

引人深思的鐵假說

李長榮

水產試驗所海洋漁業組

什麼是鐵假說

大多數研究海洋及漁業基礎生產力者，在傳統觀念上總認為海洋中如果缺少一定量的氮，是限制浮游植物生長的主要原因，然而全球仍有許多含有豐富硝酸鹽的海域（例如赤道太平洋、北大西洋、阿拉斯加灣、南冰洋等），浮游植物量並不高。因此，必定有其他的因素造成該等具有主要營養鹽及光照水平都很理想的水域，其浮游植物成長受到限制。這些因素可能包括浮游動物的捕食、水體不穩定或缺乏必需的微細營養鹽，其中早在 1930 年代，即有人解釋可能是缺鐵的關係。

基本上，鐵雖然是地殼中第 4 高量的元素（佔 5.63%），而且也在生物體的碳、氮新陳代謝中扮演決定性的角色，但海水中鐵的濃度卻非常低（屬於 Nano 等級），非常難測（易受干擾），因此，進一步的相關研究也相當困難。直到近代，海水中鐵的濃度和分布等相關研究才逐漸較有規模的展開，尤其位於美國加州 Salinas 鎮郊外的 Moss Landing 海洋實驗所，正進行著近十餘年當中最令人吃驚的科學實驗之一，那就是任職於該所的海洋學者約翰·馬丁（John Martin, 1935-1993。患有小兒麻痺，卻是一位努力不懈、非常了不起的科學家。）在 1987 年提出「鐵假說（Iron Hypothesis）」的前後研究工作。

所謂鐵假說，是指全球海洋中有很多海域的植物營養鹽都很豐富的情況下，低濃度



John Martin (1935-1993)
(Roger Kammerer, <http://earthobservatory.nasa.gov>)

的鐵元素就成為限制浮游植物成長與生物量的重要因素。換言之，在該等海域中增加鐵的濃度，就可能產生更多的浮游植物。

觀測與實驗

Martin 首先注意到海洋中有相當大的區域，主要在南冰洋和赤道太平洋海域，雖然具有大量的氮化物營養鹽，但是浮游生物卻非常少，同時這些地區的鐵濃度非常低（近似 2×10^{-12} mol/kg）。這就好像人類缺少某種維生素或微量礦物質會阻礙成長一樣，在這些高營養鹽的水體中假如缺鐵，也會阻礙浮游生物的生長。

如果鐵假說能夠獲得可靠的驗證，那麼不就可以藉由人為的操作，使這些缺鐵的海

域增加鐵的濃度，便可達到大量增加浮游植物（甚至產生藻華）的目的，而浮游植物大量的增加，則意味著可以固定更多的碳進入海洋系統，再經由生物累積、死後沉澱等等作用，直接或間接的使大氣中的二氧化碳（地球溫室效應的主要氣體）濃度降低，如此一來，它可能是解決全球暖化問題的有效方法呢，這就是為什麼鐵假說成為近年來備受矚目、討論及研究的焦點所在。

大洋的鐵除了少數火山地帶是藉由地殼活動帶來之外，大部分是藉由海岸的沖刷、河流的帶入、湧升流的帶上及大氣（塵埃）的沉降交換而來，它又是生物體新陳代謝的重要元素，因此，它的分布具有幾點特徵：

1. 垂直分布呈現營養鹽型的曲線，即表層低、底層高，以北太平洋溶解性鐵為例 (Martin et al., 1989; 以下亦同)，水深 500—4,000 m 時，約恆定在一定濃度（約 0.62—0.70 nmol/kg）。
2. 鐵和硝酸鹽、磷酸鹽、矽酸鹽及氧氣濃度之間呈現高度正相關。
3. 水平分布則非常明顯呈現離岸低、近岸高的趨勢。

因此，鐵假說的相關研究，主要便集中於以基礎生產力（碳的固定量追蹤）、浮游生物的種類與數量、葉綠素a的分布、人為的鐵施肥實驗等等方法，來說明或證實鐵在自然界中或人為操作後的分布特性與浮游生物生長之關係。事實上，鐵假說提出後不久，Martin 等人便在 1989 年發表相關報告以論證此一觀點，其中指出阿拉斯加灣由於大氣的鐵元素加入率充足（大氣塵埃通量為 22—23 $\mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{y}$ ，其中鐵佔 5.6% 左右），因此其基礎生產率也相對較高；文章的最後更把在南極大陸 Vostok 冰柱中的二氧化碳含量與經由鋁的比值轉換後所得到鐵的濃度，二者比較結

