參、氣候變遷、珊瑚白化與珊瑚礁的未來

（國立臺灣大學海洋研究所 戴昌鳳教授）

一、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，成千上萬種的無脊椎動物和魚類在珊瑚礁上生活，而建構這個生態系主角就是石珊瑚或硬珊瑚。珊瑚礁是一個獨特的生態系，它生長在營養鹽貧瘠的海域，卻擁有很高的生產力，這項特徵主要與珊瑚礁的生態特性有關，由於珊瑚是動物與植物組織的共生體，這種共生關係構成緊密的營養鹽循環和高效能的生產機制。而珊瑚礁的高生產力和立體空間則是維繫眾多海洋生物族群繁衍的重要棲地，在海洋生態系的平衡上扮演關鍵地位，因此，在國際自然保育聯盟 (IUCN)、聯合國環境保護署 (UNEP) 及世界野生動物基金會 (WWF) 所共同提出的世界保育方略 (The World Conservation Strategy) 中，就將珊瑚礁列為維繫人類食物生產、健康、生存及永續發展的重要生態系統。

1980 年代以來，由於全球人口逐漸增加，工業快速發展，溫室效應和氣候變遷的現象日益顯著，全球的珊瑚礁幾乎都受到影響，大規模珊瑚白化、疾病蔓延或珊瑚死亡的事件頻傳，使得許多海域的珊瑚礁處於快速衰退或破壞的危急情況中 (William and Bunkley-Williams, 1990; Brown and Ogden, 1993; Brown, 1997)。1992 年在巴西里約召開的地球高峰會就指出，珊瑚礁和熱帶雨林是地球上受到人類活動和氣候變遷影響最嚴重的生態系，也是需要優先加以保護的生態系，並成立了國際珊瑚礁行動小組 (International Coral Reef Initiative)，推動珊瑚礁保育工作。聯合國教科文組織 (UNESCO)、UNEP 和 IUCN 等組織，共同將 1997 年訂為國際珊瑚礁年 (International Year of the Reef)，以推動珊瑚礁保育活動；由於成效頗為顯著，又將 1998 年訂為國際海洋年 (International Year of the Ocean)，以延續海洋保育的熱潮。然而，全球珊瑚礁卻在 1998 年面臨了大量白化和死亡的空前危機；根據國際珊瑚礁學會 (International Society for Reef Studies) 的統計，全世界至少有五十個國家的珊瑚礁發生大量白化的現象，珊瑚白化的範圍非常廣，遍及太平洋、印度洋及大西洋的主要珊瑚礁區，而且從潮間帶一直延伸到水深二十公尺處，幾乎所有的石珊瑚和軟珊瑚都遭殃。許多地區從海面或從衛星影像上，就可清楚看出海底一大片慘白的景象，珊瑚嚴重白化的慘狀，令人觸目驚心。珊瑚礁是否能在地球上繼續存在，已引起國際間珊瑚礁學者和環保團體的普遍關注。

二、珊瑚礁的價值

根據估計，全球生物圈的價值及其提供的服務，每年約為 16 至 54 兆美元 (Costanza et al., 1997)，這個總值約等於全球國民生產毛額 (GNP) 的一至三倍。其中，海洋生態系統的價值約占 63%，而珊瑚礁則占了 1.8% (相當於每年 3750 億美元)。若以珊瑚礁僅占海洋總面積的 0.2% 來衡量，就更可突顯珊瑚礁的高價值和重要性了。珊瑚礁的價值是多方面的，包括：食物、遊憩、天然藥物資源、生物多樣性等。

珊瑚礁提供的食物資源包括：魚類、軟體動物 (螺類、雙殼貝、頭足類)、甲殼類 (蝦、蟹、龍蝦) 及海藻等。單就魚類而言，珊瑚礁魚類約占熱帶地區國家總漁獲量的 10~25%，由於許多珊瑚礁區都位於開發中國家，而這些國家的沿海居民大多依靠珊瑚礁的生產維生，光是亞洲地區的珊瑚礁就與十億人的生計有關 (Jameson et al., 1995)，如果這些珊瑚礁遭受破壞，無疑地將會嚴重影響這些國家的經濟和糧食供應。

