

中華民國第 51 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 地球科學科

第三名

040506

洞穴十字路—揭開東帝汶近萬年的氣候秘辛

學校名稱：臺北市立成功高級中學

作者： 高二 李嘉桐 高二 鄭岱昇 高二 紀威任	指導老師： 謝莉芬
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：石筍、鈾鈦定年、氧同位素

摘要

以東帝汶 Monkey cave 的 MC2 石筍進行鑽孔，拋光，得到各段的石筍粉末後，以鈷釷定年法得知生成年代，並得出石筍 $\delta^{18}\text{O}$ 數值。

東帝汶 Monkey cave 的 MC2 石筍有 81 個鑽孔點， $\delta^{18}\text{O}$ 值介於-4.237 ‰~-2.452 ‰之間， $\delta^{18}\text{O}$ 氧同位素的變動範圍約在 1.8 ‰之間。

MC2 石筍生長時期 13542~10740 年前，即更新世晚期。

東帝汶 MC2 石筍在早期 $\delta^{18}\text{O}$ 較晚期數值較重，而到後期較接近 10740 年前則是 $\delta^{18}\text{O}$ 有一直變輕的趨勢，由此可看出早期雨量較晚期為少，且雨量呈現增加的趨勢，代表溫度上升，上升氣流較強，雨量較多所致。

東帝汶 MC2 石筍和約萬年前中國南京葫蘆洞石筍的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比較，呈現相反的趨勢，與新仙女木事件發生時(12800~11500 年前)，大西洋北部大量融冰注入，而造成暖流無法北上，造成低緯度溫度較高，雨量較多的有關。

壹、研究動機

看完明天過後這部電影之後，就覺得氣候環境變遷對我們人類的影響非常大，氣候可以影響到我們賴以維生的第一級產業，更進一步的牽動著全球貿易及經濟，甚至是影響到我們的生命。

電影裡的情節是影響北半球，讓北半球的溫度降到非常低，因此也產生疑惑，同樣的氣候變遷事件是如何影響到南半球的氣候，而這個情節在地球歷史中也曾經發生過類似的事件，就是所謂的新仙女木事件，所以希望可以了解這個時期的氣候變遷。

高一的地球科學課本中曾經提到岩芯、有孔蟲、樹輪等都是可以用來做為氣候變遷的研究材料，而石筍也是其中之一。由許多資料顯示出，石筍在鈾鈷定年的測定較準確，而且石筍層層堆積的生長方式穩定且緩慢，能看出各層之間氧同位素的差異，所以決定著手研究石筍來觀察氣候變遷。

閱讀完相關資料後，且在 99 年 8 月到東帝汶實際採集石筍標本。希望藉由這些石筍，可以得知在亞洲地區約萬年前的氣候環境變化。

貳、研究目的

1. 得知石筍內的碳氧同位素數值。
2. 以鈾鈷定年得知石筍的年代。
3. 得知亞洲東帝汶約萬年前的氣候環境變遷。
4. 與其他地區的研究結果做比較與統合，得知地球約萬年前的大氣環境的變遷。

參、研究設備及器材

鈾鈷定年：Thermo-Finnigan MC-ICP-MS 多頻道耦合電漿質譜儀。

碳氧同位素 & Hedy Test：Thermo-Finnigan MAT252-IRMS 同位素比例質譜儀，見圖(一)。

鑽孔：鑽孔機具，見圖(二)；鑽孔機，見圖(三)。



圖(一) 進行碳氧同位素和 Hedy Test 的儀器：Thermo-Finnigan MAT252-IRMS。



圖(二) 鑽孔器。



圖(三) 鑽孔機。

肆、研究過程或方法

一、東帝汶的位置與氣候

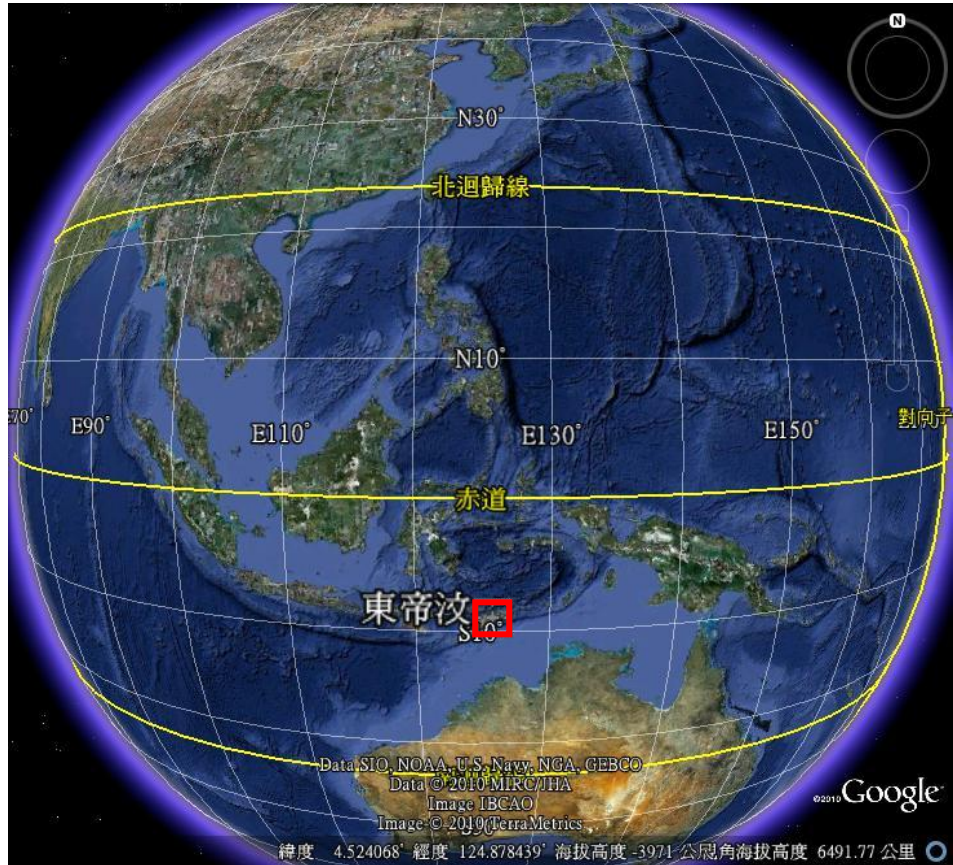
(一) 地理位置

- 1.東帝汶位於南緯 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ，東經 $126^{\circ}\sim 128^{\circ}$ ，見圖(四)。
- 2.標本採集地點 Ossu 位於，南緯 $08^{\circ}47' 10.8''$ ，東經 $126^{\circ}23' 31.1''$ ，見圖(五)。

(二) 氣候

大部地區屬熱帶雨林氣候，平原、谷地屬熱帶草原氣候，年平均氣溫 26°C ，年平均濕度為 70%-80%。年平均降水量 1200-1500 毫米，但地區差異較大：北部沿海地區每年 5 月至 11 月為旱季，12 月至翌年 5 月為雨季，年降水量為 500-1500 毫米，中部山區年降水量為 2500-3000 毫米。

(<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%9D%B1%E5%B8%9D%E6%B1%B6>)。



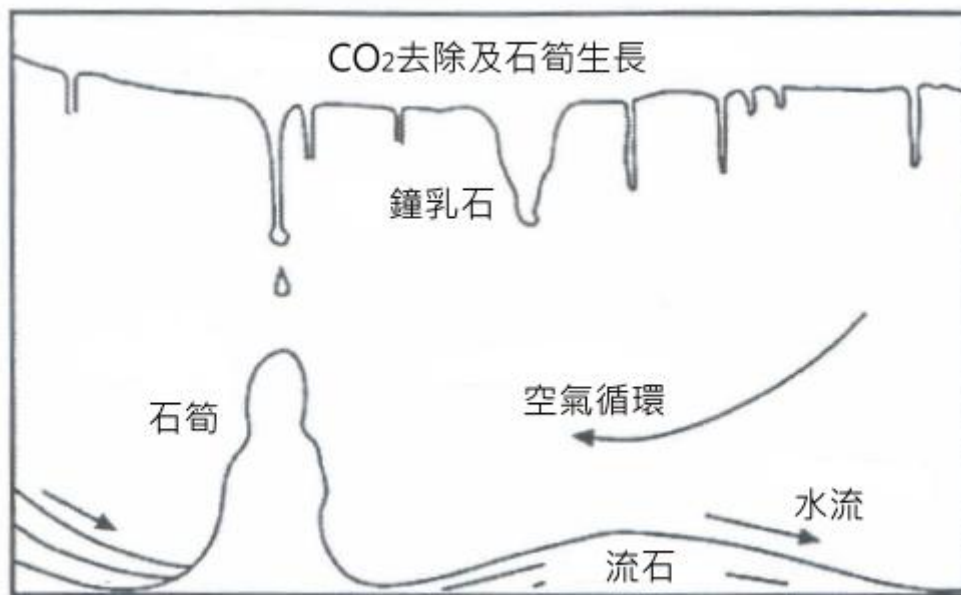
圖(四) 東帝汶位置：位於南緯 8°~10°，東經 126°~128°。(Google Earth)



圖(五) 採樣點 Ossu 位置：南緯 08°47'10.8"，東經 126°23'31.1"。
(Google Earth)

