

「地球系統科學」：「地球系統」概念的實踐

洪逸文¹ 許瑛珺^{2*}

¹臺北市立陽明高級中學

²國立臺灣師範大學 地球科學系

摘 要

聖嬰現象、臭氧洞與氣候變遷的接連出現，不僅是地球面臨的危機，同時其相關研究也成為地球科學界所需面對的挑戰。因為要了解這些複雜現象，不僅需要整合跨領域的地球科學知識，同時還要考量人類活動所帶來的影響。本文藉由回顧此三個現象的研究過程，進而呈現一個新的研究架構--「地球系統科學」，並透過對其內涵的探討，發現「地球系統科學」是以一個整體性的哲學概念來重新評估地球系統所具的複雜與非線性本質，並應用「地球系統」的概念，來研究生物與自然環境及人類系統的運作機制及其間交互作用。最後藉由討論氣候模式的演變來闡明地球系統科學如何應用於實際的科學研究。

關鍵詞：地球科學、系統理論、地球系統、地球系統科學

壹、前言

自 1970 年代中葉之後，許多自然環境的內在複雜變化及外在人類活動所造成的環境議題層出不窮，讓傳統的地球科學研究領域面臨許多挑戰與困境。在自然環境的內在變動部分，可以聖嬰現象為代表，對於此一現象的研究已超越了傳統的大氣與海洋領域，需整合兩個研究領域才能面對此一挑戰(Glantz, 1996)。在人類活動所造成的環境議題方面，則可以臭氧洞為代表，透過大氣科學與化學領域的合作，方能對人類排放的氟氯碳化物(CFCs)如何影響平流層臭氧的形成與消失有所了

解(Graedel & Crutzen, 1995)。另外，現今人類面臨最大的問題—氣候變遷，更可能是自然環境內在的變動與人類活動所產生溫室氣體交互作用而成。在不同時間與空間尺度下，影響氣候變化的機制各有所不同，許多機制的影響大小尚待釐清，更有甚者，還有許多機制仍混沌不明(IPCC, 2001)。這些困境，將促使傳統地球科學領域尋找新的思維來面對未來的挑戰。

傳統上，地球科學分為岩石圈、氣圈、水圈等研究領域，有時也將太空科學納進來。各個研究領域都可分別視為一個獨立的系統。但是現今所面臨的困境，往往都需要跨領域的整合來進行研究，也就是這些獨立的系統需要統整成一個更大的

* 為本文通訊作者

研究範圍，甚至包括以往未曾涵蓋的領域——生物圈。除此之外，還需要重新評估各層圈的組成成分，了解彼此間反饋的動態作用，利用新的研究架構來確立其階層與結構性，而瞭解其相互關聯性。因應而生的便是「地球系統科學」(Earth System Science) (Earth System Science Committee, 1986)。

本文首先探討傳統地球科學研究領域面臨哪些困境？其次，介紹什麼是「地球系統科學」，最後藉由實際的例子來探討其內涵。希望藉由本文對「地球系統科學」的介紹，讓我們能重新認識「地球系統」運作之法則，進而能體認人類的所作所為都將可能影響地球運作的平衡，以期能達「永續發展」的目標。

貳、傳統地球科學所面臨的挑戰

從 1957 年——國際地球物理年 (International Geophysical Year, IGY) 後，許多針對全球環境變遷且相互關聯的觀測資料開始大量累積，其時間尺度涵蓋了十年到百年不等，其中影響最大的莫過於人造衛星所蒐集到的大量數據。而超級電腦的數據處理能力，更讓以往提出的全球變遷模式變得不再適用，因為這些模式過於簡化地球運作的方式與平衡。在新的觀測資料與模式中，我們可以發現地球其實是處於多重、複雜的穩定狀態，經常被環境中新加入的變數或不規則的震盪所影響，而調整進入另一平衡狀態 (Steffen & Tyson, 2001)。其中生物活動——尤其是人類活動的

影響，在上世紀 70 年代中葉後，益發顯得明顯與重要。因此，傳統地球科學的研究領域受到這些因素的衝擊，開始面臨許多挑戰，如：對某些自然現象的解釋已超過傳統地球科學單一領域的知識範圍；再如：某些自然界的運作法則已經不再被視為是線性的，也就是說，其因果關係已經不再是單純，而是具有多重的影響性。尤其是當考慮生物圈的影響時，此一衝擊更是明顯。在相關研究中，聖嬰現象、臭氧洞、氣候變遷這三項是最具代表性，茲分述如下。

