

知識天地

珊瑚化石對考古學與古環境研究的貢獻簡述 — 放射性定年篇

邱子虔助研究員(地球科學研究所)

珊瑚化石是地球歷史學研究上常用的材料，其骨骼中的氧同位素比值以及微量元素的變化常被拿來作為古氣候及古海水變化的指標，但其實珊瑚化石的「年代」本身即可提供許多有趣的古環境訊息。珊瑚骨骼的組成為霏石(aragonite)，基本成分為碳酸鈣(CaCO_3)，所以可用碳十四(^{14}C)定年方法來決定其年代，而且珊瑚在形成骨骼的過程中，會把鈾元素帶入其骨骼中，死後其骨骼大致上保持封閉系統狀態，只要是保存良好的樣本，就不會有元素的加入或流失，所以我們亦可用鈾系(Uranium-Series)衰變系統來定珊瑚的年代。雖然兩者皆屬放射性定年方法，珊瑚的碳十四年代與其鈾系年代並不相等，因為碳十四年代並不是真實的年代。

碳十四定年其實是相當廣為學界所應用之定年方式，為何說碳十四年代並不是真實年代呢？放射性定年的基本條件是我們必須知道(或依其他證據來假設)母元素的「初始值」，但是碳十四在地球上(其實是在大氣中)的初始含量並不是一個定值，大氣中的碳十四是因宇宙射線而產生的，而宇宙射線進入地球的量並不固定，所以大氣中的碳十四初始值在不同年代可能不同，至少它不會是一個定值，所以當我們假設一個碳十四初始值而計算出的碳十四年代，並不是此標本的真實年代。所幸針對較年輕的歷史，樹輪紀錄可作為校正碳十四年代的基準，因為樹木的年輪代表的是真實年代，而木材本身有很多碳，可用碳十四來定年，累積大量在生存年代上重疊的樹輪紀錄之候，可歸納出「碳十四年代」和「真實年代」之間的關係，產生一條碳十四年代校正曲線。許多學術研究需要正確的年代控制，但是受到樣品本身成份的限制，很多時候只能用碳十四定年，雖然測出的並不是真實年代，但是只要將它輸入「碳十四年代校正曲線」就可以將之轉換成樣品的真實年代^(1, 2)。



圖一：位於大西洋巴貝多(Barbados)的隆起珊瑚礁。

大約從一萬兩千年前開始到更老的歷史部分，連續的樹輪紀錄就很難取得了，而且沒有方法可以定出其真實年代，這時珊瑚化石就發揮了它的功用，雖然珊瑚化石一般而言在的「總數」及「連續性」方面比不上其他常用的化石，但是它有一些不可取代的優點：每個珊瑚標本可以分別定年，不需與任何其他紀錄作對比，每個資料點的分析誤差互不影響，而且珊瑚化石的真實年代可以直接用鈾系定年法測得，此外，我們可以建立一套鑑別珊瑚標本優劣的揀選標準，有系統地挑選保存度最好的珊瑚標本，避免浪費精力及研究資源在劣質的樣本以及解釋錯誤的資料，尤其當年代

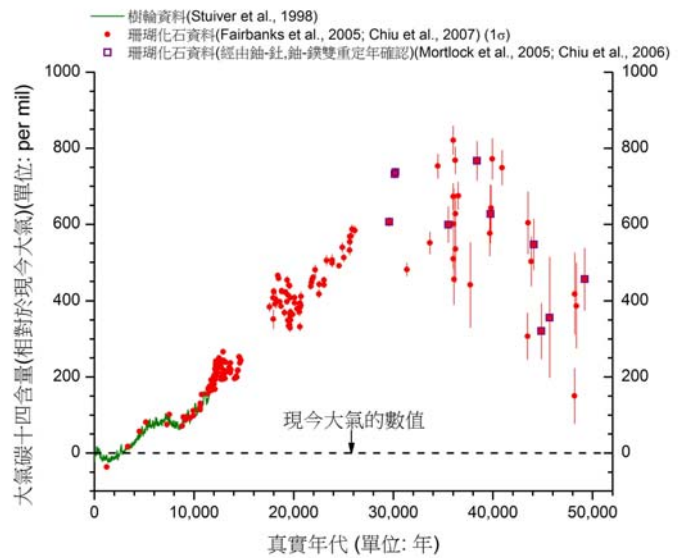
越久遠，珊瑚化石已經被抬升起來之後(圖一)，可能遭受不少成岩作用及風化的摧殘，所以不論要將珊瑚化石用在哪一方面的研究，最重要的先決條件是珊瑚化石標本的篩選，若選擇已變質的標本來作分析，很難測得正

