

因應氣候變遷海岸工程規劃設計策略之探討

蔡 瑤 堂

水利技師、國立海洋大學兼任教授

一、前言

氣候變遷是全球的大事，所以聯合國環境規劃署(UNEP, United Nations Environment Programme)及世界氣象組織(WMO, World Meteorological Organization)在1988組成了政府間氣候變遷專門委員會(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)，就氣候變遷現況提供明確的科學觀點，及其對環境及社經可能的衝擊。所有聯合國及世界氣象組織會員國均可參加，目前有195個國家。IPCC自1990年出版有關氣候變遷的科學及技術評估報告至2014已第5次。評估報告包含三冊：各工作團隊(Working Groups)、綜合報告(Synthesis Report)及決策者摘錄報告(Summary for Policymakers)。

有關氣候變遷的議題很多，在此把它聚焦在海岸工程規劃設計策略之探討，乃是因海岸是直接面對氣候變遷強浪、高水位及豪雨的第一線。因此海岸工程規劃設計策略需重新調整以因應氣候變遷所帶來的衝擊。

台灣海岸侵蝕嚴重是一不爭的事實，氣候變遷可能使海岸侵蝕更加嚴重，因此國發會已於2012年草擬「國家氣候變遷調適政策綱領」，其中領域五就是海岸調適策略，可作為因應氣候變遷調適海岸衝擊的指導方針。

本文先說明氣候變遷的成因及現象，接著是氣候變遷對海岸之衝擊，然後就因應衝擊提出海岸工程規劃策略，最後以屏東海岸地層下陷，相對海平面上升現象，其海岸保護的經驗作為因應氣候變遷的參考。

二、氣候變遷的成因及現象

(一) 氣候變遷的成因

因全球暖化(global warming)導致地球低大氣層平均溫度的增加，致地球氣候產生實質的變化，並且持續相當時間，使某些地區發生極端氣候，如暴雨量及頻率增加，而其它某些地區則極端乾旱及熱浪，是為氣候變遷。導致全球暖化的原因主要是人類的干預，尤其是溫室氣體(greenhouse gases)的過度排放，因溫室效應使全球暖化。

太陽輻射到達地球表面約有一半被地球表面吸收，並使地球表面暖和，而其餘則被地球及大氣層反射至太空。太陽輻射能包括可見光、紅外線及紫外線，但大部分能量集中在可見光及紅外線，紫外線只佔極小部份。其中紅外線輻射穿過大氣層(太陽的能量約超過一半的能量以紅外線的方式進入地球)，但大部分被溫室氣體分子及雲吸收及並向各方向散發，此效應乃使地球表面及低大氣層暖和，即所謂溫室效應。如圖1所示[1]。

大氣層主要包含氮(nitrogen)和氧(oxygen)，但此兩種氣體沒有溫室效應。溫室氣體包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、水氣(H₂O)、氟氯碳化物(CFCs)、氧化亞氮(N₂O)、臭氧(O₃)等。其中自然生成之溫室氣體，如二氧化碳、甲烷及水氣構成地球的溫室，使地球維持溫暖的氣候，地球才有目前的生命。否則地球必然極冷。地球大氣若無溫室效應，則平均溫度約-18°C，目前平均氣溫約15°C。

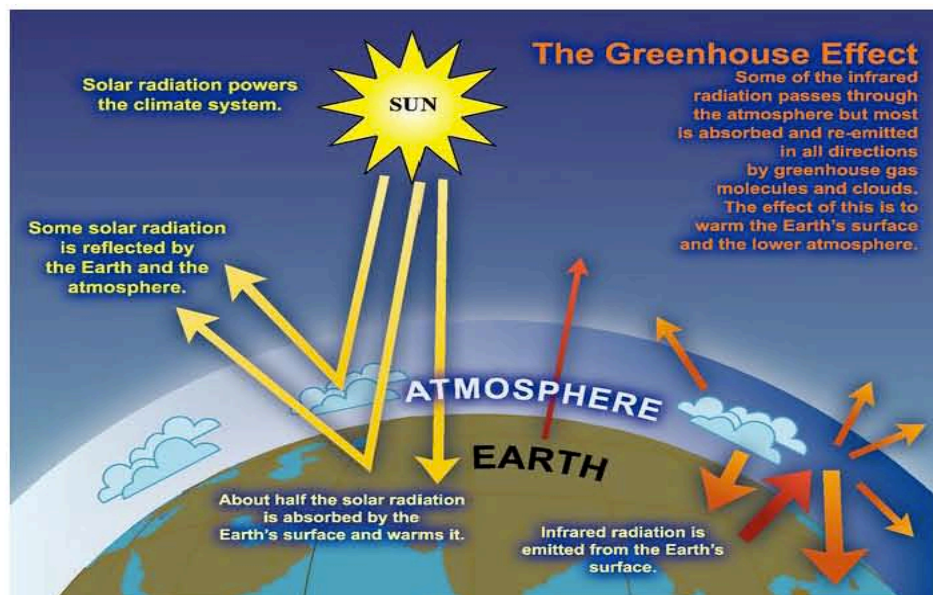


圖1 溫室效應示意圖

溫室氣體的來源如表1所示[2]，除了氟氯碳化物(CFCs)無自然來源外，其它溫室氣體均有自然來源，但人類活動所造成各種溫室氣體的過度排放，才是問題所在。溫室氣體的增溫效應若以二氧化碳為基準，如表2所示氟氯碳化物是最可怕的，可達到二氧化碳的10,000倍。二氧化碳的溫室效應雖比其他氣體低，但溫室效應二氧化碳佔了55%，氟氯碳化物佔24%，此乃因石化燃燒及吸收二氧化碳的森林遭到嚴重破壞導致大量二氧化碳排放到大氣。而溫室氣體在大氣中停留的時間亦列在表2[2]，除了