一、聖嬰現象

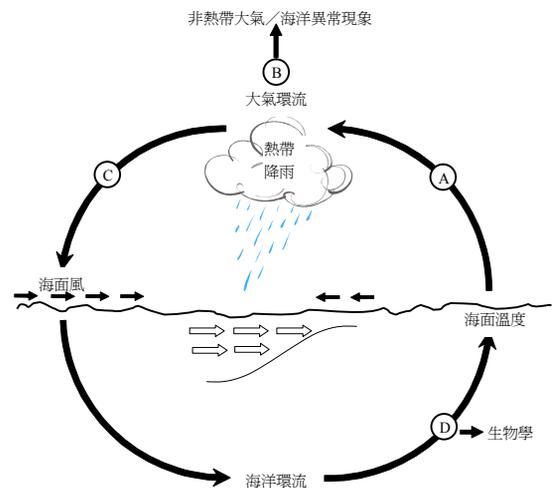
在 20 世紀的前葉，科學家對於聖嬰現象的興趣與研究，可以分成兩個毫不相干的領域在進行，分別是南方震盪 (Southern Oscillation) 與聖嬰事件 (El Niño)。前者著重在橫跨印度洋與太平洋的大氣氣壓變化，及其與印度季風變化之間的關係，可以說是屬大氣科學的研究領域；後者則是與南美洲西岸的沿岸湧昇流相關，並旁及相關生物環境中鳥糞石、鯉魚等民生社會問題，所以可算是屬於海洋科學的領域。

1950 年代國際地球物理年 (IGY) 對海洋環境的研究，仍是以民生、社會用途為主，而海洋對氣候變遷的影響仍不是研究的主要重點。但是在 1957-58 年的觀測期間恰好發生一次聖嬰事件，這一次所蒐集到的資料，促使大氣與海洋關聯性的研究有了重大的突破。比雅克尼斯 (Bjerknes,

1966)發現在 1957 至 1958 年間的聖嬰現象期間，太平洋東部和中部一帶的赤道東風減弱與暫時消失，而導致湧昇流中斷，進而引起從南美洲西岸到換日線間赤道太平洋的海面溫度升高。換言之，他的發現初步描述出太平洋上海洋與大氣交互作用的物理過程。這對地球科學的研究是一大突破，因為它不僅連接了聖嬰事件與南方震盪(合稱 ENSO)的研究，更為看來各自獨立的海洋與大氣系統，開創了一條嶄新的研究路線。而後在 1960 年代國際海洋探測年代計劃(International Decade of Ocean Exploration, IDOE)與其子計劃沿岸湧昇流生態分析(Coastal Upwelling Ecological Analysis, CUEA) (FAO, 1974)中，更進一步結合大氣與海洋的研究，增進了我們對區域及全球氣候如何受到沿岸湧昇流生態系統的影響，尤其是赤道太平洋地區(Glantz, 1996)。

到了 1970 年代，開始使用人造衛星收集海洋氣象資料，全球性的聖嬰變化輪廓才開始浮現，尤其是橫跨太平洋的大尺度現象，很大一部分是藉由不同的人造衛星雲圖合成(Lau & Busalacchi, 1993)。這些觀測技術的突破也孕育了一個全球尺度計劃的研究，那就是在 1980 年初成立於聯合國世界氣候研究計劃下的托加計劃(Tropical Ocean Global Atmosphere Program, TOGA)，此計劃為觀測和模擬赤道太平洋海氣交互作用及其對全球氣候變化之影響。基於過去的研究，科學家已經了解到異常的海洋和大氣環流(即聖嬰現

象)可以發展數月至數年之久，他們也認為大部分的變化可藉由赤道海洋和大氣的耦合系統來解釋(NRC, 1990)，計劃中除了利用傳統的觀測儀器外，還加上衛星蒐集大範圍的資料，以期發展長期預報模式與模擬。圖一是 TOGA 研究的一些主要因子與過程。在 TOGA 計畫中，海洋與大氣耦合實驗(Coupled Ocean & Atmosphere Research Experiment, COARE)更是一個突破以往概念的實驗，其想法是來自科學家相信熱帶海洋表面溫度的升高將引起全球大氣環流的改變，因而改變了全球的氣候，也就是說西太平洋暖水團會是驅動大氣變化物理過程的熱力引擎(Webster & Lukas, 1992)。



圖一、TOGA 計畫的主要因子與過程：

A: 熱帶降雨和大尺度環流對海面溫度相當敏感。B: 熱帶降雨會影響非熱帶大氣與海洋的異常。C: 熱帶降雨會影響海面風場。D: 海面風場會驅動赤道表面海流與海洋內部波動，進而影響湧昇流。而湧昇流又會影響海面溫度分布。(NRC, 1990)

環顧 TOGA 計畫的成就，在於結合了對大氣及海洋動力過程的跨領域研究，說明 ENSO 為大氣海洋系統的一種內部循環。也就是，大氣環流的變化改變了海洋的環流，同時也改變了海洋表面溫度的分布，而海洋表面溫度分布的變化，又透過可感熱和潛熱的上傳，進而改變大氣環流(唐存勇和吳明進，民 81)。

