

失序的碳循環

周揚震、徐恆文

古人觀察大自然周而復始的變化，歸納出「四時有度，天地之理也」，說明春夏秋冬的更迭運行自有一定的規則，這是天地自然的道理。而當人類活動使得「四時無度」時，就可能釀成重大的災難。

天行健

《易經》謂：「天行健，君子以自強不息」提及了大自然具有恆常持久、周而復始的道理與規律。現代科學進一步把自然界的恆常變化細分為水循環、碳循環、能量循環、氧循環、氮循環等。近年來人類活動頻繁，影響了這些周而復始的循環，造成氣候變遷，衝擊人類生存的環境。

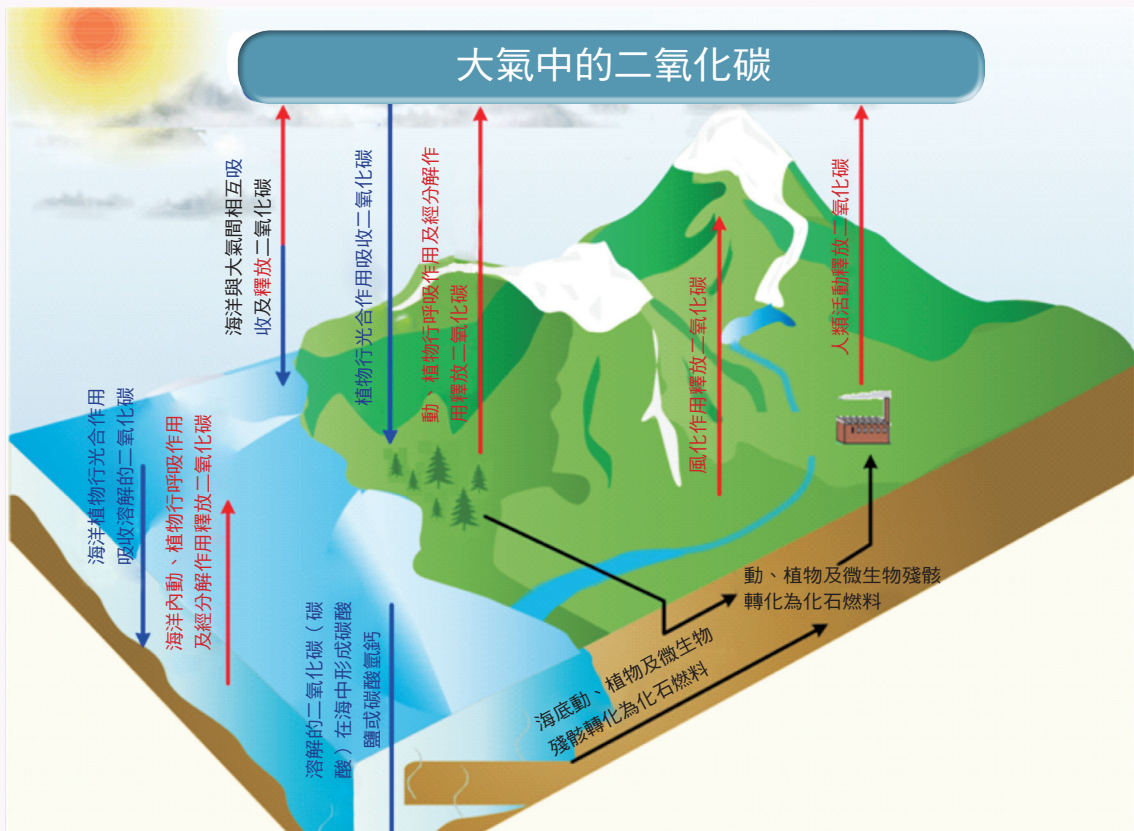
碳是構成生命的重要元素，也是所有有機物質的基本成分。碳循環是指碳元素在各個自然的儲存庫間，不斷發生的各種化學、物理、地質和生物過程。自然的儲存庫包括大氣、陸地生物圈、沉積物及海洋生物圈。

陸地領域中的碳透過不同方式，在各生物體間傳遞及流動。綠色植物藉由光合作用，把由大氣中擷取的二氧化碳轉化成葡萄糖，再代謝成植物的有機體。植物體內的碳再隨著食物鏈轉移到各種動物體內，構成動物的有機體或在有機體內貯存。此外，動植物在行呼吸作用時，會消耗部分攝取到體內的有機物，並把二氧化碳排放到大氣中。

