



歷史氣候定量化研究方法與指標的 敏感性探討

陳 星

南京大學大氣科學學院
xchen@nju.edu.cn

2017年2月13日 臺北



主要內容



- 問題的提出
- 歷史氣候定量化：重建與模擬
- 量化的敏感性問題
- 個例分析：資料重建與模式使用
- 幾點初步認識



問題的提出



- 歷史氣候與現代氣候的銜接
 - (1) 資料的定量化
 - (2) 時間分辨率與空間分佈的对应
 - (3) 代用資料來源的多樣性
 - (4) 模式的多樣性
 - (5) 不確定性與敏感性



歷史氣候定量化：重建與模擬



- 歷史氣候定量化的主要途徑
 - (1) 借助各種代用資料和歷史文獻記載與現代觀測資料的對比建立統計關係，重建歷史氣候要素值；
 - (2) 用氣候模式再現過去氣候要素場，得到定量時空分佈。
- 兩種方法各有特點，但都存在不確定性，也就是對真實氣候的逼近都有不同程度的差距。



不確定性與敏感性



■ 不確定性

- (1) 代用資料：主要表現為時間解析度的不同；
- (2) 模式類比：模式、強迫條件、參數化方案的差異等；
- (3) 共同問題：代用資料和模式的敏感性。

■ 敏感性

- (1) 時間响应的敏感性
- (2) 响应幅度的敏感性

- 透過對代用資料的歷史氣候重建和強迫條件對氣候模擬結果影響的個例分析，討論歷史氣候量化的敏感性問題。



個例分析-1：大九湖孢粉溫度重建



- 問題
- 資料和方法
- 溫度轉換函數與孢粉敏感性
- 孢粉因素敏感性的區域差異
- 討論



問題



- 喬本和草本（蕨類）孢粉哪個重要？
- 百分比含量高的和低的哪個重要？
- 不同孢粉對溫度的敏感性差異是否顯著？
- 不同區域的孢粉樣本反映的氣候意義是否相同？
- 什麼樣的孢粉氣候因素轉換函數建立方法較好？



資料和方法



- **孢粉樣本:**

神農架大九湖地表和地層孢粉採樣得到的百分比含量

- **氣候資料:**

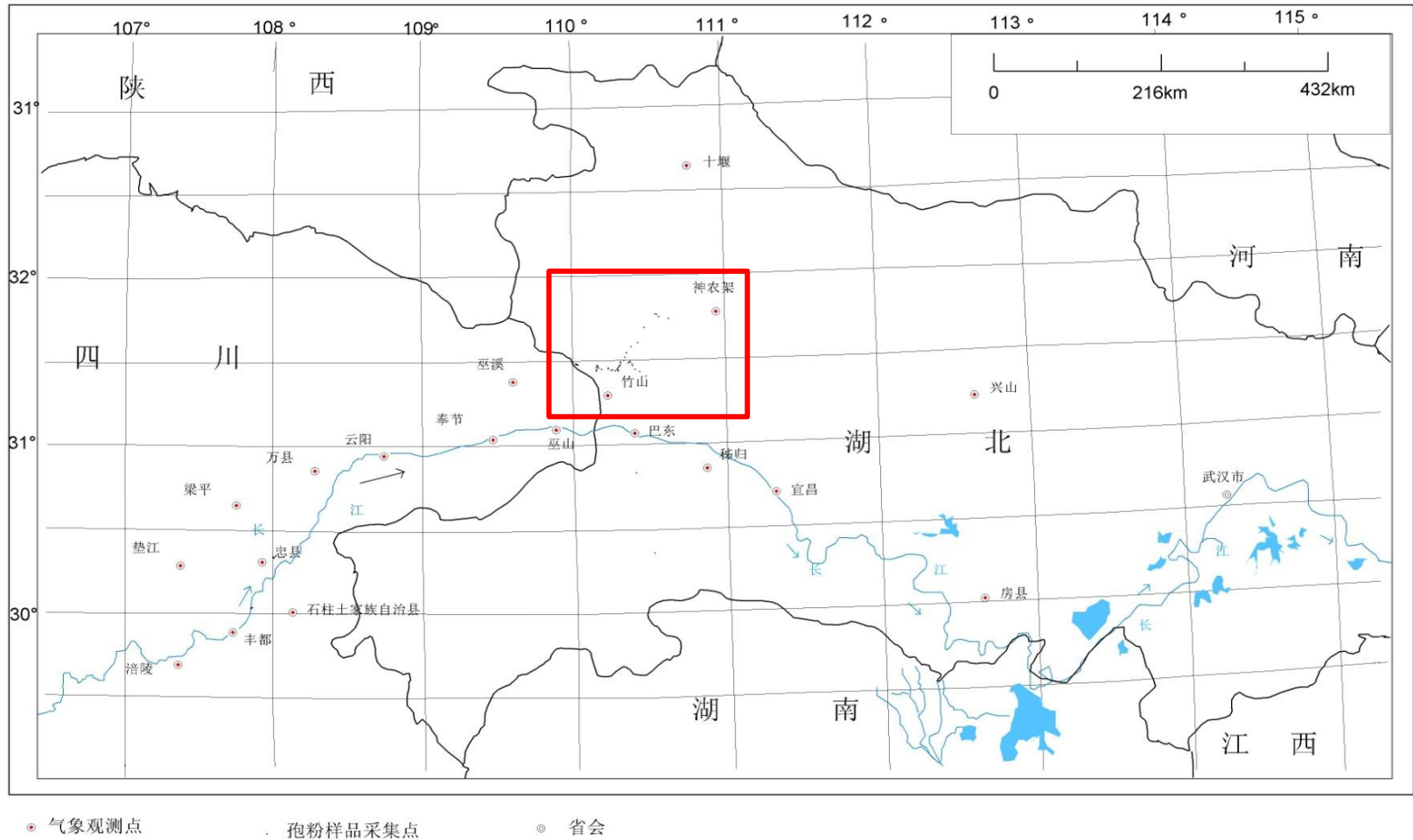
神農架地區氣象站溫度資料

- **比較分析方法:**

多元線性回歸、逐步線性回歸、經驗正交函數分析
(EOF)、不同樣本劃分的比較、區域差異比較

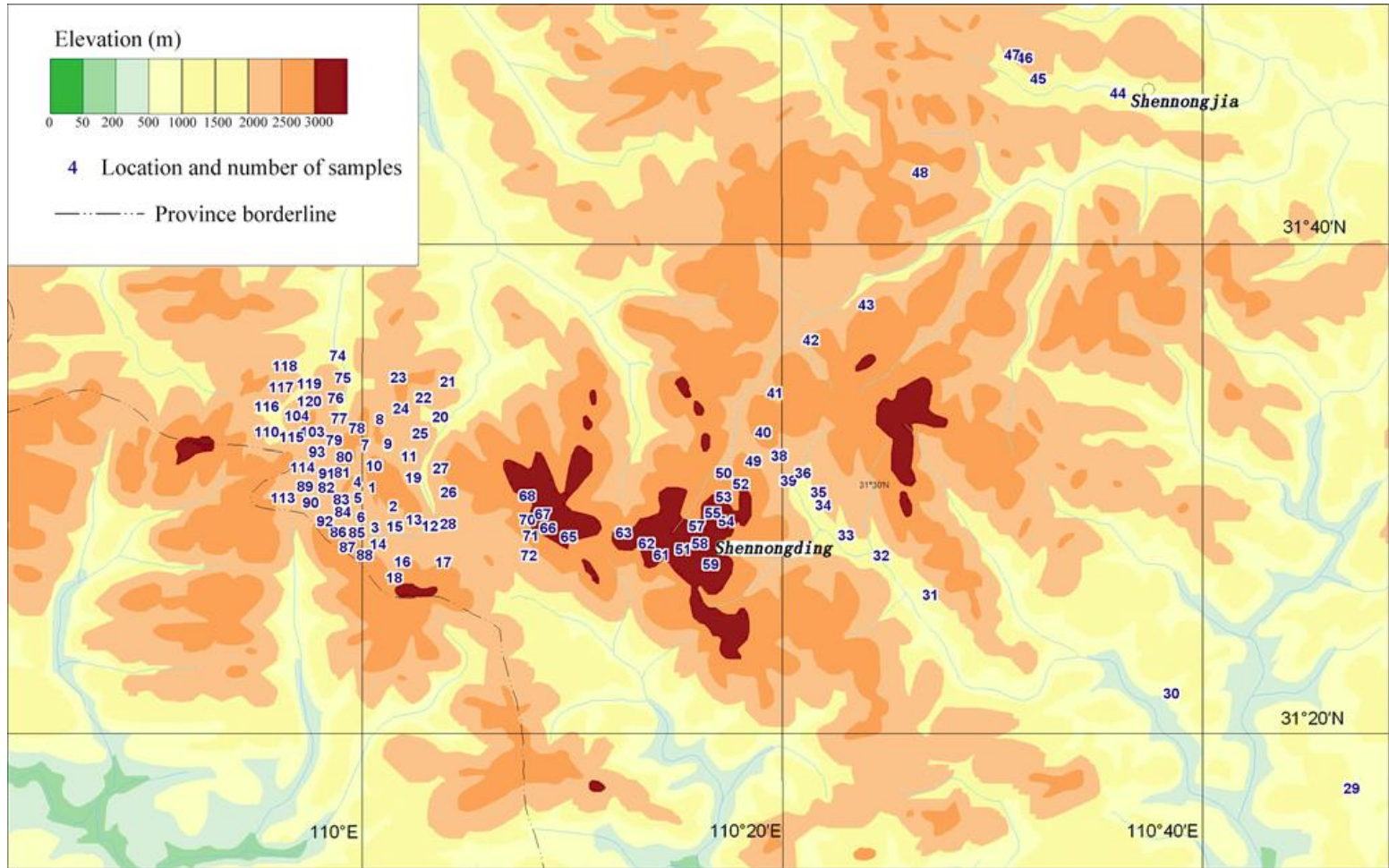


神農架孢粉採樣點和氣象站分佈圖





神農架地表孢粉採樣點分佈和地形圖





溫度轉換函數與孢粉敏感性



- 溫度孢粉轉換函數的建立
- EOF分析
- 喬本分析
- 草本（蕨類）分析



溫度-孢粉轉換函數的建立



■ 溫度分佈的擬合

$$T(\phi, \lambda, H) = a_0 + a_1\phi + a_2\lambda + a_3H$$

$$T = 61.657 - 1.375\phi - 0.006H$$

Table 2 Comparison of observed and fitted annual mean temperatures for 7 meteorological stations

Name	Latitude/N (°)	Longitude/E (°)	Altitude (m)	Observation temperature (°C)	Fitted temperature (°C)
Zhushan	32.23	110.23	309.0	15.4	15.35
Fangxian	32.03	110.77	427.1	14.3	15.05
Yunyang	32.65	110.78	253.9	15.4	15.23
Shengnongjia	31.75	110.67	937.2	12.1	12.31
Xingdong	31.23	110.77	275.6	16.8	17.06
Badong	31.07	110.40	295.6	17.3	17.16
Dajiuhu	31.50	110.00	1760.0	7.2	7.78