二、臭氧洞

雖然在 1930 年代伽普曼(Chapman, S.)就已經對平流層臭氧循環過程提出清楚解釋。但是隨著人類活動製造出許多氣體排放至大氣中，如氮氧化物(NO_x)、氟氯碳化物(CFCs)等，這些氣體都可能對平流層臭氧造成新的威脅(Graedel & Crutzen, 1995)。所以從 1970 年代開始，化學界與大氣科學界合作展開對這些人造的(anthropogenic)氣體的研究，數年內即獲得一些可觀的成果(Walker, 1999)。

其中，庫儒正(Crutzen, P.)在 1970 年發現，原本在自然狀況由土壤與海洋的微生物活動產生的氮氧化物，會經由大氣的對流活動帶至平流層，參與臭氧的循環過程而影響臭氧的形成。但是隨著人類航空、太空活動的增加，長程噴射客機與太空梭都也可將氮氧化物直接排放進入平流層，而分解臭氧(Graedel & Crutzen, 1995)。而後在 1974 年，有些科學家對於火箭發射殘留排放物的研究發現，氯亦能摧毀平流層的臭氧。因此庫儒正、莫里納(Molina, M.)與羅嵐(Rowland, S.)在研究氟

氯碳化物與臭氧反應過程後共同提出一個理論，他們推測人造的氟氯碳化物可能會對臭氧層帶來嚴重的衝擊(Molina & Rowland, 1974)。此類做為冷媒及噴霧推進劑的氟氯碳化物，跟前述氮氧化物來源最大不同在於純粹係由人工合成製造。但是這些化學物質在大氣長期觀測的資料紀錄累積相當緩慢，其影響也非立即且顯而易見，因缺少觀測證據支持，所以這終究只是個理論推測。

然而 1985 年法爾曼(Farman, J.)與他的同事在南極有驚人的發現：自 1970 年代起，南極地區的臭氧濃度已經呈現急劇下降，發生時間都是在每年的 9-10 月，也就是南極春季來臨時，此一發現同時也有人造衛星的資料互相佐證(Roan, 1989)。臭氧洞的發現對全球產生極大的衝擊，國際間也迅速在 1987 年簽訂了「蒙特婁議定書」(Montreal Protocol)來限制氟氯碳化物的製造與使用。但是在科學界有許多科學家使用電腦數值模式來模擬此一現象，卻一無所成。直到所羅門(Soloman, S.)與其同仁，將極區永夜所形成平流層冰雲的因素放進程式中，發現冰粒會使原本對臭氧無害的氟氯碳化物轉換成臭氧殺手，才成功模擬出臭氧洞的形成機制(Graedel & Crutzen, 1995)。

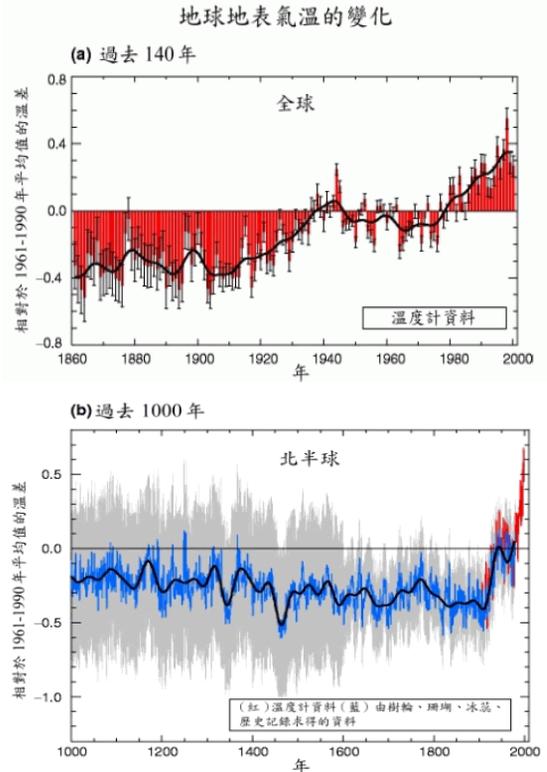
這種經由實際觀察、實驗室研究與電腦模式間的相互配合，不僅在短時間內解決一個複雜的問題，同時也像聖嬰現象的研究一樣，為以後的科學研究樹立了一種模式。但是對地球科學研究最重要的影

響，就是彰顯了「人類活動」所帶來自然環境的改變不再只是區域性的議題，而會是全球性的。

三、全球暖化與氣候變遷

從 1970 年代以來，隨著對聖嬰現象的研究，人們開始懷疑溫室氣體 (greenhouse gases) 不斷地釋放可能會造成氣候的改變，尤其是對氣溫的影響會最為顯著 (Glantz, 1996)。另一方面，根據地質紀錄顯示全球氣溫本身就具有自然變化的週期 (魏國彥與許晃雄，民 86)，究竟氣溫變化的影響因素為何？是自然界的內在變化抑或是外在的人為影響呢？

