

台灣溫泉休閒遊憩地區水質特性之探討

Study of Water Quality Characteristics in Recreational Areas of Hot Springs in Taiwan

開南大學
休閒事業管理學系
助理教授

張誠信*

Cheng-Shin Jang

國立台灣大學
生物環境系統工程學系
博士班研究生

林清傑

Ching-Chieh Lin

財團法人台北市七星
農田水利研究發展
基金會 研究員

陳世楷

Shih-Kai Chen

開南大學
休閒事業管理學系
學生

郭嘉惠

Ghia-Hui Kuo

開南大學
休閒事業管理學系
學生

周聖堯

Sheng-Yao Chou

摘要

本研究將應用因子分析法探討台灣溫泉休閒遊憩地區水質特性，並計算各因子之得分(score)，並繪製其空間分佈，探討因子得分與 Piper 水質圖、溫泉地質分類(火成岩與非火成岩)、酸鹼值(酸性與非酸性)、溫度(高溫與低溫)關係。由分析結果顯示溫泉水質可區分為三個水質因子，因子一推測為火成岩溫泉水質特性，主要組成包含 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、pH，因子二推測為非火成岩溫泉水質特性，主要組成包含 Cl^- 、 HCO_3^- 、 Na^+ ，因子三推測為溫泉水溫特性，主要組成包括水溫與 SiO_2 。因子一高得分區域位於北部大屯山溫泉休閒遊憩地區，因子二高得分區域位於台南中崙與關仔嶺溫泉休閒遊憩區，因子三高得分區為中央山脈南、北兩區域。以 Piper 水質圖觀察因子一與因子二，分別落於 III 與 IV 區、IV 與 I 區，代表因子一為火山地區與海水入侵之水質特性，因子二可能為一般深層自由含水層地下水水質特性與海水入侵之水質特性。比較溫泉水質與水溫、酸鹼值、地質分類之後，發現溫泉地質上形成方式，對於溫泉水質變化最具有顯著差異，溫泉酸鹼值次之，溫泉水溫對於水質影響最小，僅與二氧化矽有關。

*通訊作者，開南大學休閒事業管理學系助理教授，33857 桃園縣蘆竹鄉開南路 1 號，csjang@mail.knu.edu.tw

關鍵詞：因子分析，溫泉，水質，Piper 水質圖，酸鹼值。

ABSTRACT

This study used factor analysis to explore water quality of recreational hot springs in Taiwan, and computed and mapped scores of factors. Scores of factors were plotted in a Piper diagram to discuss their formations of recreational hot springs. Three classifications of hot spring - geological formations (volcanic or non-volcanic hot springs), pH (acid or non-acid hot springs) and temperatures (low or high temperatures) - were adopted to examine scores of factors. The study results reveal that there are three factors of water quality of hot springs in Taiwan. Factor 1 which includes SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} and pH present characteristics of water quality of volcanic hot springs. Factor 2 which contains Cl^- , HCO_3^- and Na^+ exhibits characteristics of water quality of non-volcanic hot springs. Factor 3 which includes temperature and SiO_2 presents thermal characteristics of water quality of hot springs. Factor 1 with a high score is distributed in hot springs of the Da-Twen Mountain. Factor 2 with a high score is situated in hot springs of the Chung-Lun and Kuan-Tzu-Ling in Tainan. Factor 3 with a high score presents in hot springs of the northern and southern Central Maintain. According to the Piper's diagram, factor 1 falls into zones III and IV, representing that the formation of hot springs are associated with volcanic activities and seawater intrusion, respectively. Factor 2 falls into zones I and IV, representing that the water quality of hot springs are similar to that of deep unconfined groundwater and is associated with seawater intrusion, respectively. To compare with the three classifications in hot springs, geological formations of hot springs have a more significant difference in water quality than the other classifications.

Keywords: Factor analysis, Hot spring, Water quality, Piper's diagram, pH.

一、前言

台灣地區溫泉發展已超過百年歷史，台北北投溫泉、宜蘭礁溪溫泉、新竹清泉溫泉、苗栗泰安溫泉、台南關仔嶺溫泉、屏東四重溪溫泉、台東知本溫泉等都是日據時代就開始發展，現在都成為台灣重要的溫泉休閒遊憩區。近年來，由於國人年平均所得增加，逐漸重視休閒活動，加上媒體休閒娛樂節目大量報導，並引進國外溫泉旅遊相關資訊，促使國內溫泉休閒產業蓬勃發展。

根據「溫泉法法規彙編」(經濟部水利署, 2005) 其中「溫泉標準」定義為溫泉露頭或溫泉孔口測得之泉溫為攝氏 30 度以上，且泉質符合下列各款之一者：

1. 溶解固體量(TDS)：在 500 mg/L 以上。
2. 主要含量陰離子：碳酸氫根離子(HCO_3^-) 250 mg/L 以上、硫酸根離子(SO_4^{2-}) 250 mg/L 以上或氯離子(含其他鹵族離子) Cl^- , including other halide) 250 mg/L 以上。
3. 特殊成分：游離二氧化碳(CO_2) 250 mg/L 以上、總硫化物(Total sulfide)大於 1 mg/L、總鐵離子($\text{Fe}^{+2}+\text{Fe}^{+3}$)大於 10 mg/L 或鐳(Ra)大於一億分之一(curie/L)。

溫泉標準所定義之冷泉，指溫泉露頭或溫泉孔口測得之泉溫小於攝氏 30 度且其游離二氧化碳為 500 mg/L 以上者。由溫泉定義顯示其水質特性異於一般地面水與地下水，且為構成溫泉極重要之條件，有進行深入探討之必要。