甲烷，其它氣體停留時間均相當長久，可達上百年，故這些氣體一旦進入大氣，幾乎無法回收，其影響是長久且全球性的，只有靠自然的過程讓它們逐漸消失。而人類活動只有減少排放一途。

表1 溫室氣體的來源

氣體種類	來源
二氧化碳(CO ₂)	自然來源:如光合作用、呼吸作用。 人類活動:75%以上是由化石燃料燃燒產生的，其他如毀壞森林。
甲烷(CH ₄)	自然來源:濕地。其他包括白蟻、海洋、植被和甲烷水合物。 人類活動:使用煤和天然氣生產能源、垃圾掩埋、飼養反芻動物(如牛、羊等)、稻作農業，以及生質燃燒。
氟氯碳化物(CFCs)	自然來源:無。 人類活動:人造化學物質包含清潔溶劑、泡沫噴出媒介、防燃劑、冷媒等。不僅是溫室氣體的一種，也會破壞臭氧層。
氧化亞氮(N ₂ O)	自然來源:海洋、大氣中氮的化學氧化，以及土壤。熱帶土壤是一個向大氣排放氧化亞氮的特別重要的源。 人類活動:肥料中的氮轉化為氧化亞氮，以及隨後從農業土壤中的排放；生質燃燒；養牛；以及某些工業活動，包括尼龍的生產。
臭氧(O ₃)	自然來源:在對流層紫外線作用及閃電雷擊電離作用。 人類活動:工廠、汽車排放之氮氧化合物及碳水化合物經過光所合成臭氧。但臭氧層亦具有吸收太陽光中大部分的紫外線，以保護地球表面生物，不受紫外線侵害之功能。

表2 溫室氣體增溫效應比較

氣體別	增溫效應[3]	溫室效應(%)	在大氣中停留時間(年)
二氧化碳(CO ₂)	1(基準)	55	50~200
甲烷(CH ₄)	10	15	12~17
氧化亞氮(N ₂ O)	100	6	120
臭氧(O ₃)	1,000		
氟氯碳化物(CFCs)	10,000	24	40~150

(二) 氣候變遷的現象

溫室氣體如果超出自然生成的量，則地球溫度會升高。目前觀測到的現象如溫

度升高會顯示在地表及海表溫度的增加，海冰覆蓋面積範圍減少，而溫度升高及冰雪溶化導致海平面上升等。

1. 地表與海表溫度上升

圖2為全球平均地表與海表溫度距平的變化(由1850~2012的觀測值)，溫度距平是相對於1961~1990平均值計算而得。上圖為年平均值，下圖為10年平均值。上圖顯示1850~1900年和2003~2012年兩段期間的平均溫度增加了 0.78°C ，從1980年到目前地表與海表都呈現明顯暖化的現象。

但2016年世界氣象組織(WMO)公佈2011~2015年的地球體檢報告，光是2015年的年均溫增加幅度已經超過 1°C 。

2. 海冰覆蓋面積縮小

1979至2012年北極年均海冰覆蓋範圍縮小速率約每10年3.5~4.1%，如圖3所示，夏季最低海冰覆蓋範圍約每10年縮小9.4~13.6%，即每10年縮小0.73~1.07百萬平方公里。但1979~2012年南極年均海冰覆蓋範圍以每10年以1.2~1.8%的速度增加，即每10年增加0.13~0.20百萬平方公里。但南極存在很大的區域差異，有些增加，有些減少。

過去20年來，格陵蘭和北極一直在損失冰量，北半球春季積雪面積持續在縮小中。

但2016年世界氣象組織(WMO)公佈2011~2015年的地球體檢報告，五年來北極海冰覆蓋範圍與1981~2010年相比，已減少了28%。

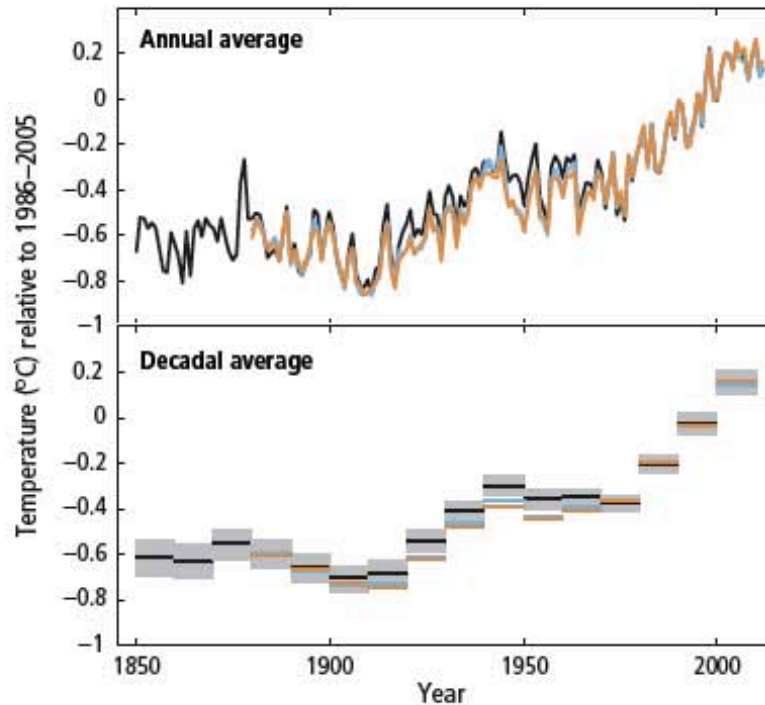


圖2 全球平均地表與海表溫度距平的變化(1850~2012觀測值)[4]