孢粉-溫度轉換函數擬合



- 垂直氣候帶與水準氣候帶的轉換

地表孢粉：高度-垂直氣候帶-溫度

地層孢粉：深度-時間-溫度

- 因子篩選

孢粉百分比含量

孢粉類型隨高度的分佈



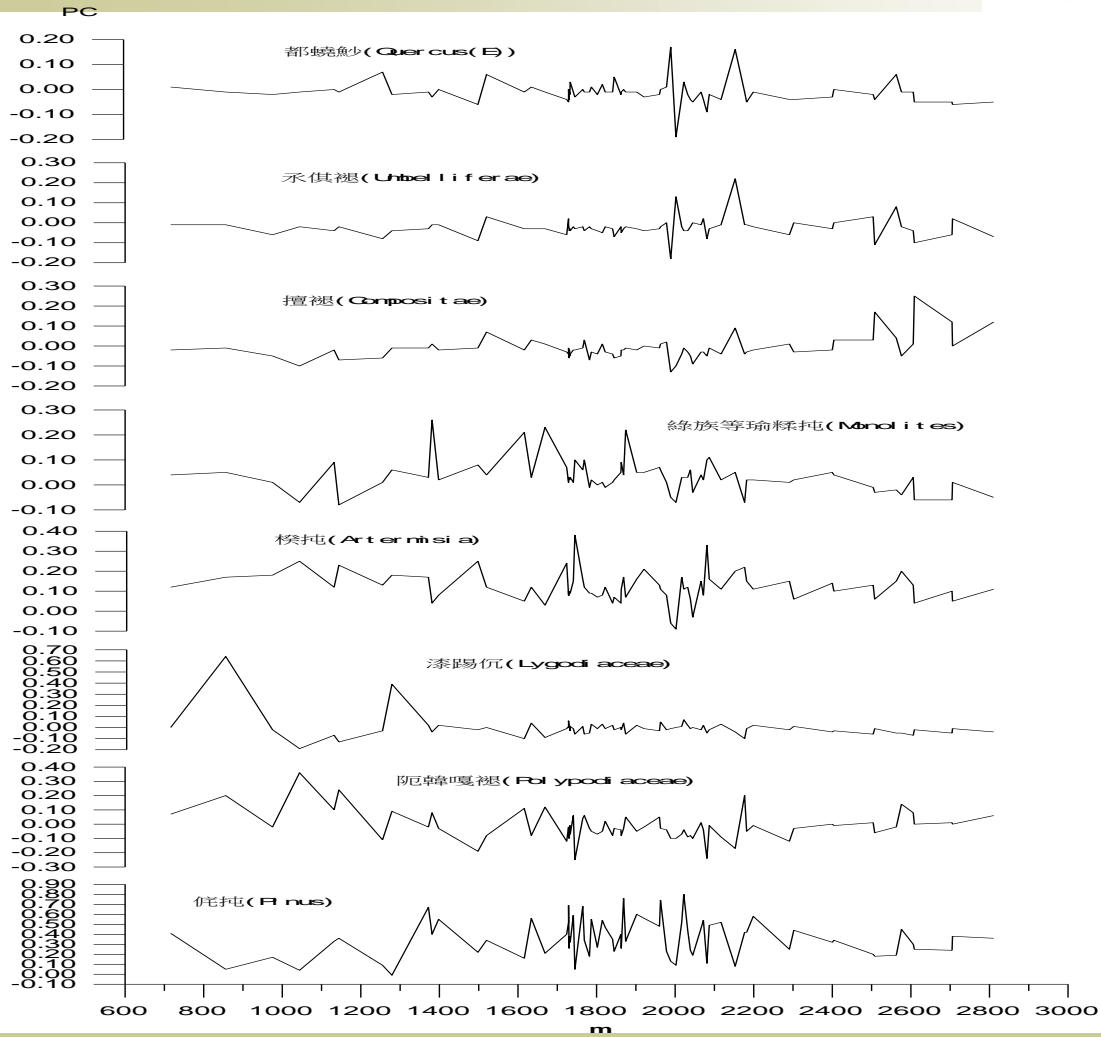
神農架大九湖地表孢粉百分比含量的EOF分析結果



孢粉類型	方差貢獻 (%)	累計方差貢獻 (%)
松屬 (Pinus)	44.8	44.8
水龍骨科 (Polypodiaceae)	13.0	57.8
海金莎 (Lygodiaceae)	12.7	70.5
蒿屬 (Artemisia)	7.3	77.8
厚壁單縫孢屬 (Monolites)	5.9	83.7
菊科 (Compositae)	4.2	87.9
傘形科 (Umbelliferae)	3.0	90.9
常綠櫟 (Quercus (E))	2.6	93.5
大戟科 (Euphorbiaceae)	1.4	94.9
石鬆科 (Lycopodiaceae)	1.2	96.1
鳳尾蕨 (Pteris)	0.8	96.9
落葉櫟 (Quercus (D))	0.7	97.6



EOF前8個特徵向量所對應的高度係數





大九湖孢粉最大百分比含量隨高度變化



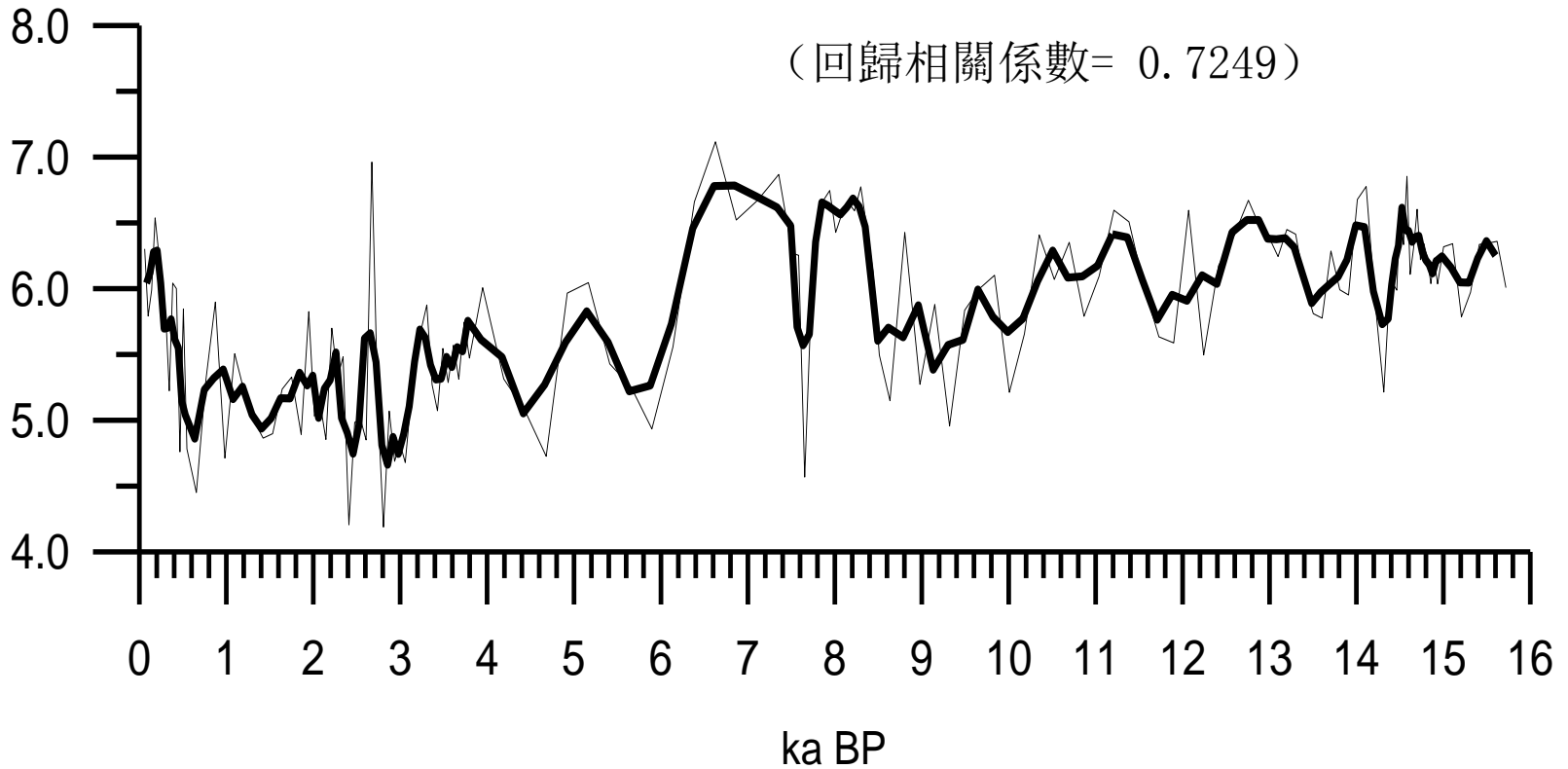
- 從低海拔到高海拔百分比含量最高的分佈依次為
鳳尾蕨（*Pteris*）： 700m
十字花科（*Cruciferae*）： 1000m
厚壁單縫孢屬（*Monolites*）： 1400-1700m
大戟科（*Euphorbiaceae*）： 1800m
樺屬（*Betula*）： 2000m
菊科（*Compositae*）： 2600m以上



EOF前10種孢粉重建的溫度序列

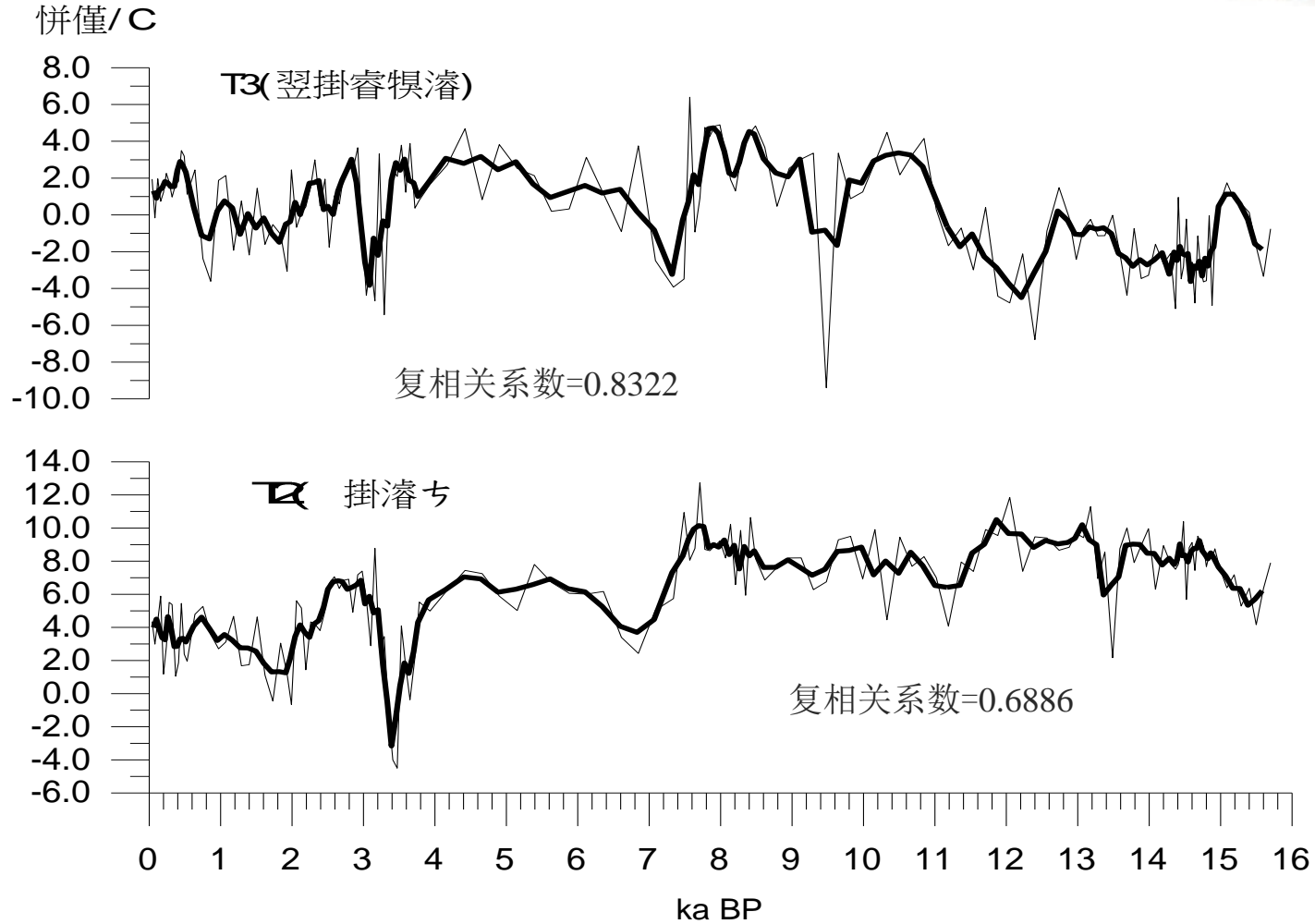


併僅/C





喬木 (29) 和草本 (含蕨類, 26) 重建的溫度序列





喬本和草本（含蕨類）孢粉溫度敏感性差異



- 喬本轉換函數重建的溫度較高，但對YD以前的溫度特徵描述不好，對晚全新世的溫度變化表現得過於劇烈；
- 喬本對溫度較高的氣候環境回應較敏感，而對溫度較低的氣候環境回應較慢，如對YD等異常寒冷事件的回應有所滯後；
- 草本和蕨類轉換函數對YD以前的溫度變化特徵描述較好，但重建的溫度太低；
- 草本、蕨類孢粉對低溫氣候環境極為敏感，對YD等極端突發寒冷事件回應迅速，但對高溫氣候環境的回應沒有喬本類孢粉敏感。



