

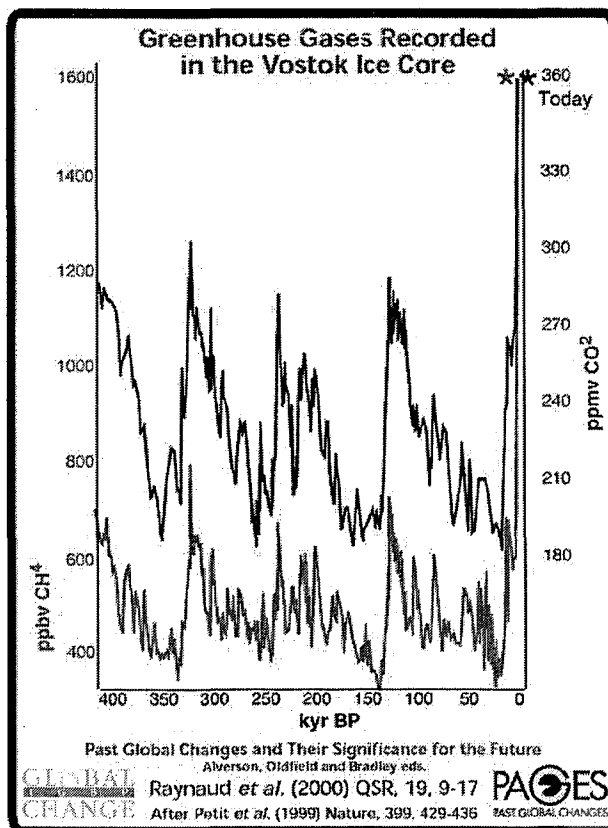
八大團隊預測古大氣二氧化碳濃度：鹿死誰手，還看明朝

(國立臺灣大學地質科學系教授 兼 全球變遷研究中心古環境變遷組組長 魏國彥)

南極 Vostok 冰芯清楚顯示過去 42 萬年來，南極高空的氣溫與大氣中的溫室氣體——二氧化碳 (CO₂) 及甲烷 (CH₄) ——的濃度密切相關：當溫度高的時候，兩種溫室氣體的含量也高；溫度降下來時，溫室氣體濃度亦應聲下跌。過去 42 萬年來的四個冰期——間冰期迴旋重複顯示這樣的關係，而二氧化碳的濃度在 280ppm 與 180ppm 之間來回擺盪，似乎是間冰期的「楚河」與冰期的「漢界」，二氧化碳的濃度不容越雷池一步 (Petit *et al.*, 1999, 見下圖)。

2004 年「南極冰芯鑽探歐洲團隊」(European Programme for Ice Coring in

Antarctica, 簡稱 EPICA) 發表了一根更長的冰芯古溫及落塵紀錄，紀錄涵蓋了過去 74 萬年 (EPICA Community Member, 2004)。分析冰芯氣泡中封存的大氣二氧化碳濃度雖然要花較長久的時間，但是結果也是指日可待，2004 年的一篇文章發出戰帖 (Wolff *et al.*, 2004)，邀請氣候模型學者根據已發表的古氣溫資料，及一切其他可用的資料、模型與知識，來預測這根 EPICA 冰芯中 42 至 74 萬年前期間的二氧化碳濃度。有八個團隊提出了他們的預測，結果簡述於 AGU 的 2005 年 9 月 20 日出刊的 EOS 週報 (Wolff *et al.*, 2005)。



有兩個團隊用的是「以今知古，由近推遠」的辦法，他們將 Vostok 冰芯的結果當作「訓練資料」(training set)，做出兩者之間的回歸關係，而後利用已發表的 EPICA 冰芯古溫結果來預測該冰芯下段氣泡中的二氧化碳濃度值。因為冰芯下段重建的古溫顯示間冰期的最高溫沒有後期那麼高，因此，推算出來的間冰期二氧化碳濃度也降低了，降到只有 250-260 ppm；而冰期的低值與後期大抵相近，約為 180-200 ppm。