根據聯合國的氣候變遷智庫—「政府間氣候變遷小組」(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的第三次評估報告，圖二 (IPCC, 2001) 是過去 1000 年與 140 年來的全球平均溫度變化的情形，我們可以發現相較於過去一千年的紀錄，二十世紀的增溫現象是相當不尋常，不太可能是太陽輻射強度、火山爆發或大氣內部變化等自然因素所造成。另外，在過去 140 年的變化中，可發現 1970 年代中葉後發生了急遽增溫的現象，且高於平均值。這是否代表著人為因素的影響呢？奇林 (Keeling, C. D.) 從 1958 年起在夏威夷 Mauna Loa 火山所測量的大氣中二氧化碳含量變化情形，顯示這些年來二氧化碳的含量逐年升高，而且此一趨勢仍在持續維持。這代表人類使用化石燃料，釋放出大量二氧化碳，已經改變了大氣中二氧化碳的濃度。



圖二、地表氣溫變化：

- (a) 過去 140 年全球平均溫度的變化。平滑曲線代表長期變化趨勢。
- (b) 過去 1000 年全球平均氣溫變化。平滑曲線為 50 年平均值。二十世紀中葉以後是溫度計量測的溫度；之前的溫度是由樹輪、珊瑚、冰蕊、歷史紀錄推估出來，因此灰色區間為 95% 可信賴區間。(來源：IPCC, 2001；許晃雄譯，民 90)

如果用程式模擬自然及人為因素對這 150 年間的氣溫變動的影響，並與實際氣溫紀錄比對，我們可發現二十世紀後半期的氣溫異常明顯受到人為因素的影響 (IPCC, 2001)。

但是此一發現存在了兩個爭議，首先是氣候模擬程式的可靠性，其次是人為因素對全球增溫的影響究竟有多大，更精確

地說，如何評估人為因素對氣候系統運作機制的影響(許晃雄，民 90)。現今仍有許多科學家認為二氧化碳濃度的變動與全球氣溫的變化屬於自然的規律，也就是說地球本身的自然環境就有其運作的內在法則，這些溫室氣體濃度的變化並非外在的人為因素所導致(Lindzen, 1990；White, 1990)。但是對這些運作機制的了解程度將決定氣候模式的可靠性，所以本質上，這兩個爭議是互相糾葛的。

更進一步了解這兩項爭議，我們必須對影響氣候系統的輻射作用項(radiative forcing)，即影響輻射加熱、冷卻作用因素作探討。圖三(IPCC, 2001)是說明目前所了解的作用項過去 250 年間的變化情形，及對其的科學了解程度。圖中可發現，我們僅對溫室氣體與臭氧有普通程度的瞭解。而對懸浮微粒、高空卷雲、太陽輻射與地表反照率的科學瞭解程度都是甚低的。這些甚低的理解程度，主要是因為其反應過程錯綜複雜，彼此牽連，無法藉由過往的科學研究與知識預測得到。舉例來說，人類燃燒化石燃料，除了產生溫室氣體導致氣溫升高外，還可能產生大量的懸浮微粒，懸浮微粒可以反射太陽輻射，冷卻地表，這屬於直接效應。但是懸浮微粒也可能影響雲量、雲的生命期與特性，進而間接影響大氣的輻射加熱作用(許晃雄，民 90)。換言之，人類燃燒化石燃料對氣溫變化有正、負兩方面的影響，而被影響的氣候系統運作機制是非線性、不可預期的。當然，這些運作機制的曖昧不明與影響的

不確定性，對氣候模式預測的可靠性造成很大的影響。

回顧這些研究歷程，聖嬰現象讓科學家發現雖已了解大氣、海洋個別系統的運作模式，但是聖嬰現象內在複雜的變化，已超過單一氣象或海洋領域所能解釋的，必須重新尋找出新的運作法則才能應付。進而整合大氣與海洋跨領域的研究，了解 ENSO 是海洋與大氣系統的一種共同表現。更重要的是，「海氣系統」的研究思維不僅代表海洋與大氣間具有緊密的關聯，應將其視為一個新的系統來進行研究，更指出傳統地球科學領域在面臨此類新課題時，應如何結合不同領域的研究方法，而為以後學科研究整合開創新的可能性。

其次，臭氧洞的相關研究，讓我們知道電腦數值模式的建立可增進對地球環境中複雜問題的了解，及預測未來可能發生的情況與影響，雖然模式中的各種因素與運作原則未必完善、正確(Graedel & Crutzen, 1995)。就如剛開始無法模擬臭氧洞的形成，直到加入極區冰雲的因素後才順利模擬成功。這不僅是完成模擬一個自然變化，更具意義的是在模擬測試過程中，不僅可評估哪些因素對自然環境變化的效果，甚至還可以發現新的運作機制。其次，也是最重要的，人類的活動會導致自然環境的改變，不一定只是局部的如都市化、污染或酸雨，更可能是全球性的影響(Walker, 1999)。因此在地球科學研究領域中，人類活動應該不再視為外在影響因素，而應將其納為研究範圍的一部分。