確的鈾系年代和碳十四年代。除了前人已建立的篩選準則外(包括珊瑚化石的礦物相、鈾的總量、碎屑來源的鈾含量、鈾同位素初始值的確認)，近年來增加鈾-釷($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)及鈾-鏷($^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$)系列雙重定年方法為另一強而有力的檢驗方法⁽³⁻⁶⁾，尤其是那些疑似受到淡水或成岩作用影響的珊瑚化石，若果真從鈾-釷及鈾-鏷系列獲得一致的定年結果，更增加了樣本年代的可信度。

目前已有一條根據珊瑚化石定年資料所建立的碳十四年代校正曲線⁽⁷⁾，這條校正曲線中的珊瑚化石來自低緯度大西洋及太平洋島嶼，每個標本都經過嚴格篩選後才進行下一步分析^(3, 5, 8)，整條年代校正曲線的資料由現代延展至過去五萬年，雖然時間上有些間斷，但足足比樹輪碳十四年代校正曲線^(1, 2)的時間尺度長了三至四倍，有了這條珊瑚化石碳十四年代校正曲線之後，即使研究的標本之碳十四年代老於兩萬年亦可把它校正成真實年代，這對考古學，尤其是對於兩萬年前至五萬年前人類遷徙以及特定文化產生年代之確定很有貢獻，因為大部分出土的文物以及週邊材料經常沒有其它適合的放射性元素來作絕對定年，但是可以用碳十四定年，再利用這條「珊瑚化石碳十四年代校正曲線」來求得其真實年代；在古海洋、古環境研究方面，上次冰期(last glacial)亦是缺乏良好年代控制的時期，

特別是期間的小暖期(interglacial)(氧同位素期第三期)困難度更高，因為深海岩芯中用來作相對定年的有孔蟲氧同位素值在這段期間的變化結構並不十分明顯，各個區域似乎也略有不同，造成對比上的困難，所以我們可以利用岩芯中既有的材料(如：浮游有孔蟲化石)作碳十四定年，再用珊瑚化石碳十四年代校正曲線將之轉換成真實年代，即可作為此岩芯紀錄的年代控制點。

定出珊瑚的碳十四年代以及其鈾系年代(鈾系年代在此等同真實年代)之後，不單單只是提供一個可以校正碳十四年代的資料庫，根據這些珊瑚化石碳十四年代及其鈾系年代的差值，我們還可以回推古大氣的碳十四含量，進而得知其他古環境訊息。我們拿「現代」(定義為西元 1950 年)大氣的碳十四含量當作標準值，在過去如果碳十四年代和相對應的真實年代差異越大，當時大氣中的碳十四含量就越高，由這些大西洋及太平洋島嶼的珊瑚化石定年資料，我們可以計算出過去五萬年以來的古大氣碳十四相對含量(圖二)，資料顯示大部分的時間古大氣的碳十四含量都高於現代，且在三萬年前到四萬年前大氣中碳十四含量特別的高(圖二)。大氣中碳十四含量是由什麼因素控制呢？這可分兩方面來說明：一是與前面所提到的宇宙射線有關，太陽黑子的活動以及地球磁場的強度都會影響宇宙射線進入地球的量⁽⁹⁻¹²⁾，太陽活動越強或地球磁場越強都會使宇宙射線偏離，降低地球上大氣中碳十四的初始值；二則與地球本身的碳循環有關⁽¹³⁾，碳十四在大氣中形成之後，如同一般的碳一樣逐漸進入各個碳儲存庫中，所以儲存庫之間交換速率或是儲存庫大小的改變，都可能影響停留於大氣中的碳十四之量。至於為何古大氣中的碳十四含量會與現今大氣有這麼大的差異？有一派學者認為這是上次冰期時全球碳之分佈或古海洋流通狀態與今有重大不同⁽¹⁴⁾，致使大量的碳十四滯留在大氣中，但至今尚未在深海沉積物中找到直接證據；另有一種可能性是當時的地球磁場強度極弱，讓大量的碳十四在大氣中生成，目前學界仍缺乏連續的古地磁絕對強度紀錄來作明確對比。過去五萬年來的大氣碳十四含量變化主因至今仍可說是個謎，但是從珊瑚化石的定年資料明確地顯示這段期間地球環境(或許是全球碳循環方面、或是古地磁強度變化)迥異於今日。