觀光遊憩是珊瑚礁地區發展最快速，獲益最鉅的產業，許多熱帶珊瑚礁區的國家，例如：斐濟、馬爾地夫、模里西斯、索羅門、帛琉和加勒比海的許多小國，都依賴珊瑚礁的遊憩產業為主要收入。觀光收入約占了馬爾地夫國民生產毛額的 45%，在許多加勒比海國家更高達 50%，而 1990 年加勒比海的觀光產值就有 89 億美元，並提供了 35 萬個就業機會 (Souter and Linden, 2000)。在美國佛羅里達州的珊瑚礁區，每年約有 16 億美元的產值。澳洲大堡礁的觀光產值每年約十億美元 (Birkeland, 1997)。這些數據顯示，珊瑚礁區的遊憩資源的重要性和高經濟價值。

珊瑚礁分布在陸地邊緣，形成天然屏障，可以保護海岸，使沿海地區免於受到暴風侵襲、海岸侵蝕或海水倒灌等的危害。珊瑚礁的護岸功能，不但保障沿海居民的生命財產安全，也使得鄰近的紅樹林及海草床等棲地受到保護，眾多依賴這些濕地維生或繁衍族群的生物乃得以生存。

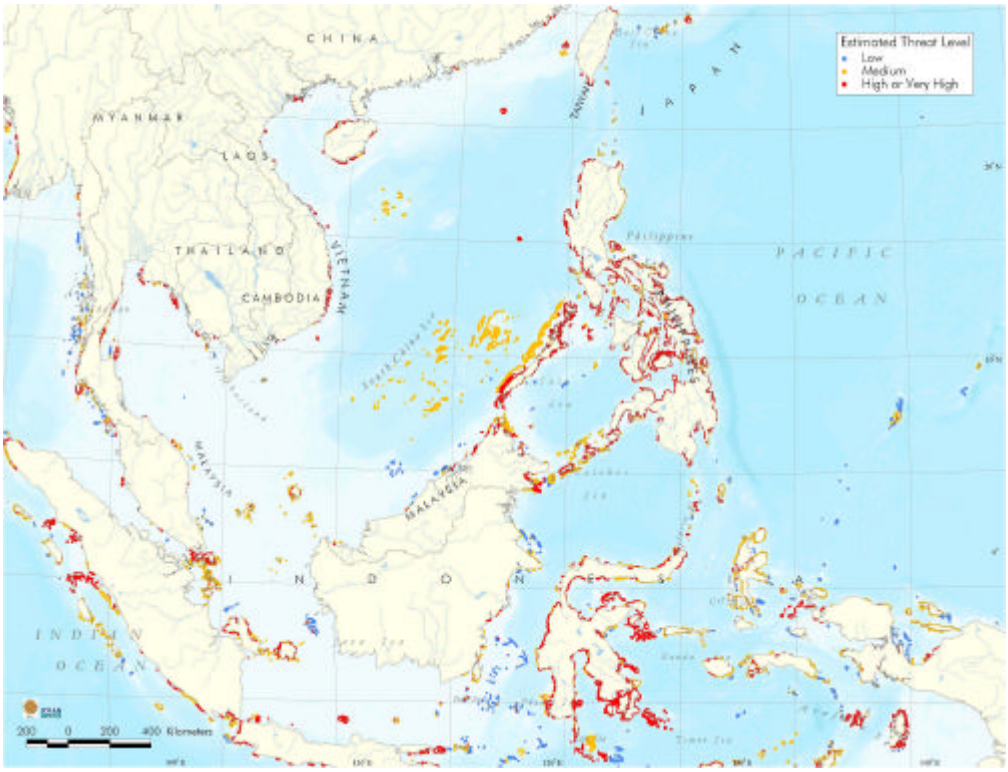
珊瑚礁擁有很高的生物多樣性，根據估計，全球的珊瑚礁區大約有 100　900 萬種生物，而其中絕大多數種類尚未被研究過 (Malakoff, 1997)。珊瑚礁的生物多樣性具有多重價值，包括經濟、生態和審美的價值。許多珊瑚礁生物含有豐富的生物活性物質，是極具潛力的天然藥物資源，而珊瑚礁生物所生產的天然藥物，可能是人類對抗疾病的重要資源。珊瑚礁生態系的破壞，將威脅到人類賴以生存的資源。

三、珊瑚礁面臨的威脅

基本上，珊瑚礁的破壞因子可分為天然災害和人為破壞等兩大類。天然災害主要是暴風侵襲、掠食者攻擊、大退潮和水溫升高等。其實，在許多情況下，這些天然災害很可能是由人為污染間接或直接造成的，例如海水溫度升高，就可能由聖嬰現象 (E1 Niño) 或溫室效應所引起，而這些都與人類活動有關。下列是珊瑚礁常見的污染：

