

國立台灣師範大學地球科學研究所碩士論文

鮮水河—小江、奠邊府剪切帶之構造史與應變分析

**Structural Evolution and Strain Analysis of
the Xianshuihe-Xiaojiang and Dien Bien Phu
shear zones**

指導教授：李通藝 博士

葉孟宛 博士

研究生：徐永忠

中華民國九十八年一月

國立台灣師範大學碩士學位論文考試

題目：鮮水河—小江、奠邊府剪切帶之構造史
與應變分析

**Structural Evolution and Strain Analysis of the
Xianshuihe-Xiaojiang and Dien Bien Phu Shear Zones**

考試委員：_____

指導教授：李通藝博士

葉孟宛博士

研究生：徐永忠

考試日期：中華民國九十八年一月



誌謝

研究所的求學過程，是我一生跨時代、跨領域、跨過台灣海峽的重要階段，讓我對地質的視野擴展到全世界。

首先要感謝指導教授 李通藝博士，老師無窮無盡的包容、大而無為的放任政策、神來一筆的關鍵提醒，使不材學生我能夠順利完成論文。再來要感謝共同指導 葉孟宛博士啟發式的教導，讓學生能夠發揮無盡潛力；致力研究的精神令人欽佩。感謝台灣大學 羅清華博士，您的同位素定年學讓我涉獵了地質裡一個從未踏足的領域，也讓我有機會參觀清大原子爐。感謝台灣大學 胡植慶博士，您的斷層力學使我對斷層的基礎定義與理論更加清晰。感謝地質調查所 朱傲祖博士在學生遭遇問題時給予提點，您對地質的熱忱、認真的態度、敏捷的思考以及時時掛著和藹的微笑，在在都是學生我學習的榜樣。再次感謝各位老師花費心力對學生的論文給予指點與指正。

感謝文化大學 魏稽生主任、嚴治民學長，無論學識、知識、生活上讓我獲益良多。吳樂群老師、羅偉老師、蔡裕偉老師，感謝您們熱忱的教導，給我對於地質的基本知識。感謝台灣大學葉恩肇學長，您的指點與幫助給了我不同方向的思考。

在師大的日子裡，要感謝福良、宜伶學姊、彥麟、冠英、國恩、進達、光軒、愛玲、怡岑、郁伶、宇平、寧祥、詩敏、嘉修，你們的協助與歡笑，帶給我向前的動力。對了還有錫祥和亞俊。

感謝玲雯、順民、佳蓉、克豪、佑傑、義凱、秉宏、英如、喬均、伯軍、芊、雅頌、壯怡、湘婷、清雲、佩琪、宏偉、博文、以瑛、存義、冠橋，一起野外、一起打球、一起歡樂的日子歷歷在目，如果再回到從前，你們依然是我的好朋友。

最後要感謝我的家人，爺爺、父母親、弟弟，沒有你們默默的支持與付出，就沒有今天的我；以及二十幾年的好朋友方凱、佩蓁、汝崢、盟傑、柏峰、天三、巧燕、悅華，感謝你們的關心。



摘要

新生代印度板塊碰撞聚合歐亞板塊以來，整個亞洲大陸的地殼變形始終不曾間斷。上個世紀，東亞地體的演化以碰撞—脫逸模式為主軸，所以紅河剪切帶這個板塊邊界成為整個研究的重心。到了這個世紀，下部地殼流體模式與地震剪力波分離模式逐漸取代碰撞—脫逸模式的地位，所以戰場也轉移到東亞塊體旋轉的東部邊界：鮮水河—小江、奠邊府剪切帶。過去學者對鮮水河—小江、奠邊府剪切帶的研究一直侷限在測地學上，直到近年來才有學者加上定年資料加以討論。本研究從鮮水河—小江、奠邊府剪切帶大地構造數據資料推論變形歷史，更嘗試以懷氏法與 R_t/ψ 得到的結果比對下部地殼流體模式以及地震剪力波分離模式。

從葉理分析得知，鮮水河—小江剪切帶構造史可以分為五期：第一期（D1）鮮水河區域受東北—西南向的應力，大約相當於 60Ma。印度板塊碰撞歐亞大陸板塊初期；第二期（D2），大約在 30~40Ma。鮮水河區域應力轉成東—西向；第三期（D3）鮮水河區域受逆衝斷層作用影響，使得同斜褶皺轉變成偃臥褶皺；第四期（D4），下部地殼產生塑性流動，驅使鮮水河剪切帶產生左移運動；第五期（D5），鮮水河剪切帶因持續左移運動作用帶動拉張盆地形成正斷層。奠邊府剪切帶構造歷史分為以下三期：第一期（D1），大約在 60Ma。受到東



—西向應力產生同斜褶皺；第二期（D2）約為 30~40Ma.受西北—東南向應力產生偃臥褶皺；第三期（D3）西北—東南向應力持續作用，產生同斜褶皺。

由懷氏應變分析結果得知：鮮水河—小江剪切帶符合下部地殼流體模式，且為地震剪力波分離模式中的耦合；奠邊府剪切帶不符合下部地殼流體模式且為地震剪力波分離模式中的非耦合。再由 R_f/ψ 應變分析結果得知：鮮水河—小江剪切帶符合下部地殼流體模式，且為地震剪力波分離模式中的耦合；奠邊府剪切帶也符合下部地殼流體模式，但是完全不符合地震剪力波分離模式。

關鍵詞：鮮水河—小江剪切帶、奠邊府剪切帶、下部地殼流體模式、地震剪力波分離模式、懷氏法、 R_f/ψ 。

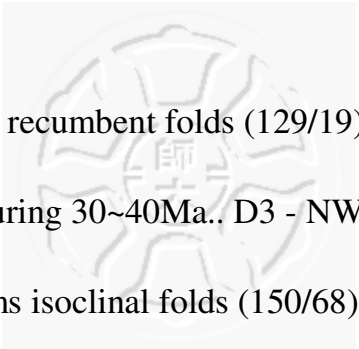


ABSTRACT

The XianshuiHe-Xiaojiang and Dien Bien Phu shear zones defines the eastern boundary of clockwise rotation of Asia crust fragment due to the Cenozoic India-Eurasia collision. Previous studies on these fault zones mainly focused on geodesy. This research used field data and strain analysis (both Fry and R_f/ψ methods) to reconstruct the structural history of the XianshuiHe-Xiaojiang and Dien Bien Phu shear zones.