參、何謂「地球系統科學」？

地球學家在重新詮釋傳統地球科學不同研究領域的關係與其研究模式後，發現我們需要以一種整體而非化約的觀點來看待地球上的自然與生物系統，進而提出一份稱為「布列松頓報告」(Bretherton Report)，報告中認為我們應該將地球視為一整體的系統，包括人類與自然環境等子系統，並運用系統思維來看待地球系統內的交互作用，因此將這門新的科學稱為「地球系統科學」(Earth Systems Science Committee, 1986)。正因地球系統科學是一門研究地球系統與其子系統間運作及交互作用的科學，所以它可以是一種研究的方法，同時也是一種學科的內容。前者是因為可以利用其系統思維對地球系統與其子系統進行跨領域的研究，後者則是因為其學科知識是統整各個子系統的學科知識而來(Melton, 1998)。下面將討論地球系統科學的定義，並探索地球系統科學是否可能成為科學研究的一種新典範呢？

一、地球系統科學的定義

地球系統科學將地球視為一個互相關聯、共同作用的實體系統，其中包含岩石圈、氣圈、水圈及生物圈，這些層圈彼此會有物理的、化學的、生物的動態交互作用，其時間尺度可從極短的毫秒至數億年，空間尺度也可從極小的原子到整個行星尺度，這些層圈有時甚至會受到地球系統以外因素的影響。地球系統科學是建構於傳統地球科學研究領域之上，運用系統

思維將其研究架構延伸至人類活動所造成的影響，該如何為地球系統下定義呢？

Schellnhuber(1999)提出地球系統可作為系統科學中最高的階層，同時也是最抽象的代表，而生物與自然系統(biophysical system)與人類系統(human system)為次一階層的子系統時，地球系統(E)可以表示為：

$$E = (N, H)$$

N 代表所有的生物與自然系統；

H 則是代表人類系統。

然而人類系統不僅由人類的存在、行為等實體物質活動所構成，還有超乎實體的非物質組成元素(metaphysical component)，例如人類活動、交往所訂定的契約、協定等，這些元素在人類系統中也具有獨立的地位。所以人類系統(H)亦可表示為：

$$H = (A, S)$$

A 代表所有的實體物質；

S 則代表超乎實體的非物質組成元素。

從上述的定義可得知，「地球系統科學」已經不只是傳統的「地球科學」。並不僅僅因為多了「系統」二字，是因為運用「地球系統」思維作為研究架構後，已經根本上改變了此一超級領域 E —地球系統的研究焦點。換言之，地球系統科學主要是以地球整體的觀點，透過各類化學元素與能量的循環來研究生物與自然系統跟人類系統的運作(function)與交互作用(interaction)，前者可以是土壤、岩石、水

文、大氣、海洋、冰圈與生態系等自然環境，而後者可以是污染、經濟成長、社會改變等相關的人類活動(Pitman, 2005)。

在系統理論中，系統的組成結構有其階層性，在系統的每一階層自有其運作的法則，而且低階的運作法則無法適用於高階，但是高階的運作法則卻可支配全部低階層的運作(Bertalanfy, 1969)。正如同前述的燃燒化石燃料對氣溫變化的影響，以較高階—即整體地球觀點而言，便可能同時存在正、負兩種效應。如果將人類系統跟生物與自然系統視為兩個獨立的系統，那麼我們觀察到的都將只是停留在較低階層的運作法則，也就是較局部的部份，但是系統的低階層運作法是無法適用於高階層，換言之，我們無法預測、評估在地球系統中此一較高的層級將會有何反應與影響，因為系統的高階層自有另一套運作法則。在過去的科學研究活動中，往往是將人類的活動「規定」屬於生物與自然系統(IPCC, 2001)，也就是說，人類系統本質上是外在(external)元素。但是現今許多社會科學研究已開始將人類系統視為是整體地球系統的一部份，尤其是考慮人類的經濟活動對自然環境產生的影響時，人類系統實際是地球系統的內在組成元素(Steffen et al., 2002)。

二、典範的轉移的可能性

雖然本文的主題不在於使用科學史與科學哲學的方法，詳細討論地球系統科學所帶來的影響，尤其在科學理論的演化

上是否可稱為「科學革命」--的確也有許多科學家這麼稱呼它(Kineman, 1997; Schneider, 1997; Schellnhuber, 1999)。不過無庸置疑的，「地球系統」觀點的確改變了我們看世界、研究世界的方法，例如說1950年代對於海洋與大氣的認識，往往認為是兩個獨立不同的領域，但在聖嬰現象被充分研究後，科學家不再只是把海洋當作大氣系統的一個邊界(抑或反之)而已，反而是用「海氣系統」來稱呼，這不僅是名稱的改變，更是研究方法與內涵的改變。在臭氧層破洞危機之後，人們也開始相信大自然是很容易被改變，也就是說地球雖然有自我的運作機制，但是人類的活動卻很容易破壞這機制，而將未來帶到另一岔路，所以人類活動的影響也逐漸被重視。這種世界觀的改變已可算具備研究典範轉移的一項特徵，也是科學革命的一項特質(Kuhn, 1970)。