1956 年之前地質學家多認為溫泉由岩漿水與天水所構成，至 1956 年後，根據氫氧同位研究(Craig *et al.*, 1956; Craig, 1966; White, 1975)證明大部分溫泉水來自雨水，因此溫泉形成必需足夠天水供應，另外為存在特定加熱源。陳肇夏(1981)對溫泉特定加熱源進行分類，第一類存在地殼淺層尚未完全冷卻之侵入岩體或岩漿庫，該類熱源通常可達 90°C/km；第二類存在隱沒帶上方之地函熱瘤(mantle thermal diapir)地殼淺層尚未完全冷卻之侵入岩體或岩漿庫，該類熱源地溫梯度在 30~90°C/km 之間，以 45~60°C/km 最為常見；第三類為一般地熱，該類熱源地溫梯度較低，在 30°C/km 之間，且必須有適當地質構造，如高滲透性含水層、低滲透性阻水層存在。溫泉可依據水質特性、地質、水溫特性進行分類(陳肇夏, 1994)，其中溫泉水質特性可依據 pH 區分強酸性溫泉(pH<4)、弱酸性溫泉(4<pH<6)、中性(6<pH<8)、弱鹼性溫泉(pH>8)，地質特性分類包括火成岩區溫泉、變質岩區溫泉、沉積岩區溫泉，水溫特性分類包括沸騰溫泉(>97°C)、高溫溫泉(75°C 至 96°C 之間)、中溫溫泉(50°C 至 74°C 之間)、低溫溫泉(低於 50°C 至高於年平均氣溫 5°C 之間)。

一般而言，溫度、pH 與水化學成分亦有相當之關係，水溶液溶質溶解度會隨溫泉溫度上升而增加(Zhu and Yu, 1995)，各溶質溶解度亦隨溫泉之 pH 改變，而有所不同，由於溫泉深處與淺處(接近地表)之壓力、pH 值、氧化還原環境不同，因此當深層溫泉水進入淺處後，水中溶解物因溶解度減小，產生大量沉積，如 Fe(OH)₃、SiO₂、CaCO₃ 等，但溫泉水中仍有部分溶解之沉積物。溫泉主要陰離子包括氯離子、碳酸根及碳酸氫根離子、硫酸根離子，溫泉主要陽離子包括鈉離子、鉀離子、鈣離子、鎂離子、矽離子等，這些陰陽離子最主要之來源為溫泉地層岩石，但也會受到地表水與海水等外界流體水質侵入，這些陽離子濃度高低與岩石溶解度亦受到溫度與 pH 值之影響。另外，陳耀麟(2002)利用多項水質之比值如 Cl⁻/SO₄²⁻與 Na⁺/Ca²⁺區分沉積岩區溫泉與火山岩區溫泉。

過去多變量分析常使用於探討水質化學特性，如 Olmez *et al.* (1994)、Mahknecht *et al.* (2003)、Farnham *et al.* (2003)、Liu *et al.* (2003)、Love *et al.* (2004)皆利用因子分析法探討水質演化過程與其特性。過去許多國人認為不同溫泉水質特性對人體具有療效(張育銓, 2003)，如碳酸氫鈉泉對外傷、發炎、疤痕有療效，酸性硫酸鹽泉可舒緩慢性皮膚病，氯化物泉被認為可強化骨骼及肌肉、提高新陳代謝等，因此溫泉水質對溫泉產業發展有相當之影響，且許多有關溫泉休閒遊憩研究指出「溫泉水質」將會影響遊客消費意願(林中文, 2001；黃文星及李宏安, 2002；黃旭男等, 2002；方怡堯, 2004)。

本研究將應用因子分析法探討台灣溫泉休閒遊憩地區水質特性，計算各因子之得分(score)，並繪製其空間分佈，探討因子得分與 Piper 水質圖、溫泉地質分類(火成岩與非火成岩)、酸鹼值(酸性與非酸性)、溫度(高溫與低溫)關係，期望本研究結果能對於台灣地區溫泉休閒產業發展有所助益。

二、溫泉水質資料

根據工業技術研究院能源與資源研究所(2000; 2001; 2002; 2003; 2004)整合過去有關溫泉水質資料及現場採集樣品試驗分析溫泉水質，台灣各縣市溫泉共 121 處，本研究可收集 113 處完整溫泉水質資料(如表 1)，其中以地質分類屬火成岩 30 處、變質岩 68 處、沉積岩 15 處(如圖 1)，以水溫分類屬沸騰溫泉 4 處、高溫溫泉 20 處、中溫溫泉 44 處、低溫溫泉 42 處、冷泉 3 處，依據 pH 區分強酸性 22 處、弱酸性 1 處、中性 68 處、弱鹼性溫泉 22 處。

較完整之溫泉水質項目包括水溫、pH、氯離子、硫酸根離子、碳酸氫根離子、二氧化矽、鈉離子、鉀離子、鈣離子、鎂離子等十項，另外部分溫泉尚有鐵離子、鋁離子、導電度、硝酸鹽氮離子、氟離子、磷酸根離子、總溶解固體量(TDS)、硼等八項水質項目可提供水質特性一致性之校核比對，若同一地區溫泉水質資料超過一筆，選取水質資料一致性高者平均之。

表 1 台灣溫泉名稱

縣市	數目	名稱
台北市	18	硫磺谷、小油坑、冷水坑、北投地熱谷、馬槽、湖山、小隱潭、鼎筆橋、頂北投、陽明山、竹子湖、胡宗南墓、中山樓、長春、挹翠橋、七股、下七股、翠林橋
台北縣	14	大油坑、四磺子坪、八煙、庚子坪、庚子坪後山、磺山、金山、大埔、加投、金泉、水尾、社寮、三芝冷泉、烏來
桃園縣	3	四稜、新興、爺亨(八陵)
新竹縣	5	小錦屏、秀巒、清泉、泰崗、北埔冷泉
苗栗縣	1	泰安
台中縣	4	谷關、馬陵、神駒谷、白冷
南投縣	14	十八重溪、惠蓀(咖啡園)、東埔、樂樂、和社、春陽、太魯灣、紅香、奧萬大、瑞岩、精英、廬山、雲海一號、雲海二號
嘉義縣	1	中崙
台南縣	4	六重溪、龜丹、關仔嶺、南化玉山村
高雄縣	9	不老、石洞、多納、桃源、高中、富源、寶來、七坑、十三坑
屏東縣	5	大武村、四重溪、旭海、士文溪、雙流
台東縣	10	土坂、利吉、利稻(戒莫斯)、知本、金鋒、金崙、紅葉谷、桃林、轆轤、霧鹿
花蓮縣	9	二子、文山、安通、東里、紅葉、富源、瑞穗、萬里、富里
宜蘭縣	16	大濁水、五區、仁澤、布蕭丸、四季、四區、天狗(田古爾)、清水、土場、茂邊、員山、烏帽、排骨溪、梵梵、礁溪、蘇澳冷泉