The reconstructed structural history revealed 5 deformation episodes (D1- D5) of both ductile and brittle structures for the XianshuiHe-Xiaojiang shear zone: the oldest D1- possibly started as the India plate colliding into the Eurasia plate during 60 Ma..D2- forms N-S trending upright isoclinal fold by east-west compression possibly during thirty to forty Ma.. D3- forms N-S isoclinal fold which later became recumbent folds due to further thrusting by E-W compression. D4- lower crustal level flow reactivated the fault as left-lateral fault as the Tibetan crust thickened. D5 - the left-lateral motion of the XianshuiHe-Xiaojiang fault zone continued and pushed pull-apart basin to form normal faults.

The structure history reconstructed along the Dien Bien Phu shear zone shows 3 episodes: D1- N-S upright isoclinal fold formed by



compression. D2- forms recumbent folds (129/19) by NW-SE compression possibly during 30~40Ma.. D3 - NW-SE compression stress was continuing and forms isoclinal folds (150/68).

The results of both Fry method and R_f/ψ in XianshuiHe-Xiaojiang and Dien Bien Phu shear zones are matched the Lower crustal level flow model. In Shear-wave splitting analysis, The results of both Fry method and R_f/ϕ in the XianshuiHe-Xiaojiang shear zone is coupled; The results of Fry method in Dien Bien Phu shear zone is decoupled; The results of R_f/ϕ is not matched.

Key words : Xianshuihe-Xiaojiang shear zone 、 Dien Bien Phu shear zone 、 Lower crustal level flow model 、 Shear-wave splitting analysis 、 Fry method 、 R_f/ψ ◦



誌謝.....	iii
摘要.....	ivii
英文摘要	v
目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xiii
第一章 緒論	1
1.1 前言.....	1
1.2 前人研究.....	2
1.2.1 地質背景	2
1.2.2 懷氏法 (Fry's method)	9
1.3 研究動機與目的	15
1.4 研究區域地質背景	18
1.4.1 前言	18
1.4.2 鮮水河剪切帶.....	19
1.4.3 小江剪切帶	20
1.4.4 奠邊府剪切帶.....	26
第二章 研究方法	28
2.1 前言.....	28
2.2 野外工作.....	29
2.3 標本處理.....	33
2.4 懷氏法做法.....	35
2.5 R_f/ϕ	38
第三章 分析結果	41
3.1 大地構造分析	41
3.1.1 鮮水河剪切帶構造分析	41
3.1.2 奠邊府剪切帶構造分析	52

3.2 應變分析.....	59
3.2.1 懷氏法分析數據.....	59
3.2.2 R_f/ϕ 分析數據.....	78
第四章 討論	80
4.1 大地構造史.....	80
4.1.1 鮮水河剪切帶的構造歷史.....	80
4.1.2 奠邊府剪切帶的構造歷史.....	85
4.2 應變分析.....	89
4.2.1 懷氏法分析結果.....	89
4.2.2 R_f/ϕ 分析結果.....	95
4.3 福林氏圖解 (Flinn diagram)	100
4.4 顆粒度分析.....	102
第五章 結論	111
參 考 文 獻.....	114

圖目錄

圖 1.1	板塊碰撞—脫逸模式。.....	3
圖 1.2	下部地殼流體模式。.....	5
圖 1.3	西藏高原內部以及鄰近地區 GPS 速度場資料。.....	6
圖 1.4	東亞地區地震剪力波與構造線比對圖。.....	7
圖 1.5	懷氏法的做法。.....	9
圖 1.6	應變橢圓中間空白的區域會隨著礦物顆粒數目的增加以及礦物顆粒分佈的不叢聚而越趨明顯。.....	11
圖 1.7	礦物顆粒的不叢聚性與常態化數量的關係。.....	11
圖 1.8	以常態化的懷氏法重新處理未受應力的資料。.....	13
圖 1.9	以常態化的懷氏法重新處理受應力作用後的資料。.....	14
圖 1.10	鮮水河—小江、奠邊府剪切帶相關位置圖。.....	17
圖 1.11	鮮水河—小江、奠邊府剪切帶以及紅河剪切帶的地理位置與相對關係圖。.....	19
圖 1.12	鮮水河剪切帶康定段構造簡圖以及剖面圖。.....	21
圖 1.13	小江剪切帶附近區域地質圖。.....	23
圖 1.14	鮮水河—小江斷層系統通過了四個主要構造單元：松潘—甘孜褶皺帶（SONGPAN-GANZI FOLD BELT）龍門山逆衝帶（LONGMEN SHAN THRUST BELT）揚子地台（YANGZI PLATFORM）和華南褶皺逆衝帶（SOUTH CHINA FOLD AND THRUST BELTS）。.....	25
圖 1.15	奠邊府剪切帶附近構造簡圖。.....	27
圖 2.1	本研究工作流程圖。.....	28
圖 2.2	鮮水河剪切帶區域地質圖與採樣點位分布圖。.....	31
圖 2.3	奠邊府剪切帶區域地質圖與採樣點位分布圖。.....	32
圖 2.4	應變橢圓 X-Y 面、Y-Z 面、X-Z 面判定，依照應變橢圓球體的三軸長短為基準。.....	34
圖 2.5	運用 FABRIC 7 軟體可以直接在薄片電子圖檔上做懷氏法的運算。.....	36
圖 2.6	紅點為每顆礦物的中心，經過手動點出橢圓後（藍色橢圓）會自動於左下角標示長短軸比例（R）以及長軸與水平線的夾角（ ψ ）。.....	37
圖 2.7	FABRIC 7 軟體自動計算我們標示應變橢圓的每條直徑與水平線偏轉角度，畫出最符合此應變橢圓的趨勢曲線（藍色曲線）所有礦物中心與水平線的夾角每 5 度做區間，計算區間內的算術平均數，把這些區間內的數值相連結做另一個趨勢曲線圖（紅色曲線）, 右上角呈現的數據為紅色曲線算出來的數值。.....	37
圖 2.8	左圖為應變發生前原始的軸率（ R_i ）與位態（ θ ）, 右圖為經過應變之後產生的新軸率（ R_f ）與新位態（ ψ ）。.....	38
圖 2.9	R_i 曲線圖。.....	39