(一) 海岸開發和沉積物污染

珊瑚礁地區的海岸開發，往往會破壞珊瑚礁棲地，更嚴重的是經由土壤侵蝕而帶入珊瑚礁區的沉積物污染。泥沙懸浮在海水中時會遮蔽陽光，阻礙水體和底棲生物進行光合作用；沉降下來之後，覆蓋在珊瑚或其他底棲生物表面，會造成生物窒息死亡；而且，陸源沉積物往往夾帶過量的有機物質、重金屬或殺蟲劑等，對生物造成危害。根據估計，全世界的珊瑚礁有 30%以上都受到海岸開發的影響 (圖一)。除此之外，河川上游土地開墾所造成的土石流，最後也會被帶入海岸地區，造成沉積物污染，對於河川短促，雨量又集中的台灣來說，土石流不僅危害民眾的生命和財產，也對海洋生態系造成非常嚴重的傷害，而沉積物污染可說是危害台灣海域珊瑚礁生態系的最大殺手 (Dai, 1997; Dai et al. 2002)。



圖一　東南亞地區珊瑚礁遭受人為活動威脅的程度。紅、黃、藍色分別代表嚴重、中度及輕微 (來源: Burke et al. 2002)。

(二) 過漁

捕捉珊瑚礁魚類、貝類或蝦蟹類等食物資源，是人類利用珊瑚礁的傳統方式。這些生物資源在適度捕撈的情況下，族群可以持續繁衍，供人類永續利用；但是當捕撈過度時，就會危及生物族群的繁衍或再生能力，使得族群崩潰，甚至滅絕。許多珊瑚礁生物往往具有高經濟價值，而其族群數量較小，生殖力又不高，很容易受到過度捕撈的影響，例如龍蝦和石斑魚面臨的困境就是屬於這種情形。漁民在漁獲日益減少的情況下，轉而利用炸藥或毒物捕魚，會對珊瑚礁生態系造成更嚴重的傷害，這種情形在許多開發中國家尤其明顯。根據估計，全球有四分之三以上的珊瑚礁都受到過漁的影響(Hodgson, 1999; Jackson et al., 2001)。

(三) 海洋污染

珊瑚礁區的污染來源甚多，包括：(1) 河川輸入的陸源污染物質; (2) 沿岸市集或村落直接排入的污染物質，(3) 油輪或貨輪擱淺造成的污染。這些污染物包括：沉積物、有機質、油和重金屬。有機質污染主要來自家庭、旅館、餐廳的廢水，這些廢水含有過量的營養鹽，若未經妥善處理就排入礁區，會造成藻類大量生長，覆蓋珊瑚，甚至改變珊瑚礁生態系的平衡。油污染的影響則是多元的，重油覆蓋珊瑚組織可能造成珊瑚窒息死亡，也可能影響珊瑚的生理，造成珊瑚白化及病變，或者導致珊瑚的生殖力或生長速率降低。重金屬污染對珊瑚的影響也很複雜，而且可能是長期的效應。