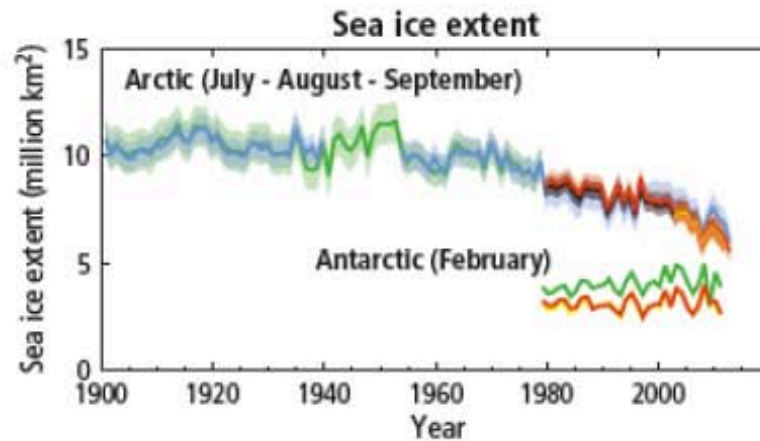


圖3 南北極海冰覆蓋範圍[4]

3. 海平面上升

如圖4所示，1901~2010年間海平面每年平均上升1.7mm，但在1993~2010年間平均每年上升3.2mm。1993~2010年期間全球平均海平面上升與觀測到的因全球暖化造成的海洋熱膨脹、冰川變化、格陵蘭及北極覆蓋冰變化及陸地水儲量變化等方面的貢獻總和相一致。圖5為海平面上升各種因素貢獻示意圖，其中海底面下陷相對上也是海平面上升，如台灣西海岸地層下陷相對上亦可稱為海平面上升。故海平面上升可分為兩種型態，反應氣候變遷致地球暖化引起之海平面上升，稱為海平面變動(eustatic)，代表地區性地面相對於海平面垂直位移，致

相對海平面上升，稱為地殼均衡(isostatic)。

2016年世界氣象組織(WMO)公佈2011~2015年的地球體檢報告，也證實在過去五年來海平面平均每年上升超過3.0mm。

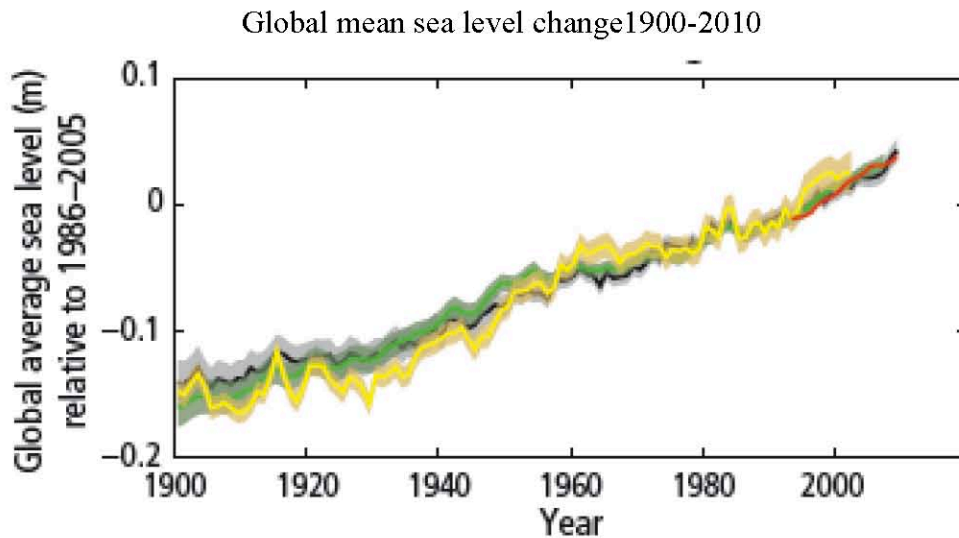


圖4 相較於1986~2005全球平均海平面上升[4]

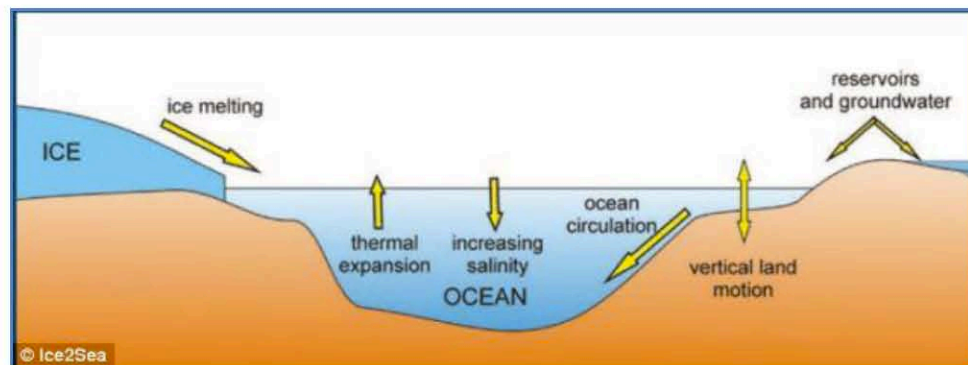


圖5 貢獻海平面上升各種因素示意圖[8]