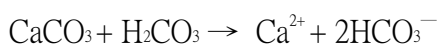
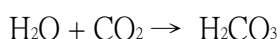
二、石筍

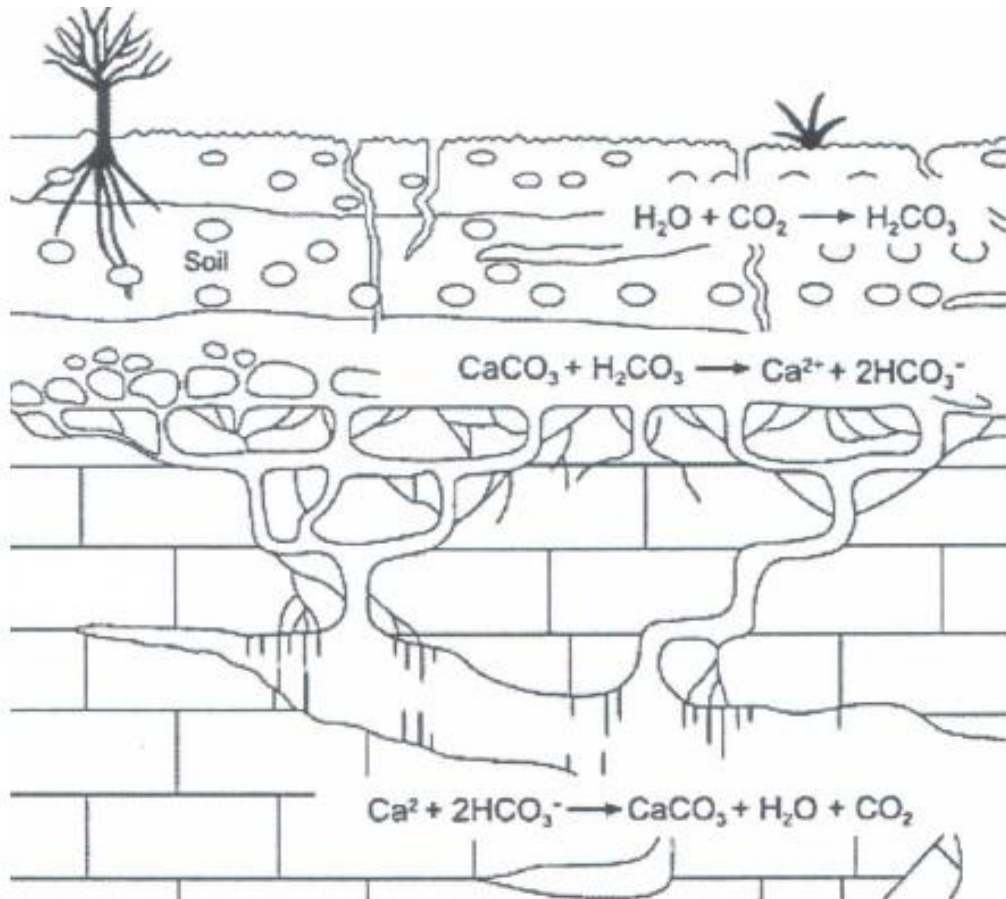
洞穴碳酸鹽是一種陸相沉積物，通常形成於地表下的石灰岩洞穴，常見的有鐘乳石(stalactites)、石筍(stalagmite)與流石(flowstone)等（圖(六)），利用洞穴石筍的優點在於：(1)容易準確定年（如鈾鈷定年）；(2)高解析度分析；(3)分布廣泛，美洲、歐洲、亞洲、大洋洲等皆有石灰岩洞穴；(4)時間跨度較長可達十萬年以上紀錄；(5)在地表下生長屬於封閉性的生長環境，較不易受外界污染，也不容易受到風化侵蝕作用的影響；(6)石筍生長緩慢（鍾瑋琳,2009）。在形成過程中，洞穴滴水在石筍頂部先形成水膜，在逐漸凝結時，有時間序列性的生長。因此石筍能夠清楚地反應環境因子的變化(Fairchild et al.,2006)使得洞穴岩沉積物成為研究古氣候與古環境變遷良好的研究材料。



圖(六) 洞穴碳酸岩環境分布圖。(鍾瑋琳,2009)

石筍能提供古氣候與古環境訊息的因素，主要在於生長過程 CaCO₃中的 C 和 O 受到各組成來源的影響，所以石筍的同位素來源有(1)降雨、(2)土壤中 CO₂的來源、(3)地表植被、(4)碳酸鹽溶解於地下水中與沉澱作用。由圖(七)可看出碳酸鹽洞穴的形成過程，石筍的碳氧同位素組成主要是地下水滲透至土壤中時溶解由植物光合作用在根部呼出的 CO₂以及植物體腐爛釋放出的 CO₂ (Hendy,1971)，當地表水與二氧化碳作用形成碳酸後（H₂O+CO₂→H₂CO₃），再滲透至碳酸鹽地層產生溶蝕作用（CaCO₃+H₂CO₃→Ca²⁺+2HCO₃⁻），而後再與石灰岩發生融解作用（Ca²⁺+2HCO₃⁻→CaCO₃+H₂O+CO₂），形成鐘乳石、石筍、石柱等碳酸鈣沉積物（圖(七)；鍾瑋琳,2009）。





圖(七) 喀斯特地形溶解過程示意圖。(鍾瑋琳,2009)

三、氧同位素的反應機制與影響因素 (鍾瑋琳,2009)

洞穴沉積物是由洞穴滴水中形成，跟 Hendy(1971)同位素平衡分化的條件下：

(1)同一生長層 $\delta^{18}\text{O}$ 值相差不大；(2)碳氧同位素之間無線性關係。

洞穴滴水的氧同位素組成和洞穴中的溫度，是影響石筍氧同位素紀錄的主要原因 (Gascoyne et al.,1992)。

在亞洲季風區，石筍的氧同位素紀錄已被認為是反應夏季季風強度變化、降雨量和溫度變化的代用指標(李紅春等,1997,1998;Wang et al.,2001;Paulsen et al.,2003;Yuan et al.,2004)，尤其當夏季季風強時，氣候將會表現得相對悶暖、潮濕，由於降雨效應導致石筍的氧同位素趨輕變化。當夏季季風減弱時，石筍的氧同位素趨重變化(李紅春等,1997,1998)，因此，在東亞季風區洞穴石筍的氧同位素紀錄，主要反應季風強度和降雨量及溫度的變化(李紅春等,1997,1998;Wang et al.,2001;Paulsen et al.,2003;Yuan et al.,2004)。

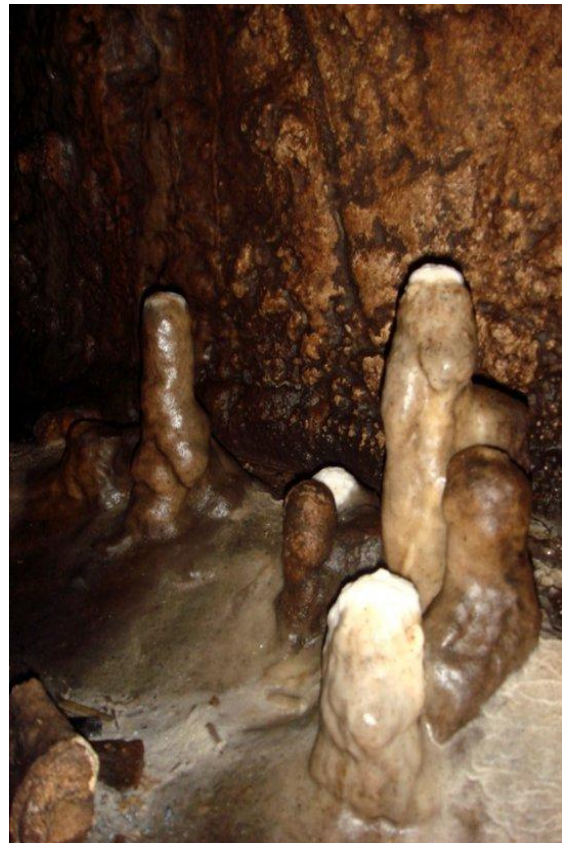
四、標本處理

(一) 石筍樣本採集

1. 本研究選取之石筍標本，係由教授所採集位於東帝汶 Lekiraka Monkey Cave, Wailakurini Mountain, Ossu (南緯 08°47' 10.8"，東經 126°23' 31.1"，見(圖(四)、圖(五))的石筍標本。
2. 99年8月其中兩位同學與教授一起至東帝汶相同地點實際採樣(圖(八)、圖(九))。



圖(八)東帝汶 Monkey Cave 洞外照片
拍攝時間：2010/08/19。



圖(九) 東帝汶 Monkey Cave 內石筍照片
拍攝時間：2010/08/21。

(二) 樣本處理：切片、拋光、氧同位素與鈾鈷定年前處理

- 1.標本沿生長軸切成兩半，再將其中一部分沿生長軸切成兩半，得四分之一的標本。



圖(十) 切割石筍所使用的器材。

- 2.利用高速旋轉的細砂紙，反覆磨擦有紋路那面的石筍切片進行拋光，須有連續水流降溫及帶走磨掉的粉末。



圖(十一) 進行石筍拋光。



圖(十二) 石筍切片完成圖。

3.鑽孔於頂部跟底部(初步的氧同位素和碳同位素的測定)