有兩個團隊用的是古海洋學的資料與知識，其中之一主要是根據深洋底棲有孔蟲的氧同素比值 (Shackleton, 2000) 來反推，在扣除其中軌道參數的影響之後，其餘的變化假設皆由大氣二氧化碳濃度所調控，其結果也顯示，老間冰期的二氧化碳高值也大約是 250-260 ppm。另一團隊用的是北大西洋中、底層水底棲有孔蟲的碳同位素值梯度與 Vostok 冰芯中的二氧化碳濃度的關係來反推，其基本假設是海洋中的碳酸鈣補償 (carbonate compensation) 的變化與海洋碳化學的層化 (stratification) 密切相關，而導致吸收或放出二氧化碳的效果 (Flower *et al.*, 2000)。其預測結果與前一團隊極為近似。

第五個團隊假設南極上空的氣溫受到三個因素控制：(1) 二氧化碳濃度 (2) 氣溶膠濃度 (由冰芯的落塵量代表)，(3) 冰原大小 (由海洋底棲有孔蟲氧同素值代表)。各個因素對溫度影響的強度由 Vostok 冰芯的基本數據來估算，然後再將此關係延伸應用到 EPICA 的下段，估計老間冰期二氧化碳濃度值。其結果亦與上述方法所得極為近似。

第六團隊動用了上述各種代用指標，又用了多變量線性回歸，來找出古氣溫與各變數的關係，發現二氧化碳濃度是最主要的控制參數，其推算的結果也與其他團隊大同小異。

第七團隊用了一個海洋—大氣—生物圈的碳循環三盒模式，用了海洋碳同位素值及冰芯紀錄等數值來推算，得到的老間冰期二氧化碳濃度較其他各團隊都高，可達 270 ppm。

第八團隊將上述各種複雜參數都置諸腦後，而將天文軌道參數造成的太陽輻射強度當成控制大氣二氧化碳濃度的終極因素，並設定了一些門檻限制 (Paillard and Parrenin, 2004)，這些門檻與地球到達冰期鼎盛時如何改變海洋溫鹽環流，而又如何增加大氣中二氧化碳含量，而反饋造成冰期終結 (termination) 有關。其結果與其他團隊大不相同，所得到老間冰期二氧化碳的濃度與晚期沒有什麼差異，仍在 280 ppm 與 180 ppm 之間擺盪。

總結而言，各家的預測彼此間大同小異，這並不代表科學家們果真已瞭解古氣候變化的機制，或有什麼共識。原因在於無論是哪一種方式，大家的基礎都是建立在以過去 42 萬年的冰芯與海洋岩芯紀錄所建立起的統計模型，或盒型模型，或天文參數推力模型，無論哪一類型，都是經驗型模型，而非有什麼明確的物理模型來推演導算。

預計在 2006 年，測定中的 EPICA 冰芯中氣泡的二氧化碳濃度將會發表出來，究竟鹿死誰手，誰是最後贏家也將揭曉。我們也不能排除另一種可能性，那就是所有的團隊都錯了，就像「大樂透」開獎時，所有的號碼組合都「槓龜」，那麼，其他沒有參加這場小賭的科學家或反而暗爽，哈哈！且看「山人自有妙計」，一堆新模型又將登場！

事實上，大自然給我們的驚異一直層出不窮，大自然的迷團似乎永遠解不完。江山代有才人出，各領風騷數十年！

References

- EPICA Community Member, 2004. Eight glacial cycles form an Antarctic ice core. *Nature*, 429(6992): 623 - 628.
- Flower, B. P., Oppo, D. W., McManus, J. F., Venz, K. A., Hodell, D. A., and Cullen, J. L., 2000. North Atlantic intermediate to deep water circulation and chemical stratification during the past 1 Mys. *Paleoceanography*, 15(4): 388 - 403.
- Paillard, D. and Parrenin, F., 2004. The Antarctic ice sheet and the triggering of deglaciation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 227(3-4): 263 - 271.
- Petit, J. R., *et al.*, 1999. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, *Antarctica. Nature*, 399: 429 - 436.
- Shackleton, N. J., 2000. The 100,000-year ice-age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity. *Science*, 289(5486): 1879 - 1902.
- Wolff, E. W., Chappelaz, W. J., *et al.*, 2004. The EPICA challenge to the Earth system modeling community. *EOS Trans. AGU*, 85(38): 363.
- Wolff, E. W.m Kull, C. *et al.*, 2005. Modeling past atmospheric CO₂: Results of a challenge. *EOS Trans. AGU*, 86(38): 341, 345.