常規逐步回歸方法擬合結果



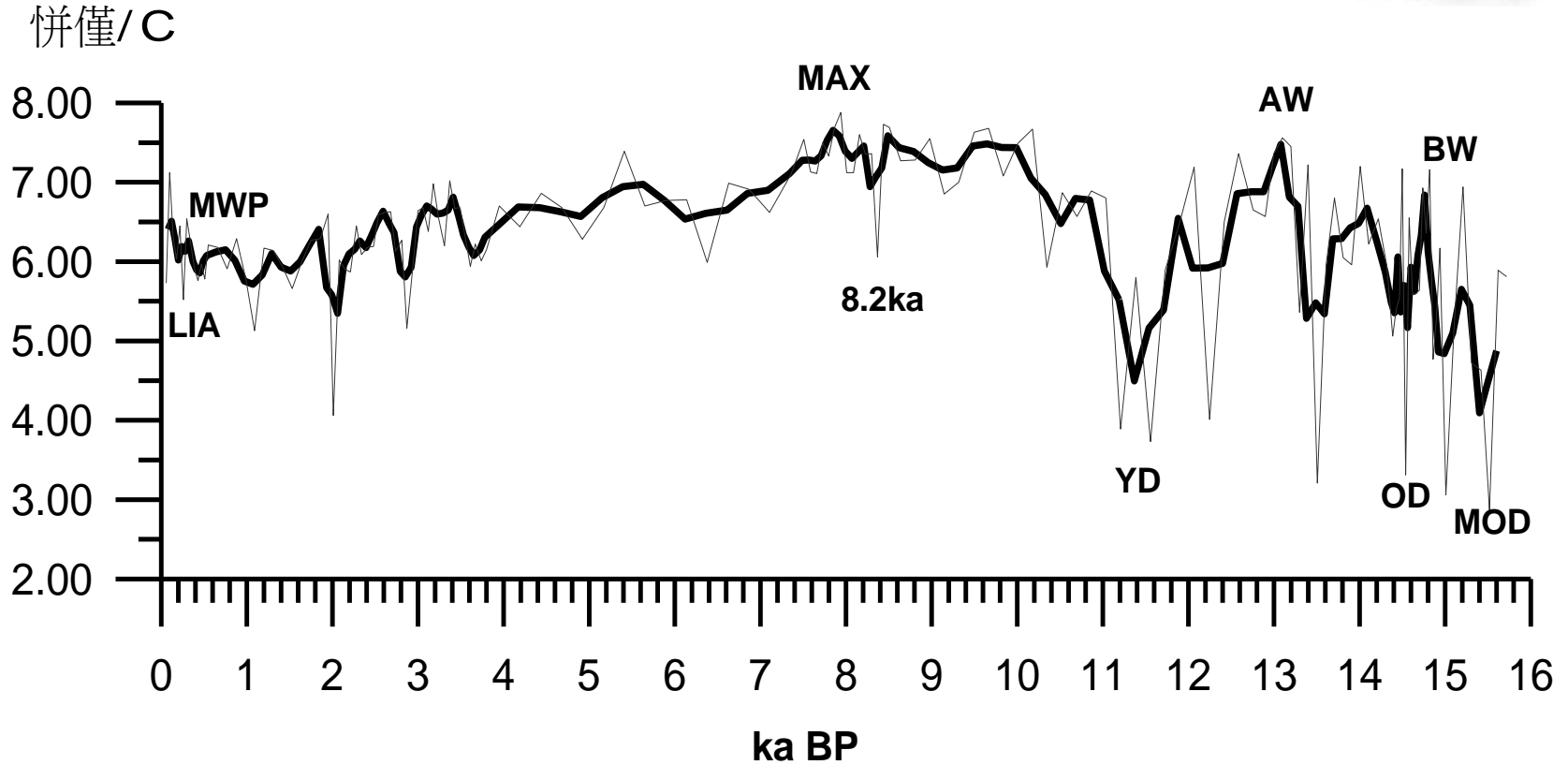
- 年平均溫度（复合相关系数：0.8962）

$$T = 7.649 - 2.33097X_1 - 0.10873X_2 - 0.17352X_3 - .13176X_4 + 0.13356X_5 \\ - 0.83069X_6 + 1.96494X_7 + 0.38411X_8 + 2.77741X_9 + 0.04439X_{10}$$

- X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, 和X10 分别代表冷杉属 (*Abies*)、桦属 (*Betula*)、菊科 (*Compositae*)、十字花科 (*Cruciferae*)、大戟科 (*Euphorbiaceae*)、桔梗科 (*Campanulaceae*)、石韦属 (*Pyrrosia*)、凤尾蕨 (*Pteris*)、卷柏属 (*Selaginella*) 和厚壁单缝孢属 (*Monolites*) 的相对百分比含量 (%)。



根据神农架大九湖297cm厚剖面泥炭层孢粉样本重建的 15.753kaBP以来的年平均温度



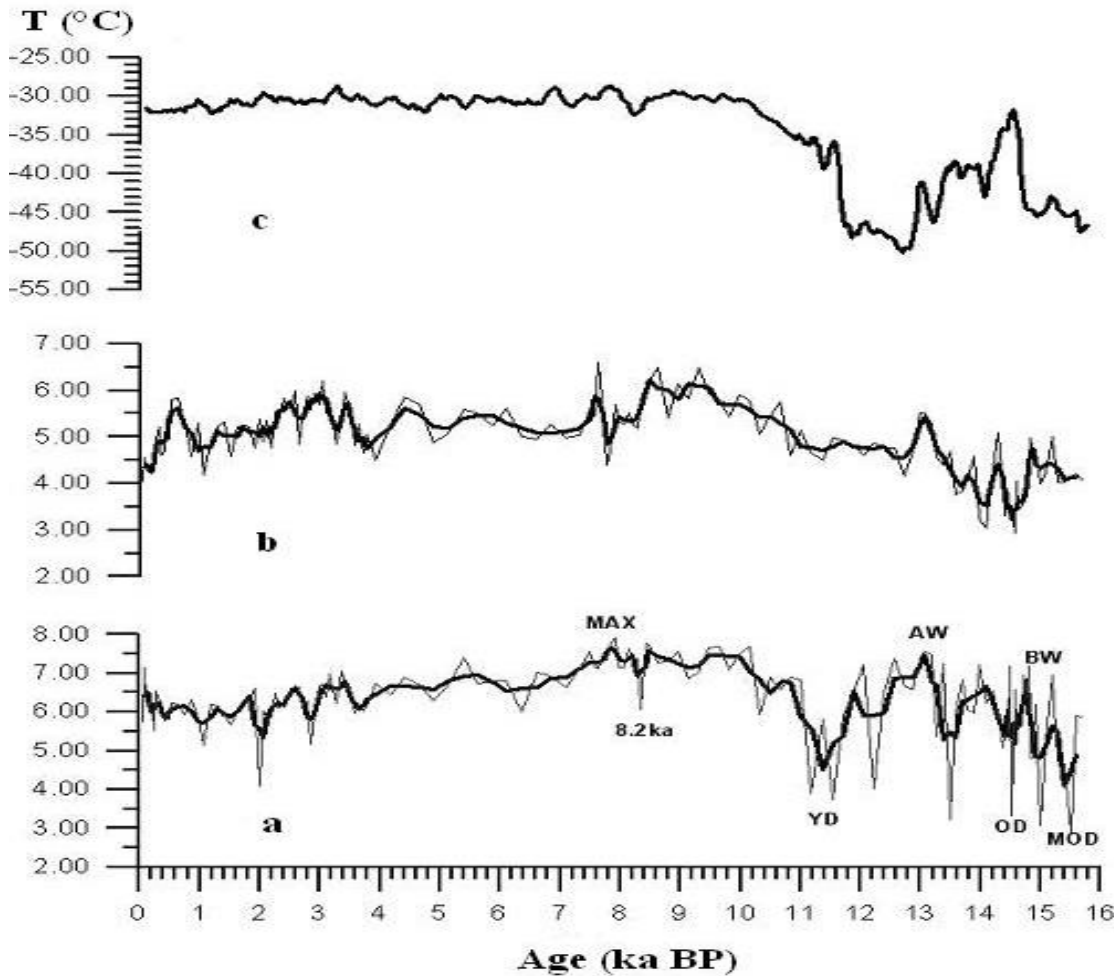
粗線為三點滑動平均，YD-新仙女木事件，OD-老仙女木事件，MOD-最老仙女木事件，AW-阿勒羅德暖期，BW-博令暖期，MAX-溫度最高點，8.2ka-早全新世冷事件 (Zhu Cheng, Chen Xing et al., *Chinese Science Bulletin*, 2008)



孢粉因數敏感性的區域差異比較



- 神農架大九湖轉換函數
- 中國北方-宋長青等轉換函數
- Greenland-冰芯



a 重建的大九湖15ka
以來的年平均溫度

b 宋長青等重建的中國
北方15ka以來的年
平均溫度

c Greenland溫度變化
曲線

(Chen Xing et al.,
Chinese Science
Bulletin, 2008)



區域特征比較



■ 孢粉類型組合不同

(1) **中國北方函數**：雲杉屬、松屬、樺屬、櫟屬、莎草科、麻黃屬、菊科和蒿屬，8個孢粉因數中喬木類和草本（蕨類）各占1/2；

(2) **大九湖函數**：冷杉屬、樺屬、菊科、十字花科、大戟科、桔梗科、石韋屬、鳳尾蕨、卷柏屬和厚壁單縫孢屬，喬木占1/5；

相同的有樺屬和菊科；

■ 溫度敏感性不同

(1) **中國北方函數**：對極值反映較平緩

(2) **大九湖函數**：對極值反映較劇烈



討 論



- 喬本的孢粉百分比含量較大，在整個孢粉樣本變化中的信號強、方差貢獻大，但氣候敏感性相對較低，對氣候環境演變、特別是氣候突變的回應較遲緩；
- 草本（蕨類）孢粉百分比含量相對較低，方差貢獻相對較小，但氣候敏感性相對較高，對氣候環境的突變回應迅速，能夠同步記錄氣候變換過程中的極值變化；
- 不同區域的孢粉樣本所反映出的孢粉因數氣候敏感性、孢粉因數的最優組合不同；
- 逐步回歸可以獲得最大複相關係數和最佳孢粉因子組合，仍是建立孢粉氣候因數轉換函數的最有效方法，可以選出對氣候環境變化最為敏感的孢粉類型及其組合。