- (1)沿石筍生長軸垂直剖面鑽取粉末，Monkey Cave 石筍中央生長軸約 9cm，每 1mm 取一樣本粉末，見圖(十三、十四)。
- (2)樣本粉末取樣完成後，分別取約 0.05mg 置入專用小玻璃錐形容器中。



圖(十三) 進行石筍鑽孔。



圖(十四) 石筍樣本比例尺及鑽孔位置：黑線所指的位置為鑽孔位置，水平橫線間距為 3mm。(右邊為實驗材料)

4. 鈾鈷定年分析

- (1) 將石筍沿中央生長軸平行剖面鑽取粉末樣品各約 0.1 克。
- (2) 粉末樣本取樣完成之後倒進鐵氟龍燒杯中秤重。
- (3) 加入純水後再加入 14N 的硝酸數滴溶解標本進行消化步驟。
- (4) 加入適當 ^{229}Th - ^{233}U - ^{236}U spike 記錄重量，而後加入 10 滴過氯酸後，鐵氟龍容器不加蓋子置於加熱板烤乾(溫度約 250-270°C)，約半小時左右。
- (5) 確定乾燥後，加入 2N 鹽酸(約繞燒杯內緣一圈的量)，固體溶解後倒入離心管，加入 3 滴氧化鐵，並緩慢滴入氨水(約十滴內)，直至有橘色氫氧化鐵沉澱物產生，而後將標本進行離心。
- (6) 離心後分離上層液體，而後使用去離子水清洗，在離心重複此步驟三次(離心速度約 3000rpm，每次離心時間約 6 分鐘)。
- (7) 離心完成後，將沉澱物留下進行純化步驟，將沉澱物加入 10 滴 14N 的硝酸溶解後，倒回原來的鐵氟龍容器中，加入 2 滴過氯酸後，置於加熱板上烤乾。
- (8) 加入 14N 硝酸並烤乾，重複三次，再加 10 滴 7N 硝酸後，準備倒入陰離子交換樹脂管柱。
- (9) 管柱清洗：管柱中依序加入各約 1ml 的 6N 鹽酸、純水、7N 硝酸。
- (10) 標本過管柱：將標本導入管柱後，依序將 7N 硝酸約 2.5ml 加入管柱中去除鐵後，加入約 1ml 的 6N 鹽酸，管柱中的溶液滴入鐵氟龍燒杯收集鈷元素，再加入去離子水收集鈾元素。
- (11) 將收集好的鈾鈷元素個別加入 0.1ml 過氯酸，烘乾後加入 1 滴 14N 硝酸再烘乾，重複 3 次。
- (12) 將收集完成的鈾鈷元素，加入含 0.05N 氫氯酸的 1% 硝酸。
- (13) 標本送教授實驗室多頻道耦合電漿質譜儀 MC-ICP-MS 儀器，進行定年測定。

5. 碳氧同位素原理與分析

- (1) 沿石筍生長軸垂直剖面鑽取粉末，Monkey Cave 石筍中央生長軸約 9cm，每 1mm 取一樣本粉末，樣本粉末取樣完成後，分別取約 0.05mg 置入專用小玻璃錐形容器中，而後送進全自動碳酸鹽進樣器進行測定。
- (2) 粉末樣本在恆溫 70°C 下，以自動針頭滴入 5 滴濃度 100% 的磷酸所釋放出的二氧化碳氣體以穩定同位素質譜儀，進行碳氧同位素測定分析，過程採用美國國家標準局碳酸鹽標準碳酸鈣樣品 NBS-19 作為標準對比值。

$$\delta^{18}\text{O} = -2.2\text{‰PDB} \quad \delta^{13}\text{C} = 1.97\text{‰PDB}$$

$$(3) \text{公式：} \delta = [(R - R_{\text{std}}) / R_{\text{std}}] \times 1000\text{‰}$$

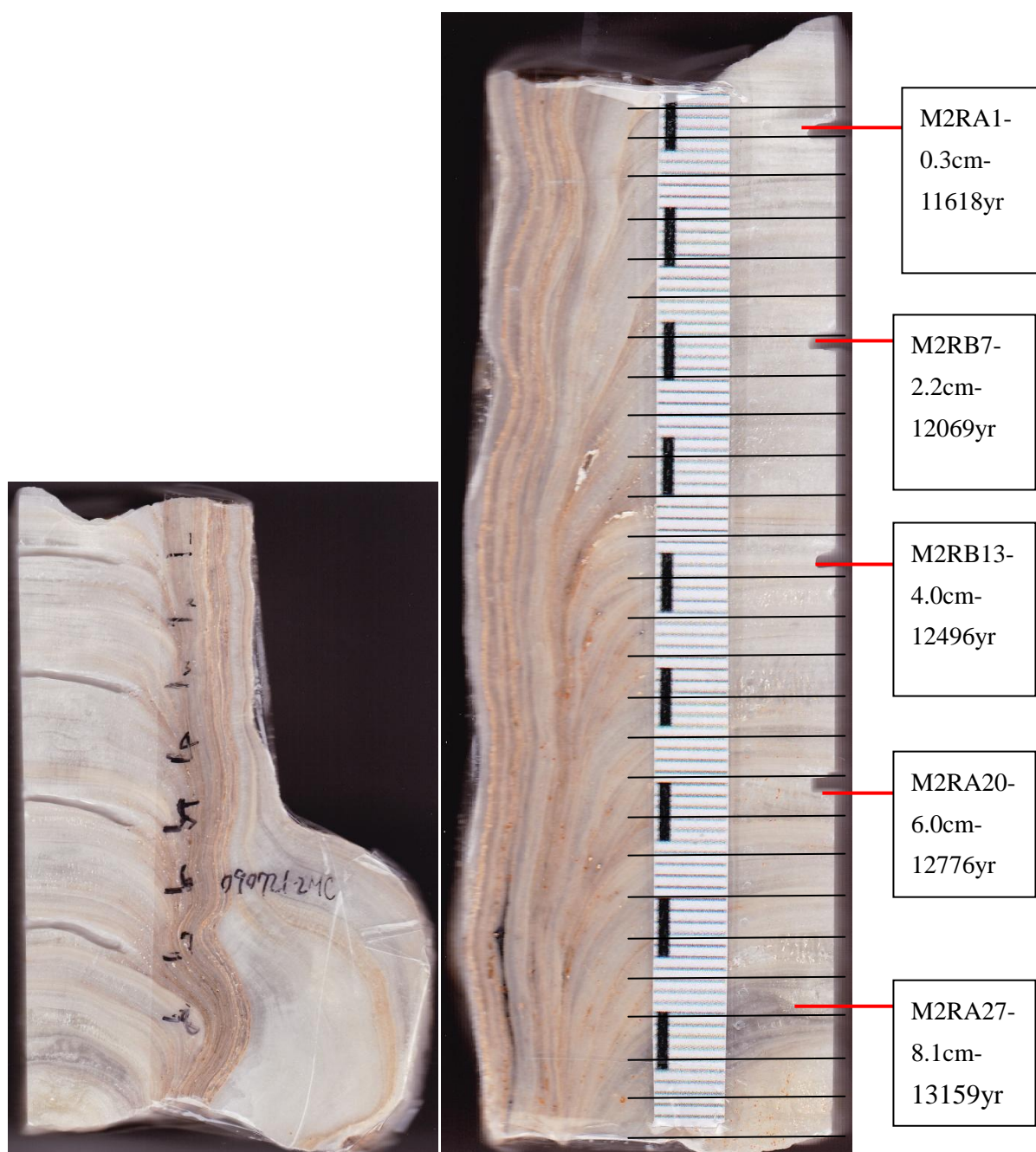
6. Hendy test

- (1) 為了要檢測在同一段時間所獲得的訊號是否受到汙染及確定它的可信度。
- (2) 在距離中心軸左右每邊 0.3 公分各取 4 個取樣點，總過每層共 8 個取樣點。
- (3) 距離頂部 0.8 公分、2 公分、4 公分、6 公分以及 7.7 公分進行上述(2)的步驟。
- (4) 假如每層取樣點的變動範圍在千分之一以內，就可以確定所取得的數值是可信的。

伍、 研究結果

(一) 石筍生長剖面描述

從東帝汶 Ossu 之 Wailakurini Mountain 的 monkey cave(lekiraka cave)得到的石筍 MC2 的生長軸剖面明顯看出左側有明顯間隔的深淺紋理，右側有乳白色的皺摺橫紋，大多為白色碳酸鈣的沉澱（圖十四、十五）。



(圖十五) 石筍樣本比例尺、鑽孔位置與定年資料。黑線所指的位置為鑽孔位置，並且附上測得的年代，氧同位素數值請見表(一)。水平橫線間距為 3mm。(右邊為實驗材料)

(二) 氧同位素分析

此次實驗取得到的鑽孔點有 81 個。表(一)和圖(十五)為 Monkey cave(lekiraka cave)此 MC2 石筍的鑽孔點距離頂部位置、與定年資料，表(一)也包括了氧同位素的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

表(一) 東帝汶 Monkey cave 石筍 MC2 鑽孔點距離頂部位置、標本
氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值與鈾鈷定年的結果。