(四) 氣候變遷

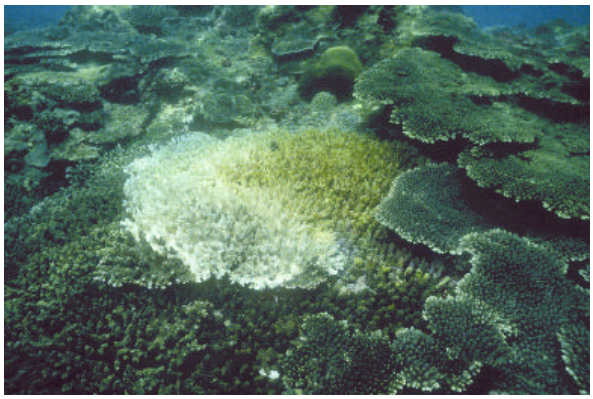
氣候變遷對珊瑚礁的影響是多方面的；其

中，最普遍的現象就是溫室效應導致海水表溫升高，引起珊瑚白化。全球海水表溫上升伴隨造成珊瑚大量白化的現象，在過去二十年間已引起廣泛注意。其中最嚴重的就是 1998 年的全球海水表溫異常，這一事件造成許多海域的珊瑚白化 (Wilkinson, 1999)。此外，大氣中的二氧化碳濃度升高，也會改變海水中碳酸鈣的飽和態，降低珊瑚的鈣化速率，減緩珊瑚礁的成長，對珊瑚礁生態系造成嚴重的影響 (Kleypas et al. 1999)。氣候變遷的另一效應是導致珊瑚礁生物的疾病蔓延，自 1980 年以來，全球珊瑚礁生物的疾病頻頻發生，科學家發現許多怪異的疾病都與氣候變遷有關 (Harvell et al. 1999; Rosenberg and Ben-Haim, 2002)。臭氧層破壞導致太陽幅射或紫外線增加，也會導致珊瑚白化和死亡；聖嬰現象伴隨的降雨異常集中，使珊瑚礁區的海水鹽度產生劇烈改變，都曾經引起珊瑚白化

四、氣候變遷與珊瑚白化

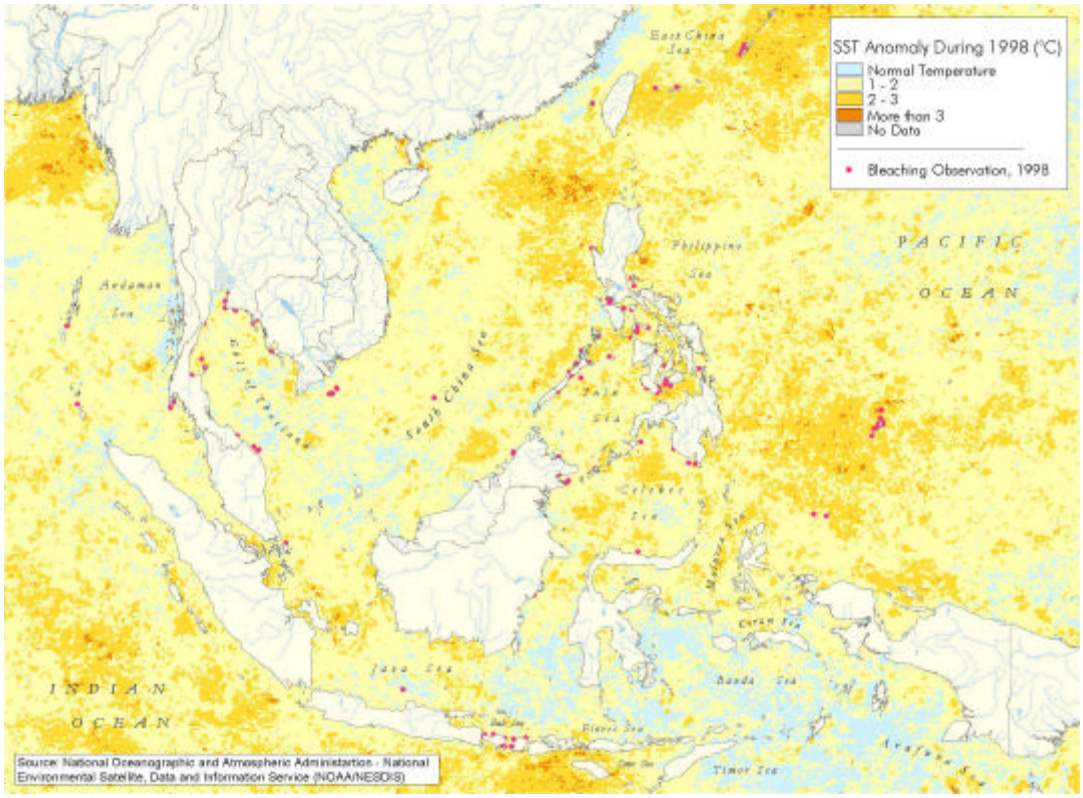
珊瑚礁普遍存在的共生關係是維繫高生產力和高生物多樣性的主要因素之一。其中，扮演關鍵性角色的就是珊瑚與共生藻的共生關係。共生藻屬於渦鞭藻類，是一群體型微小的單細胞藻類，它們居住在造礁珊瑚內皮層的細胞內，能吸收太陽能行光合作用，把宿主珊瑚代謝的廢物轉變成為有機物質，再以胺基酸、碳水化合物或脂質等型式，傳送給珊瑚利用；共生藻貢獻的營養物質，可能占了珊瑚總能量收入的 90%以上，對維持珊瑚正常的生理和生殖非常重要，因此，造礁珊瑚若失去共生藻將使珊瑚面臨能量供應不足的問題，無法進行正常的生理活動 (Brown, 1997; Hoegh-Guldburg, 1999)。