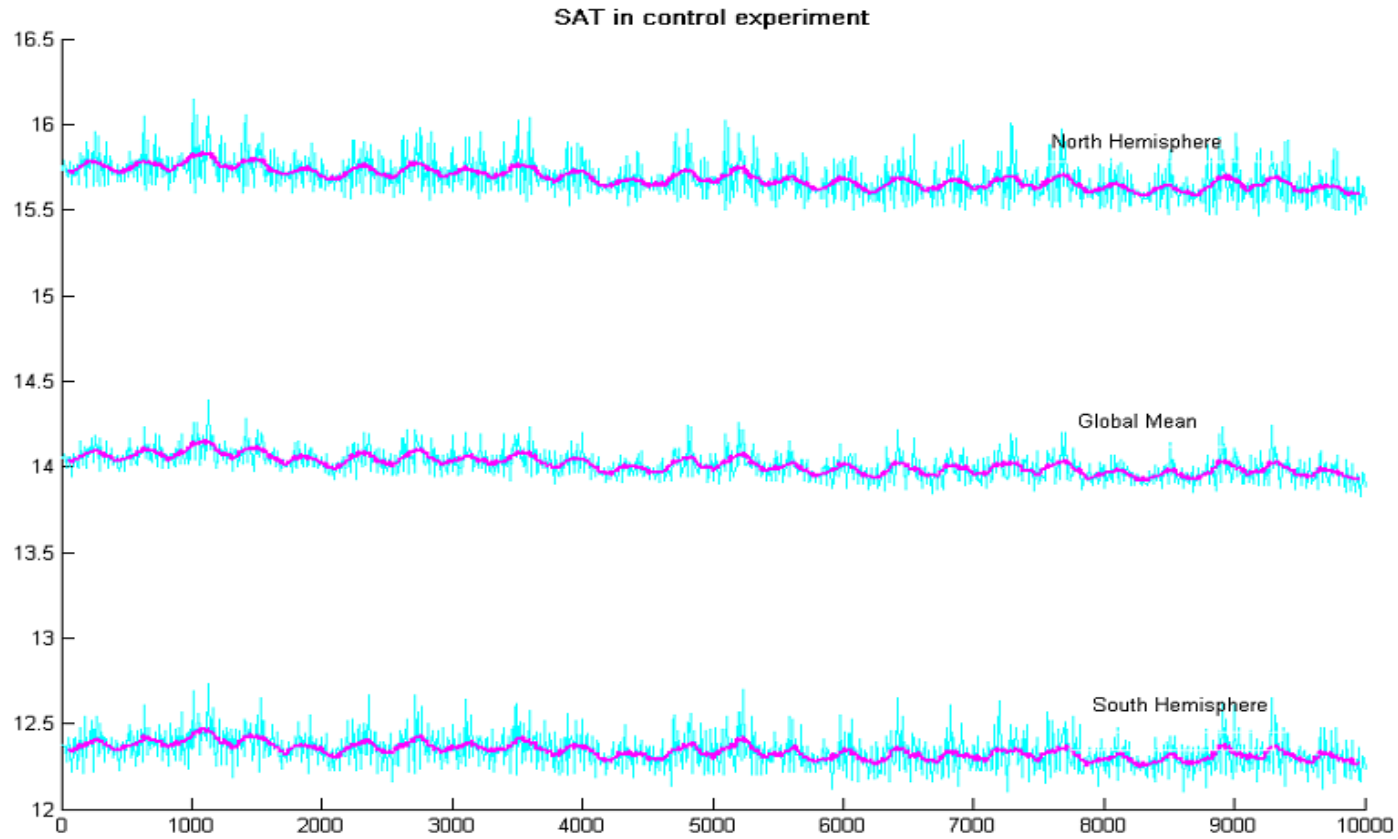
個例分析-2：淡水通量敏感性模擬



- 模式：McGill Paleoclimate Model II
- 模擬方案：8.2kyr BP和4.2kyr BP事件的淡水通量敏感性試驗及其長時間積分試驗
- 參考試驗和對比試驗的比較：
- 地面氣溫（SAT）、鹽度、表層海溫
- 淡水通量的突變作用和長期作用