Sample ID	Age(yr B.P.)	depth(cm)	$\delta^{18}\text{O}$
M2RD1	10740	0	-3.858
M2RD2	11033	0.1	-4.033
M2RD3	11325	0.2	-4.201
M2RA1	11618	0.3	-3.972
M2RB1	11642	0.4	-3.900
M2RC1	11665	0.5	-3.941
M2RA2	11691	0.6	-3.972
M2RB2	11713	0.7	-4.237
M2RC2	11737	0.8	-3.507
M2RA3	11764	0.9	-3.249
M2RB3	11784	1	-3.760
M2RC3	11808	1.1	-3.624
M2RA4	11838	1.2	-4.007
M2RB4	11855	1.3	-3.727
M2RC4	11879	1.4	-3.929
M2RA5	11911	1.5	-3.93
M2RB5	11926	1.6	-3.885
M2RC5	11950	1.7	-3.523
M2RA6	11984	1.8	-3.523
M2RB6	11998	1.9	-3.837
M2RC6	12021	2	-4.125
M2RA7	12057	2.1	-4.128
M2RB7	12069	2.2	-3.998
M2RC7	12093	2.3	-4.049
M2RA8	12130	2.4	-4.068
M2RB8	12140	2.5	-3.785
M2RC8	12164	2.6	-4.020
M2RA9	12203	2.7	-4.067

M2RB9	12211	2.8	-4.104
M2RC9	12235	2.9	-4.037
M2RA10	12277	3	-3.846
M2RB10	12282	3.1	-3.858
M2RC10	12306	3.2	-3.801
M2RA11	12350	3.3	-3.699
M2RB11	12354	3.4	-3.765
M2RC11	12377	3.5	-3.899
M2RA12	12423	3.6	-4.128
M2RB12	12425	3.7	-4.208
M2RC12	12449	3.8	-3.800
M2RA13	12496	3.9	-3.524
M2RB13	12496	4	-3.544
M2RC13	12510	4.1	-3.611
M2RA14	12536	4.2	-3.096
M2RB14	12538	4.3	-3.424
M2RC14	12552	4.4	-3.713
M2RA15	12576	4.5	-3.319
M2RB15	12580	4.6	-3.075
M2RC15	12594	4.7	-3.297
M2RA16	12616	4.8	-3.633
M2RB16	12622	4.9	-3.563
M2RC16	12636	5	-3.837
M2RA17	12656	5.1	-2.841
M2RB17	12664	5.2	-3.529
M2RC17	12678	5.3	-3.570
M2RA18	12696	5.4	-3.311
M2RB18	12706	5.5	-3.531
M2RC18	12720	5.6	-2.840
M2RA19	12736	5.7	-2.983
M2RB19	12748	5.8	-3.086
M2RC19	12762	5.9	-3.366
M2RA20	12776	6	-3.157
M2RB20	12794	6.1	-3.375
M2RC20	12812	6.2	-3.770
M2RA21	12831	6.3	-3.432

M2RB21	12849	6.4	-2.959
M2RC21	12867	6.5	-2.452
M2RA22	12885	6.6	-3.533
M2RB22	12904	6.7	-3.912
M2RC22	12922	6.8	-2.984
M2RA23	12940	6.9	-3.238
M2RB23	12958	7	-3.254
M2RC23	12977	7.1	-3.193
M2RA24	12995	7.2	-2.761
M2RB24	13013	7.3	-2.875
M2RC24	13031	7.4	-2.981
M2RA25	13050	7.5	-3.313
M2RB25	13068	7.6	-3.739
M2RC25	13086	7.7	-3.470
M2RA26	13104	7.8	-2.961
M2RB26	13123	7.9	-3.088
M2RC26	13141	8	-2.973
M2RA27	13159	8.1	-2.957
M2RB27	13214	8.2	-3.026
M2RC27	13244	8.3	-3.269
M2RD4	13287	8.4	-2.929
M2RB28	13378	8.5	-3.044
M2RC28	13372	8.6	-3.295
M2RD5	13414	8.7	-2.792
M2RB29	13542	8.8	-3.018
M2RC29	13499	8.9	-3.132
M2RC30	13542	9	-2.705

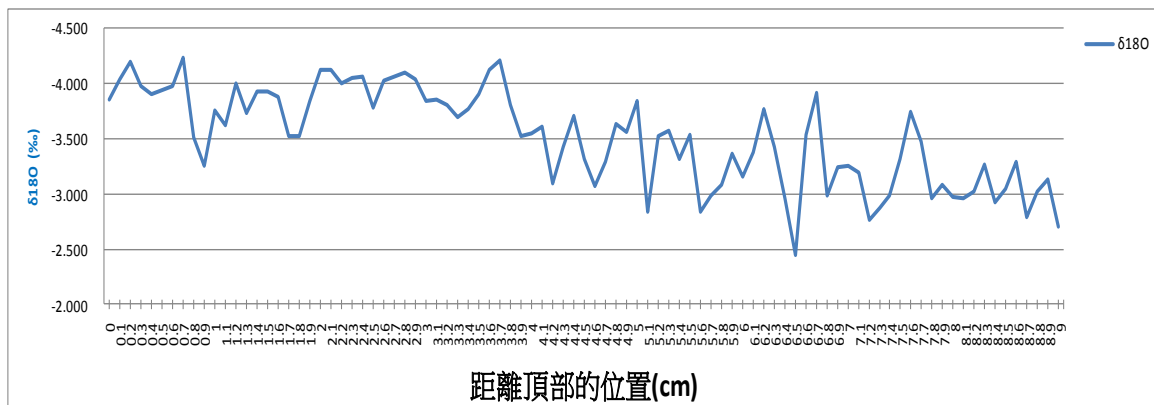
由圖(十六)Monkey cave(lekiraka cave)MC2 石筍的距離頂部位置與氧同位素的分析圖，可得知 $\delta^{18}\text{O}$ 值介於-4.237 ‰~-2.452 ‰之間，底部的同位素較頂部重約 2 ‰，距離頂部 0~4cm 之間的氧同位素有六個極輕值，分別為-4.201 ‰(0.2cm)、-4.237 ‰(0.7cm)、-4.125 ‰(2.0cm)、-4.128 ‰(2.1cm)、-4.104 ‰(2.8cm)、-4.208 ‰(3.7cm)，因此可看出氧同位素有變輕的趨勢。另在 4~9cm 之間有四個極重值-2.452 ‰(6.5cm)、-2.761 ‰(7.2cm)、-2.792 ‰(8.7cm)、-2.705 ‰(9.0cm)，因此可看出氧同位素有變重的趨勢。 $\delta^{18}\text{O}$ 氧同位素的變動範圍約在 1.8 ‰之間。

MC2 石筍生長時期距今 13542~10740 年前，即更新世晚期（表(一)、圖(十七)）。

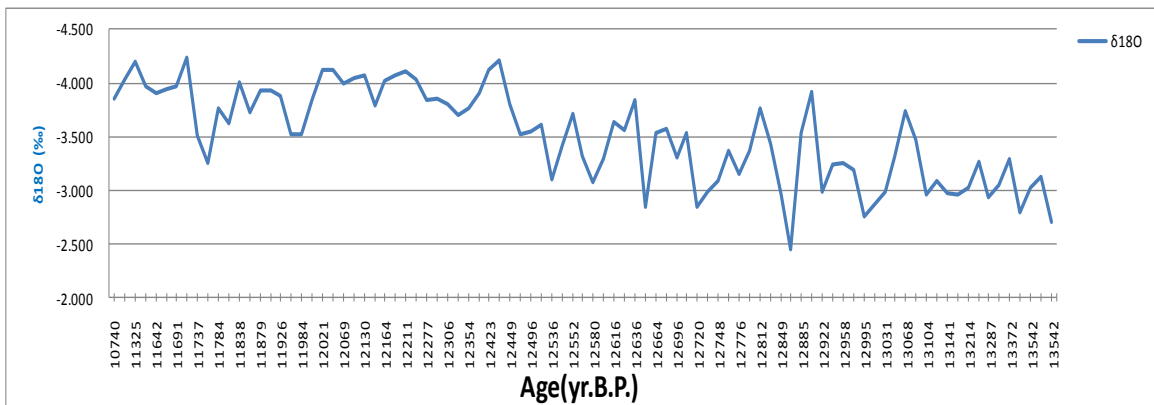
由圖(十七)可看出東帝汶 MC2 石筍由 13542~10740 年前的早期 $\delta^{18}\text{O}$ 較晚期數值較重，而到後期較接近 10740 年前則是 $\delta^{18}\text{O}$ 有一直變輕的趨勢，由此可看出早期雨量較晚期為少，且雨量呈現增加的趨勢。

在距今 12496~10740 年前之間， $\delta^{18}\text{O}$ 氧同位素有六個極輕值，分別為-4.201 ‰(11325 年)、-4.237 ‰(11713 年)、-4.125 ‰(12021 年)、-4.128 ‰(12057 年)、-4.104 ‰(12211 年)、-4.208 ‰(12425 年)，可看出氧同位素有變輕的趨勢，這六個時間是雨量較多的時期。

距今 13542~12496 年前之間 $\delta^{18}\text{O}$ 氧同位素有四個極重值-2.452 ‰(12867 年)、-2.761 ‰(12995 年)、-2.792 ‰(13414 年)、-2.705 ‰(13542 年)，因此可看出氧同位素有變重的趨勢，這四個時間是雨量較少的時期。