珊瑚白化就是指珊瑚顏色消失而變白的現象。在正常情況下，珊瑚呈現各種豐富的色彩，這些顏色主要來自珊瑚體內共生藻的色素；在珊瑚生理健康的情況下，共生藻密集分布在珊瑚組織中，根據估計，每平方公分的珊瑚組織約含有 50~500 萬個共生藻細胞；然而，當珊瑚遭受環境改變的壓力時，珊瑚就會失去共生藻和色素而變白，導致白化 (圖二)。許多環境因子的改變都會引起珊瑚白化，例如：溫度升高或降低、光度過強或不足、鹽度劇烈改變等，這些都可能與氣候變遷有關。



圖二　局部白化的桌形軸孔珊瑚群體。

造礁珊瑚的最適溫度在 18　30℃之間，超過這個界限，就可能引起珊瑚白化。由於珊瑚生長在熱帶海域，夏季時的高水溫本已接近適合其生長的臨界高溫，即使是水溫上升 1　2℃，都可能造成大範圍的珊瑚白化 (圖二)，例如：1982-83 年，發生在印尼、澳洲大堡礁和巴拿馬附近海域的珊瑚白化，以及 1997-98 年的全球珊瑚礁大量白化，都與水溫升高有關 (Hoegh-Guldburg, 1999; Wilkinson, 1999) (圖三)。雖然珊瑚可能對溫度有某些適應能力，但是這種適應往往要經過長時間的選汰之後，才會發展出來；對於近年來的氣候變遷，珊瑚顯然並未發展出適應機制來，一再發生及日益擴大的珊瑚白化就是明證。



圖三　1998 年東南亞地區海水表溫異常與珊瑚白化 (來源: Burke et al. 2002)。

珊瑚體內的共生藻需要適度的光照來行光合作用，若光度不足，共生藻無法正常生長，就會死亡或被珊瑚排出而白化；在光度太強的環境中，則會產生光抑制效應 (photoinhibition)，使共生藻無法正常生長，引起珊瑚白化。除了可見光之外，短波長的光（如紫外線）也會影響珊瑚和共生藻的生理。紫外線照射會使共生藻的生長率、葉綠素 a 含量及光合作用速率皆降低 (Gleason and Wellington, 1993)。當然珊瑚和共生藻都有減低紫外線傷害的機制，牠們會分泌黏液蛋白類的化合物來阻隔的紫外線，但是過量的紫外線就會造成珊瑚白化或死亡。臭氧層破壞導致太陽輻射和紫外線增強，已被證實與淺海的珊瑚白化有關 (Gleason and Wellington, 1993)。

珊瑚在低鹽度的環境中，會將共生藻排出體外；因此，大量降雨流入珊瑚礁淺海，使得鹽度降低，也會導致珊瑚白化。實驗結果指出，珊瑚若置於淡水和海水各占百分之五十的環境中，將在兩天內死亡；若置於完全淡水中，則在三十分鐘內死亡；即使在比正常海水鹽度稍低的環境，也會抑制珊瑚幼蟲的附著和降低其生長率。

五、珊瑚白化的生態效應

珊瑚白化會減低珊瑚的生長速率或使珊瑚的生長停滯。當水溫升高時，珊瑚的呼吸速率增加，導致珊瑚體內光合作用及呼吸作用的比值 (P/R 值) 降低，也就是自營能力降低；事實上，這種現象普遍發生於珊瑚礁生物之中，因此，水溫升高會使整個珊瑚礁自營性生物群聚的生產力劇減，原本能量均衡的生態系將突然失調，如果白化的範圍廣大，會對生態