4. 極端氣候和氣候事件的變遷

因為根據觀察極端氣候及氣候事件的變遷所得到的資料，就全球尺度而言，很難量化，故政府間氣候變遷專門委員會(IPCC)以非常可能(very likely)、可能(likely)、比較可能(more likely than not)來評估其發生的可能性。對於估計的可靠性則以中等可信度(medium confidence)、低等可信度(low confidence)等來評估。

自1950年起已觀測到許多極端氣候及氣候事件(climate events)的變遷，其可能性及可信度如下:[5]

- 非常可能
 - ★寒日及寒夜的次數已經減少。
 - ★暖日及暖夜的次數已經增加。
- 可能
 - ★在歐洲、亞洲、和澳洲的許多區域，熱浪的頻率增加。
 - ★陸地上豪大雨事件增加的區域多於減少的區域。
 - ★在北美和歐洲，豪大雨事件的頻率和強度增加。
- 中等可信度
 - ★對其他陸塊豪大雨事件變化的評估。

表3為極端氣候及氣候事件在全球尺度下，評估近年來觀測到的變遷，人類影響程度，以及21世紀早期(2016~2035)與21世紀後期(2081~2100)進一步變遷的推估。黑粗體字代表AR5根據SREX(藍色)或AR4(紅色)修訂過的全球尺度評估。

表3 全球尺度下評估近年觀測到的極端氣候與氣候事件及未來之推估[5]

現象與趨勢走向	對變遷是否發生的評估 (皆為 1950 年至今，除非另外註明)	人類對觀測到的變遷的影響	進一步變遷的可能性	
			21 世紀早期	21 世紀後期
大多數陸地地區變得較暖及/或寒日及寒夜減少	非常可能	非常可能	可能	幾乎確定
	非常可能	可能		幾乎確定
大多數陸地地區變得較暖及/或暖日及暖夜更頻繁	非常可能	非常可能	可能	幾乎確定
	非常可能	可能		幾乎確定
暖期/熱浪: 大多數陸地地區的頻率及/或持續時間增加	中等可信度 在全球尺度上	可能	未正式評估	非常可能
	可能 在歐洲、亞洲及澳洲的大範圍區域	可能 (僅限熱夜)		非常可能
豪大雨事件: 發生的頻率、強度及/或降雨量增加	中等可信度 在許多 (但非全部) 地區	未正式評估	可能 許多陸地地區	非常可能 大部分中緯度陸地地區及潮濕熱帶地區
	可能 陸地上增加的區域多於減少的區域	中等可信度		非常可能 大部分陸地地區
乾旱的強度及/或持續時間增加	可能 陸地上增加的區域多於減少的區域	中等可信度		可能 許多地區
	可能 大多數陸地地區	比較可能		非常可能 大部分陸地地區
強烈熱帶氣旋活動增加	低可信度 在全球尺度	低可信度	低可信度	可能 (中等可信度) 區域尺度到全球尺度
	可能 部分地區	低可信度		中等可信度 部分地區
極端高海面發生率及/或程度增加	中等可信度 部分地區	中等可信度		可能
	可能 許多地區 自 1970 年以來	比較可能		比較可能 西北太平洋及北大西洋海域
極端高海面發生率及/或程度增加	低可信度 長期 (世紀尺度) 的變遷	低可信度	低可信度	比較可能 部分海域
	幾乎確定 北大西洋 自 1970 年以來	低可信度		可能
極端高海面發生率及/或程度增加	低可信度	低可信度		非常可能
	可能 (部分地區 自 1970 年以來)	比較可能		非常可能
極端高海面發生率及/或程度增加	可能 (自 1970 年以來)	可能	可能	可能
	可能 (20 世紀後期)	可能		可能
極端高海面發生率及/或程度增加	可能	比較可能		可能
	可能	比較可能		可能

【註】

AR4：IPCC 4th Assessment Report，「氣候變遷第四次評估報告」

AR5：IPCC 5th Assessment Report，「氣候變遷第五次評估報告」

SREX：IPCC, Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Changed Adaptation，「促進氣候變遷調適之風險管理-針對極端事件及災害」特別報告

三、氣候變遷對海岸之衝擊

與海岸工程有關之自然現象包括水位、波浪、風、及降雨。由表3可知因氣候變遷這些現象發生的可能性，特摘錄如下：

「極端高海平面發生機率/或程度增加」在21世紀早期是「可能」，21世紀後期是「非常可能」。而引起波浪及風的「強烈熱帶氣旋活動增加」在21世紀早期是「低可信度」，21世紀後期是「西北太平洋及北大西洋比較可能」。將導致低溼海岸地區淹水及河口沖刷/淤積之「豪大雨事件發生的頻率、強度及/或降雨量增加」，在21世紀早期是「可能」，21世紀後期是「大部分陸地地區非常可能」。

因此除了熱帶氣旋(颱風)活動增加到21世紀後期才比較可能。海平面上升及豪大雨都可能到非常可能。

(一) 海平面上升之衝擊

如圖6所示，四種情境下預估至2100年地表溫度及海平面上升之情形，兩者上升趨勢一致。根據圖6(a)到21世紀末期(2081-2100)，各種情境下地表溫度上升情形列如表4。而根據圖6(b)平均海平面上升幅度列如表5。但各地區的海平面升幅並不一致，到21世紀末，在約95%以上的海洋地區，海平面會上升，預估全球70%的海岸線將出現海平面發生變化。