圖(十六) 東帝汶 Monkey cave 石筍鑽孔位置及氧同位素數值比較，可以大致推算生成年代與氧同位素數值的相關性。



圖(十七) 東帝汶 Monkey cave 石筍測的年代及該點實際的氧同位素數值比較圖。

陸、討論

(一) 石筍生長現象之探討

東帝汶 Ossu 之 Wailakurini Mountain 的 monkey cave(lekiraka cave)得到的石筍 MC2 的生長軸剖面明顯看出左側有明顯間隔的深淺紋理，右側有乳白色的皺摺橫紋。因此推測石筍在生長過程中，地表水量較多，中央生長軸受到瞬間大量的低水壓力不斷的擠壓且快速的沉積作用，造成這些皺摺現象 (鍾瑋琳,2009;Tooth,2000)。

(二) 經過化學測定的結果

- 1.此次實驗取得到的鑽孔點有 81 個。
- 2.Monkey cave(lekiraka cave)此 MC2 石筍的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介於-4.237 ‰~-2.452 ‰之間，底部的同位素較頂部重約 1‰，頂部 0~4cm 之間的氧同位素有六個極輕值，分別為-4.201 ‰(0.2cm)、-4.237 ‰(0.7cm)、-4.125 ‰(2.0cm)、-4.128 ‰(2.1cm)、-4.104 ‰(2.8cm)、-4.208 ‰(3.7cm)，因此可看出氧同位素有變輕的趨勢。4~9cm 之間有四個極重值-2.452 ‰(6.5cm)、-2.761 ‰(7.2cm)、-2.792 ‰(8.7cm)、-2.705 ‰(9.0cm)，因此可看出氧同位素有變重的趨勢。而 $\delta^{18}\text{O}$ 氧同位素的變動範圍約在 1.8 ‰之間。
- 3.此 MC2 石筍生長時期距今 13542~10740 年前，即更新世晚期。
4. 在距今 12496~10740 年前之間， $\delta^{18}\text{O}$ 氧同位素有六個極輕值，分別為-4.201 ‰(11325 年)、-4.237 ‰(11713 年)、-4.125 ‰(12021 年)、-4.128 ‰(12057 年)、-4.104 ‰(12211 年)、-4.208 ‰(12425 年)，可看出氧同位素有變輕的趨勢，這六個時間是雨量較多的時期。距今 13542~12496 年前之間 $\delta^{18}\text{O}$ 氧同位素有四個極重值-2.452 ‰(12867 年)、-2.761 ‰(12995 年)、-2.792 ‰(13414 年)、-2.705 ‰(13542 年)，因此可看出氧同位素有變重的趨勢，這四個時間是雨量較少的時期。
- 5.東帝汶 MC2 石筍在 13542~10740 年前中的早期 $\delta^{18}\text{O}$ 較晚期數值較重，而到後期較接近 10740 年前則是 $\delta^{18}\text{O}$ 有一直變輕的趨勢，由此可看出早期雨量較晚期為少，且雨量呈現增加的趨勢，代表溫度上升，上升氣流較強，雨量較多所致。

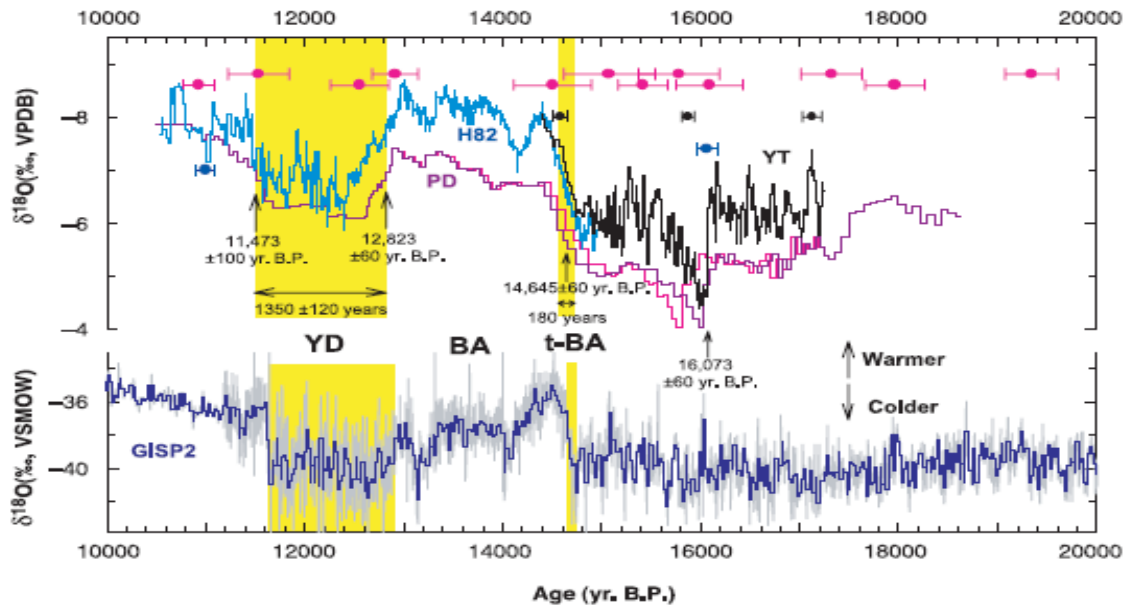
(三) 與中國南京葫蘆洞石筍 $\delta^{18}\text{O}$ 氧同位素的比較

$\delta^{18}\text{O}$ 值主要是反應降雨量與季風強度的變化。

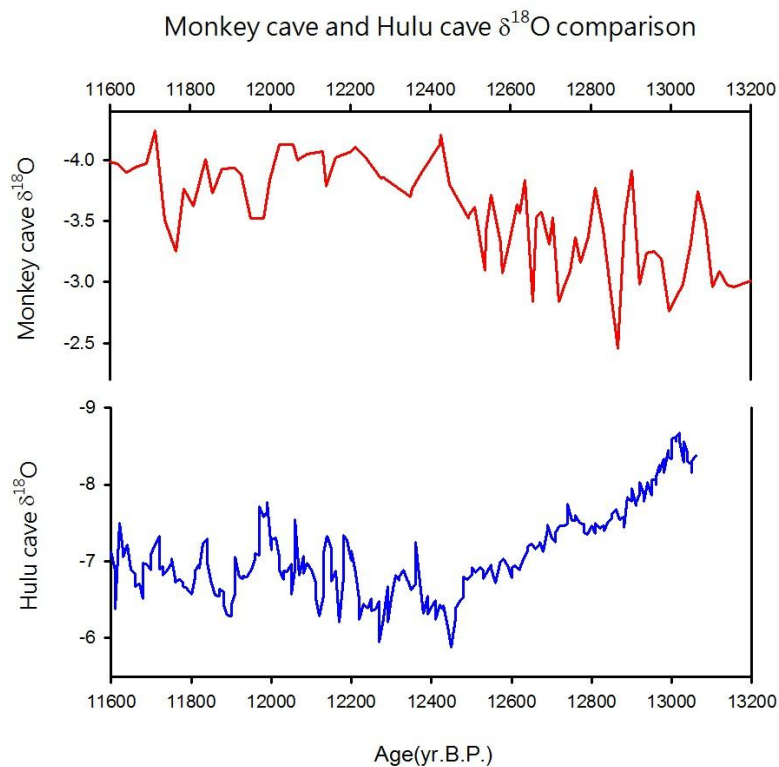
$\delta^{18}\text{O}$ 計算公式： $\delta = [(R - R_{std}) / R_{std}] \times 1000\text{‰}$

當降雨量減少時，石筍 ^{18}O 的比例就會相對提高，而在經過 δ 值的公式計算後，發現 $\delta^{18}\text{O}$ 值比較大。反之，當降雨增加時，經過公式計算之後， ^{18}O 所佔的比例較少，所以 $\delta^{18}\text{O}$ 值就會較小。所以，當 $\delta^{18}\text{O}$ 的值較小時，降雨量較多；反之，當 $\delta^{18}\text{O}$ 的值較大時，降雨量會顯得較少。(鍾瑋琳,2009)

從 Wang(2001)的資料中顯示(圖十八)，南京葫蘆洞約萬年石筍與格陵蘭冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ ，呈現相關性的曲線變化，故石筍的 $\delta^{18}\text{O}$ 值可作為古氣候的代用指標。



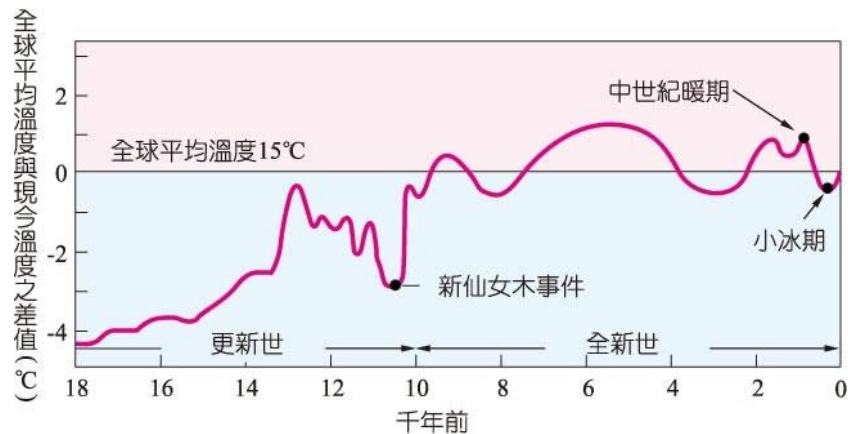
圖(十八) 南京葫蘆洞約萬年前石筍與格陵蘭冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 的比較。
(Wang et al.,2001)