模式參考模擬試驗的SAT



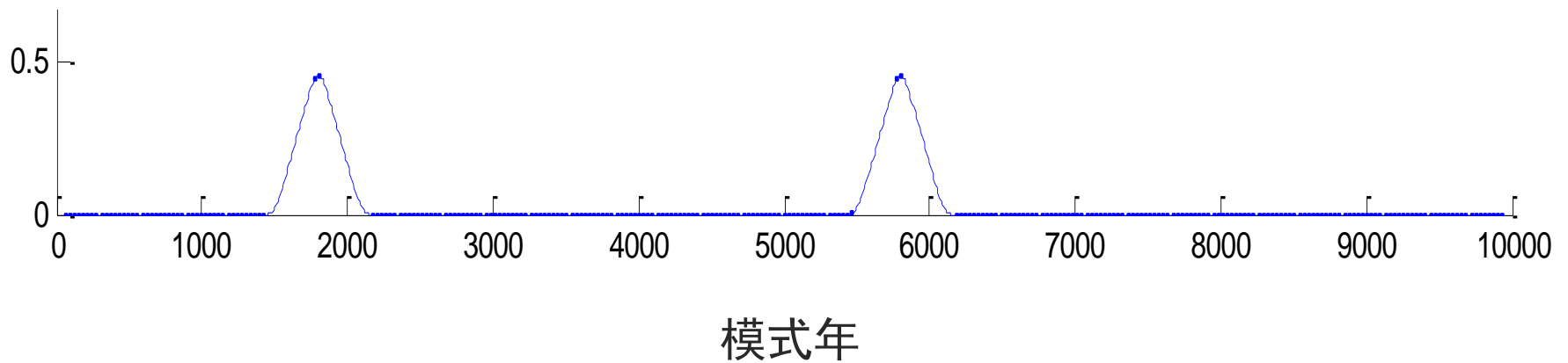


淡水通量強迫模擬試驗



8.2kyr BP

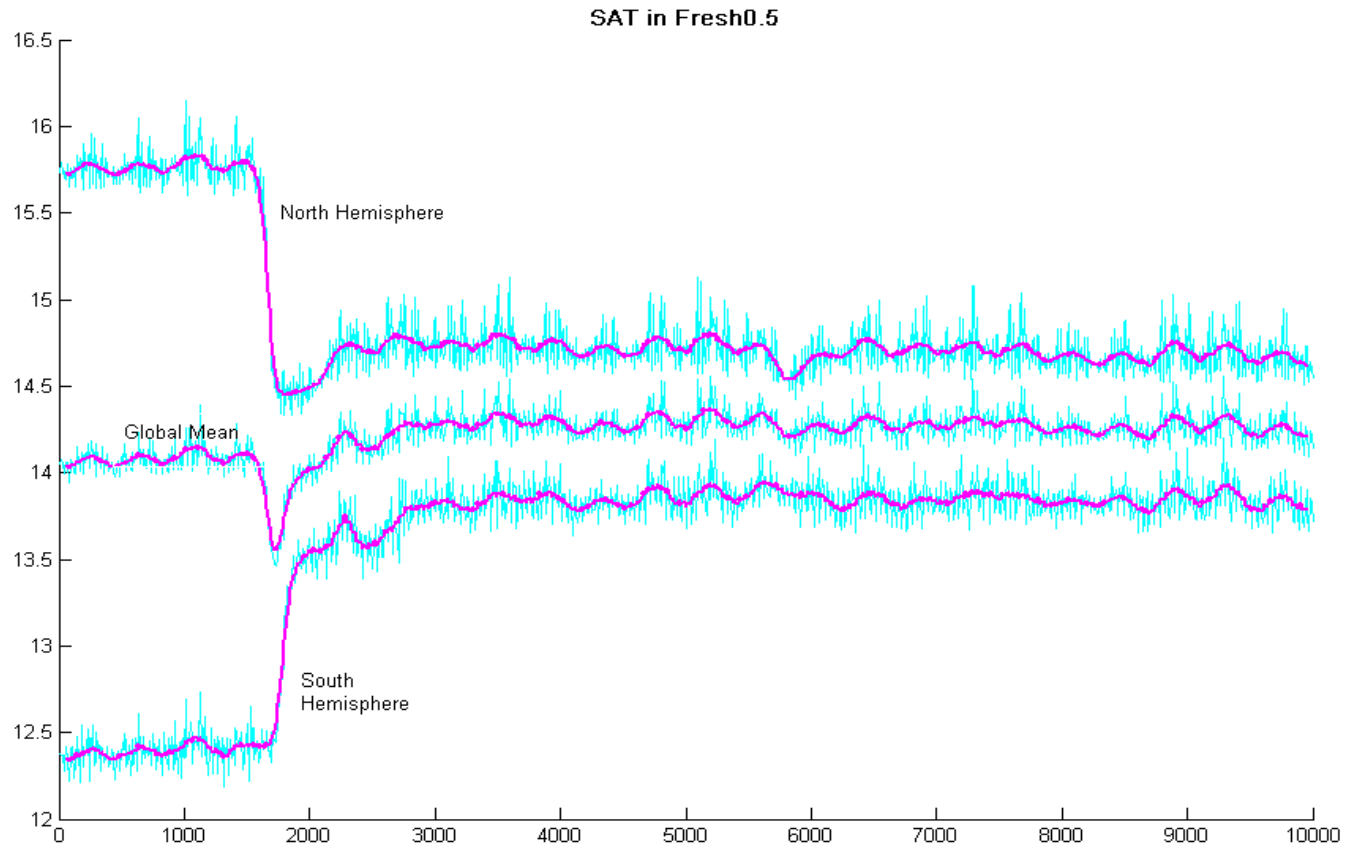
4.2kyr BP



$$1 S_v = 10^6 \text{m}^3/\text{sec}$$

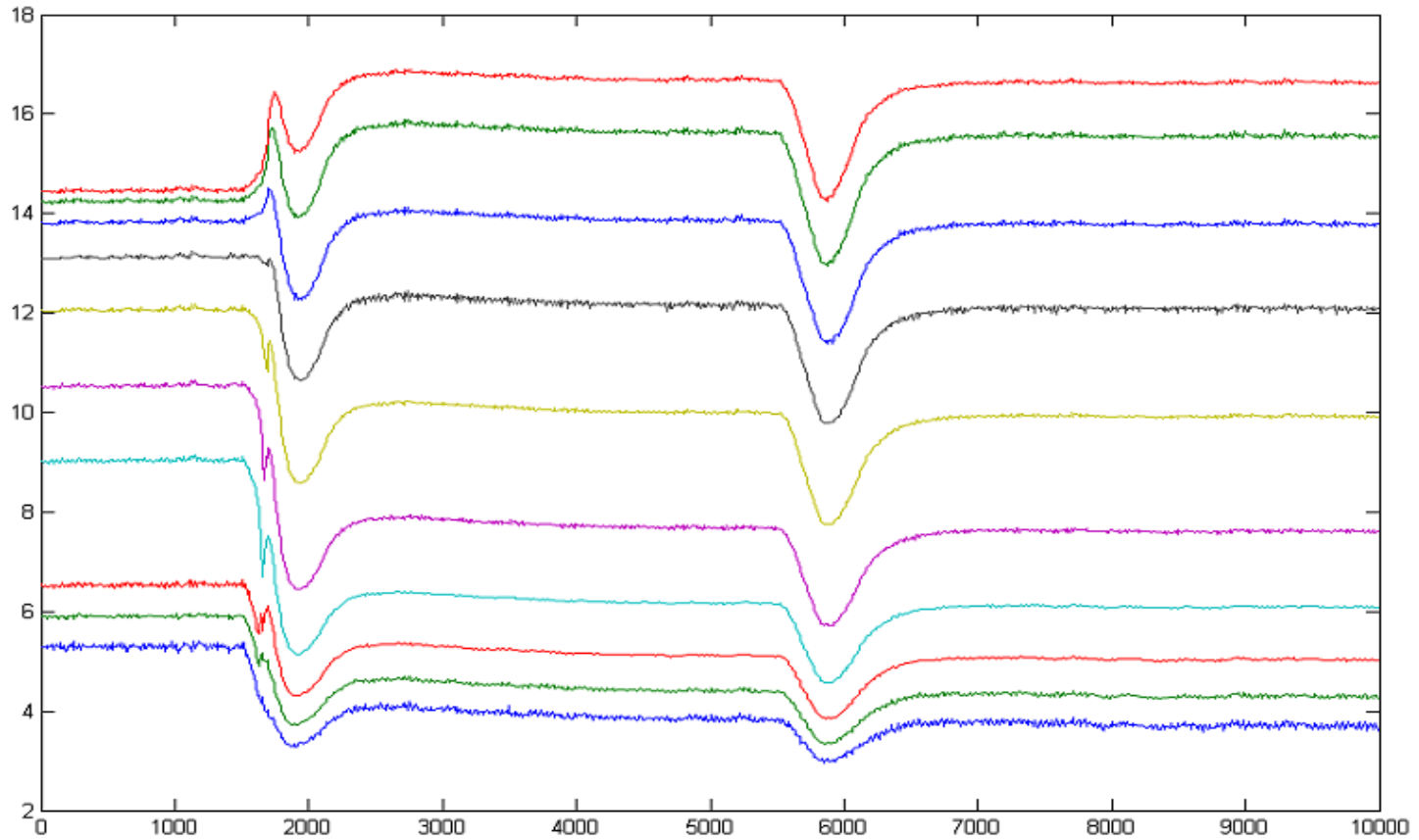


淡水通量對表面氣溫的影響





淡水通量對海水溫度的影響



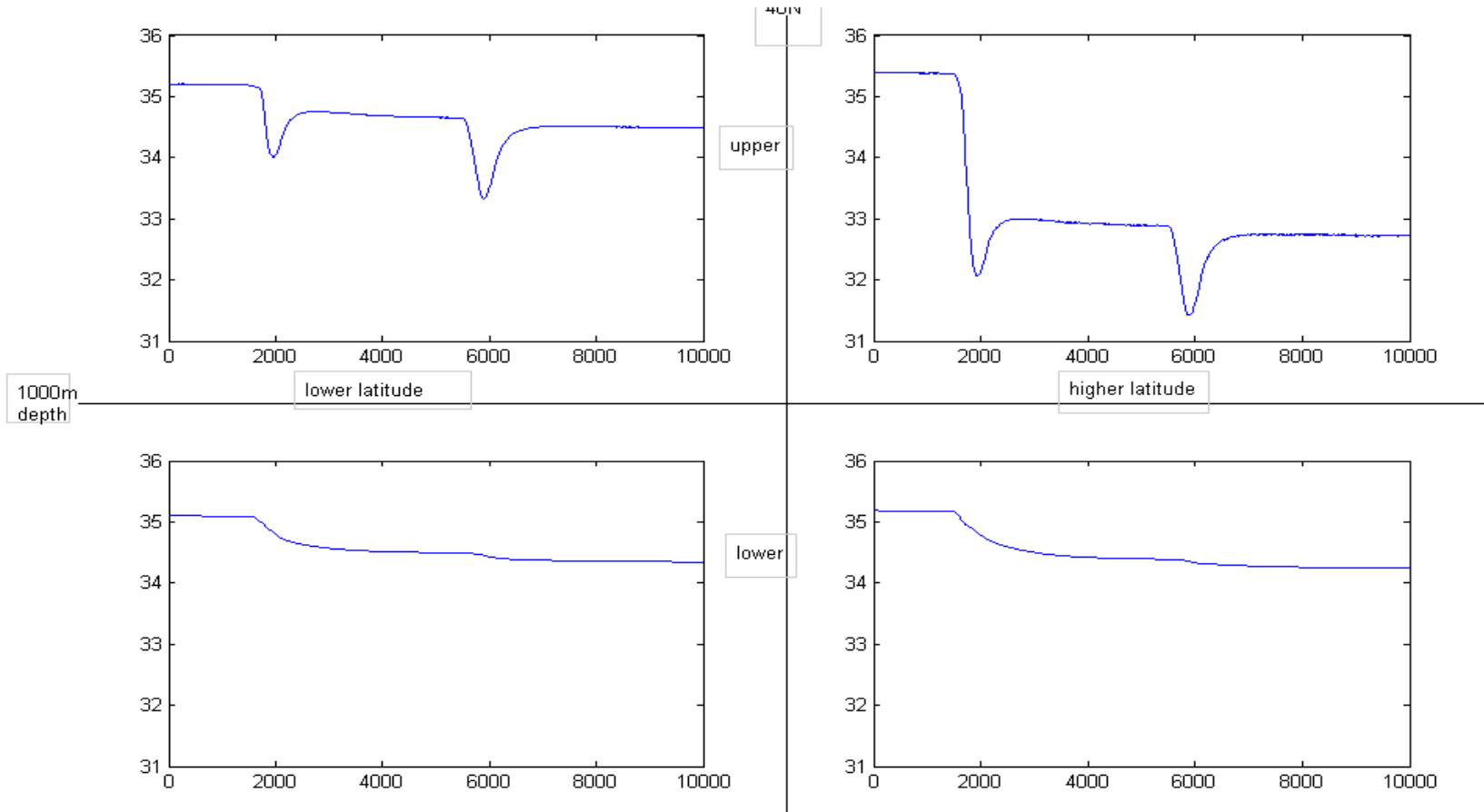
北大西洋上层1000m的平均海温，每条曲线表示一个纬度带，从上到下是从25N-75N



淡水通量對海水鹽度的影響



Salinity Series of the Atlantic





討 論



- 氣候模式系統對北大西洋中高緯度的淡水機制具有顯著響應，可產生全球溫度的突然變化，這可能是冷氣候事件的重要原因之一；
- 但這種響應，海溫的影響明顯大於氣溫；
- 這種對海洋狀況的影響是持續下降；
- 但在一定時間內，氣候系統（包括大氣和海洋）對多次淡水異常的敏感性可能是逐漸減弱的，例如 YD、8.2ka 和4.2ka事件。



個例分析-3：千年氣候模擬試驗



- 氣候模式差異
- 外強迫條件差異
- 外強迫條件對模擬結果有決定性影響
- 模式對外強迫條件回應的敏感性
- 模式與重建結果的一致性問題



模式與強迫條件



■ 氣候模式

(1) 漢堡氣象研究所海氣耦合模式ECHO-G，由大氣環流模型ECHAM4和海洋模式HOPE-G組成，包括了考慮冰蓋的動力、熱力相互作用的海冰模型；

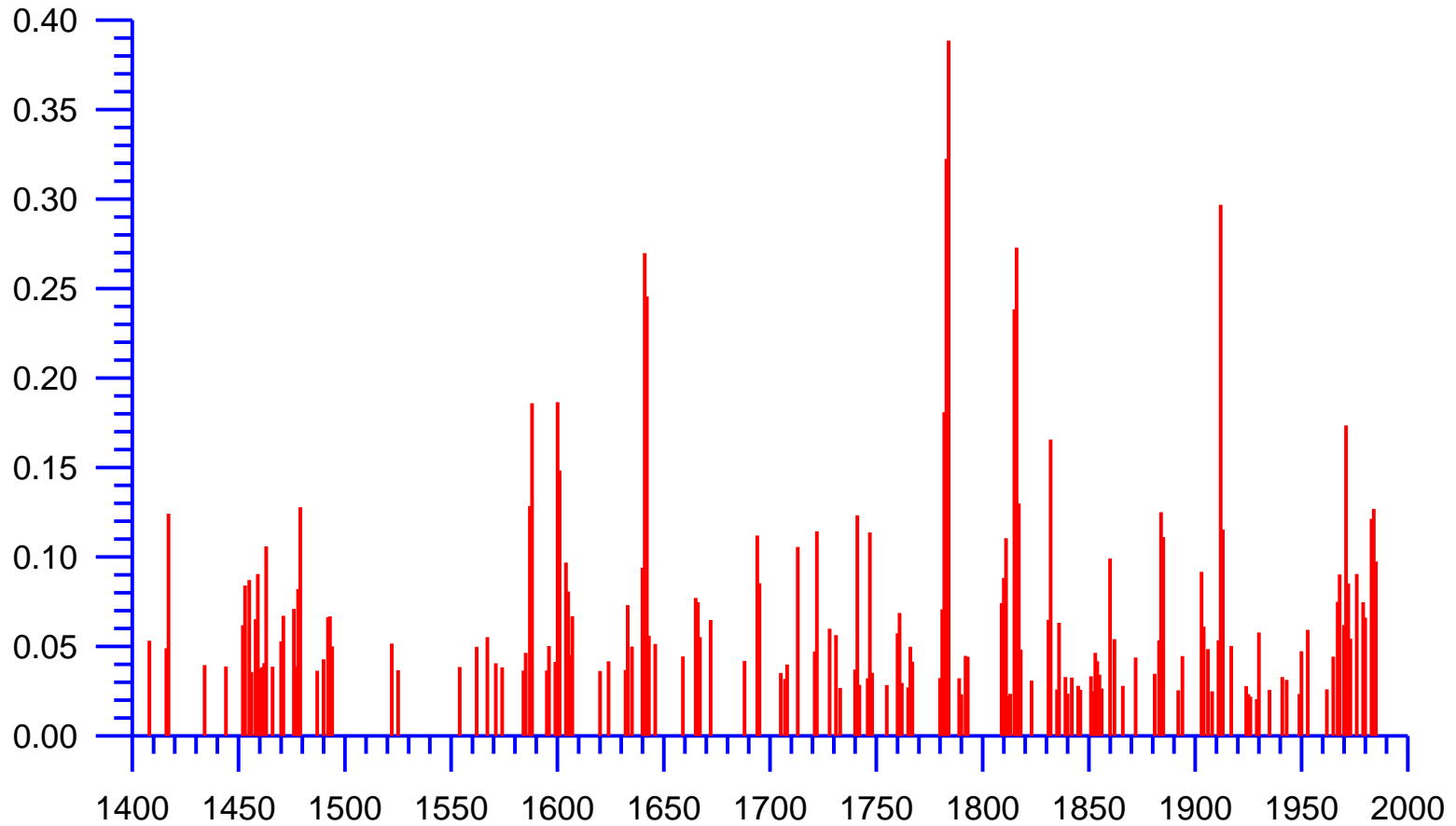
(2) McGill Paleoclimate Model II (EMIC)

■ 強迫條件

太陽輻射、火山灰、 CO_2 、 CH_4



600年來的火山灰光學厚度變化

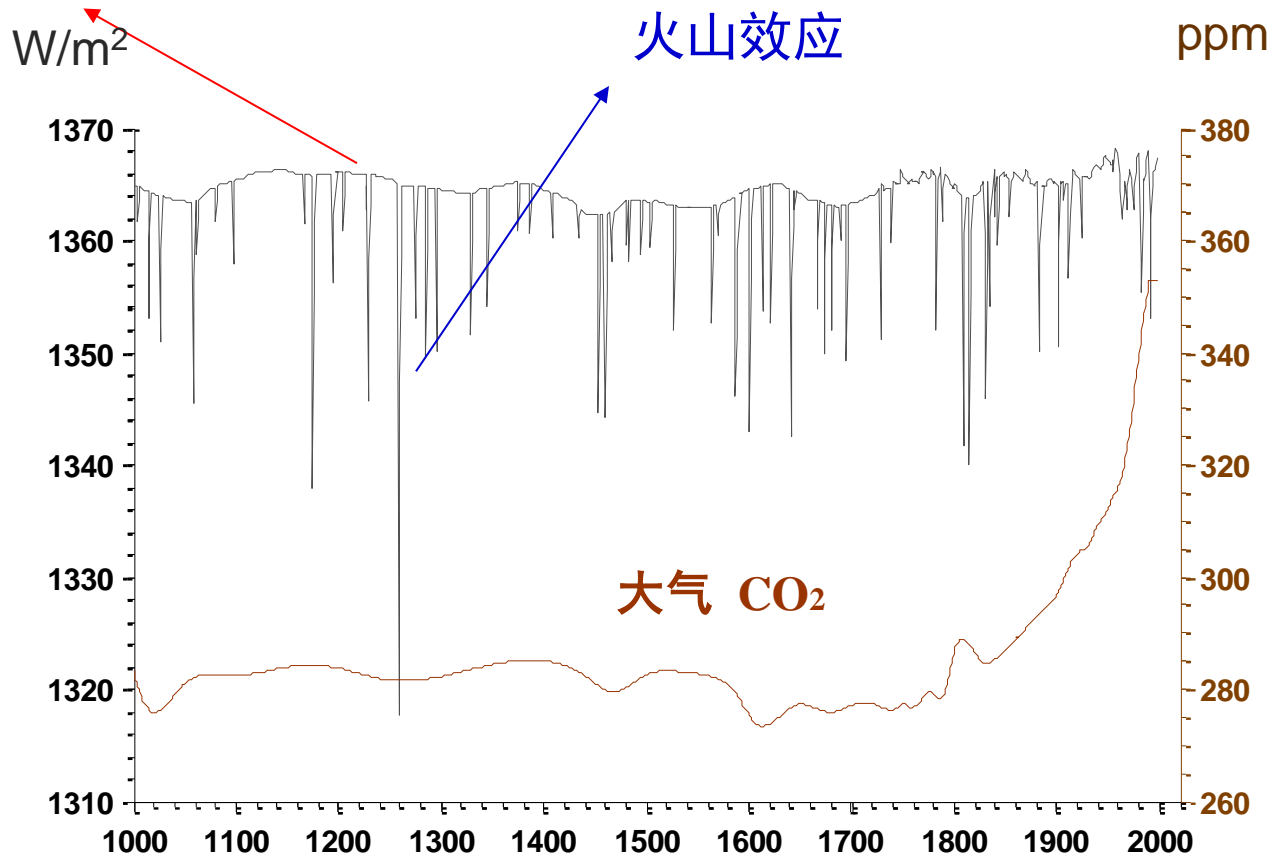




強迫因子



太阳辐射 (Crowley, 2000)