動物的排泄物和動植物死後的殘體會被土壤中的微生物分解，一部分碳構成微生物細胞，一部分則回到大氣中。微生物死亡後，也會分解釋放出二氧化碳。若動植物殘體在分解之前就被掩埋成為有機沉積物，在悠長時間的熱能和壓力作用下會轉變成化石燃料。因此，動植物和微生物等有機質，土壤以及土地中化石燃料中的碳含量，就是陸地領域的總碳存量。

二氧化碳在水裡的形態，可以是氣態的二氧化碳、碳酸氫根離子或碳酸根離子，三者的總和就是水中的可溶性無機碳。石灰岩會因風化作用與溶解在雨水或地下水中的二氧化碳（碳酸）發生化學反應，在水中形成可溶的重碳酸鹽（鈣離子及碳酸氫根離子）。水中的碳酸也會

由於人類活動的干擾，使得全球自然的碳循環遭到破壞。



大自然中的碳循環

和岩石裡的鈣和鎂反應，生成不可溶的碳酸鈣及碳酸鎂。

這些可溶和不可溶的碳酸化合物都會隨著河水沖進海洋而沉積在海底，地球的板塊運動會使海洋板塊連帶積存在海底的沉積岩一併隱沒在地球的地幔裡。最後，部分碳元素會透過火山活動回歸到大氣中。

海洋和大氣之間會不停地交換二氧化碳，這兩個方向流動的二氧化碳量大致相等，當大氣中二氧化碳濃度增減時，海洋吸收的二氧化碳量也隨之增減。大氣與海洋間二氧化碳交換的過程，主要受海水表面溫度、酸鹼值、環流、海洋生物光合作用和呼吸作用影響。海洋生物也透過光合作用（植物）和呼吸作用（動植物）與海洋交換二氧化碳。海洋生物死亡後，會被

微生物分解釋出二氧化碳，未被分解的則下沉至深海，以有機質沉積物的形式進入地殼內循環。

進步的代價

在自然的碳循環裡，碳儲存庫之間的碳交換大致是平衡的，大氣中的二氧化碳濃度較為穩定。然而，由於人類活動的干擾，使得全球自然的碳循環遭到破壞。

工業時代以來，人類大量使用幾千萬年前地球逐漸累積的化石能源，最後都以二氧化碳的形式排入大氣。而在發展各項文明設施的同時，大批的森林也遭受破壞，人們又把幾十幾百年來大自然植被中所存積的二氧化碳，用很快的速率釋放出來。

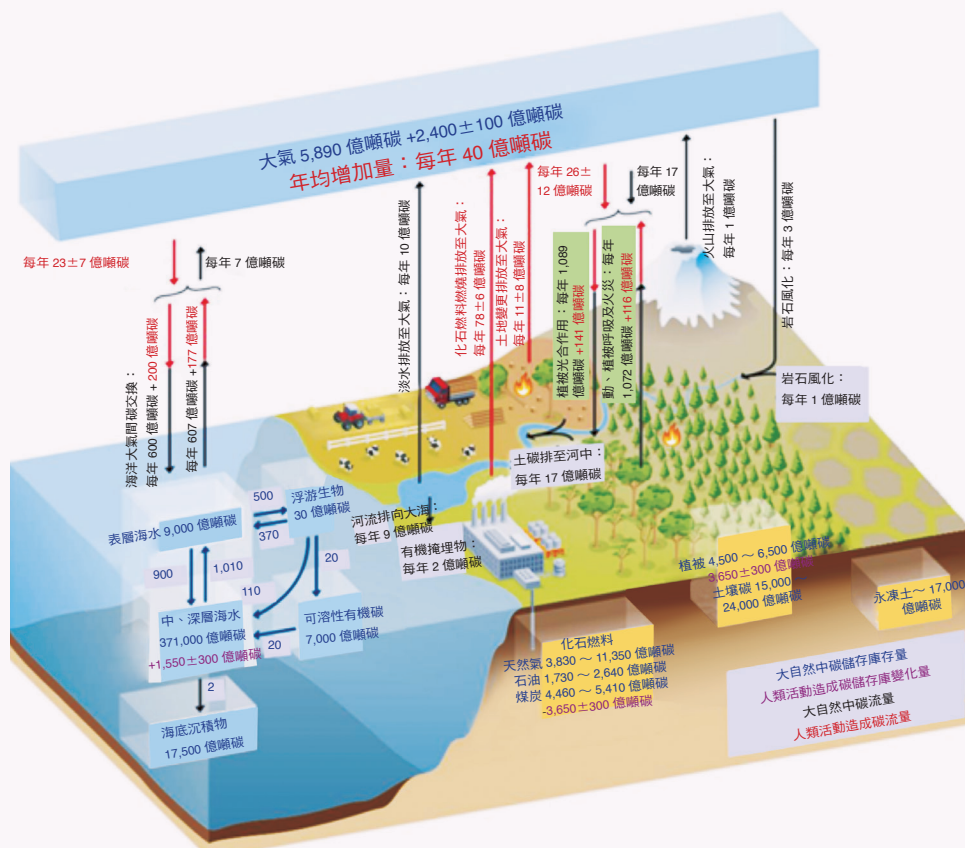
聯合國政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change of the UN, IPCC) 在 2013 年 9 月發表的《第 5 次氣候評估報告》中指出，和工業革命前相比，人類活動使得化石燃料耗用量增加 3,650 億噸，也使植被內含碳量減少 300 億噸。因而造成中層海水碳含量增加 1,550 億噸，大氣中碳含量增加 2,400 億噸，增幅高達 41%。

