

[illegible]

※ ---台灣南部 ※

## ✧ Regional heat flow variations in Taiwan orogenic belt using the silica ✧

# ✧-----geothermometer (II)---South Taiwan✧

✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱ ✱

計畫編號：NSC 91 - 2116 - M - 002 - 020

執行期間：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

計畫主持人：宋 聖 榮

☐赴國外出差或研習心得報告一份☐赴大陸地區出差或研習心得報告一份

☒ 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

☐ 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學地質科學系

中 華 民 國 92 年 9 月 25 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 利用二氧化矽溫度計研究台灣地區熱流量變化(II)-台灣南部

### Regional heat flow variations in Taiwan orogenic belt using the silica geothermometer (II)---South Taiwan

計畫編號：NSC 91-2116-M-002-020

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：宋聖榮 國立臺灣大學地質學系

#### 一、中文摘要

瞭解地球內部溫度的分布、地殼的熱流量和熱構造，對於解開一地的地殼演化、地質特性和構造演變有相當的助益。台灣位於年輕的造山帶上，研究其地表熱流量和地殼的熱構造，對於瞭解造山帶上的機制和演化，有相當大的助益。可惜台灣地區過去的地表熱流量測量工作的質與量都不足，以致於藉由地表熱流量所推演得的熱構造模式頗值得商榷。本計畫預計花三年的時間，利用簡單、快速且可信度高的二氧化矽地溫溫度計法，研究台灣地區的地表熱流量和熱構造。第二年的工作集中在台灣南部。

本研究二氧化矽地質溫度法來量測台灣南部地下熱水的溫度，發現台灣南部溫泉熱水在地下平衡時的溫度範圍為：海岸山脈為 79.6~101.0°C；中央山脈片岩區為 86.4~192.0°C；中央山脈板岩區為 61.6~199.0°C；西部麓山帶為 65.6~67.1°C。

而二氧化矽熱流量範圍為：海岸山脈為 80.3~110.0 mW/m<sup>2</sup>；中央山脈片岩區為 90.3~245.0 mW/m<sup>2</sup>，中央山脈板岩區為 53.8~256.0 mW/m<sup>2</sup>；西部麓山帶為 59.6~61.9 mW/m<sup>2</sup>。將台灣南部以 24 公里乘 24 公里為一區塊，繪製二氧化矽熱流分佈圖，顯示地表熱流量從海岸山脈開始增加到中央山脈片岩區達最高，然後又向西遞減。

**關鍵詞：**二氧化矽地溫溫度計、熱流量、溫泉、水溶液地球化學

#### Abstract

Knowledge of temperature within the earth, heat flow, thermal structure and thermal history of the crust is important to understand the characteristics of geological processes, and the cause of most tectonic and structural evolution. Taiwan mountain-building process is still going on, which can contribute the information to understand the mechanism, thermal structure and tectonic evolution of an orogenic belt in the earth. However, the quality and quantity of heat flow measurements in Taiwan area were not so good for aforementioned purpose in the past. Therefore, this project proposes a simple, effective and

convenient method the silica geothermometer to study the regional heat flow variations and thermal structures in Taiwan orogenic belt for next three years. This report presents the results of first year, which the works focused on the south Taiwan.

Silica temperature and heat flows are estimated from 46 hot in south Taiwan. The regional silica temperatures and heat flow values show wide varieties in different geological terranes, i.e. 76.9~101.0°C and 80.3~110.0 mW/m<sup>2</sup> in the Coastal Range, 86.4~192.0°C and 90.3~245.0 W/m<sup>2</sup> in the Schist Belt of Central Range, 61.6~199.0°C and 53.8~256.0 mW/m<sup>2</sup> in the Slate Formation of Central Range, and 65.6~67.1°C and 59.6~61.9 mW/m<sup>2</sup> in the Western Foothills, respectively. The silica heat flow distributions show that the distribution pattern increase from the Coastal Range to the highest in the east Central Range, then decrease to the west.