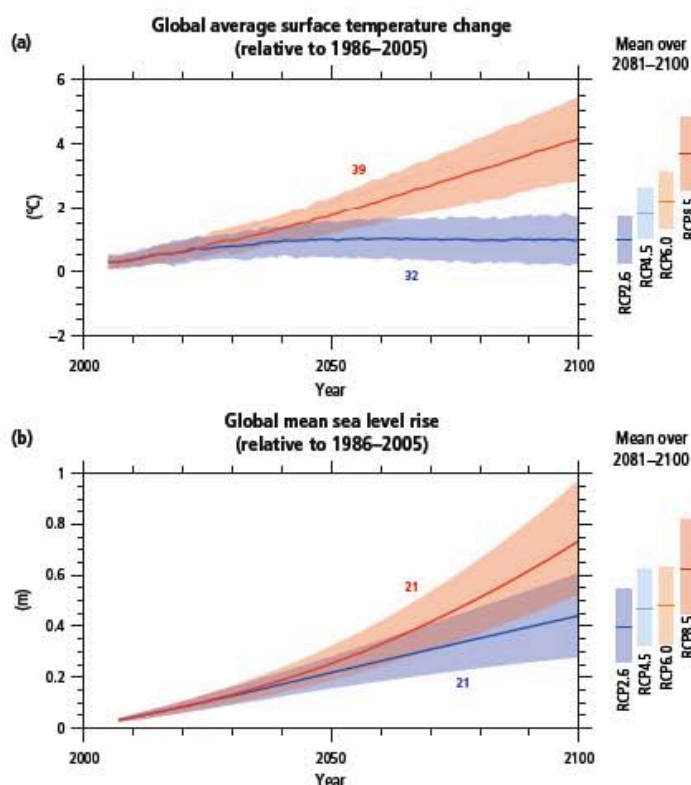


圖6 不同情境全球地表溫度變化及平均海平面上升變化估計[4]

【註】

RCP：代表濃度路徑(Representative Concentration Pathways)，四種溫室氣體軌跡供氣候模擬及研究。

RCP2.6：一個溫室氣體排放嚴格減緩情境，即將全球溫度控制在不超過工業化以前 2°C 的情境

RCP4.5、RCP6.0：兩個溫室氣體中度排放情境

RCP8.5：一個非常高的排放情境

表4 各種情境下地表溫度上升情形[4]

情境	21世紀末期(2081-2100)比1986-2005年期間上升溫度(°C)
RCP2.6	0.3~1.7(1.0)
RCP4.5	1.1~2.6(1.8)
RCP6.0	1.4~3.1(2.2)
RCP8.5	2.6~4.8(3.7)

註:(·)平均值

表5 不同情境下平均海平面升幅[4]

情境	2081-2100比1986-2005年期間平均海平面升幅(m)
RCP2.6	0.26~0.55(0.4)
RCP4.5	0.32~0.63(0.47)
RCP6.0	0.33~0.63(0.48)
RCP8.5	0.45~0.82(0.63)

註:(·)平均值



圖7 美國北卡羅萊納州諾亞諾克灣2016/9/3晴天高水位時浪越過堤防(聯合報2016/9/5)

海平面上升對海岸可能之衝擊列如表6。

表6 海平面上升對海岸之衝擊

海平面上升對海岸衝擊	說明
灘線後退	若上升 0.5m，對坡度 1/50 的海灘即後退 25m，1/100 則後退 50m，相對的沙灘寬度亦縮小 25m 或 50m。
波浪溯升增高	在自然陡坡海岸或緩坡海岸溯升不但隨海平面上升增高，亦移向內陸。若是有海岸結構物，如海堤或護岸，則其越波量會增加。對結構物之作用力也增大。
加速海岸侵蝕	造成海岸侵蝕的原因很多，最主要是沿岸漂沙失衡，如供沙沙源減少或不當海岸結構物。而海平面上升，使水深變深，碎波波高變大，且波浪溯升越趨向內陸，造成緩波沙灘侵蝕及陡坡崩塌。若有海岸結構物，則水深變大，反射波亦變大，堤腳沖刷加劇，造成海岸侵蝕。結合灘線後退、溯升增高及侵蝕效應亦會危及海岸沙丘系統的穩定及存在。
改變漂沙型態 [6]	海岸漂沙構成海灘、泥灘及濕地底層。海平面上升會改變漂沙之供應，較高水位及降雨型態改變可能改變沖刷及淤積型態，使沙灘及海岸沙丘向內陸移動，若有海堤或護岸阻擋，則沙灘及沙丘無法向內陸移動，終成一淹水區，沙灘及沙丘不復存在。
海岸濕地及棲息地喪失	海平面上升因潮間帶向內陸移動，可能改變沙灘及礁石潮間帶棲息地的型態，且一般會減少棲息地的數量。濕地則因水位上升亦可能不易得到供沙，且可能消失，濕地原是很好的棲息地。
晴天淹水	因水位上升，即使在晴朗的天氣，在高潮位時，海岸低窪地區亦會發生淹水情形，如圖 7。
進退潮錐體 (prism) 增加	在河口或潮口對所有基礎造成較大沖刷及漂沙移動。