系帶來劇烈衝擊 (Brown, 1997; Hoegh-Guldburg, 1999)。

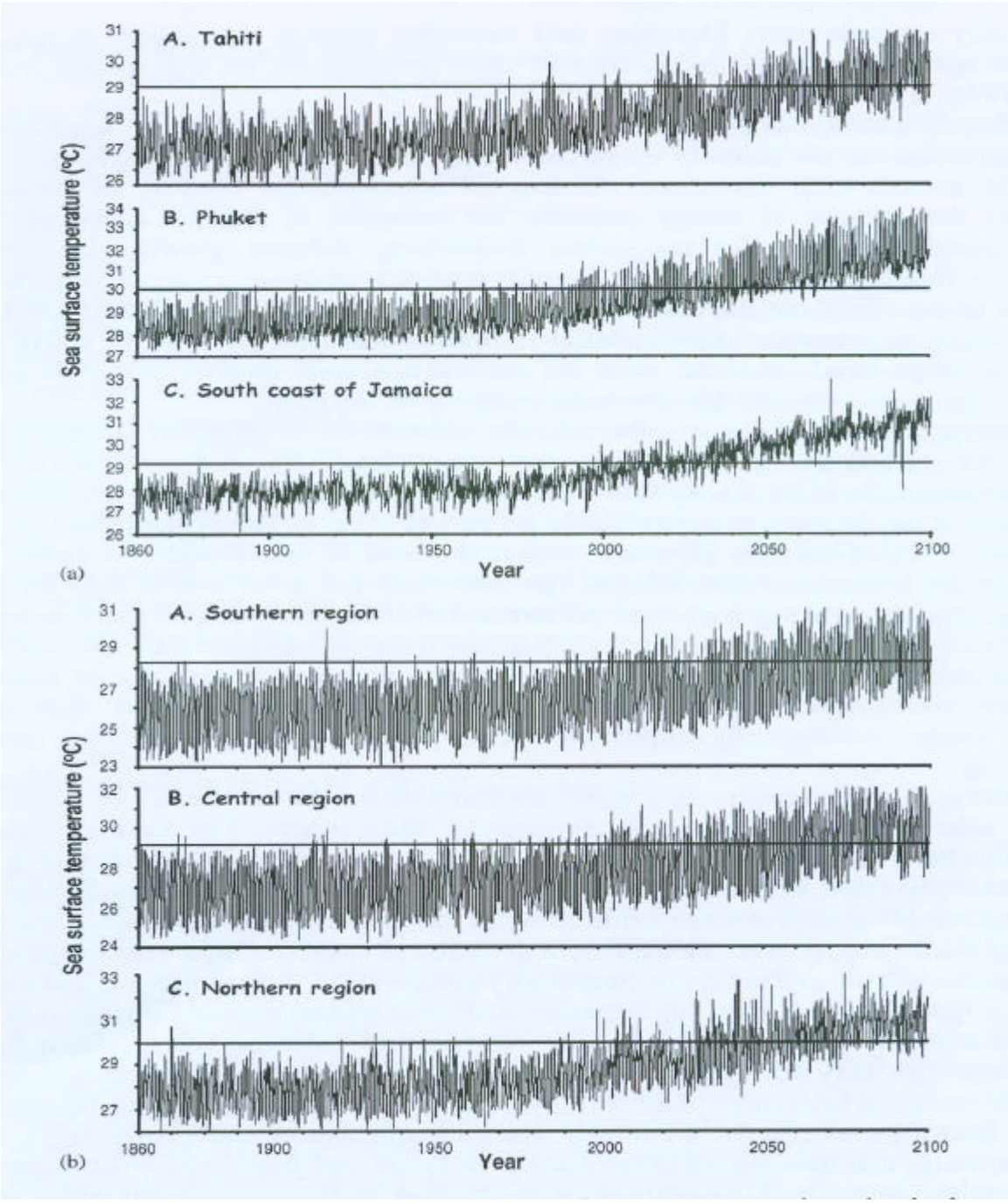
珊瑚白化也會影響珊瑚族群的繁衍。珊瑚的生殖型式、繁殖力和配子發生等特徵，都會受到影響而改變，而且這種改變可能對族群造成長遠的影響。例如：白化的環圓菊珊瑚（*Montastrea annularis*）因無足夠的能量來完成生殖過程，在生殖季節無法形成配子；此外，水溫升高會影響珊瑚幼苗的附著，在澳洲大堡礁的調查發現，在夏季異常高溫時，細枝鹿角珊瑚(*Pocillopora damicornis*)的幼蟲數目明顯減少，幼蟲成功附著的比例也隨溫度升高而降低，這些現象顯示，珊瑚族群的增長會受到抑制。