圖 2.10	⊖ 曲線圖。	39
圖 3.1	鮮水河剪切帶部分研究區域地質圖與測量點位分布圖。(A) 鮮水河 剪切帶 (B) 北段 (C) 中段 (D) 南段測量點位分布圖。	43
圖 3.2	奠邊府剪切帶部分研究區域地質圖與測量點位分布圖。(A) 奠邊府 剪切帶 (B) 北段 (C) 中段 (D) 南段測量點位分布圖。	44
圖 3.3	鮮水河剪切帶北段構造分析。	45
圖 3.4	鮮水河剪切帶中段構造分析。	48
圖 3.5	鮮水河剪切帶中段斷層機制解。	49
圖 3.6	鮮水河剪切帶南段構造分析。	51
圖 3.7	奠邊府剪切帶北段構造分析。	53
圖 3.8	奠邊府剪切帶中段構造分析。	55
圖 3.9	奠邊府剪切帶南段構造分析。	58
圖 3.10	鮮水河剪切帶採樣點位分布圖。	60
圖 3.11	奠邊府剪切帶採樣點位分布圖。	61
圖 3.12	06XS02 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	62
圖 3.13	06XS02 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	63
圖 3.14	06XS03 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	64
圖 3.15	06XS06 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	65
圖 3.16	06XS06 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	66
圖 3.17	06XS10 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	67
圖 3.18	06XS14A 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	68
圖 3.19	06XS14A 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	69
圖 3.20	06XS16 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	70
圖 3.21	06XS21c 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	71
圖 3.22	06XS21c 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	72
圖 3.23	04DBP-9 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	73
圖 3.24	05DBP-11A 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	74
圖 3.25	05DBP-11A 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	75
圖 3.26	05DBP-11B 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	76
圖 3.27	05DBP-11B 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。	77
圖 4.1	鮮水河剪切帶在水平面上的應變橢圓分布圖(懷氏法)。	91
圖 4.2	鮮水河剪切帶在垂直面上的應變橢圓(懷氏法)。	92
圖 4.3	奠邊府剪切帶在水平面上的應變橢圓(懷氏法)。	93
圖 4.4	奠邊府剪切帶在垂直面上的應變橢圓(懷氏法)。	94
圖 4.5	鮮水河剪切帶在水平面上的應變橢圓(R_F/Ψ)。	96
圖 4.6	鮮水河剪切帶在垂直面上的應變橢圓(R_F/Ψ)。	97
圖 4.7	奠邊府剪切帶在水平面上的應變橢圓(R_F/Ψ)。	98
圖 4.8	奠邊府剪切帶在水平面上的應變橢圓(R_F/Ψ)。	99

圖 4.9	福林氏圖，用來表示各種不同的應變型態。	100
圖 4.10	以懷氏法分析的數據呈現的應變狀態。	101
圖 4.11	以 R_F/Ψ 分析的數據呈現的應變狀態。	101
圖 4.12	06XS02B 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	103
圖 4.13	06XS02B 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	103
圖 4.14	06XS03 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	103
圖 4.15	06XS06 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	104
圖 4.16	06XS06 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	104
圖 4.17	06XS10 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	104
圖 4.18	06XS14A 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	105
圖 4.19	06XS14A 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	105
圖 4.20	06XS16 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	105
圖 4.21	06XS21c 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	106
圖 4.22	06XS21c 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	106
圖 4.23	04DBP-9 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	106
圖 4.24	05DBP-11A 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	107
圖 4.25	05DBP-11A 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	107
圖 4.26	05DBP-11B 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	107
圖 4.27	05DBP-11B 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。	108
圖 4.28	礦物顆粒大小與顆粒數的相對關係圖。	109
圖 4.29	礦物顆粒的面積取對數與礦物顆粒累積數量的相對關係圖。	110
圖 4.30	斜率跟應變軸率 (R_S) 的相對關係圖。	110



表 目 錄

表 2.1	本研究定向樣本採集地點以及岩性。.....	30
表 3.1	各採樣點岩性與懷氏分析數據。.....	78
表 3.2	各採樣點岩性與 R_f/Ψ 分析數據。.....	79
表 4.1	鮮水河剪切帶葉理分析結果統整。.....	82
表 4.2	鮮水河剪切帶葉理分析結果。.....	83
表 4.3	鮮水河剪切帶斷層機制解分析結果。.....	83
表 4.4	鮮水河剪切帶構造演化簡圖。.....	84
表 4.5	奠邊府剪切帶葉理分析結果統整。.....	87
表 4.6	奠邊府剪切帶葉理分析結果。.....	88




第一章 緒論

1.1 前言

上一個世紀，就有學者對整個東亞與印度這個區域產生極度濃厚的興趣（如Dewey、Tapponnier、England et al.），印度－歐亞板塊的碰撞、西藏高原的抬升，漸漸的引發了眾多學者的興趣。在這個以大自然為實驗室的區域之中，學者不但關心大陸之間的碰撞、板塊之間的聚合、造山帶的隆起、地體構造的演化（Dewey and Burke, 1973；Barazangi and Ni, 1982），甚至也帶動了氣候變遷與侵蝕速率的探討（Molnar and England, 1990；Richter et al., 1992；Molnar et al., 1993）。隨著學者們對這區域廣泛的研究與調查，隨之而來的問題也越來越多，西藏高原抬升的起因與演化過程、東亞地體的演化，在在成為學者們互相切磋的戰場（Tapponnier and Molnar, 1976；England and Houseman, 1986），在這種情形下，各種解釋這塊區域的模型應孕而生，但是卻是各說各話，沒有得到能夠使大家都滿足的定論。

在二維模型的情況下，Dewey and Burke（1973）認為印度大陸的地殼由於過度堅硬，所以平行躺臥在歐亞大陸地殼之下。基於這種條件下，Barazangi and Ni（1982） Beghoul et al.（1993）提出了印度板塊碰撞歐亞板塊之後，地殼並未因擠壓變形而縮短。發展到了三維模型，學者們開始針對印度－歐亞板塊碰撞東部邊緣的構造線產生興