如果接受「科學的本質就是一種解決問題的活動」，並接受此為科學發展的模式，那麼利用此模式來判斷科學進步與否就在於理論的可行性(workable)。原則上，我們可以藉此決定理論的優劣，假如新理論比起上一代理論解決更多的問題，那麼我們便可稱該理論的可行性較高(Lauden, 1977)。就此觀點，地球系統科學的研究理論架構已具備此一優勢，因為它將生物與自然系統及人類系統都放在同一階層的子系統，並利用「地球系統」的整體性觀點來討論其運作與交互作用。但是在實際科學研究方面，是否存在實例來佐證呢？本

文接下來將以氣候模式的演進來做說明。

肆、氣候模式的演進--地球系統概念的實際應用

現今科學研究面臨最大的議題便是「氣候變遷」，而其中的關鍵便是全球氣溫的變化，溫度上升究竟是來自地球本身的自然規律變化，還是因為人為的溫室氣體增加導致的結果，現今仍存在爭議(IPCC, 2001)。然而要釐清此爭議，最有力的探索工具莫過於「電腦程式模擬」，它同時也是唯一能對未來的氣候變遷提供量化數據的工具。

因考量氣候變遷的研究具有高度的不確定性，所以在數值模擬時，常常利用時間軸的兩個方向來修正、改善模擬程式，也就是說，利用過去氣候變遷的資料，增加對其運作機制的理解，進而修正各項參數與影響之效果。所以從模式的演進過程，我們不僅可以看出地球系統的思維所扮演的角色，也可從而驗證地球系統科學概念的體現。現行的模擬氣候變遷模式中，氣候系統是以大氣、海洋、陸地地表、冰圈與生物圈等子系統為主要組成因素，其中包含各子系統內運作與子系統間的交互作用。這些子系統是隨著我們對氣候系統認識的進展，而後逐一加入模式的運作，也就是說，組成氣候系統的元素逐漸增加，而模式的複雜性，隨著地球系統概念的演變而逐漸增加。

圖四(IPCC, 2001)顯示過去 25 年來氣候模式的演進，我們可以發現在 1970 年代

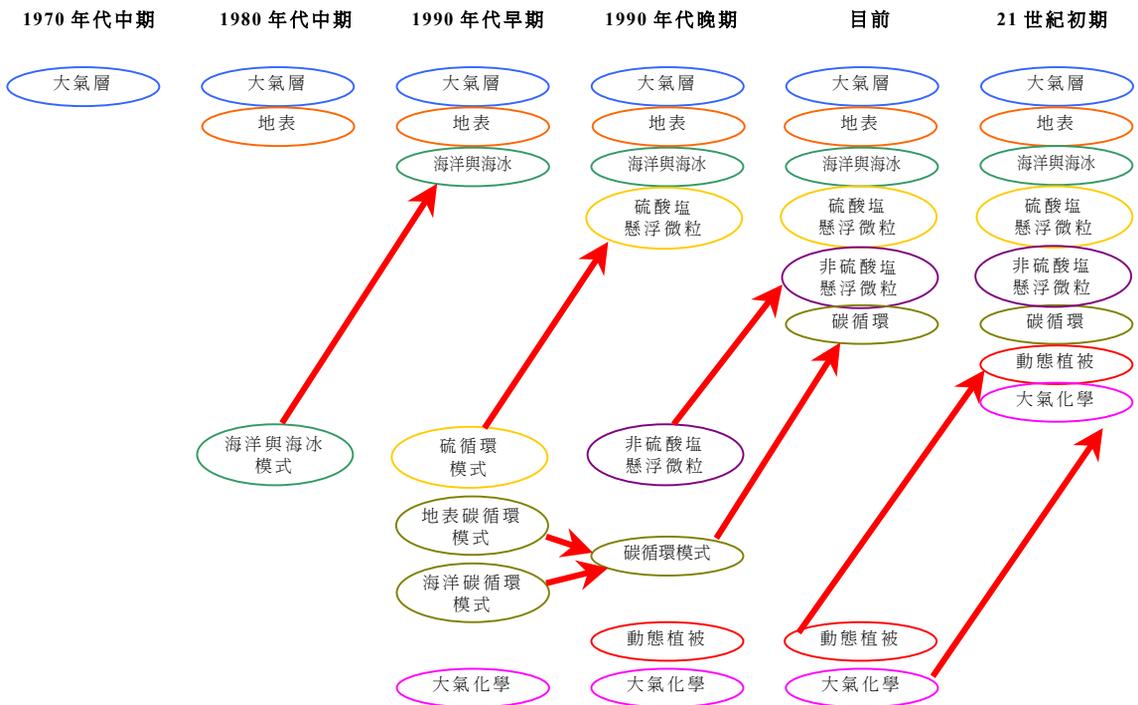
的氣候模式僅考慮大氣系統。到了 80 年代加進了陸地地表的狀態，也就是考慮地表反照率的影響。但是同時間，海洋與海冰的氣候模式也正獨立發展中，此一時間正逢聖嬰現象的研究--TOGA-COARE 緊密進行階段，由於聖嬰現象的研究提供了新的思維，海洋與海冰系統也在 90 年代初期加進了整體氣候模式運作。這一改變不僅代表氣候系統內元素的增加，另外原來各自獨立系統的邊界，即大氣和海洋的邊界，也因物質與能量的密切交換與相互影響，逐漸模糊，因而出現「海氣系統」的名稱。在此一名稱下，氣候系統的階層性就逐漸浮現了。