珊瑚白化會改變珊瑚群聚的結構，由於各種珊瑚對溫度升高的忍受能力並不一致，同樣的水溫可能使某些珊瑚死亡，另外一些珊瑚卻影響輕微，因此珊瑚群聚在經歷白化的衝擊之後，種類組成、優勢種類和種多樣性都可能跟著改變(Ostrander et al. 2000)；對水溫升高敏感的珊瑚將減少或消失，耐溫的種類則存活下來，甚至成為群聚的優勢種。許多珊瑚礁區白化事件後的追蹤報導，包括我們在南灣海域的追蹤調查都顯示，珊瑚群聚的種類組成，在白化之後已發生顯著的改變（戴等，1998, 1999)。

六、珊瑚礁的未來

珊瑚礁在各種海洋污染和全球氣候變遷的衝擊下，已面臨嚴重的存續危機。自二十世紀末至今，全球許多珊瑚礁學者都在熱烈討論珊瑚礁的未來，而令人憂心的是，氣候變遷的腳步似乎日益加速，珊瑚白化和珊瑚礁衰退的現象日益明顯；氣候模式預測，海水表溫在未來數十年將持續升高（圖四），珊瑚生長的環境將更為嚴苛，白化發生的頻率愈益頻繁，而且持續的時間愈久；種種跡象都顯示，珊瑚礁可能會是第一個從地球上消失的生態系 (Wilkinson, 1999; Souter and Linden, 2000; Knowlton, 2001; Burke et al. 2002; Roberts et al., 2002)。

為了瞭解珊瑚礁的現況和監測珊瑚礁的變遷情形，自 1997 年以來，國際間關於珊瑚礁監測和長期生態的研究在世界各地陸續展開，包括：(1) 全球珊瑚礁監測網 (Global Coral Reef Monitoring Network; http://www.coral.noaa.gov/gcrmn/)，由澳洲學者 Dr. Clive Wilkinson 領銜，集合多國學者持續對世界各地的珊瑚礁進行監測，每二年發表一本世界珊瑚礁現況報告 (Wilkinson et al. 2000)；(2) 珊瑚礁總體檢 (Reef Check; http://www.reefcheck.org/)，由美國學者 Dr. Gregor Hodgson 發起，召集世界各地學者和潛水人士，每年對珊瑚礁進行定量調查 (Hodgson, 1999)；(3) 世界資源研究所 (World Resource Institute) 的珊瑚礁危機計畫 (Reef at Risk; http://www.wri.org/reefatrisk/)，廣泛調查和整理全球珊瑚礁的現況(Spalding et al., 2001; Burke et al. 2002)。上述三個機構的珊瑚礁調查和監測計畫，我國學者都有參與。國內學者在國科會的支持下，已組成研究團隊執行「墾丁珊瑚礁海域長期生態研究」計畫 (http://140.117.92.194/lter/)，監測和研究珊瑚礁生態系變遷的機制。



圖四　根據 ECHAMP4/OPYC3 IS2a **氣候模式預測** 2000-2100 **年的氣候變遷**,

(a) **北半球的三珊瑚礁區**: A- **大溪地**; B- **泰國普吉島**; C- **牙買加南岸**;

(b) **澳洲大堡礁的南、中及北段。**

圖中的水平實線表示該地區珊瑚的耐溫上限，此模式預測海水表溫將持續升高，珊瑚白化的頻率將愈趨頻繁，而且持續時間愈久 (**來源**: Hoegh-Guldburg, 1999)**。**

與世界各國的珊瑚礁現況比較起來，台灣沿海珊瑚礁的現況和未來更令人憂心。台灣的珊瑚礁鄰近海岸，直接承受污染的衝擊和人為影響，而台灣地區人口密度高，經濟發展快速，對海洋遊憩活動的需求大，促使沿岸地區在尚未做好水土保持和污染防治的情況下，就被大量開發，給沿海的珊瑚礁引進了巨量的污染源。近年來，台灣地區頻繁發生的水患和土石流屢屢危及民眾的生命財產安全，然而，所有的污染物質最終都進入了海洋，大海其實承受了更多的災難，而珊瑚礁則是首當其衝的生態系。歷年來，我們調查台灣沿海的珊瑚礁，發現泥沙覆蓋珊瑚的現象普遍存在，許多原本生機旺盛的珊瑚礁，逐漸變成蓋滿淤泥的珊瑚墳場，珊瑚礁生態系正在迅速衰退中，若不立即採取行動去保護它們，則珊瑚礁可能很快就會從台灣沿海消失 (Dai, 1997; Dai et al. 2002)。