(二) 強烈熱帶氣旋(颱風)活動增加之衝擊

颱風是台灣最頻繁的自然災害，對海岸工程而言，颱風所帶來的波浪及暴潮對海岸為害最大。

(三) 豪大雨事件之衝擊

豪大雨不但會造成內陸的洪水及土石流，在海岸低窪地區亦會造成泛濫。尤其在河口。

上面三種氣候變遷所帶來的事件對海岸最大衝擊是同時發生(三合一)，且往往是同時發生。在台灣颱風就會造成三合一的衝擊。其對海岸之衝擊列如表 7。

表7 氣候變遷三合一(海平面上升、颱風及豪雨)對海岸之衝擊

海平面上升加強烈颱風豪雨對海岸的衝擊	說明
河口周邊地區嚴重淹水	豪雨使河水暴漲，而強烈颱風的暴潮提高海水面，會造成河口周邊三角洲低窪地區嚴重淹水。且因河口海水抬高水位亦提高河川水位，增加內陸地區淹水的風險。
海堤或護岸堤後淹水	豪雨加上暴潮及強浪，會造成嚴重越波導致堤後淹水範圍擴大。海岸低窪地區遭遇泛濫之頻率增加。
海堤或護岸易遭破壞	水位上升之情況下，颱風所帶來之強浪暴潮，不但對結構物之作用力增加，對堤腳之沖刷亦加劇，致海堤及護岸易遭破壞。
河口附近侵蝕與淤積型態改變	因河口水位及流場改變，且因豪雨產生之內陸沖刷亦改變，進而影響河口沿岸漂沙運動，而改變侵淤型態。

另外三合一對港埠之衝擊亦不可忽視，其衝擊包括造成港區淹水及設施之破壞，影響港埠營運。海平面上升使靠泊碼頭之船隻在高潮位時上升，增加裝卸貨物的困難度。水位上升亦減少棧橋式碼頭水面上淨空，可能增加其上揚力。對橋樑則因減少淨空，而限制某些較大船隻穿過橋梁底下。但惟一好處是減少航道及港池的浚挖。

四、海岸工程規劃設計之策略

(一) 因應氣候變遷海岸調適策略

為因應氣候變遷對海岸之衝擊，需主動事先規劃如何保護海岸資源及開發之調適策略(adaptation strategies)，調適策略一般包含保護性(protect)、適應性(accommodate)及後撤性(retreat)策略。策略之執行因地制宜、不同災害管理及保護目標而異，調適策略效果常隨時空而異，因此有時需要採取複合式策略。海岸工程之規劃設計必需配合國家整體調適策略，行政院經濟建設委員會(國發會)已於2012年草擬「國家氣候變遷調適政策綱領」，其中領域五海岸調適策略可做為依據。

海岸調適策略的各種選項列舉如表 8。

表8 海岸調適策略綱要[6][7]

海岸調適策略	說明
保護性	硬性保護設施 柔性保護設施
適應性	事先規劃以避免最壞的衝擊 選新場址或採取較嚴格之設計標準 翻新改善現有結構物
後撤性	限制海岸危險地區之開發 廢除脆弱海岸地區之開發 促進自然海岸成為保護區 重新安置棲息地

(二) 海岸工程規劃設計之考量

配合海岸調適策略，海岸工程規劃設計之考量詳列如表9。

表9 海岸工程規劃設計之考量

海岸調適策略	海岸工程規劃設計之考量
保護策略	<p>1. 硬性保護設施:</p> <p>(1) 應檢討一定要採用硬性保護設施的理由，如現有海岸已經有海堤或護岸保護其背後之生命財產，遷移確實有困難，但因海平面上升是緩慢的，應注意觀測該地區之水位變化(包括暴潮)、波浪及堤前地形變化，以作為加強該海岸設施之依據。若係 50 年之設計使用年限，宜考慮提高設計波高及設計水位之回歸期，以反應未來水位上升，確保結構物安全。</p> <p>(2) 若為新建工程，如防波堤，除採用較長回歸期之設計波浪及設計水位，宜為未來因應水位上升、波高增大，預先考慮將來如何加強加高防波堤，以達到堤身穩定及港測水面靜穩之效果。</p> <p>(3) 因強風豪雨導致堤後淹水，宜設抽水站加強排除降雨及越波水量。</p> <p>(4) 在港埠設施，設計時宜考慮未來水位上升，未來再加高仍可承受增加的重量。而棧橋式碼頭需預估增加的上揚力，或先預留淨空。浮動碼頭其浮箱上下導柱需預估未來可能浮箱上升最大高度。</p> <p>2. 柔性保護設施: 以不產生負面影響為原則，維持自然海岸。</p> <p>(1) 不作為(do nothing): 僅蒐集正確資料，密切觀察，對海平面上升不必過份反應，與自然不對抗，不介入海岸變遷。</p> <p>(2) 人工養灘是一常用的手段，建立及維護海岸沙丘系統，使沙灘</p>

	<p>及沙丘構成一柔性消波的面，乃是最自然的保護海岸的方式。</p> <p>(3)人工岬頭是一硬性岬頭及養灘的半柔性手段，亦常被採用。</p> <p>(4)種值濱海植物不但有保護沙灘功能，亦可創造棲息地。</p>
適應策略	<p>如提高臨海之結構物免以淹水，增加材料強度，採用移動式結構物，或預估淹水風險，結構物位置預先作額外後退。特殊地點必要時可隨海水面上升填高。適應策略之考量往往是需要柔性且不斷修改漸進的去配合海平面上升。順應自然，是最好的手段。填海造地則配合海平面上升，先予與提高。</p>
後撤策略	<p>以空間規劃手段，整合後撤性技術。若經常發生侵蝕的海岸，用保護性策略費用太高，則考慮把海岸道路或設施往內陸後撤。</p> <p>海岸開發利用要避開脆弱的海岸地區。</p>
複合策略	<p>上述各策略單獨採用往往無法達到預期效果，故需同時採用兩種或三種策略形成一個功能完整的策略。[9]</p>