表 2 為十項主要溫泉水質統計資料，水溫範圍在 17.8°C 至 99°C 之間，pH 範圍在 1.46 至 9.80 之間，溫泉陰離子濃度以 HCO_3^- 最高、 Cl^- 次之，陽離子濃度以 Na^+ 最高， Mg^{2+} 最少，其中多項溫泉水質數據最小值為低於偵測極限以下，如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 SiO_2 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} ，在進行統計分析時，以零代入計算。

三、研究方法

3.1 因子分析法

因子分析乃以少數幾個因子解釋一群相互之間有關係存在之變數，達成「資料簡化與摘要」

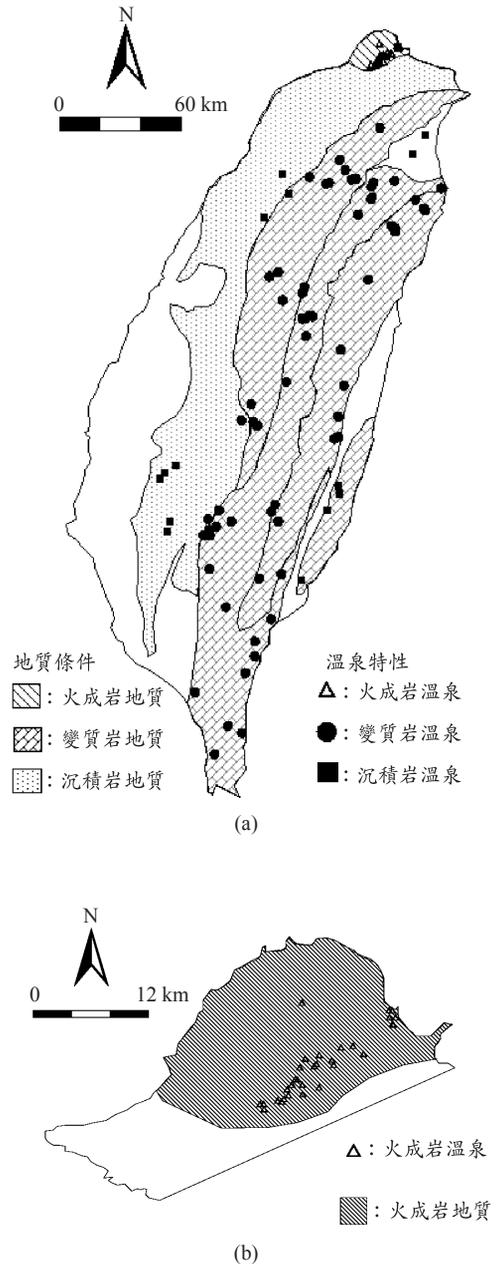


圖 1 (a)台灣地區溫泉分佈、(b)大屯山區溫泉分佈 (為圖 1(a)北部大屯山地區局部放大)

之目的。因子分析乃針對內部相關性高之變數做資料簡化之工作，本研究以相關矩陣計算分析水質項目，所以其是將每個變數同等看待，且因子分析具有維度降低，即降低變數個數之好處，

表 2 溫泉水質統計分析

水質項目	平均數	中位數	標準差	最小值	最大值
T (°C)	56.9	54.4	18.6	17.8	99.0
pH	6.45	7.00	2.07	1.46	9.80
Cl ⁻ (mg/L)	441.3	22.7	1280	ND	9497
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	270.7	51.2	560	ND	4161
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	834.9	504.8	1532	ND	10900
SiO ₂ (mg/L)	64.4	47.0	56	ND	308
Na ⁺ (mg/L)	534.1	267.0	1077	9.8	9524
K ⁺ (mg/L)	27.0	8.8	59.6	0.2	466
Mg ²⁺ (mg/L)	20.7	6.3	37.0	ND	253
Ca ²⁺ (mg/L)	63.2	25.7	88.3	ND	637

ND：未偵測出該項目濃度，統計計算時，以零代入

其僅考慮幾個前面主因子而忽略後面的一些因子之方式來達成，故會損失少部份的訊息(Sharma, 1996)。分析步驟簡述如下：

3.1.1 原始數據資料之標準化

- (1) 由於各個變數之單位不盡不同，且有些變數之變異過大，故先將原始變量數與觀測樣本數所構成之原始數據矩陣予以標準化轉換，標準化轉換後所得之數據矩陣，其平均值為 0，標準偏差為 1。
- (2) 假設資料有 n 個觀測樣本數(於本研究中即為溫泉數量)，且每個觀測樣本數有 p 個變量數(於本研究中即為各溫泉所選取之水質檢測項目)，即構成一個 p×n 之原始數據矩陣 **X**：

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pn} \end{bmatrix}_{p \times n} \dots\dots\dots(1)$$

首先將原始數據進行標準化轉換，即：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{s_i} \text{ (其中, } i=1, 2, \dots, p; j=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots(2)$$

其中 X_{ij} ：為第 j 個樣本其第 i 個變量數之測值。

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \text{ : 為第 } i \text{ 個變量數之平均值。}$$

$$s_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2} \text{ : 為第 } i \text{ 個變量數之標準偏差}$$

經過標準化後之矩陣(**Z**)之元素 z_{ij} ，其平均值為 0，標準偏差為 1；因此，相關矩陣(**R**)如(3)式：

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \dots & 1 \end{bmatrix}_{p \times p} \dots\dots\dots(3)$$

$$\text{其中, } r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{k=1}^n (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}}$$

