

八千年來大氣二氧化碳濃度增高是自然變化還是人類活動造成的？

(台灣大學全球變遷研究中心古環境變遷組組長 魏國彥)

儒第門近年在他的科學期刊文章 (Ruddiman, 2003) 及專書著作中大力鼓吹：過去 8000 年來大氣二氧化碳濃度的增高是人類活動所造成的。他立論的基礎在於南極冰芯的紀錄，在過去 40 萬年四次冰期—間冰期迴旋中，在前三次冰期的「終止」(Termination) 過程中二氧化碳濃度都是初期上升甚快，然後就會迅速下滑；而唯獨最近這一次冰期結束後，初期二氧化碳濃度也急速上升，並也如同往例，隨後呈現下跌，可是這趨勢在 8000 年前停止了，取而代之的是一路上升的緩步上揚 (Monnin et al., 2001)，這個狀況與以往的前三次「終止」過程形成鮮明對比。若以早先的三次「終止」事件為師，二氧化碳濃度應該要跌到 240ppm，而過去 8000 年到工業革命之前，二氧化碳的濃度卻一路上升到 280ppm。根據儒第門 (Ruddiman, 2005) 的說法，這多增加的 40 ppm 是人類活動所賜，同時，這多出來的 40 ppm，也阻礙了新冰期的來到。氣體中源自於農業部門的氣體主要為甲烷、二氧化碳及氧化亞氮三種，其中與畜牧產業有關者，主要為甲烷，其次為氧化亞氮，而其所增強輻射溫暖化作用 (radiative forcing)，約佔全球 20% (Cole et al., 1995)。禽畜養殖過程中之溫室氣體來源主要為腸內發酵 (enteric fermentation) 及糞尿處理 (manure management)，甲烷為最主要腸內發酵之溫室氣體來源，氧化亞氮產生以糞尿處理過程為主 (IPCC, 1996)。

要在大氣中增加 40 ppm 二氧化碳濃度要焚燬大片森林；而焚燬森林所產生的二氧化碳不會全部都投身於大氣之中，應該有更多的部分要溶解到海水裡。儒第門估計，進入海洋中

的二氧化碳量應該至少是進入大氣的五倍。因此，海洋中的證據也很重要，應該要在海洋的無機碳的溶解量上也顯現出相應的上升趨勢。儘管近兩百年來人類大量燃用化石燃料所排放的二氧化碳只有三分之二左右被吸收到海洋之中，這是因為時間還不夠長，無法達到平衡。與之相較，8000 年是夠長了，長到讓二氧化碳能經過海洋溫鹽循環抵達海底，與海底的碳酸鈣發生化學反應而達到中和。

若將與海底碳酸鈣沈積中和效應也算入，那麼增加這大氣中 40ppm 二氧化碳濃度需要由大氣中總共釋放出 700GtC (7000 億公噸碳) (Joos et al., 2004)，那麼，8000 年前地表森林應該是 200 年前的兩倍不止，換言之，由 8000 年前到 200 年前，地球上損失的森林總量應與目前全球森林總量相當。如何驗證呢？答案在大氣與海洋儲存庫中的碳同位素比值，由於森林的銳減，由生物庫中釋放大量的碳 12 應該會使海洋儲存庫中的碳同素值 ($\delta^{13}\text{C}$) 下降約 0.45‰。而 Indermühle et al (1999) 對南極 Taylor Dome 冰芯 8 個標本的測定似乎表明過去 8000 年來大氣二氧化碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 下降了 0.2‰。布羅克 (Broecker et al., 2001) 對此不表同意，因為他們根據西赤道太平洋單一箱型岩芯 (水深 2300 公尺，東經 158 度) 中浮游有孔蟲殼體碳同素的測定，並未發現 8000 年來有任何下降趨勢。當然，根據如此一根單一岩芯的測定結果並不能「一竿子打翻一船人」，畢竟，影響浮游有孔蟲碳同素的因素還很多。2004 年德國研究團隊 (Eyer et al, 2004) 發表 EPICA 南極新冰芯一組 22 個標本的測定結果似乎更具說服力，他們在過去 7000 年中並未發現明確的 $\delta^{13}\text{C}$ 下降趨勢，因