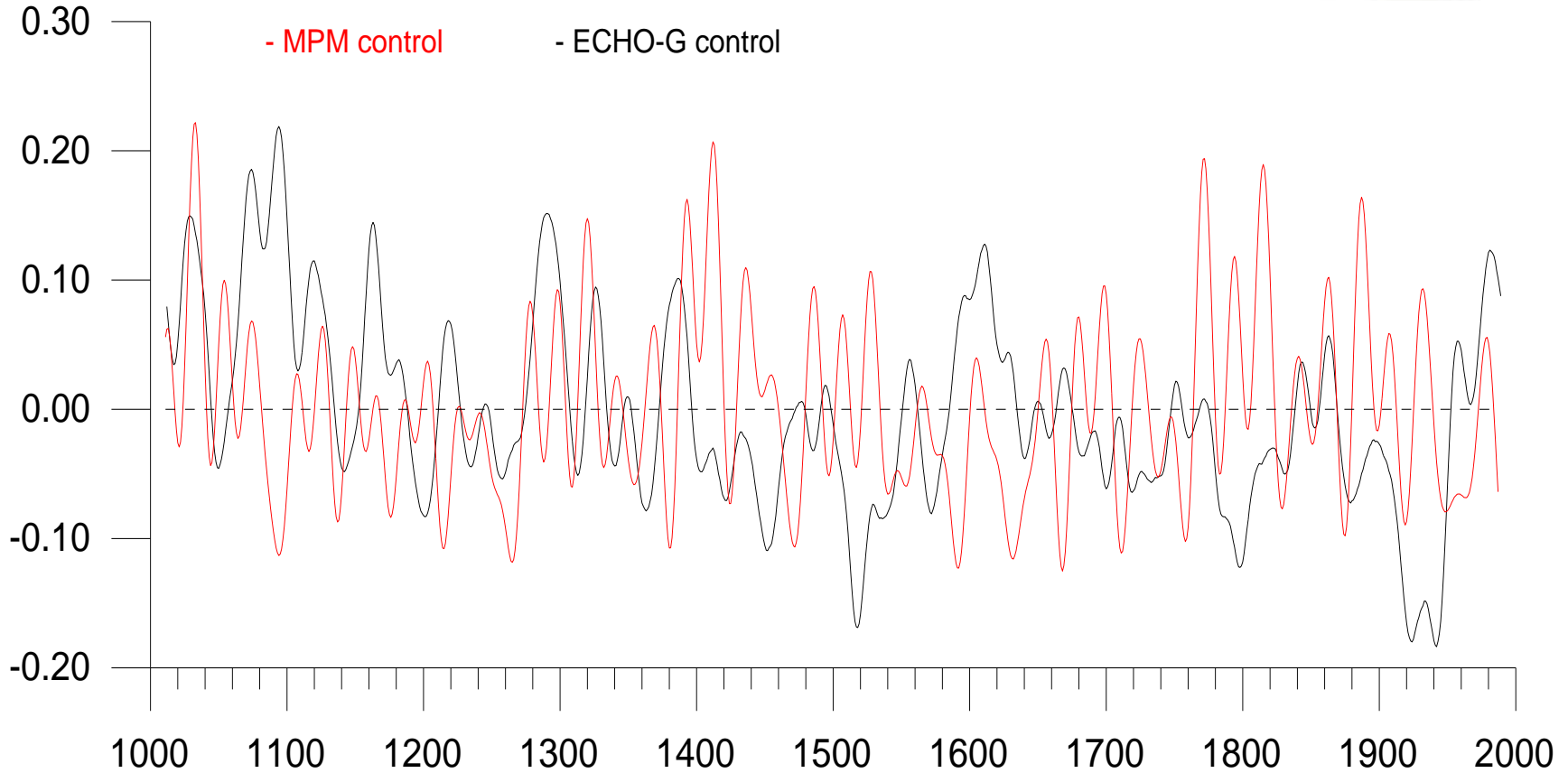
1000年氣候模擬試驗的敏感性



- 過去1000年：**MWP & LIA**
- 中世紀暖期（**MWP**）： 900~1300 AD
- 小冰期（**LIA**）：
1550~1850 AD



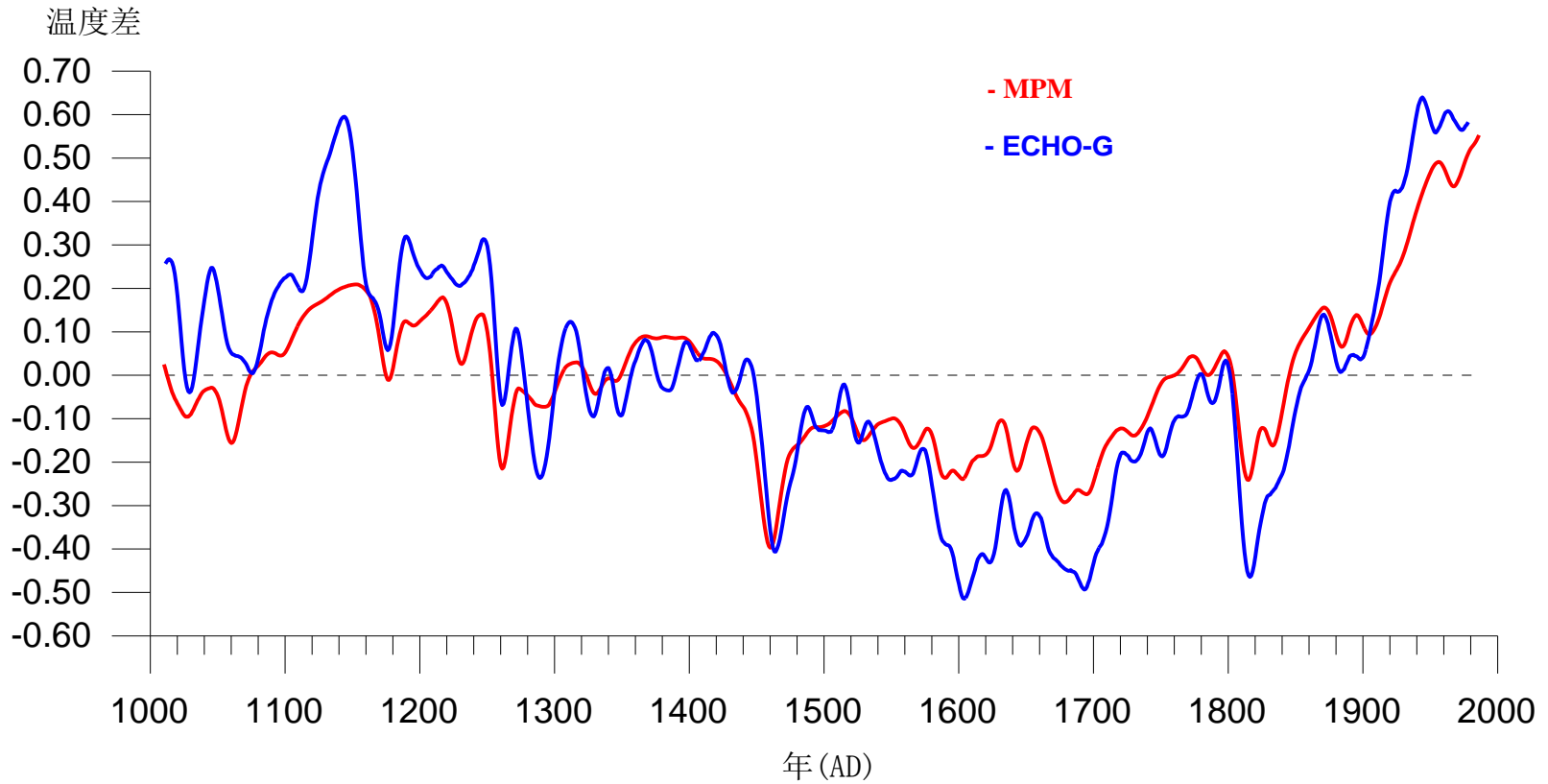
參考試驗-未加任何外強迫



MPM-2 (紅色) 和ECHO-G (黑色) 參考試驗得出的溫度距平
(經Gaussian30年濾波平滑處理)