**Keywords:** Silica geothermometer, Heat flow, Hot springs, Water geochemistry

#### 二、緣由與目的

瞭解地球內部溫度的分布、地殼的熱流量 (heat flow) 和熱構造 (thermal structure)，以及熱演變史，對於解開一地的地殼演化、地質特性和構造演變有相當的助益。

台灣地區的地殼熱構造研究，包括有 Barr and Dahlen (1989)、Hwang and Wang (1993)、Lin (2000) 和 Song and Ma (2000) 等人。所有的模式基本上都根基於地表熱流量的量測值及所繪製的熱流量分佈圖 (Lee and Cheng, 1986)，也就是說 Lee and Cheng (1986) 所發表的熱流量數據的精、準確程度和數據分布，深深的影響前述熱構造和演化模式的正確與否。

Lee and Cheng (1986) 所發表的台灣熱流量的分佈圖 (heat flow map)，主要的數據來源包括有四種，(1)、利用熱探針 (needle probe) 量測 23 口、100-150 公尺深鑽井的溫度梯度 (geothermal gradient) 和熱導度 (thermal conductivity)，然後利用  $Q = K \times G$  ( $Q$ : 熱流量值;  $K$ : 熱導度;  $G$ : 地

溫梯度)，換算獲得 22 組熱流量值。其熱流量值介於 0.5 HFU 至 11.6 HFU 之間。依據作者所述，熱流量值小於 0.8 HFU 或大於 4 HFU，可能是測量時誤差所致或受地下水循環的影響，所以其熱流量值可信度較差（大屯火山群的熱流量值約為 3~4 HFU）。在其所有發表的 22 組數據中，有 2 組數據小於 0.8 HFU，7 組數據大於 4 HFU，也就是說 22 組由作者自己直接用熱探針所量測的數據中，有 9 組的數據是不可用的，但作者在繪製台灣熱流量分布圖時，還是把這 9 組數據包含在其中。

(2)、收集前人，如中國石油公司和工研院能礦所，地熱探勘井所量測的地溫梯度值，然後利用  $Q = K \times G$  ( $Q$ : 熱流量值;  $K$ : 熱導度;  $G$ : 地溫梯度)，換算獲得 14 組熱流量值，熱流量值介於 1.5 HFU 至 14.1 HFU 之間。此 14 組數據的準確與否，主要受控於熱導度的量測值，可惜作者未有熱導度的直接量測，而是利用前述 22 組數據所量測的熱導度平均值 ( $K = 8$  TCU) 來計算其熱流量值，所得的結果誤差較大。

(3)、收集中油探勘石油時，所量測的地溫梯度，然後利用  $Q = K \times G$  ( $Q$ : 熱流量值;  $K$ : 熱導度;  $G$ : 地溫梯度)，所獲得的 35 組熱流量值，熱流量值介於 1.0 HFU 至 4.3 HFU 之間。此 35 組的數據主要是集中於台灣西部平原區和麓山帶的石油鑽井，而中央山脈的板岩區、東麓的中、高度大南澳變質岩區、和東部的海岸山脈則未有資料。另早期鑽井在測量地溫梯度時，是否有做井底地溫校正 (黃立勝, 1990)，作者未有交代，且熱導度值是利用前人所量測的沉積岩區的熱導度平均值 ( $K = 6$  TCU) (Liu, 1966; Chou et al., 1978)，來計算熱流量值，可能會有誤差出現。

(4)、收集 Liu (1966) 和 Chou et al., (1978) 所發表的 14 組熱流量值。所測量的方法與 Lee and Cheng (1986) 所發表熱流量值的方法是相似的，都是先量測溫度和熱導度，然後再求得熱流量值。此 14 組數據主要分布在西部沉積岩區的熱流量值，同樣有熱導度值量測的問題。熱導度值在 Liu (1966) 和 Chou et al., (1978) 的所發表的文章中，都不是直接量測的結果。Liu (1966) 的熱導度值是由  $K = \alpha \rho c$  ( $K$ : thermal conductivity;  $\alpha$ : thermal diffusivity;  $\rho$ : rock density;  $c$ : heat capacity)，推導而得。而 Chou et al., (1978) 的熱導度值是由  $K = 1.02 + 1.24 V_{int}$  ( $V_{int}$ : interval velocity of the formation) 的經驗公式換算的，都有較大的誤差。