圖二: 利用珊瑚化石放射性定年資料所重建的過去五萬年來古大氣碳十四含量變化紀錄⁽¹⁵⁾。

參考文獻

1. Reimer, P. J., Baillie, M. G. L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, G. S., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Hogg, A. G., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C. B., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C. E. (2004) Intcal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kry BP. *Radiocarbon* **46**, 1029-1058.
2. Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., Beck, J. W., Burr, G. S., Hughen, K. A., Kromer, B., McCormac, G., Van der Plicht, J., Spurk, M. (1998) INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon* **40**, 1041-1083.
3. Chiu, T.-C., Fairbanks, R. G., Mortlock, R. A., Cao, L., Fairbanks, T. W., Bloom, A. L. (2006) Redundant ²³⁰Th/²³⁴U/²³⁸U, ²³¹Pa/²³⁵U and ¹⁴C dating of fossil corals for accurate radiocarbon age calibration. *Quaternary Science Reviews* **25**, 2431-2440.
4. Edwards, R. L., Cheng, H., Murrell, M. T., Goldstein, S. J. (1997) Protactinium-231 dating of carbonates by thermal ionization mass spectrometry: Implications for quaternary climate change. *Science* **276**, 782-786.

5. Mortlock, R. A., Fairbanks, R. G., Chiu, T.-C., Rubenstone, J. (2005) $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ ages from a single fossil coral fragment by multi-collector magnetic-sector inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **69**, 649-657.
6. Cutler, K. B., Gray, S. C., Burr, G. S., Edwards, R. L., Taylor, F. W., Cabioch, G., Beck, J. W., Cheng, H., Moore, J. (2004) Radiocarbon calibration and comparison to 50 Kyr BP with paired ^{14}C and ^{230}Th dating of corals from Vanuatu and Papua New Guinea. *Radiocarbon* **46**, 1127-1160.
7. Fairbanks, R. G., Mortlock, R. A., Chiu, T.-C., Cao, L., Kaplan, A., Guilderson, T. P., Fairbanks, T. W., Bloom, A. L., Grootes, P. M., Nadeau, M.-J. (2005) Radiocarbon calibration curve spanning 0 to 50,000 years BP based on paired $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and ^{14}C dates on pristine corals. *Quaternary Science Reviews* **24**, 1781-1796.
8. Chiu, T.-C., Fairbanks, R. G., Mortlock, R. A., Bloom, A. L. (2005) Extending the radiocarbon calibration beyond 26,000 years before present using fossil corals. *Quaternary Science Reviews* **24**, 1797-1808.
9. Lal, D. (1988) Theoretically expected variations in the terrestrial cosmic-ray production rates of isotope, in *Solar-Terrestrial Relationships and the Earth Environment in the Last Millennia*, G. C. Castagnoli, Ed. North-Holland, Amsterdam; New York (1988) pp. 216-233.
10. Elsasser, W., Ney, E. P., Winckler, J. R. (1956) Cosmic-ray intensity and geomagnetism. *Nature* **178**, 1226-1227.
11. Stuiver, M. (1961) Variations in radiocarbon concentration and sunspot activity. *Journal of Geophysical Research* **66**, 273-276.
12. Stuiver, M., Quay, P. D. (1980) Changes in atmospheric C-14 attributed to a variable sun. *Science* **207**, 11-19.
13. Edwards, R. L., Beck, J. W., Burr, G. S., Donahue, D. J., Chappell, J. M. A., Bloom, A. L., Druffel, E. R. M., Taylor, F. W. (1993) A large drop in atmospheric $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ and reduced melting in the Younger Dryas, documented with ^{230}Th ages of corals. *Science* **260**, 962-968.
14. Hughen, K., Southon, J., Lehman, S., Bertrand, C., Turnbull, J. (2006) Marine-derived ^{14}C calibration and activity record for the past 50,000 years updated from the Cariaco Basin. *Quaternary Science Reviews* **25**, 3216-3227.
15. Chiu, T.-C., Fairbanks, R. G., Cao, L., Mortlock, R. A. (2007) Analysis of the atmospheric ^{14}C record spanning the past 50,000 years derived from high-precision $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ and ^{14}C dates on fossil corals. *Quaternary Science Reviews* **26**, 18-36.