圖(十九) 東帝汶 Monkey Cave 和中國南京葫蘆洞的石筍 $\delta^{18}\text{O}$ 值(Wang et al.,2001)的比較。

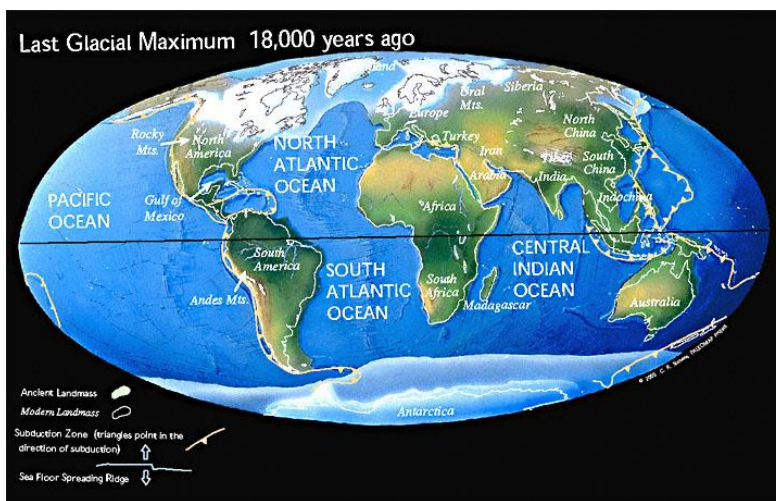
東帝汶和中國南京葫蘆洞的石筍 $\delta^{18}\text{O}$ 值(Wang et al.,2001)的比較，可以看出剛開始 13200 年前的 $\delta^{18}\text{O}$ 值差異較大。但是，當新仙女木事件發生期間(12800 年前~11500 年前)，其中 13542~12496 年前的 $\delta^{18}\text{O}$ 值，可看出兩地區的 $\delta^{18}\text{O}$ 數值呈現相反的趨勢。

此次實驗的 MC2 石筍年代約是在 13542~ 10740 年前之間(以鈾鈣定年的誤差約是在一年以內，所以可以忽略不看)，而其中 12800~ 11500 年前是新仙女木事件(圖(二十))。



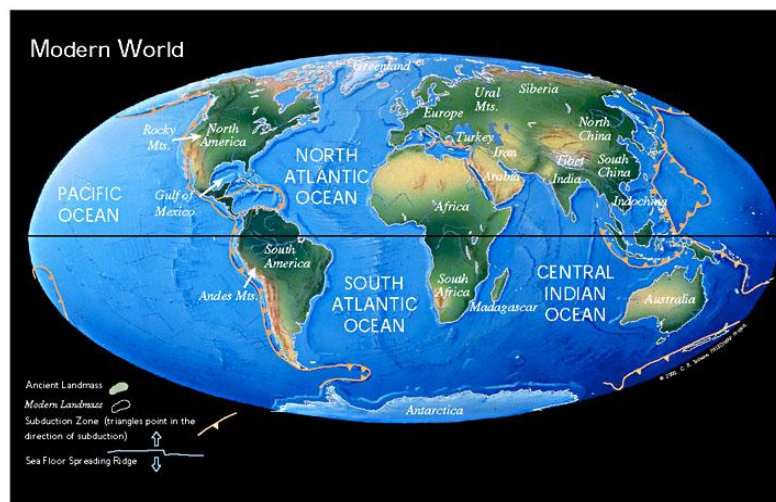
圖(二十) 18,000 年來的短期氣候變化圖。(王執明,2010)

要了解兩地區的 $\delta^{18}\text{O}$ 數值呈現相反的趨勢，首先要討論造成東帝汶氣候變化的原因，由圖(二十一、二十二)可以看出：18,000 年前和現在的板塊位置大致不變，因此板塊構造運動並不是影響東帝汶氣候變化的原因，如圖(二十三)中可看出板塊構造運動在地球系統變化是以千萬年至一年的時間尺度，因此在一萬年之間，板塊較不可能是影響東帝汶氣候如此的劇烈變化的原因。



圖(二十一) 18,000 年前大陸板塊位置示意圖。綠色為潮溼的區域，黃色為較乾燥的區域，白色是冰川覆蓋的區域。

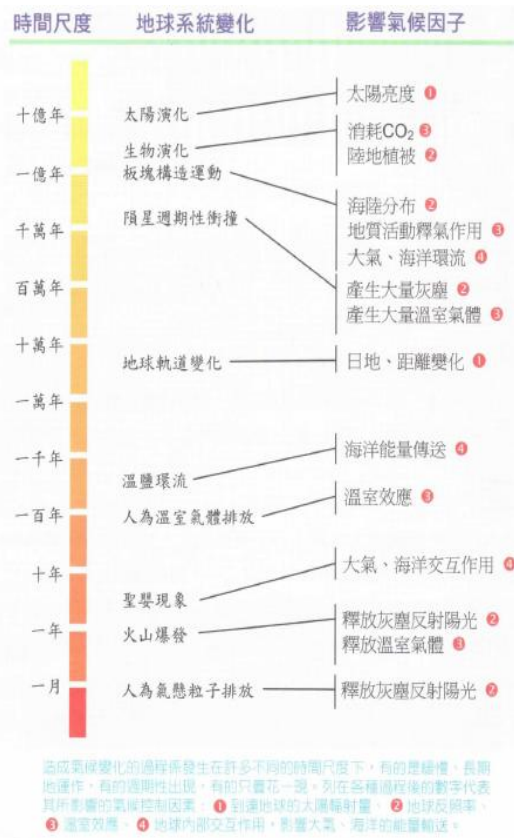
(<http://www.scotese.com/lastice.htm>)



圖(二十二) 現今大陸板塊位置示意圖。綠色為潮溼的區域，黃色為較乾燥的區域，白色是冰川覆蓋的區域。

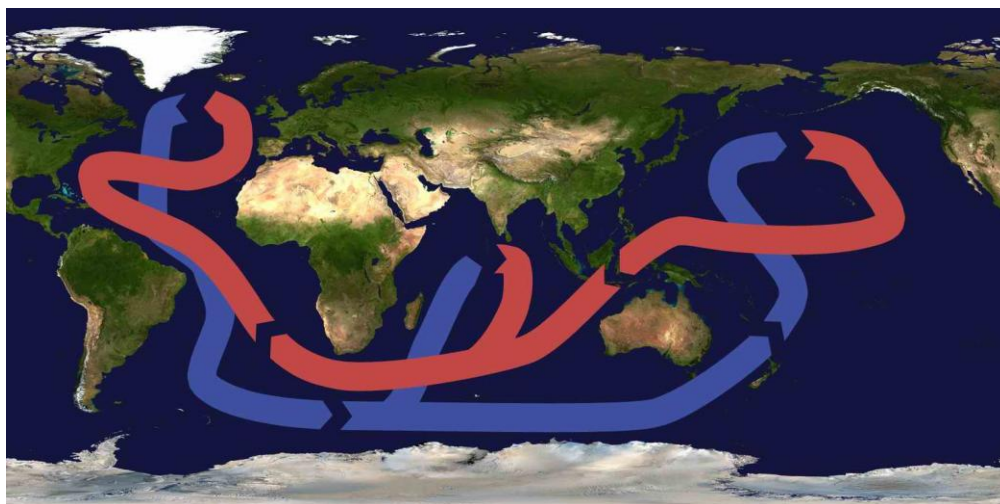
(<http://www.scotese.com/modern.htm>)

圖(二十三)中溫鹽環流一千年的時間尺度與圖(十七、十九)東帝汶的 $\delta^{18}\text{O}$ 發生劇烈變化的時間尺度是符合的。因此，推斷當時的氣候變遷主要影響因素是溫鹽環流。



圖(二十三) 不同時間尺度的氣候變化。
(王執明,2010)

溫鹽環流，扮演著全球氣候海洋與大氣熱量雨水氣的角色，如圖(二十四)。北大西洋低溫、高密度、高鹽度的海水由挪威與格陵蘭之間的拉布拉多海下沉，沿大西洋南下，至南極附近，匯集南極底流，一部分進入環南極洋流，另一部分則向北移動，逐漸與上層海水混合，於印度洋和太平洋湧升。這條高溫、低密度、低鹽度的海水，回游至格陵蘭附近。若環流循環順暢，則高低緯氣候差異會較小；若減弱或停止，則會造成高緯度冰原擴張，全球氣候進入冰期狀態。