故綜合上述四種獲得的熱流量值，及所繪出的台灣熱流量分布圖，其誤差可能相當的大。

二氧化矽地溫溫度計法量測地下熱水的溫度，以及地殼熱流量的方法提出後，已有相當多的學者，利用此一方法來量測地殼的熱流量及熱構造 (Fournier and Truesdell, 1971; Swanberg, 1980;

Swanberg and Herrin, 1976; Swanberg and Morgan, 1978; 1980; 1985; Vugrinovich, 1987; Wan et al., 1989; Wheildon et al., 1994; Ilkisik, 1995; Mimi et al., 1998)，也已獲得不錯的研究結果。台灣地區溫泉的分布相當廣泛，而且主要集中於中央山脈變質岩區。另外，有相當多的地下水深井在台灣西部平原和麓山帶，提供吾人利用二氧化矽地溫溫度計法研究台灣地區地下熱水的溫度、熱流量的估計，以及熱流量分布圖，不僅可以彌補現今熱流量數據不足處，更進一步可用以探討台灣造山帶地殼的熱構造及演化等相關問題。

二氧化矽地溫溫度計的基本原理為：在地殼深處的儲存層中，熱水中的二氧化矽濃度，是石英溶解在熱水中，在該深度溫度條件下達平衡的溶解度；當熱水上升或接近地表以後，溫度下降，使熱水中的二氧化矽濃度超過石英的溶解度，但二氧化矽卻不會發生沉澱，是因為在此地表低溫狀態下，熱水改與非晶質二氧化矽達到平衡，而非晶質二氧化矽的溶解度遠較同溫度下石英的溶解度高出甚多，因此地表附近熱水中的二氧化矽濃度要大於非晶質二氧化矽的溶解度時才可能產生沉澱，所沉澱出來的沉澱物不是石英，而是非晶質的二氧化矽 (矽華) (Truesdell and Fournier, 1975)。

利用石英或非晶質二氧化矽溶解度與溫度的關係，所推導出的三個推算地下熱水溫度的公式為：

$$T(\text{SiO}_2) (^{\circ}\text{C}) = 1533.5 / [5.768 - \log(\text{SiO}_2)] - 273.15 \text{ (SiO}_2 \text{ in ppm)}$$

(Truesdell, 1975; Swanberg and Morgan, 1980; Rybach and Muffler, 1981)

此式的有效溫度範圍為 0  $^{\circ}\text{C}$  - 250  $^{\circ}\text{C}$  之間。 $\text{SiO}_2$  的濃度是指熱水在一大氣壓下、汽化後殘餘熱水的  $\text{SiO}_2$  濃度，這時的濃度會比真正的石英的溶解度大。若熱水在上升過程中未發生氣化，其  $\text{SiO}_2$  濃度應與石英溶解度相似，此時熱水溫度的公式為：

$$T(\text{SiO}_2) (^{\circ}\text{C}) = 1315 / [5.205 - \log(\text{SiO}_2)] - 273.15 \text{ (SiO}_2 \text{ in ppm)}$$

(Truesdell, 1976; Swanberg and Morgan, 1980)

此式的有效溫度範圍為 0  $^{\circ}\text{C}$  - 250  $^{\circ}\text{C}$  之間。

由於大部分的熱水採自地表或鑽井的井口，噴出時壓力已降至一大氣壓，熱水會氣化，所採到的樣本是汽化後的殘餘熱水水樣，因此上述的第一式公式較為適用。

如果熱水上升至地表附近時，停留一段時間與地表附近的非晶質二氧化矽達到平衡，則水中的  $\text{SiO}_2$  濃度和溫度的關係變為：

$$T(\text{SiO}_2) (^{\circ}\text{C}) = 731 / [4.52 - \log(\text{SiO}_2)] - 273.15 \text{ (Truesdell, 1976; Swanberg and Morgan, 1978, 1980, 1981;}$$

Rybach and Muffler, 1981)  
(SiO<sub>2</sub> in ppm)

上述三種公式適用於不同條件下的溫泉水樣，所以在採樣分析時，需特別留意溫泉冒出地表的產狀。

一般而言，地表上的熱水最高溫度為 100℃，此時的非晶質二氧化矽飽和濃度為 370 ppm，相當於石英在地下 226℃熱水中的溶解度、或是 206℃熱水汽化後的二氧化矽濃度。因此，溫度超過 206℃~226℃的地下熱水到達地面之後，將會沉澱出一部分的二氧化矽，所以，二氧化矽地溫溫度計不適合用於超過此溫度地下熱水的量測。