碳循環模式也發生同樣的情形，在 90 年代初期，因為夏威夷的二氧化碳濃度觀測資料引發對碳循環機制的探討，但是卻分別在陸地與海洋系統個別進行，兩個模式後來在 90 年代晚期相互結合，並納入現今的模式運作。在現今的氣候模式中可再次印證系統的運作法則，即高階層並非遵循低階層的運作法則。舉例來說，燃燒化石燃料會導致溫室氣體增加，大氣氣溫因而升高，進而使蒸發的水氣增加，但是水氣同時也是一種溫室氣體，會增強大氣的暖化效應，對氣溫而言，這是一種「正回饋」(positive feedback)作用。但是水氣增加，可能會和同樣因燃燒而生的懸浮微粒結合，形成更多的層雲，反射更多的太陽輻射，即是一種「負回饋」(negative feedback)作用，所以氣溫不見得如預期般上升。這兩種作用在氣候模式中是分屬兩

個不同的組成因素，即碳循環與非硫酸鹽懸浮微粒，此說明著較高階的氣候系統運作規則，並不是單純地由較低階的碳循環或懸浮微粒的運作而來，這也顯現出地球系統科學複雜與非線性運作的特性。

在圖四的氣候模式中，雖然沒有明列出人類活動的影響，但是人類活動的蹤跡卻是隨處可見，例如硫酸鹽懸浮微粒、碳循環、動態的植被、大氣化學，無一不是受到人類活動而產生改變。所以地球系統將人類活動與自然環境並列為子系統，這不僅是讓人類活動影響進入自然科學的範

疇，人類活動影響也因而與自然環境的變遷並列，表面上看來似乎彰顯人類活動的重要性，但是就另一個角度來看，這場革命傳達給科學家乃至一般社會大眾一種概念，正如同克卜勒的革命(revolution)將地球移出宇宙的中心，達爾文的演化論(evolution theory)指出人類與其他生物的起源並無不同，地球系統思維也代表天地萬物並非為人類而創造(Walker, 1999)，人類不僅不是自然環境的核心，而且也不能自外於變動中的自然。



圖四、過去 25 年來，氣候模式的演進。(IPCC, 2001)

伍、結論

在地球幾次面臨重大環境危機後，地球科學家不僅要面對每一次的挑戰，進而開始改變其思考模式，重新思考地球科學所應涵蓋的範圍。在藉由系統科學概念の後設分析中，我們可以發現在聖嬰現象的研究中，嘗試結合傳統不同研究領域的概念—「海氣系統」出現了；在臭氧洞的危機後，不僅蒐集觀測資料與分析資料的方式改變了，更重要的是開始重視人類活動對自然環境的影響；而後在氣候變遷的研究中，更提出「地球系統科學」的概念，嘗試結合自然環境的變動與人類活動的影響，來分析地球系統所可能的變化。這不是一次科學革命，目前尚未有定論，但是這種思維的轉變，已經對地球科學界帶來許多影響與衝擊，那就是地球系統科學不僅包含自然科學的研究，更將因應人類活動而生的社會科學，如政治、社會、經濟和法律等一起涵蓋進來。因為人類有形與無形的活動，不僅會影響地球自然環境，同時也對人類本身產生衝擊。

這些思維的轉變，對人類的未來更是有決定性的影響，那就是所謂的「永續發展」(sustainable development)。究其英文原義 sustainable 指的是「可承受的」，也就是在地球系統的思維下，人類活動與自然環境都是主要的構成元素，而人類的活動對自然環境會產生影響，相對地，自然環境也會制約人類的活動。所以人類在考慮對自然所可能產生的影響下，就應採取「自然環境可承受」的思維來進行各項活

動，這即是「資源的使用不超過資源再生的速率，廢棄物的排放不超過自然環境分解或承載的能力，對自然環境的影響不超過自然調適的速率」(Daly, 1993)，期而減輕人類與地球所承受的變動，進而減緩全球變遷的腳步。