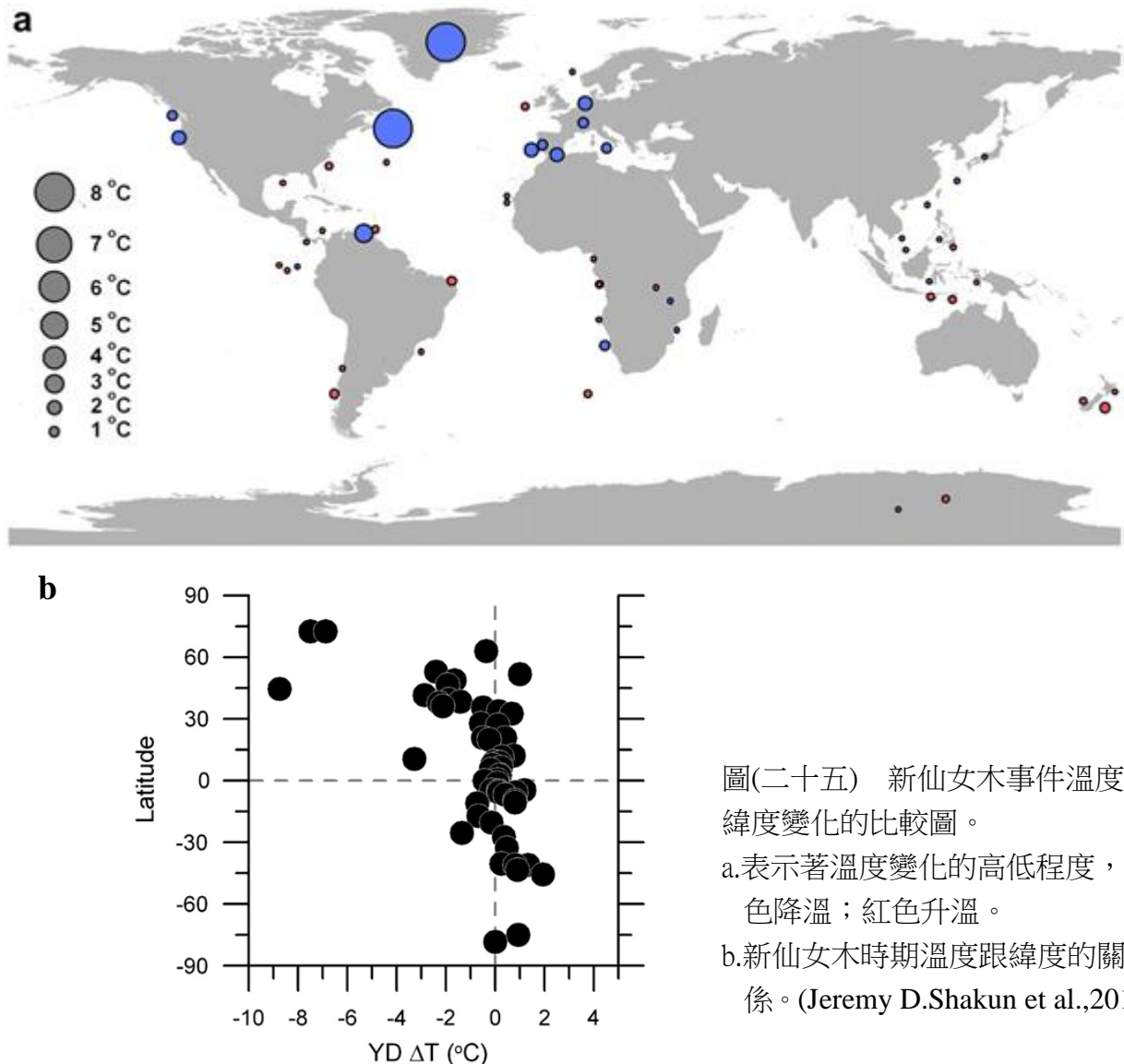


圖(二十四)
溫鹽環流水溫與
流向示意圖。
(王執明,2010)

新仙女木事件的成因是因為北美洲大規模融冰事件，是大西洋深層水流速減緩或深度改變，導致北大西洋的溫鹽環流減弱，熱量因而無法傳遞到北半球，歐洲因而進入了冰期，近而影響北半球，造成它突然寒冷。

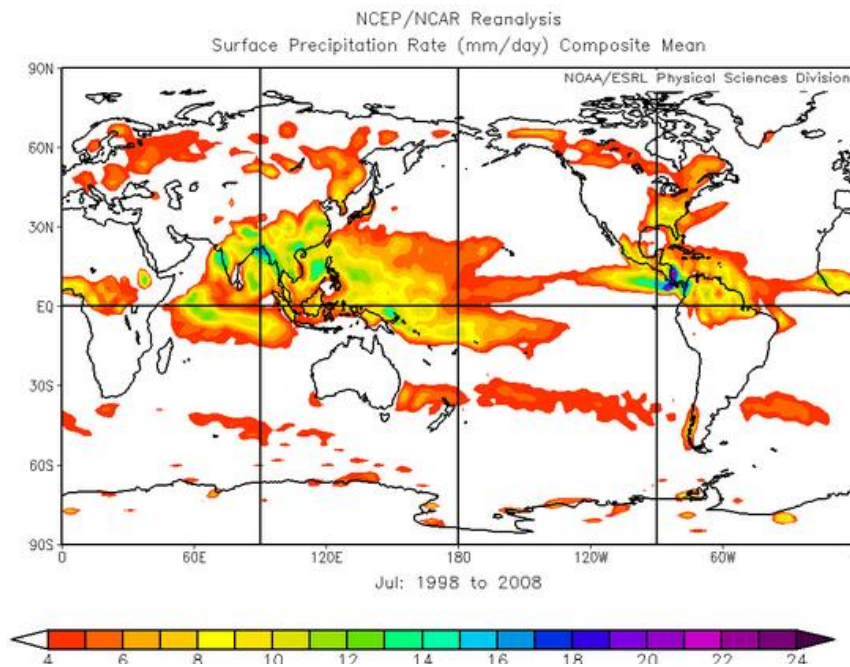
造成東帝汶和中國南京葫蘆洞的石筍兩地區的 $\delta^{18}\text{O}$ 數值呈現相反趨勢的原因與新仙女木事件有關。當新仙女木事件發生時，大量融冰進入北大西洋，造成海水鹽度、密度下降，阻礙溫鹽環流的循環而造成暖流無法北上，造成北半球高緯急劇冷卻，令北半球的高緯度的高壓帶增強，而東亞冬季季風也隨之增強，因而造成北半球低緯的熱量無法傳送至高緯，因此熱量向南半球移動，造成南半球季風系統增強，氣候更加潮濕及溫暖。

所以，位於南半球的東帝汶才會在新仙女木事件發生時， $\delta^{18}\text{O}$ 呈現下降的趨勢，也就代表降雨的增加。反觀，位於北半球的南京，則是 $\delta^{18}\text{O}$ 呈現上升的趨勢，也就代表降雨的減少。因此，位於北半球的溫度下降，位於南半球各地則是呈現不減反升的趨勢，其中東帝汶上升約 2°C ，如圖(二十五)，因此此地上升氣流較旺盛，雨量較多。



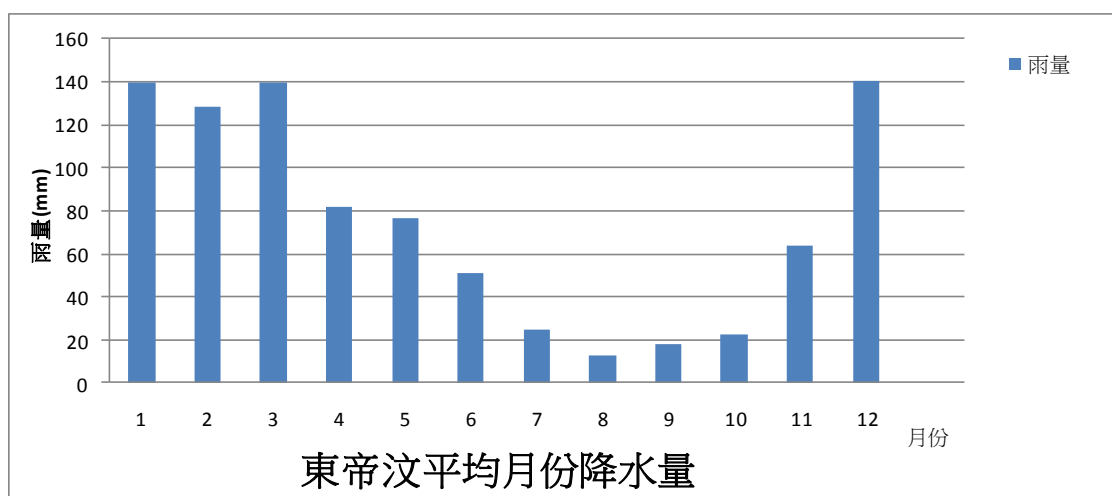
圖(二十五) 新仙女木事件溫度與緯度變化的比較圖。
 a.表示著溫度變化的高低程度，藍色降溫；紅色升溫。
 b.新仙女木時期溫度跟緯度的關係。(Jeremy D.Shakun et al.,2010)

由資料可看出南京葫蘆洞主要是受到東亞熱帶季風(夏季盛行西南季風，冬季盛行東季風)影響，四季分明，冬夏長而春秋短。一般而言，降雨季節主要分布在6月~7月。由圖(二十六)可看出7月份I.T.C.Z的位置。