從上述幾種二氧化矽地溫溫度計的計算公式，在採集水樣的時候，需特別注意溫泉水的產狀，然後量測水樣中的 SiO<sub>2</sub> 濃度，選擇適當的公式，即可得地下平衡的熱水溫度。

熱水的二氧化矽溫度與當地熱流量的關係為：  
 $T(\text{SiO}_2) = mq + b \rightarrow q = [T(\text{SiO}_2) - b] / m$

q : heat flow;

b: mean annual air temperature;

m: the minimum average depth to which the groundwater circulate and determined to be 680 °C m<sup>2</sup>W<sup>-1</sup> (constant)

(Fournier and Rowe, 1966)

故由熱水中所獲得的二氧化矽溫度，就可計算獲得當地的熱流量和熱流量分布圖，進而探討影響熱流量的分布因素，以及模擬區域的熱構造和演化情形。

台灣地區溫泉分布相當廣泛，約有 128 多處，而且主要分布於中央山脈兩側；另在台灣西部平原地區和麓山帶有相當多的地下水監測或取水利用的深井，提供吾人利用二氧化矽地溫溫度計法，來研究台灣地區熱流量的變化，進一步繪製台灣地區熱流量分布圖，以探討造成台灣地區熱流量異常的因素，並藉由分析溫泉中的陰、陽離子濃度，以探討台灣地區溫泉可能的成因。

### 三、採樣及分析方法

本研究主要的方法是用感應耦核電漿分光儀 (ICP-AES) 分析溫泉水中的二氧化矽 (SiO<sub>2</sub>)。然後依照經驗公式換算地底下平衡時溫泉的溫度，在計算獲得當地的熱流量值。

溫泉樣本主要是採集台灣南部地區自然出露的溫泉湧泉，以及人工開鑿的溫泉井。

## 四、結果與討論

### 1、溫泉二氧化矽濃度、溫度及熱流量

本研究共採集了台灣南部 42 個溫泉樣本進行

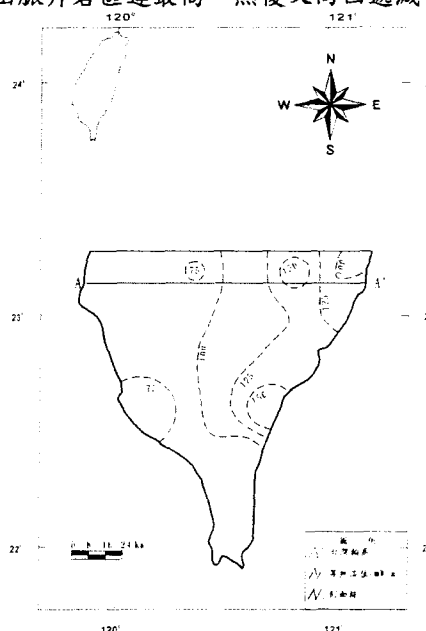
二氧化矽離子的分析工作，其結果如表一。所計算的地下平衡溫度和熱流值也同時列於表一。