果，顯示當鐵的濃度很低時（例如現今及 12.7 萬年前的最後間冰期期間），二氧化碳的濃度則相對達到最高峰期，而鐵的濃度達到最高時（例如 1.8 萬年前的冰河盛期期間），二氧化碳則處在低濃度狀態。

Martin 過逝後的當年秋天，他的後繼者 Coale 等即進行了鐵假說的第一次現場鐵施肥實驗，雖然不如預期的成功（可能施加硫化鐵的水塊在第 5 天被由上而下的補充水帶到深層無光區），但 Coale, Johnson, Gordon 等在 1995 年的第 2 次鐵施肥實驗中（分三個時段投放）則大獲成功，事實上觀測到的浮游植物量高達 30 倍以上，密集帶更長達 950 哩，2 週內所增加的浮游生物大約吸取水域中 2,500 公噸的碳，而這些碳終究會再度從大氣中獲得補充，對於鐵假說的證明自是不言而喻。

前後相關議題的重要研究成果，計有：Mimas 等 (1992) 研究熱帶海洋及南冰洋的淨生產力時，顯示全球的塵埃沉降到海洋中的分布狀態可以有力的證明鐵假說，這也對過去一直採信的唯一捕食假說 (Grazing Only Hypothesis) 構成相當大的衝擊。Laubscher 等 (1993) 利用葉綠素a及基礎生產力分布的詳細分析結果，顯示南冰洋是全球鐵元素最缺乏的地區，這裏同時也是全球葉綠素a濃度及基礎生產力最低的地區。De Baar Hein 等 (1995) 在南冰洋的研究亦顯示在自然環境下，南極大陸環流 (ACC) 的南方支流可出現湧升流並帶來豐富的鐵，使表層提高生產量，雖仍未達到發生藻華。Coale 等 (1996) 研究顯示在西經 140 度的赤道太平洋海域中，鐵的主要來源為湧升流，實驗亦證明鐵的濃度越高，被固定的碳越多，同時，湧升流速率和湧升水中的鐵濃度也是影響赤道生物生產量的重要因素。Hall 等 (1999) 紐

西蘭皇家學會的國際研究團隊透過廣域觀海衛星 (SeaWiFS) 的即時觀測，成功的捕捉到鐵施肥之後所激發的浮游植物增生影像 (如圖)。Coale等 (2004) 以龐大的跨國研究陣容在南冰洋海域，經由二處各 15 km²海域的鐵施肥，每一海域消耗掉 3 萬公噸二氧化碳的結果，再次驗證鐵假說真實的一面。

結語

當今全球暖化問題逐漸加速嚴重之際，尋找可以解決溫室效應的方法，儼然已成為人類共同努力的目標，除了消極的限制會助長溫室氣體 (主要包括二氧化碳、甲烷、氟氯碳化物等) 的工業生產之外，也有許多科學家更是積極的提倡以大面積植樹的方式，來降低大氣中的二氧化碳。然而，地球的表面畢竟有 71%是水體，假如鐵假說能成為實際可以應用的理論，那麼以人類的科技能

力，是很有可能實現解決全球暖化問題的。誠如 Martin 曾說過：「給我半艘油輪的鐵，我將給你下一個冰河期」。這話並不誇張，科學家並已預估藉由鐵施肥的理論推算結果，可以移除大氣中 20%人為造成的二氧化碳，其費用比大規模植樹更低。

目前已有些工程師正談論如何大規模有系統的在南極大陸周圍海洋中施加鐵元素，以使海洋更肥沃。但 Coale 則更謹慎的認為大規模的施行海洋改造必須事先考慮周詳，例如死亡的浮游生物沉降後，將在海洋上層 (約 900 m) 開始分解，由於此區的下方溶氧很低，如果氧氣耗盡，分解作用就會開始破壞氮化合物，如此一來，恐將造成許多全球重要漁業生物所賴以維生的營養鹽供應不足。諸如此類的影響評估工作，在我們進行大規模的地理工程之前，必要審慎研究，畢竟地球是人類與萬物共同的唯一資源。