五、屏東海岸地層下陷的經驗

(一) 屏東海岸下陷情形

如前所述，地層下陷相對上是海平面上升。因氣候變遷到2100年可能最大的海平面上升是0.82m。而屏東海岸因養殖業超抽地下水導致地層下陷，林邊佳冬地區自民國59年至87年3月止，平均累積下陷量2.77m，塭豐村一帶累積下陷量達3.06m，枋寮地區下陷量亦達2.04m，87年至今累積最大下陷量超過1.0m。故到目前為止屏東海岸(枋寮至塭豐)累積地層下陷量約3~4m。

因此屏東海岸因地層下陷產生的相對海平面上升約在3~4m，其所造成之後果及採取之海岸補救措施值得做為氣候變遷對海岸衝擊之對策作參考。

(二) 地層下陷之後果

最直接的後果就是淹水，如圖8所示，大潮時淹到台17沿海公路，當然住家也不例外，尤其在颱風時雨水排不出又有海水倒灌，如圖9所示。



圖8 台17線沿海公路林邊段大潮時淹水情形[10]



圖9 莫拉克颱風林邊地區淹水情形[11]

而在海岸部分除了大潮及颱風時發生海水倒灌外，沙灘亦發生嚴重沖刷，使海底坡度變陡，海岸退縮。

(三) 對策

台17線加高路面免於大潮時淹水，新建住家把一樓墊高至二樓高，如圖10。但最大的投資是在海岸防護工程。



圖10 新建房屋預先墊高[10]

如圖11所示為屏東海岸自東港漁港至番子崙三處海岸防護設施，包括海堤、突堤、離岸堤、潛式離岸堤，在大鵬灣導流堤南側有弧形突堤保護之人工養灘。

根據水利署的統計自民國60年至84年12月止，所建之海岸防護設施計有:[12]

海堤:23,456m

突堤:150m

閘門:2 處

背水堤:1,250m

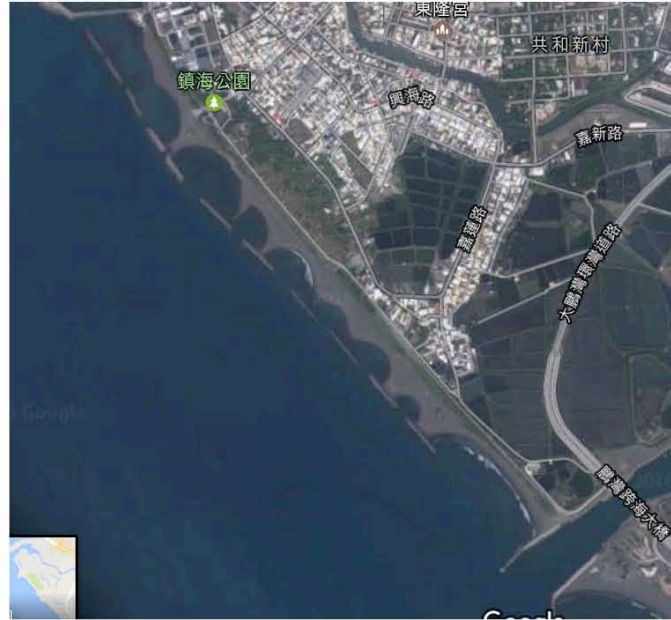
導流堤:9 座

海岸保護工:1,515m

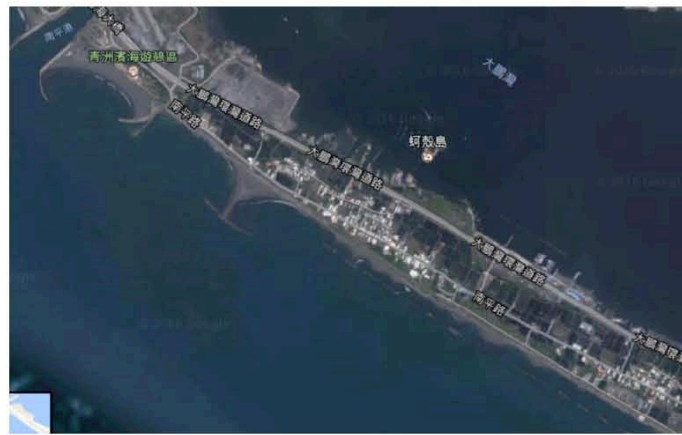
離岸堤:53 座

上述這些設施包括保護海岸及防止海水倒灌設施，不但要隨地層下陷不斷提高，受颱風波浪破壞後還要不斷維修。因硬式設施迫使大量沙灘流失，堤腳沖刷，因此要一直視其產生之負面效應不斷修正。以上是民國85前之統計資料，自85年後又增加了許多設施，如潛式離岸堤及人工養灘。因地層下陷使部份海平面明顯上升，光是這些海岸保護設施經費就非常龐大。