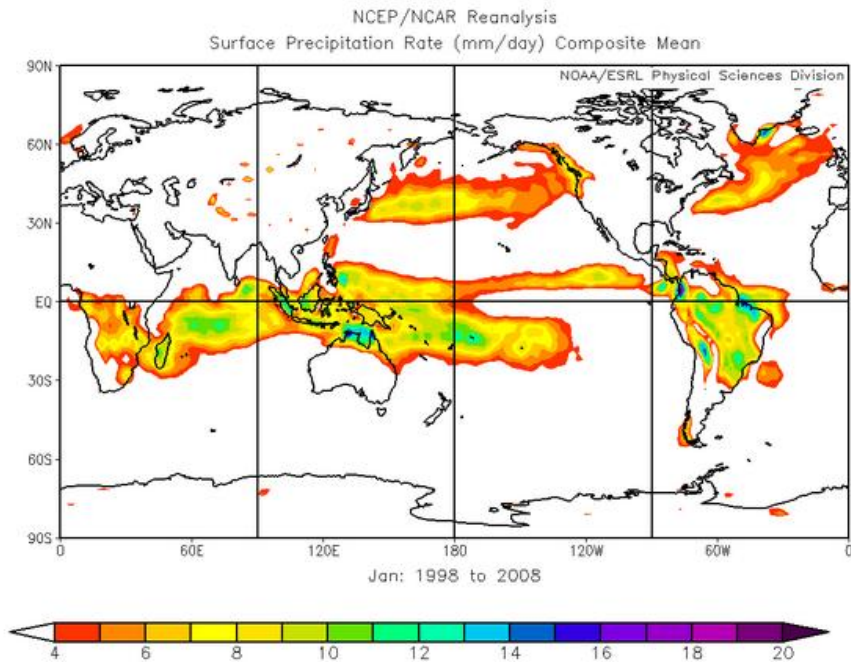


圖(二十六) I.T.C.Z.間熱帶輻合帶在七月所影響的地理範圍。
(www.esrl.noaa.gov/psa/cgi-bin/data/composites)

東帝汶大部地區屬熱帶雨林氣候，平原、谷地屬熱帶草原氣候。年平均降水量1200-1500毫米，但地區差異較大：北部沿海地區每年5月至11月為旱季(因東帝汶位於南半球，故降雨仍集中在夏季)，12月至翌年5月(夏、秋兩季)為雨季(圖(二十七))，年降水量為500-1500毫米，中部山區年降水量為2500-3000毫米。由圖(二十八)看出東帝汶在1月份I.T.C.Z位置中。



圖(二十七) 東帝汶平均月份降水量。(http://worldclimate.com)



圖(二十八) I.T.C.Z.間熱帶輻合帶在一月所影響的地理範圍。
(www.esrl.nova.gov/psa/cgi-bin/data/composites)

由東帝汶石筍約萬年前的石筍 $\delta^{18}\text{O}$ 值與南京的胡蘆洞、以及和 Jeremy(2010)的資料比較，可知北半球的溫度下降，南半球各地溫度則是呈現不減反升的趨勢，其中東帝汶上升約 2°C ，因此當時的 I.T.C.Z.較現在會有南移的可能。

柒、結論

1. 對於所觀察到的這些現象有一個很合理的解釋：就是針對 I.T.C.Z.突然南移，新仙女木事件的冷卻是被視為南方流動環流明顯減弱的結果，而南方流動環流明顯減弱是由於大量融冰流進北大西洋。另一方面，新仙女木事件也導致 I.T.C.Z.的南移的結果，也導致了雨量是跟著 I.T.C.Z.變化的東帝汶雨量增多，而 $\delta^{18}\text{O}$ 值也就有變小的趨勢。
2. 北大西洋氣流循環的減少，導致夏季的 I.T.C.Z. 逐漸南移，因此在新仙女木事件時，南印尼比較潮濕，然而，石筍最顯著的 $\delta^{18}\text{O}$ 值減少表示季風降雨的增加，也得知此時海平面也明顯上升，並且導致溼度增加(Griffiths et al.,2009)。

捌、未來展望

1. 現在只有一支石筍的數據，不夠能準確建立東帝汶萬年前大氣氣候及環境的系統；因此，希望能夠取得更多經定年後確定為同時期的石筍的氣候訊號。
2. 不僅要分析現有的樣本，更要進一步分析 99 年 8 月去東帝汶相同洞穴所採集的樣本，以提高數據的可信度及準確性。

3. 再進一步探討 $\delta^{13}\text{C}$ 值與環境中地表植被的變化關係。
4. 目前的 $\delta^{18}\text{O}$ 與 $\delta^{13}\text{C}$ 都處於低分析的階段，希望能進一步取更多樣本的採樣點近性更高解析的分析。

玖、誌謝

感謝教授提供東帝汶石筍和進行切割石筍、標本處理的器材，還有進行鈾鈦定年的 MC-ICP-MS 和進行碳氧同位素分析 MAT252-IRMS。同時還有感謝學長，指導實驗的操作，以及論文的討論。感謝老師的指導，沒有老師的督促及時時叮嚀，很難想像是如何從零走到這裡。

壹拾、參考資料及其他

- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen H.B., Gundestrup, N. 1973. Stable isotope bioclimatology. *Meddeleser Grnl.*, 197, 1-53.
- Epstein, S., Buchsbaum, R., Lowenstam, H. A., 1953. Revised carbonate-water isotopic temperature scale. *Bulletin of the Geological Society of America* 64, 1315-1326.
- Fairchild, 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems-ERS-2006.
- Gascoyne, 1992. Paleoclimate determination from cave calcite deposits. *Quaternary Science Reviews* 11, 609-632.
- Google Earth.
- Griffiths-2009-NG-Increasing Australian-Indonesian monsoon rainfall linked to early Holocene sea-level rise.
- Hendy, C. H. The isotope geochemistry of speleothems Pt. I., 1971. the calculation of the effects of different model of formation on the isotope composition of speleothems and their applicability as paleoclimate indicators. *Geochim et Cosmochim Acta* 35, 801-824.
<http://gis.geo.ncu.edu.tw/earth/earth.htm>
<http://worldclimate.com>
<http://www.esrl.nova.gov/psa/cgi-bin/data/composites>
<http://www.scotese.com/lastice.htm>
<http://www.scotese.com/modern.htm>
- Jeremy D. Shakun, Anders E. Carlson. A global perspective on Last Glacial Maximum to Holocene climate change.
- Koerner and Russel, 1979. $\delta^{18}\text{O}$ variations in snow on the Devon Island Ice Cap, North West Territories, Canadian Journal Earth Sciences 16, 1419-1427.
- Koerner and Russel, 1979; $\delta^{18}\text{O}$ variations in snow on the Devon Island Ice Cap, North West Territories, Canada. *Canadian Journal Earth Sciences* 16, 1491-1427.
- O'Neil, J.R., Clayton, R. N., Mayeda, T.K., 1969. Oxygen isotope fractionation in divalent metal

- carbonates. *Journal of Chemical Physics* 51, 5547-5558.
- Partin, 2007, Nature-millennial-scale trends in west Pacific warm pool hydrology since the LGM.
- Paulsen, D. E., Li, H. C., Ku, T. L., 2003. Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records. *Quaternary Science Reviews* 22, 691-701.
- Petit et al., 1991. Deuterium excess in recent Antarctic snow. *Journal Geophy Research* 96, 5113-5122.
- Petit, J. R., White, J. W. C., Young, N. W., Jouzel, I., Korokovich, Y. S., 1991. Deuterium excess in recent Antarctic snow. *Journal Geophy Research* 96, 5113-5122.
- Tooth, 2000. Controls on the geochemistry speleothem-forming karstic drip waters. Doctor of Philosophy thesis, Heele University, UK.
- Tung Shiang Lai Hydrographic changes of the Kuroshio Current of southeast Taiwan During the past 7500 years.
- Wang, Y. J., Cheng H., Edwards, R. L., An, Z., Shen C. C., Dorale, J. A., 2001. A high-resolution, absolute-dated Late Pleistocene Monsoon record from Hulu Cave, China. *Science* 294, 2345-2348.
- Yuan, 2004. Timing, duration, and transitions of the Last Interglacial Asian monsoon. *Science* 304, 575-578.

中文維基百科。

王執明教授總編 (2010)：基礎地球科學 (全)，龍騰文化事業有限公司。

世界氣象組織：公布之城市平均年降水總量及平均溫度。

李紅春、顧德隆、陳文寄, 1997. 利用洞穴石筍的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 重建 3000a 以來北京地區古氣候與古環境-石花洞研究系列之三，地震地質，19，第 77-86 頁。

李紅春、顧德隆、陳文寄, 1998. 高分辨率洞穴石筍中穩定同位素應用之一-京津地區 500a 來的氣候變化- $\delta^{18}\text{O}$ 紀錄，中國科學(D)，44，第 456-463 頁。

李通藝主編 (2010)：基礎地球科學 (全)，康熙文化事業有限公司。

沈川洲 (2003)：氣候變遷—以古為鑑。科學發展，2003 年 9 月，369 期。

黃亦鈺 (2004)：由石筍的碳氧同位素變化看全球氣候之變遷，北一女專題研究報告。

鐘瑋琳 (2009)：中國西南部晚第四紀環境變遷-貴州荔波縣石筍碳氧同位素紀錄，國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文。

【評語】 040506

本作品嘗試以科學界最新地球化學研究工具之一（質譜儀技術）配合鈾鈦定年及分析採自東帝汶的洞穴石灰岩的穩定碳氧同位素成分來重建近萬年的古氣候記錄，對了解氣候變遷及南半球低緯度一萬多年間的溫度變化資料具有貢獻，富學術價值。但作品明顯超過一般高中生科學能力及一般高中所能提供的資源，且對基礎的同位素背景知識了解不足，應加強。