3.1.2 相關矩陣(**R**)之主成份分析

- (1) 由上述過程所產生之相關矩陣求解其特徵值及其相對應之標準特徵向量，進而求得因子負荷矩陣。
- (2) 由特徵方程式解其相對應之標準特徵向量，如(4)式

$$|\mathbf{R} - \lambda \mathbf{I}| = 0 \dots\dots\dots(4)$$

求解出之特徵值為 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ ，且 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_p \geq 0$ ；而此時各特徵值相對應之特徵向量為標準特徵向量(**u**)元素 $u_i (i=1, 2, 3, \dots, p)$ ，p 個特徵值對應標準特徵向量矩陣為：

$$U = u^T \cdot u = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1p} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{p1} & u_{p2} & \cdots & u_{pp} \end{bmatrix}_{p \times p} \quad \dots\dots\dots(5)$$

其中 $u_{ij}=1$ (若 $i = j$)， $u_{ij}=0$ (若 $i \neq j$; $i=1, 2, \dots, p, j=1, 2, \dots, p$)，由主成份分析法之原理可得知，

$$Y = U^T Z \quad \dots\dots\dots(6)$$

(6)式中， Y 為一組原始變量 $x_1、x_2、\dots、x_p$ 所重新組合彼此互為獨立之新變量矩陣，換言之，即為新選取出之主成份， Z 則為標準化後之數據矩陣。於(6)式之兩邊同乘以 U ，則(6)式可轉換改寫為：

$$Z = UY \quad \dots\dots\dots(7)$$

因為 Y 是原始變量 X 之組合，故應對 Y 進行標準化處理，而使得其能與 Z 相匹配：

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & & & 0 \\ & \sqrt{\lambda_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sqrt{\lambda_p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{y_1}{\sqrt{\lambda_1}} \\ \frac{y_2}{\sqrt{\lambda_2}} \\ \vdots \\ \frac{y_p}{\sqrt{\lambda_p}} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\text{令 } f_1 = \frac{y_1}{\sqrt{\lambda_1}}, f_2 = \frac{y_2}{\sqrt{\lambda_2}}, \dots, f_p = \frac{y_p}{\sqrt{\lambda_p}}$$

則(8)可改寫為：

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\lambda_1} & & & 0 \\ & \sqrt{\lambda_2} & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sqrt{\lambda_p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_p \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(9)$$

故

$$Z = UY = \begin{bmatrix} u_{11}\sqrt{\lambda_1} & u_{12}\sqrt{\lambda_2} & \cdots & u_{1p}\sqrt{\lambda_p} \\ u_{21}\sqrt{\lambda_1} & u_{22}\sqrt{\lambda_2} & \cdots & u_{2p}\sqrt{\lambda_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{p1}\sqrt{\lambda_1} & u_{p2}\sqrt{\lambda_2} & \cdots & u_{pp}\sqrt{\lambda_p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_p \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(10)$$

3.1.3 確定主因子

保留特徵值大於 1 之因子，為最常被用來作為選取因子個數之準則，且選取因子之解說總變異量達到研究者設定之門檻(如 70%以上)。

3.1.4 因子軸之旋轉

因子分析就是想找共同因子使因子負荷矩陣趨向單純，轉軸之原則旨在能符合簡單結構，亦即在於使經過轉軸後之因子矩陣中每一個變數都只歸於一個或少數幾個因子上，使因子之解釋由繁雜趨向簡單，本研究以四方最大法(Quartimax)對因子負荷矩陣進行旋轉，使得因子負荷矩陣之平方向 0 和 1 兩極轉化，達到其結構簡化與主因子意義清晰之目的。

3.1.5 因子之得分計算

將因子得分係數與標準化後之原始數據資料矩陣乘積和而得。

3.2 變異數分析

變異數分析(Analysis of Variance, ANOVA)是應用統計檢定某項因子(factor)在不同水準(level)狀況下，被量測變數之平均值是否有顯著差異。本研究變異數分析是針對某因子兩個水準進行分析，分析其分組(between)均方(mean square)與組內(within)均方之比值(即 F 值)。

若變量變異數分析結果(P 值)大於顯著水準(本研究使用 0.05)，則接受虛無假說(null hypothesis, H_0)，代表該因子各項水準不具有顯著差異，反之則反駁虛無假說，接受對立假說(alternative hypothesis, H_1)，代表變數因子水準之效應不為零，即具有顯著差異性，詳細變異數分析理論請參考 Sharma (1996)。另外，本研究繪製盒鬚(box-and-whiskers)圖，輔助說明因子不同水準之差異與分布。

四、結果與討論

4.1 溫泉水質之因子分析

由於有許多水質項目之單位不同，如 pH、水溫與氯離子等，且相互之間變異甚大，因此本研究先將各水質項目之變異標準化，再進行相關性分析，表 3 列出溫泉水質項目相關矩陣，其中

表 3 溫泉水質項目之相關係數矩陣

	T	pH	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
T	1	-0.03	-0.06	0.22	-0.08	0.42	-0.06	0.12	-0.03	-0.09
pH		1	-0.13	-0.62	0.25	-0.33	0.13	-0.35	-0.46	-0.33
Cl ⁻			1	0.12	0.53	0.06	0.89	0.67	0.42	0.26
SO ₄ ²⁻				1	-0.22	0.36	-0.10	0.34	0.38	0.47
HCO ₃ ⁻					1	-0.04	0.79	0.15	-0.06	-0.17
SiO ₂						1	-0.01	0.22	0.22	0.14
Na ⁺							1	0.40	0.10	0.00
K ⁺								1	0.73	0.45
Mg ²⁺									1	0.65
Ca ²⁺										1

Na⁺與 Cl⁻、Na⁺與 HCO₃⁻、HCO₃⁻與 Cl⁻、K⁺與 Cl⁻、Mg²⁺與 K⁺、Mg²⁺與 Ca²⁺呈現較高之正相關性(R>0.5)，pH 與 SO₄²⁻呈現較高之負相關性(R<-0.5)。