趣，Tapponnier and Molnar (1976) 提出了滑動線理論 (slip-line theory)，解釋中南半島沿紅河—哀牢山斷裂帶向東南脫逸往南海運動 (Tapponnier et al., 1982, 1986; Leloup et al., 1995)，進而導致南海張裂與周遭地區大規模的岩漿活動與變質變形作用 (Briais et al., 1993)。England and Houseman (1986)、Houseman and England (1986, 1993, 1996) 為了解釋圍繞著東喜馬拉雅構造結 (Eastern Himalayan Syntaxis) 順時針旋轉的地殼活動，推論西藏較厚的地殼向東流向高原的邊緣。

在這個區域中，斷裂帶的發育錯移運動模式也是大家熱衷探討的問題之一。Tapponnier et al. (1982) 認為斷裂帶的發育是沿著板塊邊界縫合帶發育，而李通藝 et al. (1998) 則認為斷裂帶的發育不只是在板塊邊界產生，板塊內部的構造弱帶也是適合斷裂帶發育的位置。

1.2 前人研究

1.2.1 地質背景

Tapponnier et al. (1982) 利用塑性黏土實驗模擬四千萬年前，歐亞大陸板塊受印度板塊碰撞的應變過程，進而提出板塊碰撞—脫逸構造模式 (collision—extrusion)。此模式述說整個大陸岩石圈為剛性板塊，在純粹水平應力作用之下 (不考慮高度變化)，當印度板塊碰撞

歐亞板塊時，板塊內部的變形量很少，變形作用集中於板塊邊緣及主要走向斷層上 (Leloup et al., 1995) 而使得板塊產生塊體旋轉，迫使中南半島沿著紅河剪切帶向東南脫逸而出，造成數百公里的左移位移量，及南海的張裂形成 (圖 1.1)。

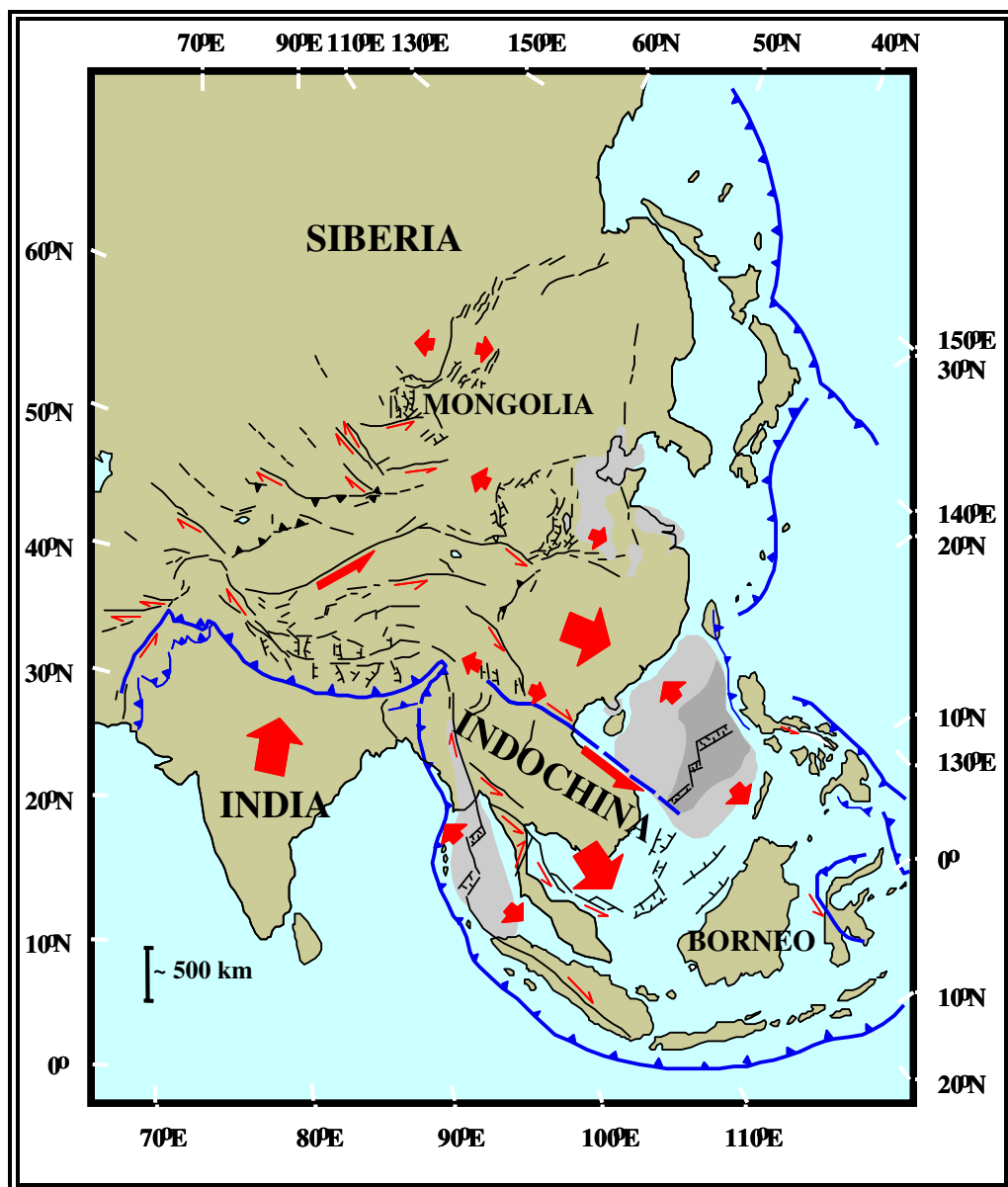


圖 1.1 板塊碰撞—脫逸模式(Tapponnier et al., 1982)。中南半島沿著紅河剪切帶

向東南方向脫逸（修改自 Tapponnier et al., 1982）。

Houseman and England（1986, 1993, 1996）認為歐亞板塊相對於剛性的印度板塊是薄黏滯體，所以歐亞大陸的變形機制以黏滯流體變形為主，而非 Tapponnier 等人（1982）所提出剛性板塊。理論中西藏高原的抬升起源於西藏地區地殼的縮短與增厚，在初始的模型理論中並沒有考慮有物質由西藏向東脫逸，但是在修改過後的模型裡就修正為有物質從西藏高原向東膨脹並不斷有向東的應變環繞著東喜馬拉雅山結呈現順時針旋轉（Houseman and England, 1996）。