表一：台灣南部溫泉水中的二氧化矽濃度、以及所計算獲得的地下平衡溫度和熱流值

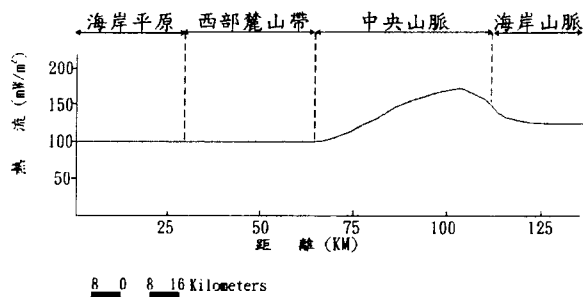
| 溫泉名稱  | SiO <sub>2</sub><br>(ppm) | Temp.<br>(°C) | Heat flow<br>(mW/m <sup>2</sup> ) | 溫泉名稱   | SiO <sub>2</sub><br>(ppm) | Temp.<br>(°C) | Heat flow<br>(mW/m <sup>2</sup> ) |
|-------|---------------------------|---------------|-----------------------------------|--------|---------------------------|---------------|-----------------------------------|
| 大崗山冷泉 | 21.0                      | 65.5          | 59.6                              | 近青溫泉   | 91.6                      | 132           | 158                               |
| 龜井溫泉  | 21.9                      | 67.1          | 61.9                              | 普沙羽揚溫泉 | 22.6                      | 68.3          | 63.7                              |
| 玉麟溫泉  | 30.4-41.0                 | 80.1-92.9     | 81.1-99.9                         | 土城溫泉   | 43.6                      | 95.7          | 104                               |
| 少年溪溫泉 | 32.9                      | 83.4          | 85.9                              | 麟麟溫泉   | 102-295                   | 138-192       | 167-245                           |
| 高中溫泉  | 28.9                      | 78.1          | 78.0                              | 高鹿溫泉   | 35.3                      | 86.4          | 90.3                              |
| 十三坑溫泉 | 36.9-140                  | 88.3-157      | 93.1-194                          | 金峰溫泉   | 50.1-331                  | 102-199       | 113-256                           |
| 十坑溫泉  | 65.0                      | 115           | 132                               | 望山溫泉   | 102-134                   | 138-154       | 164-190                           |
| 十二坑溫泉 | 49.3                      | 101           | 112                               | 摩刺南溫泉  | 83.3                      | 127           | 150                               |
| 七坑溫泉  | 51.5                      | 103           | 115                               | 蝦木溫泉   | 37.4                      | 88.9          | 90.4                              |
| 石河溫泉  | 37.6                      | 89.1          | 94.3                              | 彰霞溫泉   | 122                       | 149           | 182                               |
| 復興溫泉  | 142.0                     | 158           | 195                               | 廣松溫泉   | 68.7                      | 117           | 136                               |
| 多納溫泉  | 45.3                      | 97.4          | 106                               | 四重溪溫泉  | 34.6                      | 85.6          | 89.1                              |
| 萬山溫泉  | 56.1                      | 107           | 121                               | 旭海溫泉   | 31.6                      | 81.7          | 83.4                              |
| 雲山溫泉  | 31.7-37.0                 | 81.9-88.4     | 83.6-93.3                         | 新隆冷泉   | 18.9                      | 61.6          | 53.8                              |
| 寶來溫泉  | 48.2                      | 100           | 111                               | 大武溫泉   | 66.9                      | 116           | 134                               |
| 梅山溫泉  | 88.8                      | 131           | 155                               | 雙溪溫泉   | 21.1                      | 65.7          | 59.9                              |
| 紅紫溫泉  | 88.1-132                  | 130-153       | 155-189                           | 安通溫泉   | 45.0                      | 97.1          | 107                               |
| 金富溫泉  | 83.6-176                  | 127-162       | 151-202                           | 東豐溫泉   | 30.0-47.8                 | 79.6-99.8     | 80.3-110                          |
| 知本溫泉  | 68.3-253                  | 117-182       | 232-135                           | 利吉溫泉   | 49.3                      | 101           | 110                               |
| 柳庭溫泉  | 92.2-124                  | 133-144       | 158-175                           | 上里溫泉   | 67.4                      | 116           | 134                               |
| 比魯溫泉  | 71.6                      | 119           | 139                               | 五港溪溫泉  | 33.2                      | 83.7          | 86.3                              |

### 2、地表熱流分布圖

圖一是利用 24×24 公里所繪出所獲得的台灣南部熱流分布圖。對此一地區畫一東西剖面 (圖二)，同時也可發現地表熱流量從海岸山脈開始增加到中央山脈片岩區達最高，然後又向西遞減。