利用因子分析四方最大(Quartimax)法經過座標旋轉後，十個水質項目可簡化區分為三個主要因子(如表 3)，並佔整體變異量之 74.2%，已超過解說總變異量 70%之門檻值，其中因子一(factor 1)與 SO₄²⁻、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺呈現高度正相關性(R≥0.69)，pH 呈現高度負相關性(R = -0.71)，共可解釋整體變異量之 34.1%，因子二(factor 2)與 Cl⁻、HCO₃⁻、Na⁺呈現高度正相關性(R≥0.84)，共可解釋整體變異量之 26.2%，因子三(factor 3)與溫泉、SiO₂ 呈現高度正相關性(R≥0.77)，共可解釋整體變異量之 13.9%。由 pH 項目之負荷為負值，可判斷因子一所組成之水質成分顯示其水質特性為酸性環境，且根據 González-Partida *et al.* (2005)以地球化學微量同位素方式研究指出火山岩地質中岩石礦物(斜長石、正常石、白雲母、角閃石)主要化學成分為 K₂SO₄、MgSO₄、CaSO₄，其中硫酸根來源為火山氣體硫化氫(H₂S)接觸水份後，氧化形成硫酸，再沈澱形成硫酸鹽類岩石，因此因子一應為火成岩區溫泉水質特性。由因子二所組成之水質成分是以 NaCl、NaHCO₃ 等鹽類所組成，雖因子二組成中未包含 pH，但碳酸根離子與碳酸氫根離子主要來源為空氣中二氧化碳溶解水中所形成，或由岩石中所溶解，碳酸根、碳酸氫根濃度變化與溫

泉水質 pH 值十分相關，pH 在 4.5 至 8 之間，水中碳酸鹽大多以 HCO₃⁻形式出現，CO₃²⁻約為 HCO₃⁻之 2%以下，當 pH 為 9 時，CO₃²⁻僅為 HCO₃⁻之 11%，pH 超過 9.5 時，CO₃²⁻快速上升，pH 在 10 時，CO₃²⁻約等於 HCO₃⁻ (Sawyer and McCarty, 1978)，另外，氯離子主要來源可能為海水或火山氣體中含有鹽酸成份，但該水質特性同時包含碳酸氫根，水質未呈現酸性，土壤及岩石為海相沈積物，因此因子二可能為非火成岩區溫泉(變質岩區溫泉、沉積岩區溫泉)特性，尤其是以沈積岩環境中曾經為海相沉積物，後來經過板塊隆起之造山運動，即沈積岩溫泉水質氯離子來源。由因子三所組成之水質成分為溫度、SiO₂，其中 SiO₂ 即為 H₄SiO₄(矽酸)，Truesdell and Fournier (1975)與 Swanberg and Morgan (1979; 1985)提出可用 SiO₂ 推估溫泉地質溫度，其公式如下：

絕熱冷卻

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1533.5}{5.768 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \dots\dots\dots (11)$$

傳導冷卻

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{1315}{5.205 - \log \text{SiO}_2} - 273.15 \dots\dots\dots (12)$$

由表 3 各水質項目原始資料相關性分析顯示水溫與 SiO₂ 相關係數為 0.42，即兩者存在若干相關性，如(11)與(12)式，不論為絕熱冷卻與傳導冷卻，溫度與 SiO₂ 雖然變化不呈現正比例，但當溫

泉水中濃度 SiO_2 越高，溫泉水溫越高。經過因子分析法座標轉換與旋轉後，可將該非線性關係線性化，兩者與所主要組成因子(因子三)皆呈現高度線性關係(負荷分別為 0.85 與 0.77)，因此，因子三可能為溫泉水溫因子。

4.2 溫泉水質之因子得分分析

將因子一、因子二與因子三以 Surfer 軟體繪製空間分佈(如圖 2(a)、(b)與(c))，因子一高得分區域為北部大屯山溫泉休閒遊憩地區，其餘地區得分較低，因子二高得分地區為中崙與關仔嶺溫泉休閒遊憩地區，該兩處溫泉地質環境屬於沉積岩區溫泉，中性至偏弱鹼性水質， Cl^- 與 HCO_3^- 濃度皆高，相反地，北部大屯山溫泉休閒遊憩地區得分低，因子三高得分地區包括中央山脈北段(宜蘭)與南段(台東)變質岩溫泉休閒遊憩地區。

土壤、岩石成分與地質結構為決定溫泉水質的主要因素，不同地質化學反應過程決定溫泉水質成分特性，Piper 水質圖常常應用於地下水與溫泉水質特性之探討，Piper 水質圖以主要陽離子為鹼金屬(Na^+ 與 K^+)以及鹼土金屬(Ca^{2+} 、 Mg^{2+}) (如圖 3 左下)；主要陰離子為氯(Cl^-)、硫酸根(SO_4^{2-})，及碳酸根與碳酸氫根($\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) (如圖 3 右下)，水質依據此八種陰陽離子之所佔莫耳濃度百

分比，依序繪出右下方代陰離子及左下方代表陽離子之點位，由此兩點位分別做平行線於圖上方菱形內形成一交會點，由點之位置即可判斷該水質主要之水質成分(Freeze and Cherry, 1979)。將因子一與因子二之溫泉水質特性標示於 Piper 水質圖中，如圖 3 所示，因子一包含高濃度之 SO_4^{2-} 陰離子與 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 陽離子，因此因子一之溫泉水質特性落在 Piper 水質圖 III、IV 區，因子二包含高濃度之 Cl^- 、 HCO_3^- 陰離子與 Na^+ 陽離子，因此因子二之溫泉水質特性落在

表 4 轉軸後因子與溫泉水質項目負荷(具有高度相關性者以黑粗體表示)

水質項目	因子一	因子二	因子三
T	-0.04	-0.02	0.85
pH	-0.71	0.18	-0.21
Cl^-	0.38	0.87	-0.04
SO_4^{2-}	0.69	-0.16	0.35
HCO_3^-	-0.25	0.84	0.00
SiO_2	0.29	0.01	0.77
Na^+	0.00	0.97	-0.02
K^+	0.71	0.49	0.09
Mg^{2+}	0.85	0.17	-0.07
Ca^{2+}	0.79	-0.02	-0.18