Royden 等人（1997）、Burchfiel（2004）提出了下部地殼流體模式（lower crustal level flow model），印度板塊碰撞歐亞大陸板塊時，南—北向的應力作用造成陸塊內的變形，使得西藏抬升，荷重增大，由於荷重增大使得下部地殼產生塑性流動，並以東喜馬拉雅構造結為中心，向東沿鮮水河、小江、奠邊府這一系列剪切帶發生順時針旋轉（圖 1.2），並推論東亞地體板塊所表現出來的地殼變形與破裂，主要運動力學是受到下部塑性地殼活動帶動所驅使。

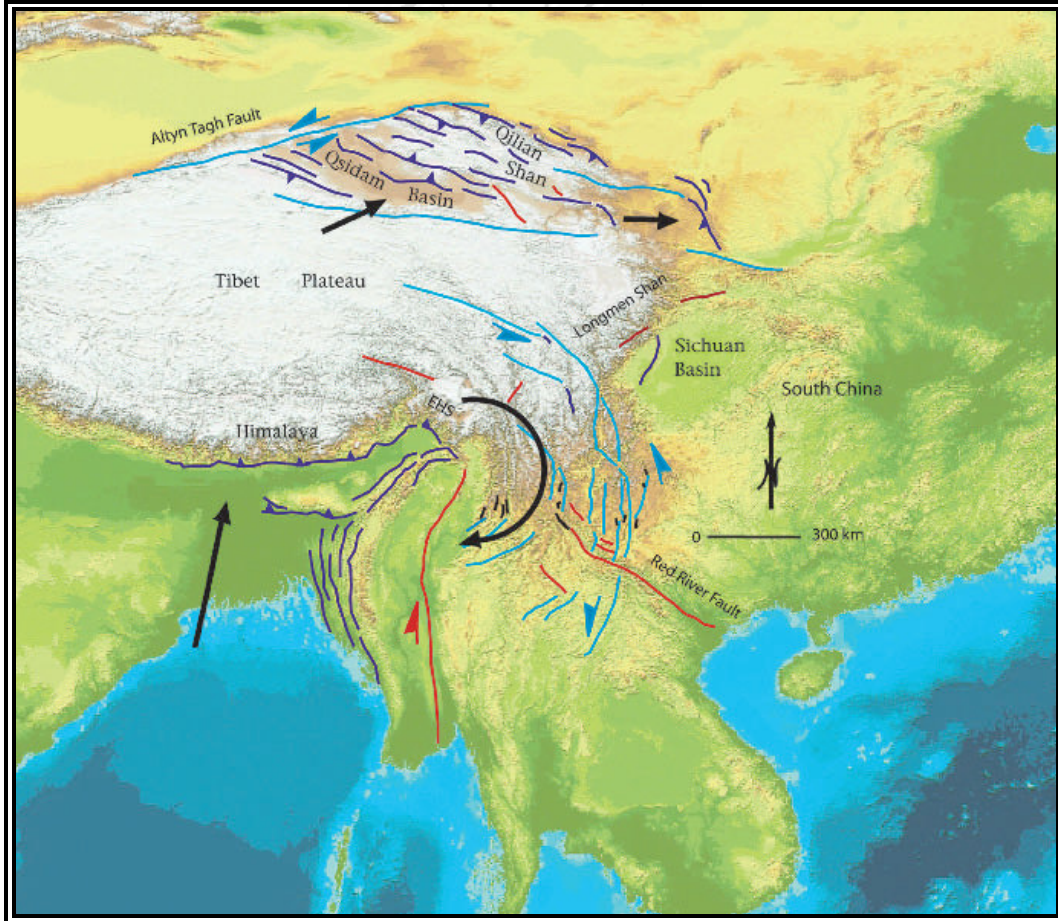


圖 1.2 下部地殼流體模式 (Burchfiel, 2004)。黑色箭頭：相對運動方向；藍色箭頭：左移斷層；紅色箭頭：右移斷層；紫色線段：逆衝斷層；東喜馬拉雅構造結束邊短黑線：張裂構造；EHS：東喜馬拉雅構造結。

Zhang 等人 (2004) 收集了西藏高原以及附近 553 個 GPS 控制點的資料 (圖 1.3)，藉由這些 GPS 相對移動的數據資料可以推論出此區域每個地塊相對的位移量以及壓縮量、每條剖面經過構造的速度場補償值，藉由這些數據去回推此區域是剛性塊體或是塑性塊體，最後得到地區並非單一塑性或是單一剛性塊體所組成的結論 (Zhang et al., 2004)。