若我們採取保護行動，則珊瑚礁或許可以被保存下來，在氣候變遷的衝擊下，台灣地區的珊瑚礁也許會隨著水溫升高而逐漸北移，在北部和東北部海域建立繁盛的群聚。關於珊瑚礁的保育，不外是污染防治、立法和執法；最重要的是起而實行，做好珊瑚礁的污染防治和環境保護工作，重新檢討沿岸土地利用的政策，加強海洋污染防治的執法，透過政府和民間的積極參與，才能使台灣沿海的珊瑚礁延續發展。

參考文獻

戴昌鳳、陳永澤、郭坤銘、莊正賢 (1998) 墾丁國家公園南灣海域珊瑚群聚的變遷: 1987 至 1997 年. 國家公園學報 8:79-99.

戴昌鳳、郭坤銘、陳永澤、莊正賢 (1999) 墾丁國家公園東岸及西岸海域珊瑚群聚的變遷: 1987 至 1997 年. 國家公園學報 9: 111-129.

Birkeland, C. (ed.) 1997. Life and death of coral reefs. Chapman & Hall, New York.

Brown, B. E. and J. C. Ogden. 1993. Coral bleaching. Sci. Amer. 268: 64-70.

Brown, B. E. 1997. Coral bleaching: causes and consequences. Coral Reefs 16: 129-138.

Burke, L., E. Selig and M. Spalding. 2002. Reefs at risk in southeast Asia. World Resource Institute, Washington D.C., USA, 72 p.

Costanza, R. et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387: 253-260.

Dai, C. F. 1997. Assessment of the present health of coral reefs in Taiwan. In: Status of Coral Reefs in the Pacific (Grigg, R. W. and C. Birkeland, eds.), p. 123-131, Sea Grant Program, University of Hawaii.

Dai, C. F., K. Soong, J. S. Huang, C. A. Chen, T. Y. Fan, H. Y. Hsieh, J. S. Chang . 2002. The status of coral reefs in Taiwan and the conservation problems. Proc. IUCN/WCPA-EA4 Taipei Conference, p. 265-276, Taipei.

Gleason, D. F. and G.. M. Wellington. 1993. Ultraviolet radiation and coral bleaching. Nature 365: 836-838.

Harvell, C. D. et al. 1999. Emerging marine diseases-climate links and anthropogenic factors. Science 285: 1505-1510.

Hodgson, G.. 1999. A global assessment of human effects on coral reefs. Marine Pollution Bulletin 38: 345-355.

Hoegh-Guldberg, O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. Mar. Freshwater Res. 50: 839-866.

Jackson, J. B. C. et al. 2001. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. Science 293: 629-637.

Jameson, S. C., J. W. McManus and M. D. Spalding. 1995. State of the reefs: regional and global perspectives. US Department of State, Washington D.C., 26 p.

Kleypas, J. A., R. W. Buddemeier, D. Archer, J.-P. Gattuso, C. Langdon, B. N. Opdyke. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. Science 284: 118-120.

Knowlton, N. 2001. The future of coral reefs. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 98: 5419-5425.

Malakoff, D. 1997. Extinction on the high seas. Science 277: 487-488.

Ostrander, G. K. et al. 2000. Rapid transition in the structure of a coral reef community: the effects of coral bleaching and physical disturbance. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 97: 5297-5302.

Roberts, C. M. et al. 2002. Marine biodiversity hotspots and conservation priorities for tropical reefs. Science 295: 1280-1284.

Rosenberg, E. and Y. Bae-Haim. 2002. Microbial diseases of corals and global warming. Environ. Miobiol. 4: 318-326.

Souter, D. W. and O. Linden. 2000. The health and future of coral reef systems. Ocean & Coastal Management 43: 657-688.

Spalding, M. D., C. Ravilious and E. P. Green. 2001. World atlas of coral reefs. University of California Press, Berkeley, CA., USA, 424 p.

Wilkinson, C. R. 1999. Global and local threats to coral reef functioning and existence: review and predictions. Mar. Freshwater Freshwater Res. 50: 867-878.

Wilkinson, C. R. (ed.) 2000. Status of coral reefs of the world: 2000. Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia, 361 pp.

William, E. H. Jr. and L. Bunkley-Williams. 1990. The world-wide coral bleaching cycle and related sources of coral mortality. Atoll Res. Bull. 355: 1-72.