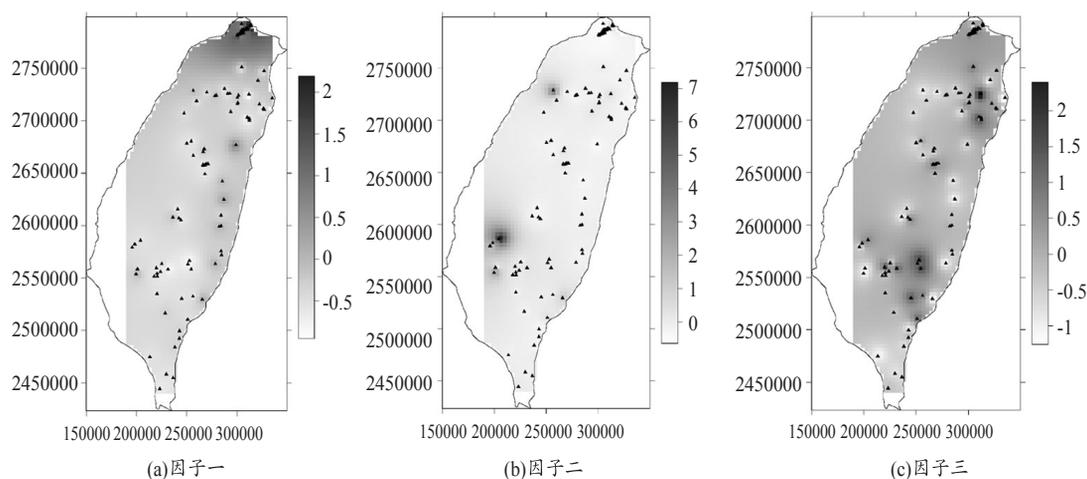


圖 2 溫泉水質因子得分空間分佈圖(▲符號為溫泉分佈)

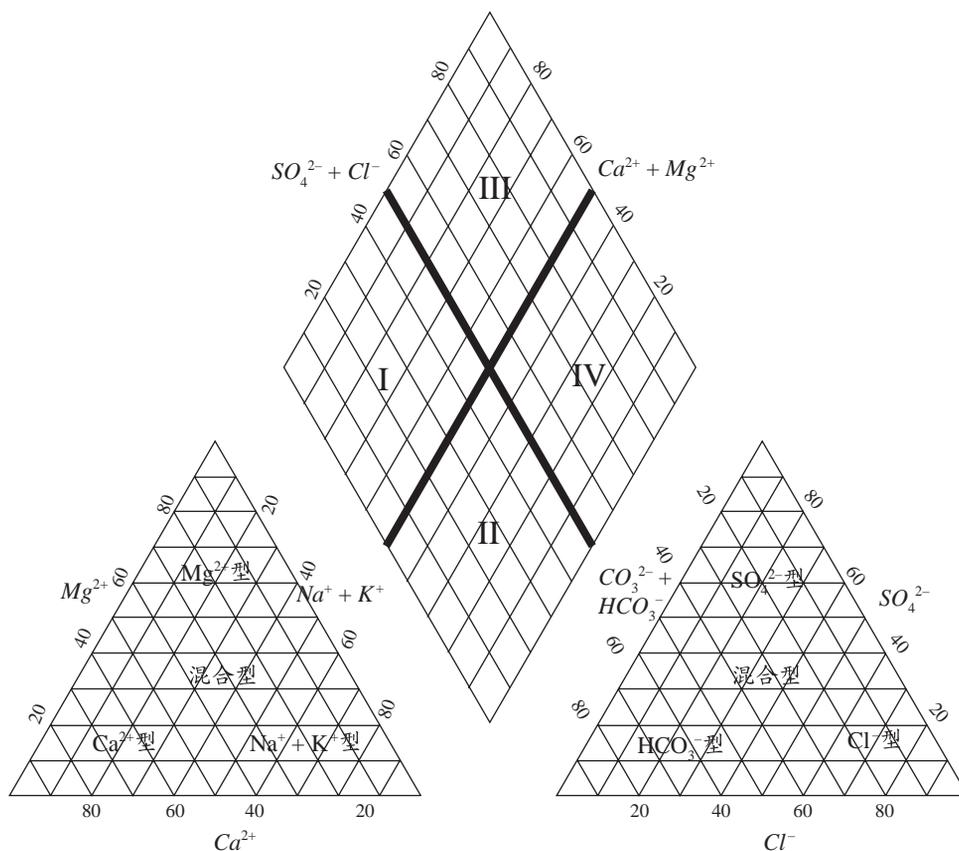


圖 3 Piper 水質圖

Piper 水質圖 I、IV 區。一般而言，I 區(Carbonate hardness)是以 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 為主，正常深層自由含水層地下水、雨水、河水在此範圍；II 區(Carbonate alkali)是以 NaHCO_3 為主，正常深層受壓含水層地下水在此範圍；III 區(Non-carbonate hardness)是以 CaSO_4 、 CaCl_2 為主，受農業污染及火山地區之地下水在此範圍；IV 區(Non-carbonate alkali)是以 Na_2SO_4 、 NaCl 為主，海水及受海水入侵之地下水在此範圍。因此，因子一為類似火山地區之地下水與海水入侵之地下水水質特性，因子二為類似深層自由含水層地下水水質特性，地熱來源為地溫梯度，與遭受海水入侵之地下水水質特性。

將溫泉區分為火成岩與非火成岩，以變異數分析探討溫泉水溫與酸鹼值分佈(如圖 4)，研究結果顯示火成岩溫泉與非火成岩溫泉在泉水溫

度上並無明顯差別($p=0.57$)，但火成岩溫泉酸鹼值明顯低於非火成岩溫泉($p=0.00$)。另外，本研究將各因子之得分，依照高溫與低溫、酸性與非酸性、火成岩與非火成岩等特性進行分類，以變異數分析探討三個水質因子在不同分類情況之下，是否具有顯著差異。一般而言，水溫溫度超過 97°C 為沸騰溫泉，水溫溫度介於 75°C 至 96°C 之間為高溫溫泉，水溫溫度介於 50°C 至 74°C 之間為中溫溫泉、水溫溫度介於 50°C 至高於年平均氣溫 5°C 之間為低溫溫泉。本研究以溫泉水溫超過 75°C 與 50°C 兩組區分為高溫與低溫溫泉水質，以避免過度主觀，影響分析結果，酸性與非酸性溫泉是以酸鹼值小於 6 視為酸性溫泉，大於 6 為非酸性溫泉。研究結果顯示不論以 75°C 與 50°C 區分高溫與低溫溫泉，因子一與因子二並無明顯差別(圖 5(a)與圖 5(b))，僅因子三具有顯著