若以動態結果來看，燃燒化石燃料和土地利用每年分別排放 78 億噸及 11 億噸碳，使陸地生態圈每年增加 26 億噸碳淨吸收量，海洋生物圈每年增加 23 億噸碳淨吸收量，因此大氣中每年碳約增加 40 億噸。由此可知，相對於地球自身龐大的碳循環，

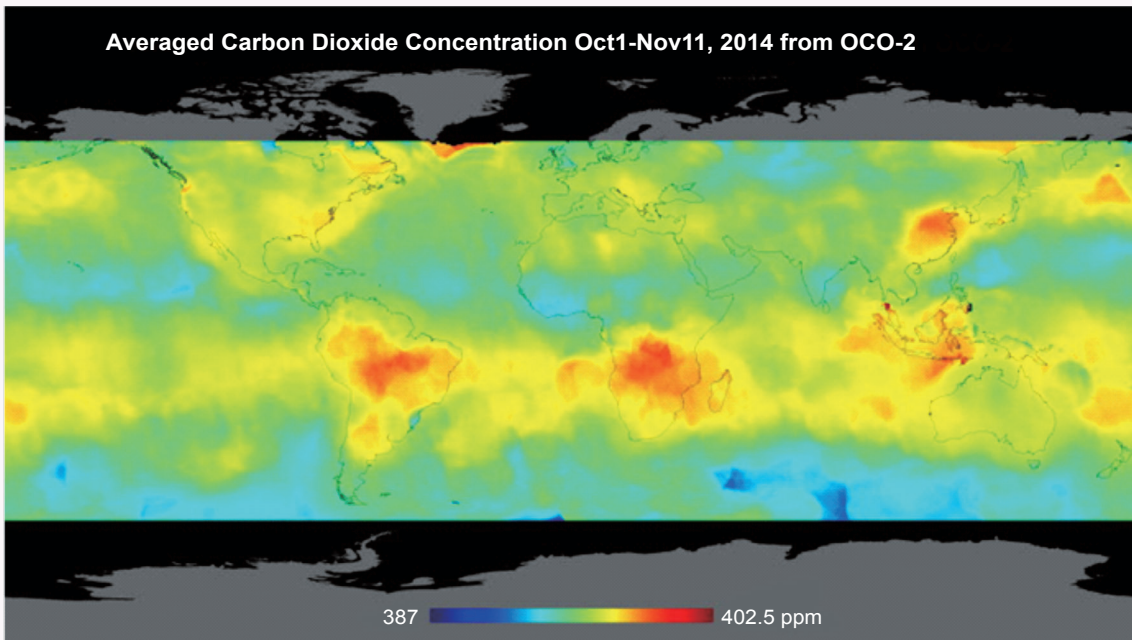
人類活動對這個循環的年均碳排放量還是微不足道的。但自工業革命以來已經過了 260 年，特別是最近半個世紀，人類活動的排碳量迅速增加，日積月累下來已經對大自然的碳循環造成顯著的影響。

力挽狂瀾

IPCC 在《第 5 次氣候評估報告》中強調：「科學家比過去更確信全球暖化是人類活動所造成的。」為了更積極推動氣候變遷及全球暖化的議題，154 國在 1992 年簽署了聯合國氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)，並在公約會議中提出減緩與調適兩項策略。



