0	0	2006	1	0
2007	0	0	2007	0	0	2007	0	0
2008	0	0	2008	0	0	2008	0	0
2009	4	0	2009	1	0	2009	6	0
2010	0	0	2010	0	0	2010	0	0
2011	0	0	2011	0	0	2011	0	0
2012	0	0	2012	0	0	2012	0	0
2013	0	0	2013	0	0	2013	0	0
2014	5	0	2014	0	0	2014	1	0
2015	2	0	2015	0	0	2015	3	0
2016	0	0	2016	0	0	2016	2	0
2017	5	0	2017	10	0	2017	8	0
2018	0	0	2018	0	0	2018	3	0
2019	0	0	2019	0	0	2019	0	0
2020	0	0	2020	0	0	2020	0	0
2021	0	0	2021	0	0	2021	0	0
2022	0	0	2022	3	0	2022	6	0
2023	0	0	2023	2	0	2023	0	0
2024	0	0	2024	0	0	2024	0	0
2025	0	0	2025	0	0	2025	0	0
2026	0	0	2026	3	0	2026	0	0
2027	0	0	2027	0	0	2027	2	0
2028	0	0	2028	0	0	2028	0	0
2029	0	0	2029	0	0	2029	0	0
2030	0	0	2030	6	0	2030	6	0
2031	2	0	2031	0	0	2031	7	0
2032	0	0	2032	2	0	2032	0	0
2033	0	0	2033	1	0	2033	4	0
2034	0	0	2034	3	0	2034	5	0
2035	0	0	2035	0	0	2035	0	0
2036	0	0	2036	0	0	2036	0	0
2037	0	0	2037	0	0	2037	1	0
2038	0	0	2038	0	0	2038	1	0
2039	0	0	2039	1	0	2039	2	0
2040	0	0	2040	0	0	2040	0	0
2041	0	0	2041	0	0	2041	0	0
2042	0	0	2042	0	0	2042	0	0
2043	9	0	2043	1	0	2043	15	0
2044	4	0	2044	1	0	2044	6	0
2045	0	0	2045	2	0	2045	4	0
2046	2	0	2046	6	0	2046	9	0
2047	1	0	2047	0	0	2047	6	0
2048	0	0	2048	0	0	2048	0	0
2049	0	0	2049	0	0	2049	2	0
2050	0	0	2050	8	0	2050	0	0

續附表二

2051	5	0	2051	12	0	2051	12	0
2052	0	0	2052	7	0	2052	11	0
2053	6	0	2053	7	0	2053	5	0
2054	0	0	2054	0	0	2054	0	0
2055	0	0	2055	10	0	2055	10	0
2056	6	0	2056	11	0	2056	10	0
2057	8	0	2057	12	0	2057	12	0
2058	6	0	2058	0	0	2058	2	0
2059	6	0	2059	0	0	2059	5	0
2060	0	0	2060	0	0	2060	0	0
2061	4	0	2061	1	0	2061	4	0
2062	0	0	2062	3	0	2062	7	0
2063	10	0	2063	10	0	2063	13	0
2064	6	0	2064	3	0	2064	9	0
2065	6	0	2065	9	0	2065	5	0
2066	10	0	2066	3	0	2066	11	0
2067	7	0	2067	5	0	2067	12	0
2068	11	0	2068	13	0	2068	13	3.73
2069	10	0	2069	10	0	2069	11	0
2070	2	0	2070	10	0	2070	4	0
2071	1	0	2071	10	0	2071	10	0
2072	6	0	2072	10	0	2072	4	0
2073	8	0	2073	11	0	2073	11	0
2074	12	0	2074	17	0	2074	16	0
2075	3	0	2075	3	0	2075	2	0
2076	3	0	2076	3	0	2076	5	0
2077	12	0	2077	11	0	2077	16	0
2078	14	0	2078	15	0	2078	16	1.05
2079	14	3.30	2079	12	0	2079	17	7.13
2080	4	0	2080	9	0	2080	17	0
2081	17	0	2081	16	1.10	2081	20	5.91
2082	7	0	2082	9	0	2082	14	0
2083	13	0	2083	13	0	2083	13	0
2084	13	0	2084	12	0	2084	15	0
2085	6	0	2085	8	0	2085	13	0
2086	3	0	2086	14	2.28	2086	11	2.49
2087	12	0	2087	4	0	2087	15	0
2088	16	11.89	2088	16	3.43	2088	19	15.42
2089	16	0	2089	14	0	2089	18	1.01
2090	17	0	2090	17	0	2090	20	1.03
2091	10	0	2091	14	3.56	2091	14	2.27
2092	8	0	2092	6	0	2092	8	0
2093	14	0	2093	8	0	2093	12	0
2094	13	0	2094	6	0	2094	15	0
2095	12	0	2095	14	0	2095	12	0
2096	13	0	2096	16	0	2096	18	3.27
2097	12	0	2097	19	5.61	2097	21	5.42
2098	14	0	2098	15	2.03	2098	16	7.43
2099	16	9.42	2099	15	0	2099	17	3.17
2100	12	0	2100	17	3.29	2100	18	1.08

附表三：IPCC 第三次評估報告中，1985 年到 2100 年，SRES A2 與 B2 在二氧化碳排放上的差異。

<i>Equivalent CO<sub>2</sub> Concentration (ppmv).</i>		
<b>Year</b>	<b>A2</b>	<b>B2</b>
1850	330	330
1860	343	343
1870	345	345
1880	347	347
1890	349	349
1900	351	351
1910	357	357
1920	363	363
1930	370	370
1940	376	376
1950	382	382
1960	388	388
1970	408	408
1980	437	437
1990	476	476
2000	504	504
2010	540	539
2020	585	578
2025	612	599
2030	642	619
2040	707	659
2050	779	700
2060	860	740
2070	950	781
2080	1050	823
2090	1180	867
2100	1320	915