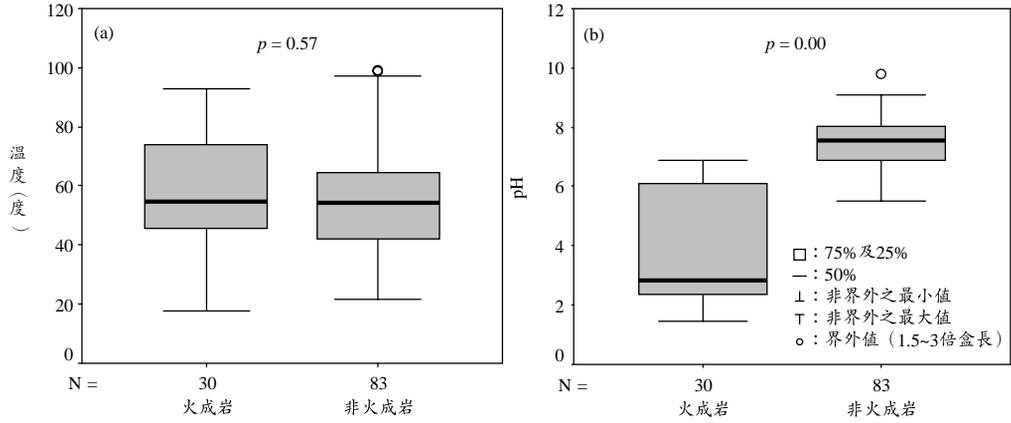


圖 4 溫泉水質之 pH、溫度與地質分類關係

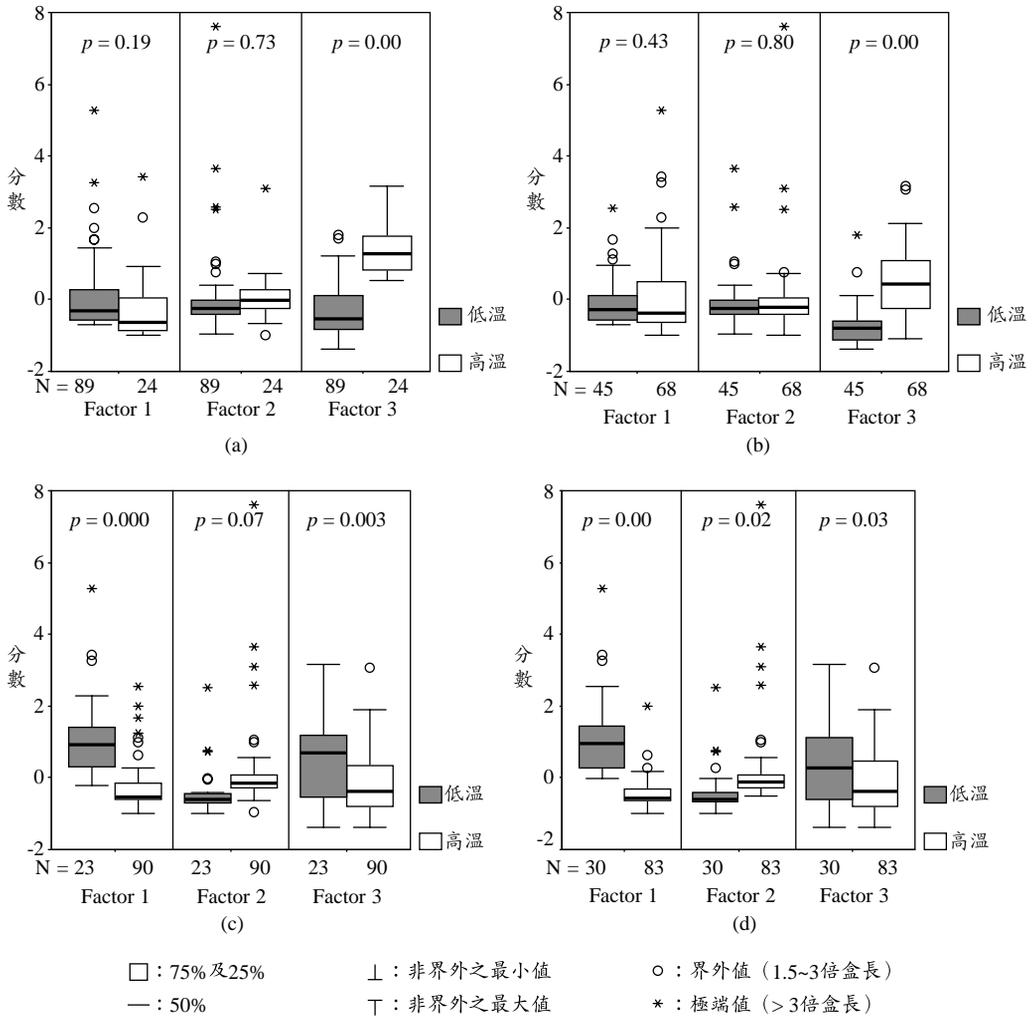


圖 5 溫泉水質因子得分與溫度分類、pH 分類、地質分類

差別；若以酸鹼值區分酸性與非酸性溫泉，因子一與因子三具有顯著差異性($p = 0.00$ 與 0.003)，但因子二並無明顯差別($p = 0.07$) (圖 5(c))；若以火成岩與非火成岩區分溫泉水質因子，因子一、因子二與因子三皆具有顯著差異性($p = 0.00$ 、 0.02 與 0.03) (圖 5(d))。比較上述分析結果顯示溫泉地質形成方式，對於溫泉水質變化最具有顯著差異。