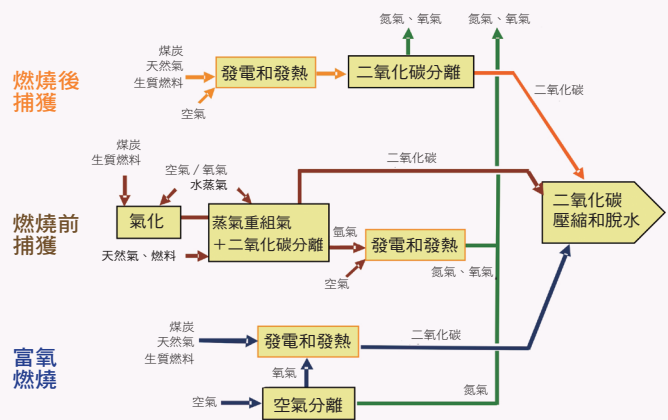
人類活動下的碳循環 (圖片來源：改編自 IPCC《第 5 次氣候評估報告》)



全球首張二氧化碳地圖，顯示2014年10月1日至11月11日從OCO-2衛星測得的平均CO₂濃度。(圖片來源：NASA)

「減緩」是希望藉由減少溫室氣體的排放，或以捕獲、封存及再利用的方式降低大氣中溫室氣體的含量。目前常見的二氧化碳捕獲方法，可依燃料轉換成熱能與電能的方式，分為燃燒後捕獲、燃燒前捕獲及富氧燃燒3類。

燃燒後二氧化碳捕獲技術主要是藉由物理或化學反應，捕獲工廠煙道氣中約15~25%的二氧化碳，減少二氧化碳排放量。燃燒前二氧化碳捕獲技術主要是以氣化技術，把碳氫化合物或固體燃料轉換成其他使用效率較高的燃料，以製造清潔能源及提升能源使用效益。後者若能同時整合前者，將可達成二氧化碳零排放的目標。富氧燃燒技術是以較高濃度的氧氣為助燃劑，與化石燃料進行燃燒反應。當氧氣濃度越高時，燃燒後的二氧化碳濃度也越高，可直接壓縮封存或再利用。



主要的二氧化碳捕獲流程和系統的示意圖 (圖片來源：改繪自 Metz et al., 2005)

目前，全球二氧化碳捕獲技術已發展到建造示範廠的階段。全球二氧化碳捕獲及封存機構 (Global CCS Institute) 在《2014年全球二氧化碳捕獲與封存現況》中指出，截至2014年，全球已有22個已營運或建



工研院於台泥和平廠建立的 1.9 MW_{th} 的鈣迴路先導型試驗廠

造中的大規模二氧化碳捕獲及封存計畫，每年可捕獲 4 千萬噸二氧化碳。另有 33 個籌備中的大規模二氧化碳捕獲及封存計畫，其中 14 個可望在 2015 年集資完成。若這 55 個二氧化碳捕獲場都穩定運轉，每年可望捕獲 1.1 億噸二氧化碳。

就國內二氧化碳捕獲技術來說，業界有中鋼公司正積極研發二氧化碳吸收劑，希望能降低碳捕獲所需的能耗。學研界主要由科技部透過能源國家型科技計畫及經濟部能源局，委託工研院分別研究化學吸收法、吸附法、薄膜捕獲法、化學迴路程序及鈣迴路捕獲程序。工研院已在 2010 年成功建立及連續運作 3 kW_{th} 的鈣迴路二氧

化碳捕獲系統，並在 2012 年與台泥合作，建立 1.9 MW_{th} 的鈣迴路先導型試驗廠，達到每小時捕獲 1 噸二氧化碳的目標，未來雙方會繼續促成 30 MW_{th} 級以上的準商業化規模示範廠的建置。

居安思危

世界各地已經出現氣候變遷所造成的衝擊：溫度上升、海平面升高、降雨量改變、激烈氣候，未來會更廣泛影響人類生活及自然生態。

直到目前，國際間大多把減少二氧化碳排放視為因應全球暖化及氣候變遷的主

世界各地已經出現氣候變遷所造成的衝擊：溫度上升、海平面升高、降雨量改變、激烈氣候，未來會更廣泛影響人類生活及自然生態。

面對未來全球人口增加， 持續性的氣候變遷會對農業生產及糧食穩定供應造成嚴重的影響。

要策略。然而，有些科學家悲觀地警告，即使全球人為的溫室氣體排放立即完全停止，大氣層中已累積了過量的溫室氣體，全球平均氣溫在未來兩百年仍然會持續上升。因此，即使能研發出有效的溫室氣體減量技術，還是無法避免未來氣候變遷對環境的衝擊。