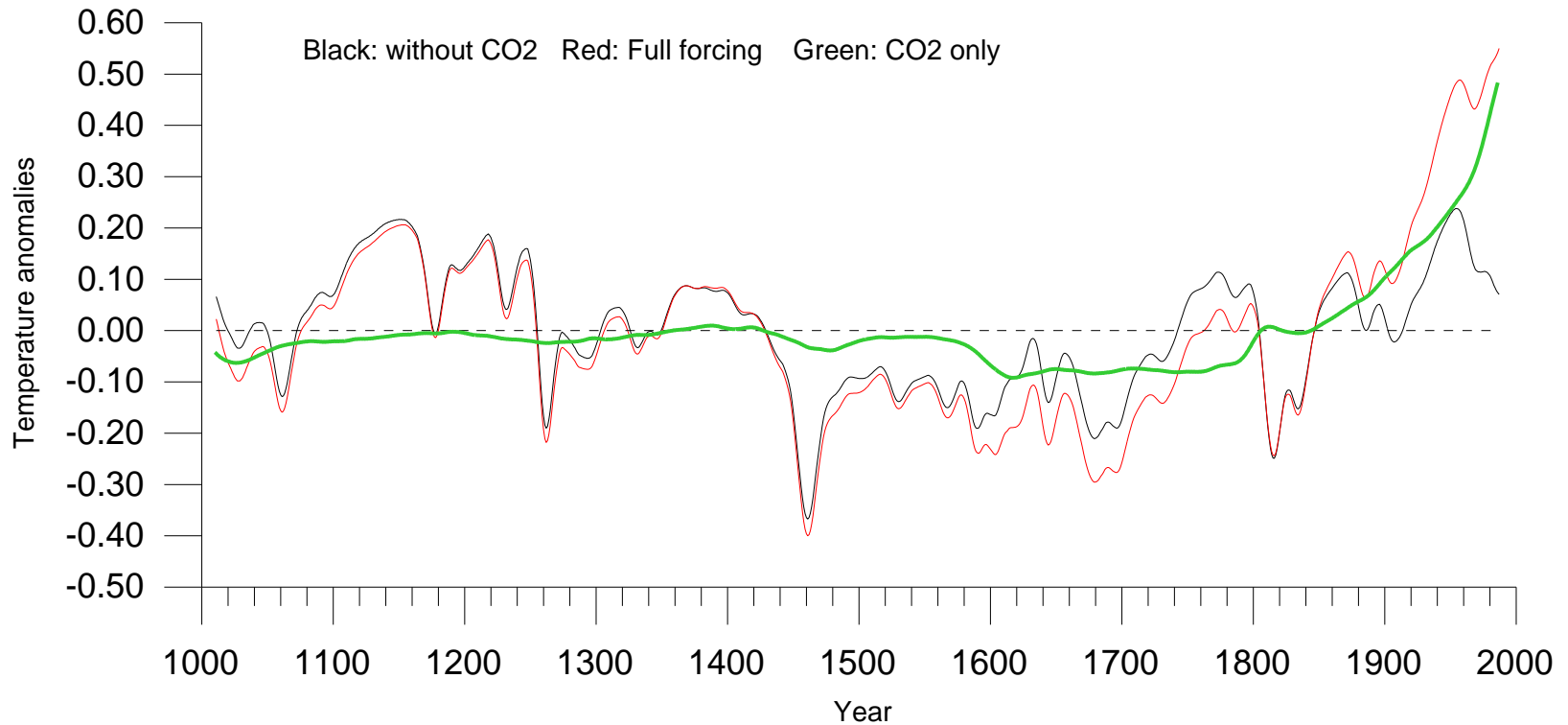
強迫模擬試驗結果：外強迫敏感性比較



MPM-2和ECHO-G模擬的強迫試驗減去參考試驗後的
全球平均溫度變化趨勢（經Gaussian30年濾波平滑處理）



單一因子敏感性：CO₂的影響

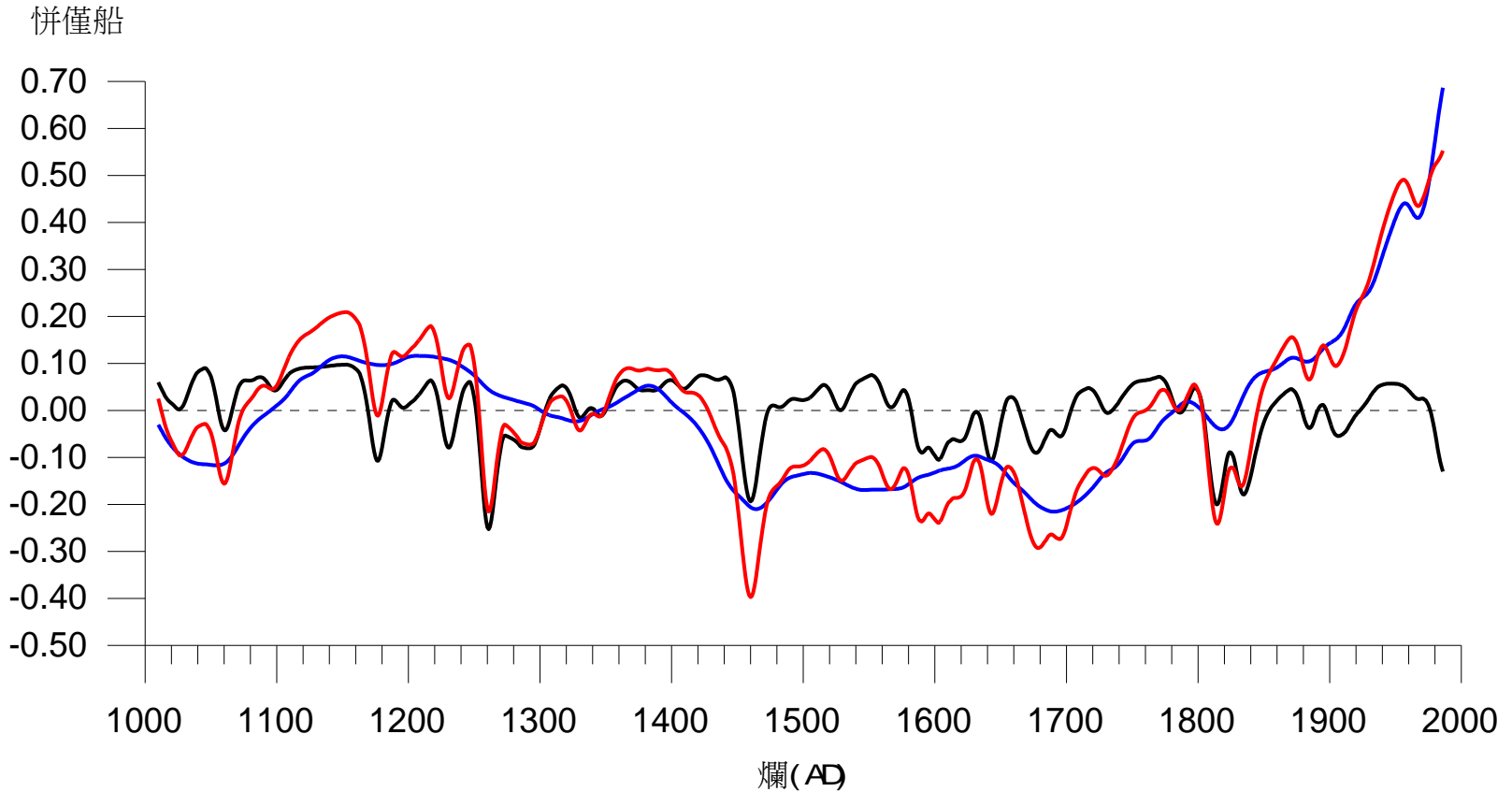


溫度距平變化與CO₂強迫關係的模擬比較（經Gaussian30年濾波平滑處理）

- 黑色：有太陽輻射、火山灰、無CO₂變化試驗與參考試驗之差；
- 紅色：有太陽輻射、火山灰、CO₂變化試驗與參考試驗之差；
- 綠色：只有CO₂變化試驗與參考試驗的差



單一因子敏感性：火山活動的作用

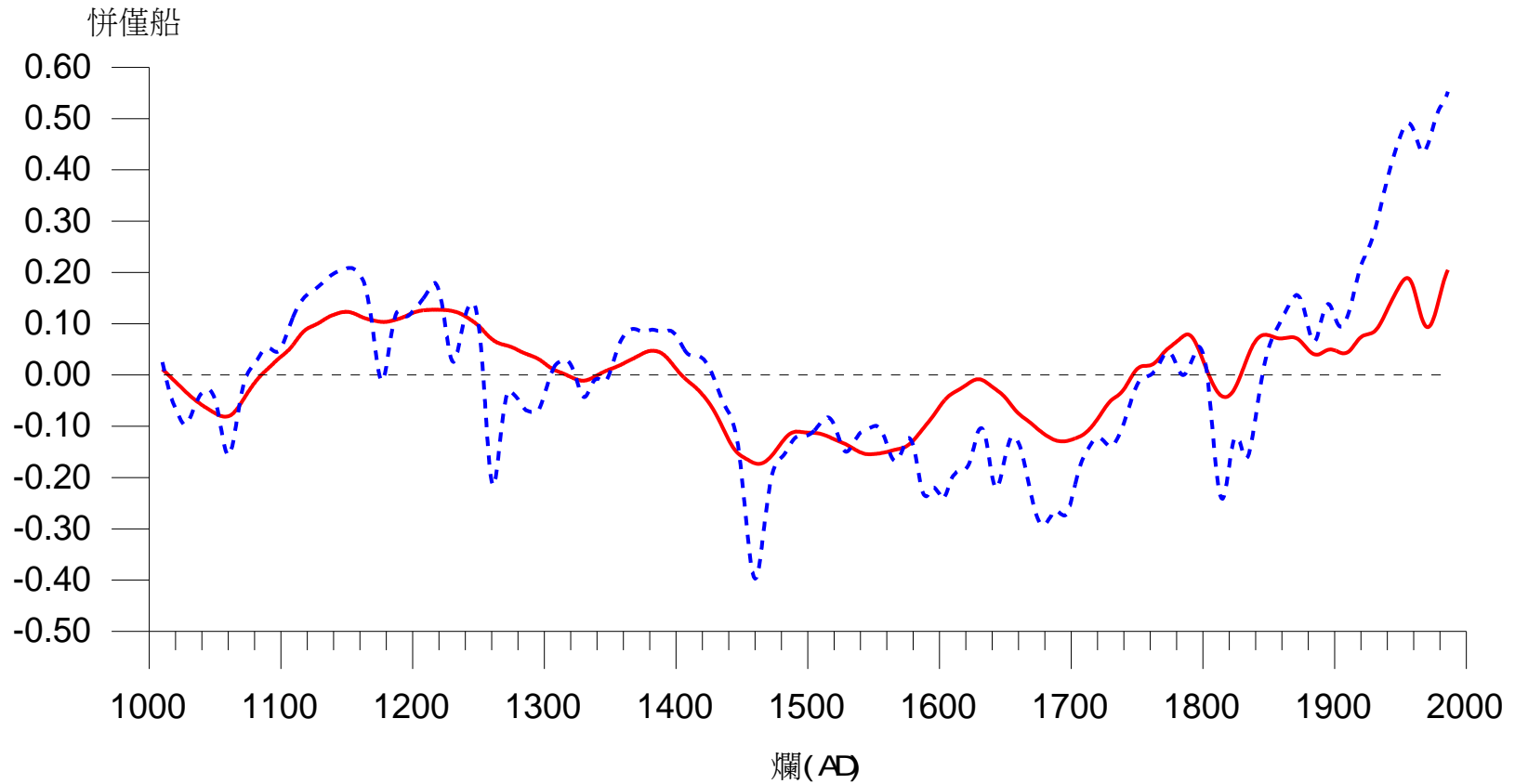


火山活動氣候效應的模擬試驗比較（經Gaussian30年濾波平滑處理）

紅色：完全強迫；藍色：無火山光學效應；黑色：火山光學效應



單一因子敏感性：太陽常數變化影響



太陽活動氣候效應的模擬試驗比較（經Gaussian30年濾波平滑處理）

藍色：完全強迫；紅色：太陽常數變化，其他為常數

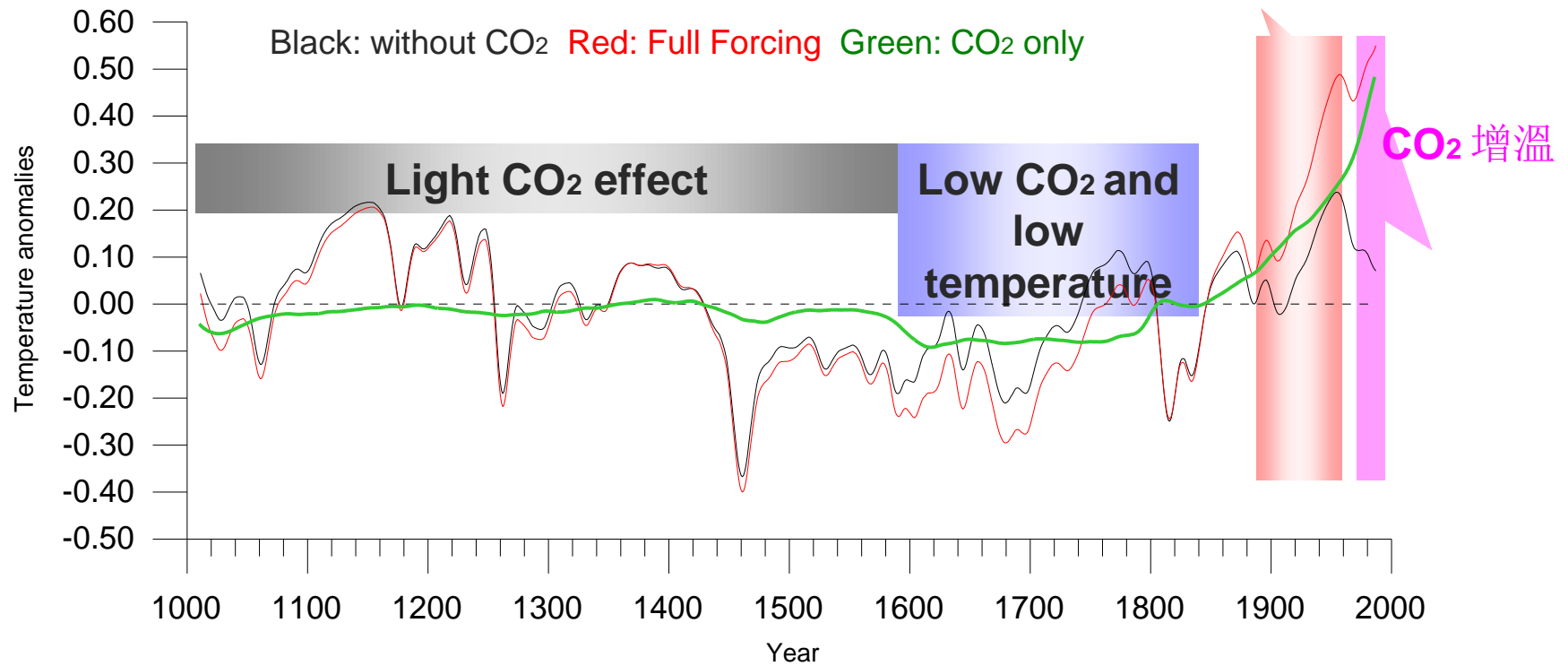


不同時期各因子作用的比較



CO₂ 效應

CO₂ & 太陽輻射





各因子對溫度變化的貢獻



- LIA的形成是太陽活動最小期、火山活動活躍期和CO₂濃度相對低值期共同作用的結果，CO₂的貢獻約占1/3，這與傳統的LIA太陽活動和火山活動決定論有很大差別；
- 強火山活動期均出現顯著降溫，降溫可達0.2℃~0.25℃左右。特別在1980以後出現的火山活動對全球變暖有明顯抑制作用，但這種作用幅度一般不超過0.2℃；
- 太陽常數的變化引起溫度的變化幅度約在-0.20℃~0.20℃之間。在20世紀以前的約900年間，太陽常數的變化是決定全球溫度變化趨勢的主要因子。工業革命以來，CO₂對現代氣候變暖的貢獻迅速增大。