參考文獻

- 唐存勇和吳明進(民 81)：什麼是 ENSO 事件？科學月刊，23(1)，25-31。
- 許晃雄(民 90)：氣候變遷的科學。科學發展月刊，29(12)，867-878。
- 魏國彥和許晃雄(民 86)：全球環境變遷導論。台北市。教育部。
- Bertalanffy, L. (1969). *General system theory: Foundations, development, applications*. New York: George Braziller, Inc.
- Bjerknes, J. (1966). A possible response of the atmosphere Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 8, 820-829.
- Daly, H. E. (1993) The peril of free trade. *Scientific American*, 296(5), 24-29
- Earth System Science Committee (1988). *Earth system science: A closer view*. Washington. DC: National Aeronautics and Space Administration.
- FAO. (1974). *Report of the fourth session of the fishery committee for the eastern central Atlantic*. FAO fisheries report, pp151.
- Glantz, M. H. (1996). *Currents of change: El Niño's impact on climate and society*. London: Cambridge University Press. 林玉郎譯：千變萬化海氣流--聖嬰現象對氣候與社會之影響。台北縣：徐氏文教基金會。
- Graedel, T. E., & Crutzen, P. J. (1995). *Atmosphere, climate and change*. New York: W.H. Freeman and Company. 陳正平譯：變色的天空：大氣與氣候變遷的故事。台北

- 市：遠哲科學教育基金會。
- IPCC. (1996). *Climate change 1995*. Edited by Houghton JT, Meira Filho LG, Callandar BA, Harris N, Kattenberg A, and Maskell K, New York: Cambridge University Press, 572pp.
- IPCC. (2001). *Climate change 2001: The scientific basis*. Edited by J.H. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.-J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson, New York: Cambridge University Press, Cambridge, 881pp.
- Kineman, J. J. (1997). Toward a special and general theory of anti-evolution. Boulder: Bear Mountain Institute. html publication on the world wide web.
Http://www.nexial.org/bmi/autevol/ghw_dis3.htm#global.
- Kuhn, T. S. (1970). *The structure of scientific revolution (2nd edition)*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lau, K. M., & Busalacchi, A. J. (1993). El Niño-southern oscillation: A view from space. In "*Atlas of satellite observations related to global change*", pp281-296, Cambridge: Cambridge University Press.
- Lauden, L. (1977). *Progress and its problems: Towards a theory of scientific growth*. Berkeley: University of California Press. 陳衛平譯：科學的進步與問題，台北市：桂冠出版社。
- Lindzen, R. S. (1990). Some coolness concerning global warming. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 71(3), 288-299.
- Melton, F. E. (1998). What is earth system science? Responses from 1998 Earth System Education Conference and compiled by Melton, Ann Arbor, Michigan.
- Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalyzed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810-812.
- NRC (National Research Council) (1990). *TOGA: A review of progress and future opportunities*. Washington, DC: National Academy Press.
- Pitman, A. J. (2005). On the role of geography in earth system science. *Geoforum*, 36, 137-148.
- Roan, S. (1989). *Ozone crisis: The 15-year evolution of a sudden global emergency*. New York: Wiley.
- Schellnhuber, H. J. (1999). 'Earth system' analysis and the second Copernican revolution. *Nature*, 402, c19-c23.
- Schneider, S. H. (1997). *Laboratory earth: The planetary gamble we can't afford to lose*. New York: Anthony Cheetham of Orion Publishers and Brockman, Inc. 劉貞譯：地球實驗室：科學大師系列(12)。台北市：天下文化。
- Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P., Jager, J., Matson, P., Moore, B. I., et al. (2003). *Global change and the earth system: A planet under pressure*. Berlin: Springer-Verlag.
- Steffen, W., & Tyson, P. E. (2001). Earth system science: An integrated approach. *Environment*, 43 (8), 21-27.
- Walker, J. C. G. (1999). Earth system science and the western worldview. *Chemical geology*, 161, 365-371.
- Webster, P. J., & Lukas, R. (1992). TOGA COARE: The coupled ocean-atmosphere response experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73(9), 1377-1416.
- White, R. M. (1990). The great climate debate. *Scientific American*, 263 (1), 18-25.

投稿日期：民國 95 年 05 月 09 日

接受日期：民國 95 年 06 月 02 日

From “Earth Sciences” to “Earth System Science”: A Paradigm Shift to System Theory and Holistic Approach

Yi-Wen Hung¹ Ying-Shao Hsu^{2*}

¹ Taipei Municipal Yang-Ming high school

² Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University

Abstract

Intensified El Niño, ozone destruction and climate changes not only pose major threats to the Earth, but also challenge the conventional studies of Earth Sciences. To study and understand these complicated phenomena, scientists would have to take interdisciplinary approaches, as well as human's influence, into account. Beginning with the review of the history of three crises we ever had, this paper advances in discussing what system theory is and how it provided Earth science with a new conceptual framework. The conceptual framework of Earth System Science holds a new holistic approach toward re-evaluation of the very nature of the complexity and non-linearity of the Earth System, and study of various biophysical and biogeochemical interactions in the system. Finally, the application of Earth System Science to scientific research is illustrated by cases of recent progress in climate modeling and simulation.

Keywords : earth science, system theory, earth system, earth system science