此，「森林大量焚燬說」似乎找不到相應的支持證據。

對於 8000 年來大氣二氧化碳濃度下降的現象布羅克一向另有一套海洋碳酸鈣調節機制的說法。他認為在由冰期往間冰期過渡的過程中，由於氣候變暖變濕，陸地森林植生與濕地堆積會大量增加，從而將大氣儲存庫中的二氧化碳抽離，而貯存到森林與濕地之中，與此同時，海洋中也因而損失一些二氧化碳，海洋深處的碳酸根離子濃度也因而上升，使得海洋碳酸鈣補償深度(carbonate compensation depth, 簡稱 CCD)向下變深，海洋沈積物中的碳酸鈣保存變得較好，表現在深海海洋沈積物中的有孔蟲的保存度變好，碳酸鈣堆積速率增加。然而，這個發生於「終止」事件期間的碳酸鈣保存其實是一個「矯枉過正」的暫時現象，需要由大氣中的二氧化碳來補充給海洋；而大氣中二氧化碳的來源，依地質時間尺度而言，是靠著火山噴發釋放的二氧化碳來補充，或是減緩大陸岩石的風化強度來調整（大陸岩石的化學風化會耗用大氣中的二氧化碳）。火山活動並不會因為氣候變暖而增加，而全新世更溫暖的氣候可能還更加強風化作用，因此，「終止期」之中對大氣二氧化碳的透支，需要在「終止期」結束以後的一段時間來由海洋自己想辦法來慢慢補足。要如何補足呢？大氣中的二氧化碳必然還處於透支狀態，此時，唯有靠著在海洋中碳循環扮演重要角色的碳酸鈣補償系統的變化來調整。布羅克認為在氣候回暖之後，也就是全新世的初期，深海中碳酸根離子濃度不得不開始下降，深海平原的碳酸鈣（有孔蟲、鈣板藻殼體）又開始溶解，保存度變差，溶解的結果也就是釋放二氧化碳，用大約 5000 年的時間，地球系統（大氣—海洋—地層）慢慢回到二氧化碳收支平衡的狀態。換言之，在 8000 年前到 3000 年前的這段時間，是地球系統處於各儲存庫二氧化碳濃度逐漸回復平衡的調整期，大氣中原來被透支的二氧化碳在海

洋慢慢的「吐氣」中逐一償還。

用目前國內「卡債卡奴」現象來作個比喻，當冰期結束、氣候回暖時，陸地的森林與濕地急速「消費」二氧化碳，向海洋這個銀行挪用，海洋也毫不吝惜的付出，海洋中二氧化碳減少的具體表徵就是深海沈積物碳酸鈣保存變好，而這個保存碳酸鈣的動作，也短暫造成二氧化碳供應量短缺，因此在「終止期」結束後，大氣二氧化碳濃度會下降，下降約 40 ppm，對於這個短缺，海洋深處的海水化學變化會做出一個相應的「補償」動作，但是海洋深處的還債動作緩慢，而且還要透過曠日廢時的運送過程（深海環流），才能送到大氣，然而畢竟海洋的庫存巨大，「債信」良好，動作雖慢，還是按照清償計畫，一點一滴的，慢慢的補足大氣中二氧化碳的短缺，由原來的 240ppm 一路補到 280ppm。這也就是為什麼在 8000 年前到 3000 年前大氣中的二氧化碳濃度可以一路緩慢上升。

簡單歸納一下，大氣二氧化碳在全新世中的緩步上升，在 Ruddiman 看來是人類活動（焚燒森林、發展農業）的貢獻，而布羅克則認為無須怪罪人類，而是海洋緩慢的調節所貢獻的。前者的「森林焚燬說」需要在大氣與海洋的碳同素中見到相應的變化，而目前的新的冰芯數據，及海洋中的有孔蟲碳同位素值變化曲線似乎都不支持此說。另一方面，「海洋碳酸鈣調節說」，則需在碳酸鈣的保存度上見到相應的變化。根據布羅克的劇本推想，深海岩芯有孔蟲應在「終止期」的數千年中良好保存，而在稍後的數千年中，也就是全新世中期保存變差，每況愈下。Broecker et al (2001)對有孔蟲保存度（有孔蟲破碎度、有孔蟲殼體重量）的研究結果似乎支持此項說法。又因為海洋碳酸鈣的碳同素與海水中的無機碳碳同素值相去不遠，因此碳酸鈣的溶解在全新世的有孔蟲殼體中並不會留下什麼明顯的訊號。

看來似乎儒第門處於下風，但是布羅克的說法並未能解決本文一開始提出的問題，也就是：為什麼這最後一次冰期結束後大氣二氧化碳的變化模式與前三次「終止期」的模式不同？換句話說，如果布羅克的「海洋碳酸鈣調節說」是對的，也應該同樣在前三次的間冰期重覆演出、百試不爽，不是嗎？難道布羅克的說法是只為這最近的一次現象量身定做嗎？最近，布羅克 (Broecker and Stoker, 2006) 提出一套巧妙的答辯，並呈現檢驗其答辯的新證據。