「調適」的概念就像買保險一樣，主要是在了解氣候變遷衝擊已是在不可避免的狀況下，思考哪些不可避免的災害在未來會發生，並針對這些災害進行預防性的投保。因此，應先評估未來氣候變遷的發展趨勢，了解在承受未來氣候時容易發生災害的領域，並排出優先順序，制定調適措施及投入資源防護。

聯合國氣候變化綱要公約所發表的《氣候變遷調適技術》報告指出，在氣候變遷衝擊下，海岸地區、水資源、農業、公共衛生及基礎建設都屬於高脆弱性領域。

氣候變遷會使某些海岸地區的海水水位上升，增加劇烈天氣變化如颱風、水災、海岸侵蝕、海水入侵地下水等的頻率和強度。此外，超抽地下水所造成的地面崩塌、土壤固化與侵蝕，會使沿岸都市的氣候風險更加複雜。

所有生物都需要足夠的水源，氣候變遷可能對水資源造成影響。在供應方面，會改變全球各地降雨量的分布與加速地表水分的蒸發。在使用方面，則會增加各地人民的用水量。因此，在建設與管理供水



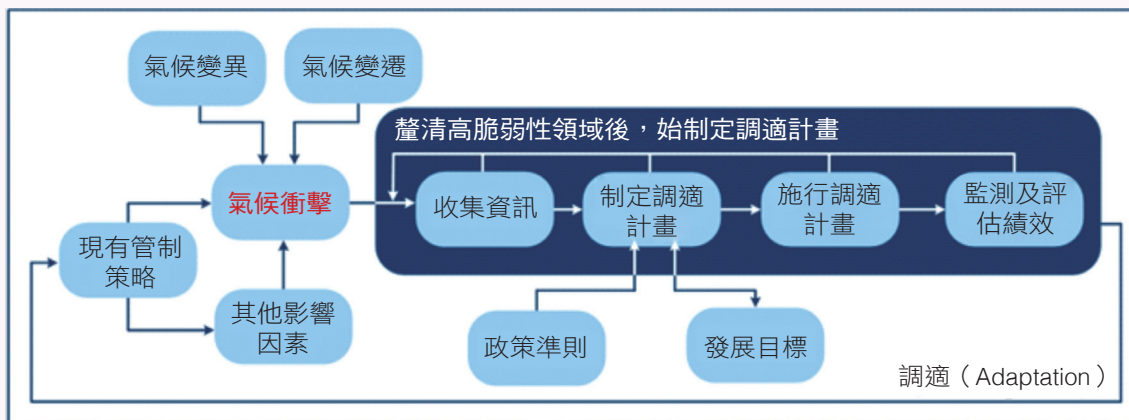
氣候變遷會使某些海岸地區的海水水位上升，增加劇烈天氣變化。（圖片來源：種子發）

系統時，應考量各地區水資源的匱乏程度。

氣候變遷造成溫度和溼度的改變，即使是短暫的氣候變化，都會影響農作物的產量。此外，氣候模式的改變會使植物疾病及病蟲害的分布發生變化，危害作物的生產。因此，面對未來全球人口增加，持續性的氣候變遷會對農業生產及糧食穩定供應造成嚴重的影響。

目前已發現氣候變遷會對人類健康造成負面影響，傳染性疾病的傳播範圍及流行季節都會因而擴大。氣候暖化可能造成病媒散布，縮短病原發育時間，增加中暑及循環呼吸系統方面的疾病。激烈氣候所造成的自然災害會破壞供水衛生及醫療系統，而災後創傷、病媒滋長等也會增加傷亡範圍。

目前已發現氣候變遷會對人類健康造成負面影響， 傳染性疾病的傳播範圍及流行季節都會因而擴大。



調適策略的制定流程

人類的生活依賴各種基礎建設，包括水電、道路、運輸工具、環保建設等，都會和氣候變遷的衝擊相互影響。例如，基礎建設在進行都市區域劃分時，須避開易淹水的部分，並改善都市能源利用效率及加強植樹範圍來減少熱島效應。

面對未來

預估未來百年或至少 50 年內，仍無法避免繼續使用化石燃料。為了因應全球能源需求持續成長、能源供需與價格不穩、備受關切的全球氣候變遷等課題的挑戰，提高化石燃料的使用效率，並搭配二氧化

碳捕獲、封存與再利用技術，是有效減緩溫室氣體排放的主要技術。

此外，人類也需開始認真考慮如何因應後全球暖化的環境，調適既有的生活及社會運作方式，以面對似乎已經無法扭轉的全球暖化現象及氣候變遷衝擊。

周揚震、徐恆文

工業技術研究院綠能與環境研究所