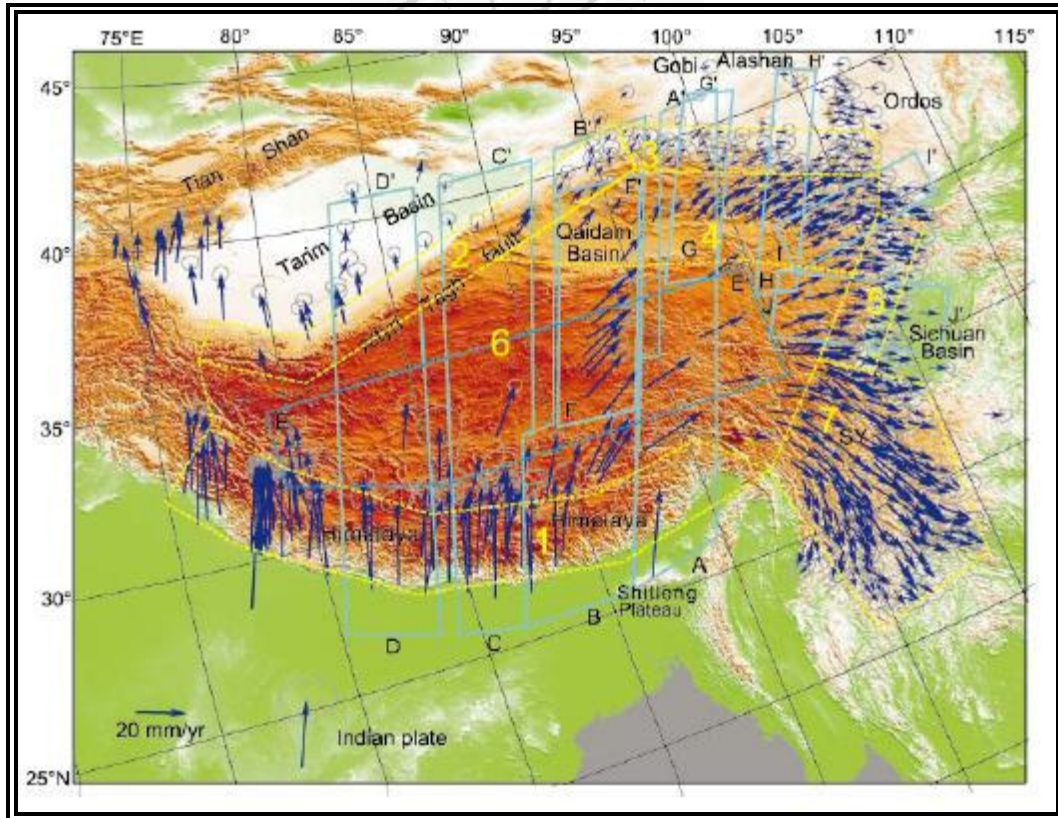


圖 1.3 西藏高原內部以及鄰近地區 GPS 速度場資料。Zhang et al., (2004) 收集以穩定歐亞大陸當固定基準點的速度場資料，黃色虛線區域代表各個應變場估算的單元；黃色數字 1-7 各代表喜馬拉雅山，阿爾金，祁連山，柴達木盆地，龍門山，西藏，四川，雲南。

Sol 等人 (2007) 根據 GPS 觀測地表活動及利用地震剪力波分離的情形來分析 (shear-wave splitting analysis) 地函活動，發現整個東亞地區的地體剪動機制並非單一模式，此研究藉由比對地表構造線與地函剪力波長軸方向之間的關係，來判斷地殼與地函之間的相互關係：地表構造線與地函剪力波長軸方向一致為耦合 (coupled)，不一致則為非耦合 (decoupled)。分析結果圍繞著整個東喜馬拉雅構造結，

皆以地函帶動地殼運動方式呈現耦合狀態，但是在東經 102° 以東、北緯 26° 以南，地殼與地函運動的相對關係卻呈現非耦合剪動機制（圖 1.4）。在此模式下，整個運動學的動力機制是地函帶動地殼運動，以東喜馬拉雅構造結為中心，產生順時針旋轉。

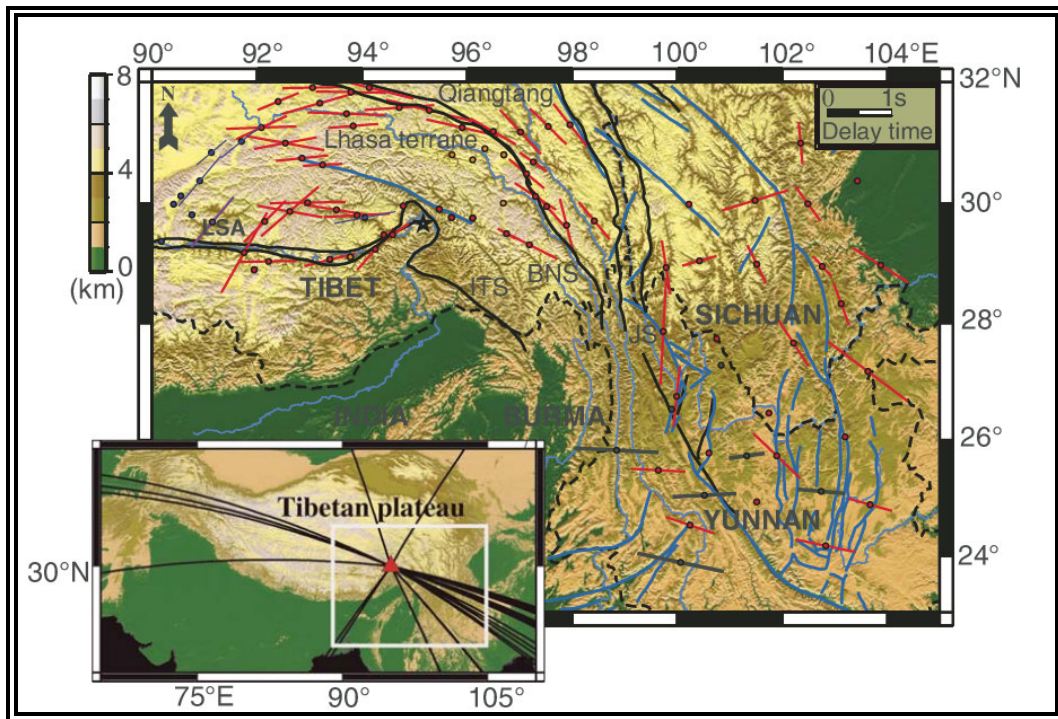
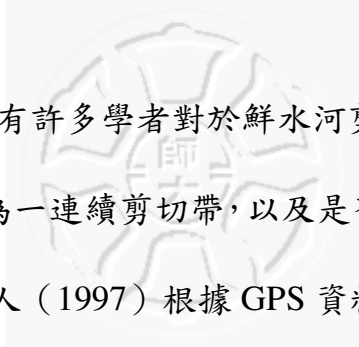


圖 1.4 東亞地區地震剪力波與構造線比對圖。紅色與橘色圈圈：地震觀測站位置；單獨的圈圈：無異向性；測站上的紅色線條：剪力波分析數據；測站上的藍紫色與灰黑色線條：前人發表的剪力波分析數據（McNamara et al., 1994; Sandvol et al., 1997）；紫色圈圈：相對不移動的地震觀測站；黑色粗線：主要的地質構造線，印度—藏布縫合帶（ITS）班公—怒江縫合帶（BNS）金沙縫合帶（JS）；短黑虛線：省界；藍線：左移斷層與右移斷層。左下插圖表示此研究區域在西藏高原的位置，以及接收剪力波 SKS/SKKS 的路徑。