布羅克指出，最近這一次的冰期終止與前三次的背景有一個基本差異，那就是，地球繞日軌道偏心率 10 萬年週期變化在最近的這一次終止期中特別小，也因此使得表現於 2 萬年的歲差週期的變化幅度特別小，致使季節性變化減小（圖 1）。在前三次的間冰期，都是因為隨著歲差週期而變的陽光輻射量陡然降低而使地球由間冰期狀態轉向冰期狀態。前三次間冰期所看到的二氧化碳濃度下降乃是因為陽光輻射強度的變化迅速明顯，使得「間冰期頂峰期」很短，故而，只見到二氧化碳濃度下降的趨勢，而沒有多餘的時間讓海洋系統來「還債」。相對而言，最近這一次的間冰期，是由一個陽光輻射幅度變化較小的歲差週期所調控，步調趨緩，地球不急著回到冰期狀態，因此我們有了較長的間冰期頂峰時期。如何驗證這個說法呢？我們知道，就地球繞日軌道週期變化而言，與目前最相近的是距今 40 萬年前的海洋氧同素第 11 階，而 40 萬年前的大氣二氧化碳濃度已由最近歐洲團隊的 EPIAC 冰芯紀錄所揭露 (Siegenthaler et al., 2005)。Broecker and Stoker (2006) 將相當於氧同位素第 1-2 階與第 11-12 階的二氧化碳濃度相比較，顯示兩者的數值與變化曲線都十分相似，遂宣稱全新世以來二氧化碳濃度的上升是自然作用，而非人類影響。如果，目前我們身處其中的這一次間冰期重演 40 萬年前第 11

階的歷程，那麼，依樣畫葫蘆，本次間冰期頂峰的暖期與二氧化碳高值可以再維持一萬年。

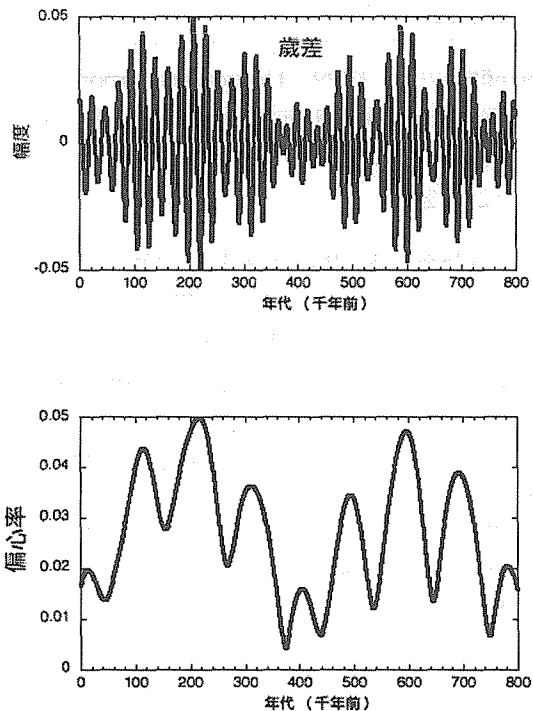


圖 1：80 萬年來歲差變化造成的陽光輻射強度變化（上圖）及地球繞日軌道的偏心率變化（下圖）。

然而，最讓我們戒慎恐懼的是：現今大氣中二氧化碳濃度已高達 370 ppm，遠遠高過歷次間冰期的顛峰值 280 ppm，地球系統還會一本初衷，能學第 11 階時期依樣畫葫蘆嗎？地球還能舊戲重演嗎？

References

- Broecker, W. S., Lynch-Stieglitz, J., Clark, E., Hajdas, I. and Bonani, G. (2001) What caused the atmosphere's CO₂ content to rise during the last 8000 years? *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2, doi:2001GC000177.
- Broecker, W. S., Stoker, T. F. (2006) The Holocene CO₂ rise: Anthropogenic or natural? *EOS*, 87 (3).

八千年來大氣二氧化碳濃度增高是自然變化還是人類活動造成的？
魏國彥

- Eyer, N. et al (2004) Comparison of two records measured on air from the EPIAC Dome C and Kohen Station ice cores. *European Geophysical Abstracts*, 6, EGU0-A-01990.
- Indermühle, A. 1999. Holocene carbon-cycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica. *Nature*, 398: 121-126.
- Joos, F., Gerber, S., Prentice, I. C., Otto-Bliesner, B. L., and Valdes, P. J. (2004) Transient simulations of Holocene atmospheric carbon dioxide and terrestrial carbon since the Last Glacial Maximum. *Global Biogeochemical Cycles*, 18, GB2002.
- Monnin, E. et al (2001) Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial termination. *Science*, 291: 112-114.
- Ruddiman, W. F. (2003) The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change*, 61: 21-293.
- Ruddiman, W. F. (2005) How did humans first alter global climate? *Scientific American*, 292: 46-53.
- Siegenthaler, U. et al., (2005) Stable carbon cycle-climate relationship during the Late Pleistocene. *Science*, 310: 1313-1317.