圖一：台灣南部地表二氧化矽熱流量分布圖。



圖二：台灣南部地表二氧化矽熱流量東西向剖面分布圖。

## 五、參考文獻

- 黃立勝 (1990) 台灣西部晚新生代沉積盆地之地下溫度及地溫梯度之研究。經濟部中央地質調查所彙刊，第六號，第 117-144 頁。
- Barr, T. D. and Dahlen, F.A., (1989). Brittle frictional mountain building 2. Thermal structure and heat budget. *Jour. Geophys. Res.*, 94(B4):3923-3947.
- Chou, T.H., and Lin, L.H. (1978) Application of interval velocity and related information in kerogen maturation predictions, *Mining and Metallurgy*, 28, 89-101.
- Fournier, R. O. and Rowe, J. J. (1966) Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. *American Journal of Science* 264, 685-697.
- Fournier, R. O. and Truesdell, A. H. (1971) Chemical Indicators of Subsurface Temperature Applied to Hot Spring Waters of Yellowstone National Park, Wyoming, U.S.A. *Geothermics* 2, 529-535.
- Hwang, W.-T. and Wang, C.-Y., (1993) Sequential thrusting model for mountain building: constraints from geology and heat flow of Taiwan. *Jour. Geophys. Res.*, 98(B6):9963-9973.
- Ilkisik, O. M. (1995) Regional heat flow in western Anatolia using silica temperature estimates from thermal springs. *Tectonophysics* 244, 175-184.
- Lee, C.-R. and Cheng, W.-T., (1986). Preliminary heat flow measurements in Taiwan. Prepared specifically for the conference forth circum-pacific energy and mineral resources conference Singapore.
- Lin, C.-H., (2000) Thermal modeling of continental subduction and exhumation constrained by heat flow and seismicity in Taiwan. *Tectonophysics*, 324:189-201.
- Liu, S.Y. (1966) Heat flow measurements through the deep oil wells in Miaoli, Report of Central Univ., Taiwan. 1, 63-79.
- Mahon, W.A. (1966) Silica in hot water discharged from drillholes at Wairakei, New Zealand. *New Zealand Journal of Sciences* 272, 48-68.
- Mimi, L., Dhia, A.B., Bouri, H., Abidate, A.B., Bouchareb-Haouchim, L. and Fatima-Zohra, A. (1998) Application of chemical geothermometers to thermal springs of the Maghreb, North Africa. *Geothermics* 27, 211-233.
- Morey, G.W., Fournier, R.O., and Rowe, J.J. (1962) The solubility of quartz in water in the temperature interval from 29 °C to 300 °C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 26, 1029-1043.
- Morey, G.W., Fournier, R.O., and Rowe, J.J. (1964) The solubility of amorphous silica at 25°C. *J. Geophys. Res.* 69, 1995-2002.
- Song, T.R. and Ma, K.F. (2000) An estimation of thermal structure of a young-orogenic belt from whole-crust thickening model. *Geological Society of American* (in review)
- Swanberg, C. A. (1980) Heat flow maps of New Mexico; Part 1, Mapping by silica heat flow interpretation technique. 4.1-4.7.
- Swanberg, C. A. and Morgan, P. (1978) The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional heat flow; a new heat flow map of the United State. *Pure and Applied Geophysics*, 117, 227-241.
- Swanberg, C. A. and Morgan, P. (1980) The silica heat flow interpretation technique; assumptions and applications. *Journal of Geophysical Research* 85, 7206-7214.
- Swanberg, C. A. and Morgan, P. (1985) Silica heat flow estimates and heat flow in the Colorado Plateau and adjacent areas. *Journal of Geodynamics* 3, 65-85.
- Truesdell, A.H. and Fournier, R.O. (1975) Calculation of deep temperatures in geothermal system from the chemistry of boiling spring waters of mixed origin. *Proceedings 2<sup>nd</sup> UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco 1, 837-844.
- Vugrinovich, R. (1987) Regional heat flow variations in the northern Michigan and Lake Superior region determined using the silica heat flow estimator. *Journal of Volcanology and*

- Geothermal Research 34, 15-24.
- Wan, T. (1988) Silica heat flow in South China. Chinese Science Bulletin 33, 655-657.
- Wan, T., Uongfu, T., and Zheng, W. (1989). Thermal structure of the lithosphere in Fujian, China. Jour. Geophys. Res., 94(B2):1888-1894.
- Wheildon, J., Morgan, P., Williamson, K. ., Evans, T. R., and Swanberg, C.A. (1994) Heat flow in the Kenya Rift zone. Tectonophysics 236,