在 2002 年之前，有許多學者對於鮮水河剪切帶—小江剪切帶以及奠邊府剪切帶是否為一連續剪切帶，以及是否被紅河剪切帶截斷展開熱烈討論。King 等人（1997）根據 GPS 資料分析鮮水河—小江剪切帶，發現此剪切帶為左移斷層且平均每年移動量為 12 ± 4 mm/yr。Feigl 等人（2003）蒐集了紅河南段越南境內四個省在 1994，1996，1998，2000 以及 2001 的 GPS 測量資料，分析得到的結果發現紅河剪切帶在 1994—2001 年之間的滑移速率每年不大於 $1-2$ mm/yr。Duong 等人（2005）也根據越南境內的 GPS 觀測資料分析 2002—2004 年奠邊府剪切帶的位移量，結果顯示奠邊府斷裂帶在這段期間內幾乎沒在活動。但是在這些前人研究中，對於鮮水河、小江、奠邊府這一系列剪切帶的討論，都僅僅侷限於地表地形變化以及地表破裂面錯移量的探討，並沒有對本區域有進一步構造或形成時間上的討論。

Roger 等人（1995）曾對康定地區的折多山岩體進行 U-Pb 和 Rb-Sr 同位素定年，發現折多山岩體侵入的年代為 12.8 ± 1.4 百萬年；同地區採集的偉晶岩脈樣本的 Rb-Sr 定年所得到的結果是 10—12 百萬年，由此推斷，剪切帶活動的時間跟淡色花崗岩體侵入是同時期。

1.2.2 懷氏法 (Fry's method)

懷氏法又稱為中心對中心 (center-to-center) 分析方法，這方法是由 Norman Fry 在 1979 年研究發明出來，主要是假設岩石中的所有礦物顆粒是均質 (homogeneous) 且分散 (random)，在受到應力作用之後，礦物顆粒之間的相對位置會被改變，在透過測量每一顆礦物顆粒中心與其他礦物顆粒中心相對位置的最短距離，就可以得到此岩石的最終應變量 (finite strain) 以及主要應力來源方向 (Fry, 1979) 將所有礦物顆粒中心的相對位置標示在一起，在所有的中心點內部可以得到一個空白的區域，最符合這個空白區域橢圓形即為此岩石的應變橢圓，長、短軸代表此岩石接受應力的方向 (圖 1.5)。懷氏法最優勢的地方，就是立刻可以得到簡單的圖形來示意岩石所受的應變量。

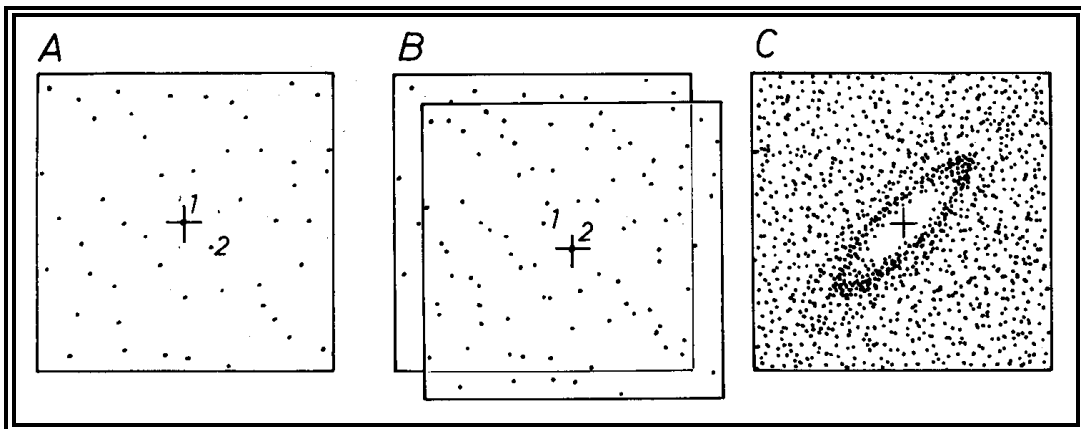
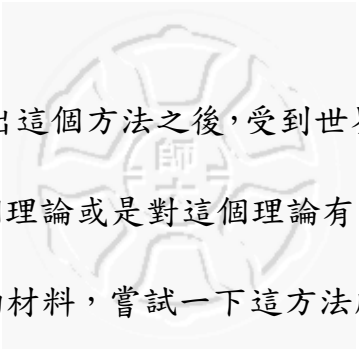


圖 1.5 懷氏法的做法。空白區域橢圓形即為此岩石的應變橢圓，長、短軸代表此岩石接受應力的方向。



Fry 在 1979 年提出這個方法之後，受到世界各國的地質學家高度關注，無論是接受這個理論或是對這個理論有質疑的學者，都想以自己研究的區域、研究的材料，嘗試一下這方法所得到的效果，於是開啟了一系列的改革。

首先推動改革浪潮的人是 Crespi (1986) 他為了論證懷氏法的實用性，以人工材料模擬的方式探討礦物顆粒間距離以及礦物顆粒分佈離散 (anticlustered) 之間的相互關係，得到兩個值得重視的現象：一、懷氏法應變橢圓中間空白的區域會隨著礦物顆粒數目的增加以及礦物顆粒分佈的離散而越趨明顯；二、礦物顆粒分佈越離散會使得懷氏法應變橢圓空白邊緣的礦物顆粒密度增加 (圖 1.6)。此外，由他的模擬實驗結果得知，完美的應變橢圓圖形決定於礦物顆粒的離散與礦物顆粒之間的相互關係 (圖 1.7)；當懷氏法應變橢圓的結果不甚理想時，有效的增加區域內礦物顆粒的數量可以提升應變橢圓準確度。此結論不但印證了懷氏法的適用性，而且大大提升了懷氏法應變橢圓圖像的解釋方式。