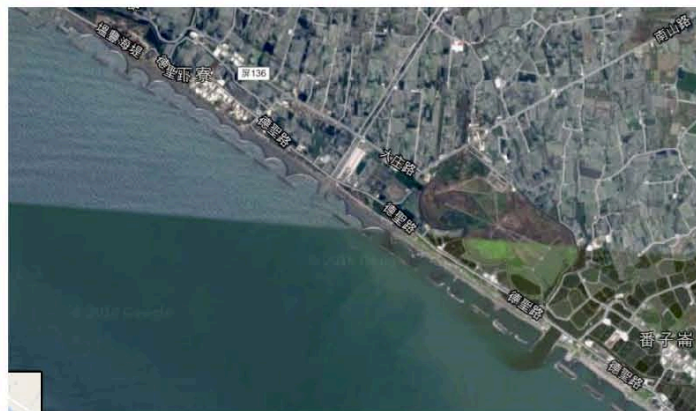
故這以硬性設施所得到的經驗值得加以省思，此可觀海面上升是屬局部的，但氣候變遷引起之海平面上升及極端氣候是全國海岸都會受到衝擊，各海岸有其脆弱性，因此其困難度也不可忽視。水利署仍在檢討屏東海岸之侵淤防制策略[13][14]，期待能對將來海岸保護策略有幫助。



東港漁港南防波堤至大鵬灣導流堤海岸



大鵬灣導流堤至大鵬灣南岸海岸



頂寮至番子崙海岸

圖 11 屏東海岸自東港漁港至番子崙三處海岸防護設施[google 地圖]

六、 結語

海平面上升自古就有，乃使海岸隨時間一直在調整變化的一個主要因素。但現在所面臨因人為因素導致氣候變遷引起之氣候變遷引起的三合一現象(海平面上升、強風、豪雨)，雖是緩慢但會持續相當長的時間，且是全面的，現今海岸地區的高密度開發，氣候變遷所帶來之衝擊益顯不可忽視。

氣候變遷引起的三合一現象將會增加海岸低窪地區淹水的風險，海灘侵蝕、陡岸崩塌、濕地及棲息地消失等，對現有海岸結構物造成破壞，對港埠也會影響貨物裝卸。

氣候變遷之保護性、適應性及後撤性等調適策略，若單獨採用，也許短時間會看到效果，但長時間的效果還是要採用複合式策略。

海岸工程之規劃設計宜配合國家調適策略作整體考量，就其海岸特性，尤其是脆弱度，採取適當措施。海平面上升是緩慢漸進的現象，要接受此事實，不對抗、不主動介入海岸變遷，即不作為之思維值得考慮，但要持續監測，充分瞭解其變化。套用郭金棟教授的名言：「海岸工程無他，瞭解自然，學習自然，順應自然而已。」

屏東海岸可觀的海平面上升(與氣候變遷相比)在海岸保護方面過去奮鬥了四十幾年已帶給我們寶貴的經驗，也學到些教訓，對海岸工程規劃設計是很好的啟示。氣候變遷對海岸的衝擊雖是一個非常重要的議題，但就屏東地層下陷相對的海平面上升，對海岸的衝擊可能比氣候變遷的衝擊嚴重得多。

七、 參考文獻

- 1.中央氣象局，「什麼是溫室效應」
http://www.cwb.gov.tw/V7/climate/climate_info/climate_change/change_6/change_6-3.html
- 2.「溫室氣體的種類及來源」
<https://tw.answers.yahoo.com/question/index?qid=20091219000010KK03000&p=%E6%B0%A7%E5%8C%96%E4%BA%9E%E6%B0%AE%E4%BE%86%E6%BA%90>
- 3.「哪些氣體造成溫室效應??」
http://www.ncu.edu.tw/~ncume_ee/tlyeh/shuan/greenhousegas.htm
- 4.IPCC, Climate Change 2014,Synthesis Report.
- 5.科技部「台灣氣候變遷推估與資訊平台建置」計畫編譯，「氣候變遷 2013，物理科學基礎，給決策者摘要」。

6. California Coastal Commission, 2015, "California Coastal Commission Sea Level Rise Policy Guidance" pp.293。
7. The National Committee on Coastal and Ocean Engineering, Engineers Australia, 2004, "Guidelines for Responding to the Effects of Climate Change in Coastal and Ocean Engineering" pp.58。
8. N. Medernott, 2013, "The great flood of London: Experts warn risk to Capital from rising sea levels worse than feared"
9. L. Ewing, 2010, "Sea Level Rise: Major Implications to Coastal Engineering And Coastal Management" Chapter36, Handbook of Coastal and Ocean Engineering, p.997~1021。
10. 經濟部水利署國立成功大學地層下陷防治服務團，"地層下陷衍生災害"。
<http://www.lsprc.ncku.edu.tw/index.php/2015-07-07-03-53-56/thl-all-subsidence/2015-10-01-03-15-01/265-2015-10-01-03-40-39.html>
11. 環境資訊中心，2009，"淪陷水中央"。<http://e-info.org.tw/node/46093>
12. 經濟部營建署，屏東海岸，海岸防護。
<http://webarchive.wra.gov.tw/wra201204/wra201204/wra/www.wra.gov.tw/ct0c48.html?xItem=12617&ctNode=2426&comefrom=lp#2426>
13. 國立中山大學，2011，"屏東海岸地形資料調查及侵蝕防制策略研究(1/2)"經濟部水利署第七河川局，pp.482。
14. 國立中山大學，2012，"屏東海岸地形資料調查及侵蝕防制策略研究(2/2)"經濟部水利署第七河川局，pp.462。

投稿 106.04.21
校稿 106.04.24
定稿 106.04.26