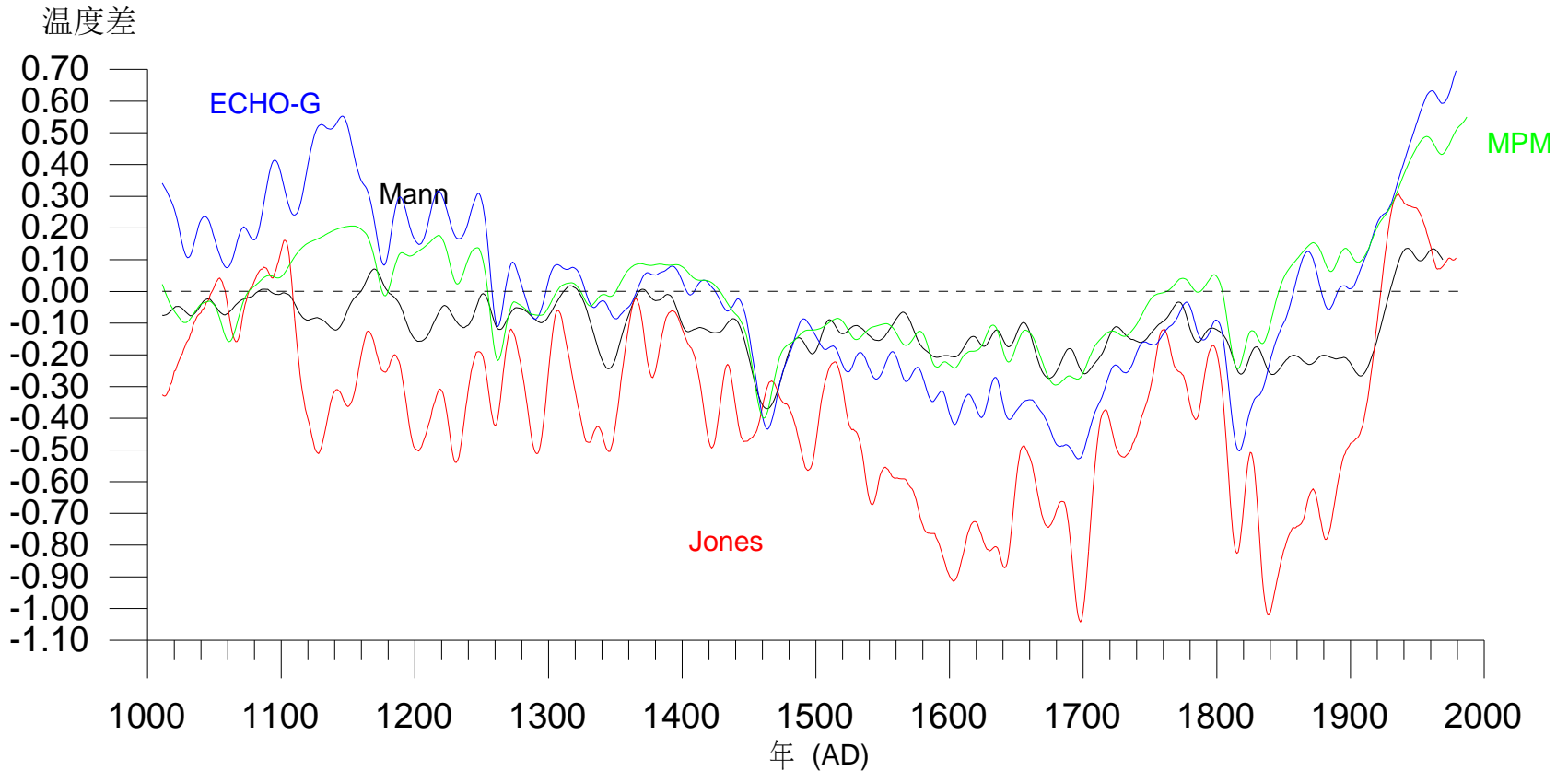
模式模拟與重建溫度的比較



- 全球平均溫度比較
- 中國區域冬半年溫度比較
- 中國區域小冰期年平均溫度比較



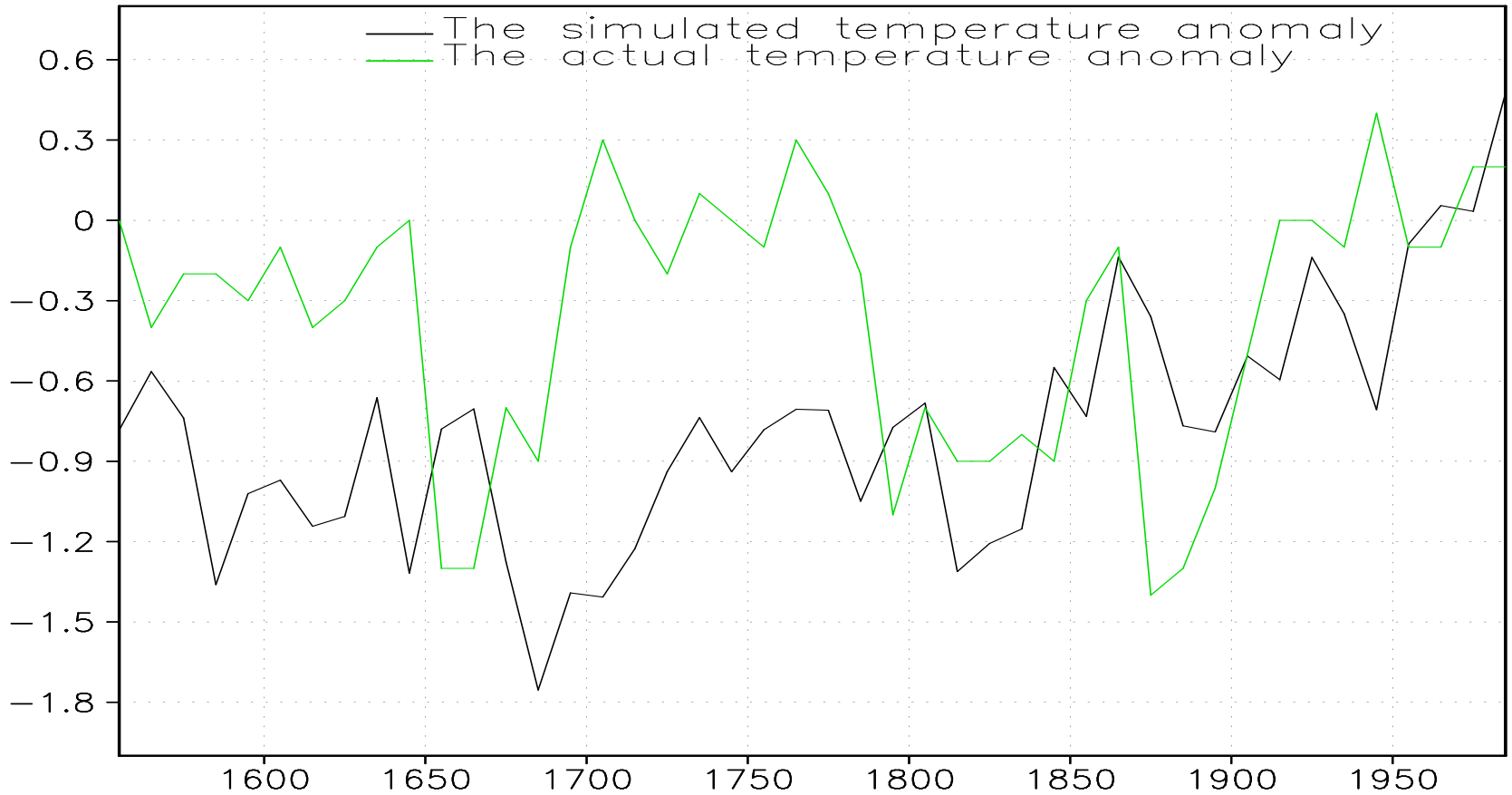
全球平均溫度比較



模式類比溫度距平與重建溫度距平序列的比較（經Gaussian30年濾波平滑處理）
（藍色：ECHO-G，綠色：MPM，黑色：Mann，紅色：Jones）



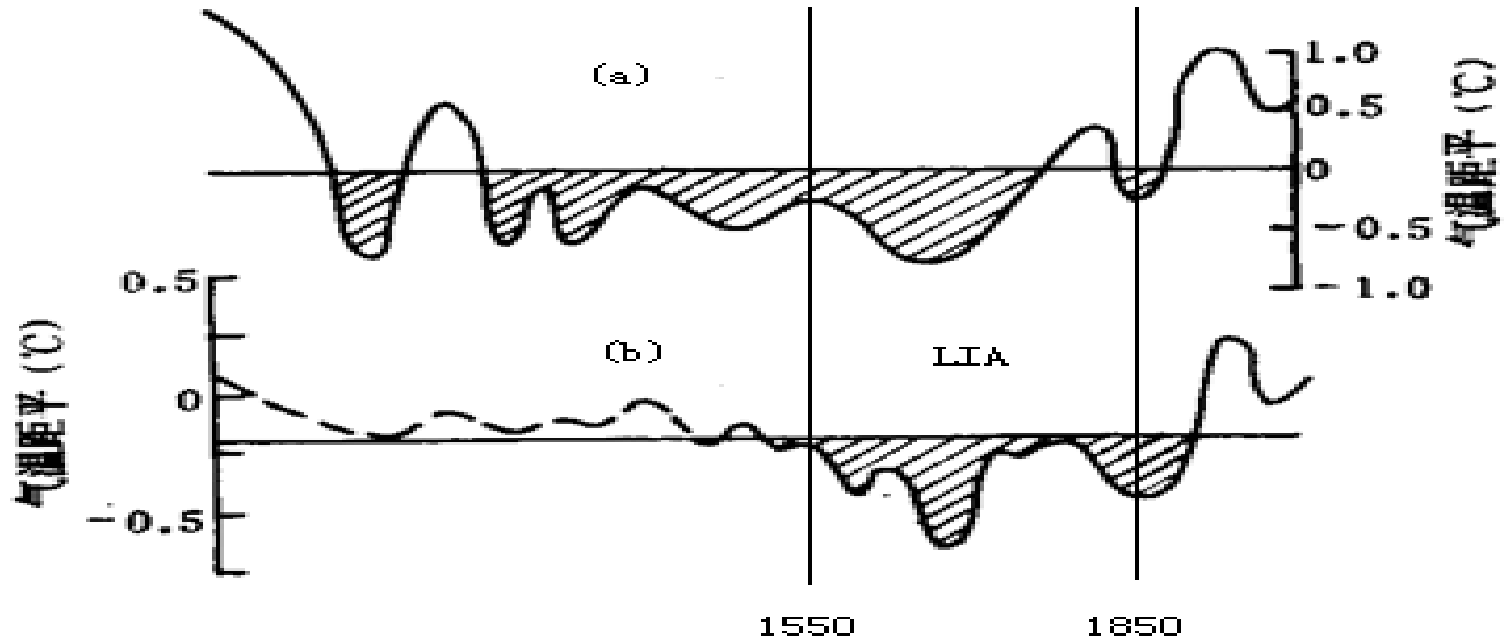
中國東部冬半年溫度的比較



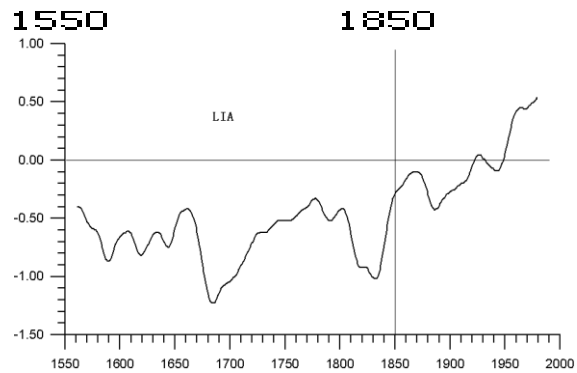
(綠線：引自葛全勝等；黑線：模式結果)



中國小冰期年溫度距平的比較



- (a) 竺可楨
- (b) 王紹武
- (c) 模式





幾點初步認識



- 結果顯示，代用資料的選取、處理和使用方法，氣候模式強迫條件的改變都會對過去氣候要素的重現結果產生顯著影響。
- 代用資料定量化的精細研究：例如樹木生長對降水或溫度的敏感性或生長函數的建立；
- 如何處理多種不同敏感性代用資料的集成應用問題；
- 不同氣候模式對強迫條件回應敏感性的確定與比較；
- 代用資料與模式的比較與集成：單個因素的比較和與機制合理性的結合，盡可能真實地定量重現歷史氣候。



Thank you