五、結 論

本研究利用因子分析探討溫泉休閒遊憩區水質特性，由分析結果顯示溫泉水質可區分為三個水質因子，因子一推測為火成岩區溫泉水質特性，因子主要成分包含 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 pH ，高得分地區主要分佈於北部大屯山溫泉休閒遊憩區，因子二推測為非火成岩區溫泉水質特性，因子主要成分包含 Cl^- 、 HCO_3^- 、 Na^+ ，高得分地區主要分佈於台南中崙與關仔嶺溫泉休閒遊憩區，因子三推測與溫泉水溫有關，因子主要成分包括水溫與 SiO_2 ，高得分地區主要分佈於中央山脈南、北兩溫泉區。以 Piper 水質圖觀察因子一與因子二，分別落於 III 與 IV 區、IV 與 I 區，代表因子一為火山地區與海水入侵之水質特性，因子二可能具有深層自由含水層地下水水質特性與海水入侵之水質特性。比較溫泉水溫、酸鹼值與地質分類發現溫泉地質形成方式，對於溫泉水質變化最具有顯著差異，溫泉酸鹼值次之，溫泉水溫對於水質影響最小，僅與二氧化矽有關。

參考文獻

1. Craig, H., 1966. Superheated steam and mineral-water interactions in the geothermal areas. *Am. Geophys. Union Trans.* 47: 204-205.
2. Craig, H., Boato, G., and White, D.E., 1956. Isotopic geochemistry of thermal waters. *Natl. Acad. Sci.* 400: 29-38.
3. Farnham, I. M., Johannesson, K. H., Singh, A. K., Hodge, V. F., and Stetzenbach, K. J., 2003. Factor analytical approaches for evaluating groundwater trace element chemistry data. *Analytica Chimica Acta* 490(1-2): 123-138.
4. Freeze, R. A. and Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, New Jersey, USA. pp. 249.
5. González-Partida, E., Carrillo-Chávez, A., Levresse, G., Tello-Hinojosa, E., Venegas-Salgado S., Ramirez-Silva, G., Pal-Verma M., Tritlla, J., and Camprubi, A., 2005. Hydro-geochemical and isotopic fluid evolution of the Los Azufres geothermal field, Central Mexico. *Applied Geochemistry* 20: 23-39.
6. Liu, C.W., Lin, K. H., and Kuo, Y. M., 2003. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *Science of the Total Environment* 313: 77-89.
7. Love, D., Hallbauer, D., Amos, A., and Hranova, R., 2004. Factor analysis as a tool in groundwater quality management: Two southern African case studies. *Physics and Chemistry of the Earth* 29(15-18): 1135-1143.
8. Mahlkecht, J., Steinich, B., and Navarro, de León, I., 2003. Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models. *Environmental Geology* 45(6): 781-795.
9. Olmez, I., Beal, J.W., and Villaume, J.F., 1994. New approach to understanding multiple-source groundwater contamination: Factor analysis and chemical mass balances. *Water Research* 28(5): 1095-1101.
10. Sawyer, C. N. and McCarty, P. L., 1978. *Chemistry for Environmental Engineering*. 3rd edition. McGraw-Hill, New York. pp. 371-373.
11. Sharma, S. 1996. *Applied Multivariate Techniques*. John Wiley & Sons Inc., NY, USA. pp. 90-143.
12. Swanberg, C. A. and Morgan, P.P., 1979. The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater and regional

- heat flow: A new heat flow map of the United States. *Pure and Applied Geophysics* 117: 227-241.
13. Swanberg, C. A. and Morgan, P. P., 1985. Silica heat flow estimates and heat flow in the Colorado Plateau and adjacent areas. *Journal of Geodynamics* 3: 65-85.
 14. Truesdell, A. H. and Fournier, R. O., 1975. Calculation of deep temperature in geothermal system from the chemistry of boiling waters of mixed origin: 2nd UN Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, Proceedings, vol. 1: p.837-844.
 15. White, D. E., 1975. Magmatic connate and metamorphic water. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 68: 1659-1682.
 16. Zhu, B. Q. and Yu, H., 1995. The use of geochemical indicator elements in the exploration for hot water sources within geothermal fields. *Journal of Geochemical Exploration* 55: 125-136.
 17. 工業技術研究院能源與資源 研究所，2000，台灣溫泉水資源之調查及開發利用(1/4)，經濟部水利署，台北
 18. 工業技術研究院能源與資源 研究所，2001，台灣溫泉水資源之調查及開發利用(2/4)，經濟部水利署，台北
 19. 工業技術研究院能源與資源 研究所，2002，台灣溫泉水資源之調查及開發利用(3/4)，經濟部水利署，台北
 20. 工業技術研究院能源與資源 研究所，2003，台灣溫泉水資源之調查及開發利用(4/4)，經濟部水利署，台北
 21. 工業技術研究院能源與資源 研究所，2004，台灣溫泉水資源之調查及開發利用(1/4-4/4) 全程計畫摘要報告，經濟部水利署，台北
 22. 方怡堯，2004，溫泉遊客遊憩涉入與遊憩體驗關係之研究-以北投溫泉為例，台灣師範大學運動休閒與管理研究所碩士論文，台北
 23. 林中文，2001，溫泉遊憩市場區隔之研究-以礁溪溫泉區為例，東華大學企業管理研究所碩士論文，花蓮
 24. 黃文星及李宏安，2002，台中市溫泉消費市場之研究，*台灣土地金融季刊*, 39(4), 181-200
 25. 黃旭男、張德儀及孫仁和，2002，台北市溫泉遊憩區旅客行為之研究，*戶外遊憩研究*，15(2)，1-22
 26. 張育銓，2003，溫泉的商品化、殖民化與全球化，*海峽兩岸溫泉學術 討會論文集：觀光休閒產業-溫泉篇*，臺灣觀光經營管理專科學校，花蓮，pp53-94
 27. 陳肇夏，1981，地熱地質與探勘，貞觀出版社，台北
 28. 陳肇夏，1994，大地氣息，陽明山國家公園管理處，台北
 29. 陳耀麟，2002，大屯火山區溫泉水之化學成分及其對河水之影響，*國立臺灣大學地質科學 研究所博士論文*，台北
 30. 經濟部水利署，2005，溫泉法法規彙編，經濟部水利署，台北
- 收稿日期：民國 96 年 11 月 16 日
修正日期：民國 96 年 11 月 28 日
接受日期：民國 97 年 1 月 22 日