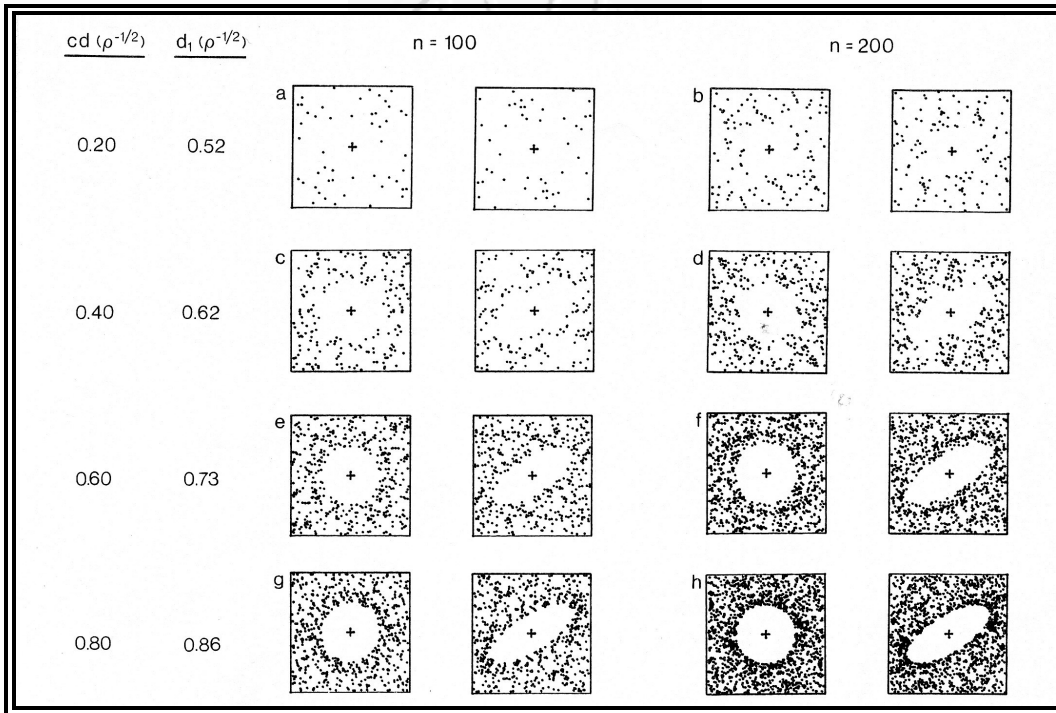


圖 1.6 應變橢圓中間空白的區域會隨著礦物顆粒數目的增加以及礦物顆粒分佈的不叢聚而越趨明顯 (Crespi, 1986)。

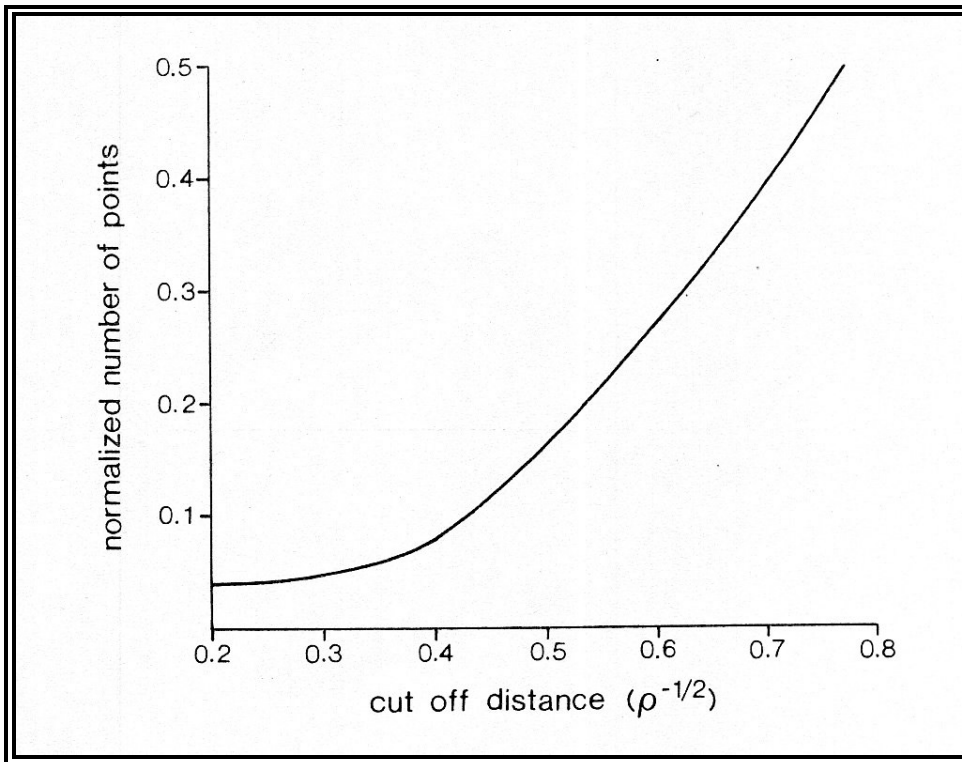
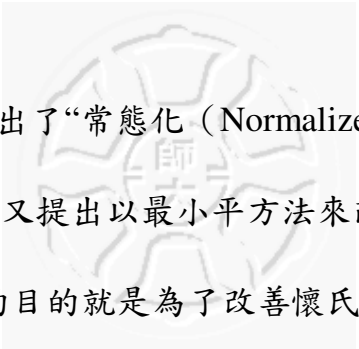


圖 1.7 礦物顆粒的不叢聚性 (anticlustered) 與常態化 (normalized) 數量的關係 (Crespi, 1986)。



Erslev (1988) 提出了“常態化 (Normalized) 的懷氏法”，接著 Erslev 和 Ge (1990) 又提出以最小平方法來改善懷氏法，Erslev 提出這兩種方法最主要的目的就是為了改善懷氏法應變橢圓的解析度。礦物顆粒分佈的大小也是影響應變橢圓結論的重要因素之一，但是應該如何篩選適當的礦物顆粒大小，以達到明顯的應變橢圓結果一直沒有定論。Erslev (1988) 不但明確的定義了兩礦物顆粒之間半徑距離的推估方式，並以此方式篩選淘汰不適用的礦物顆粒，解決了篩選礦物顆粒大小的問題，呈現出解析度較高的應變橢圓 (圖 1.8、圖 1.9)。

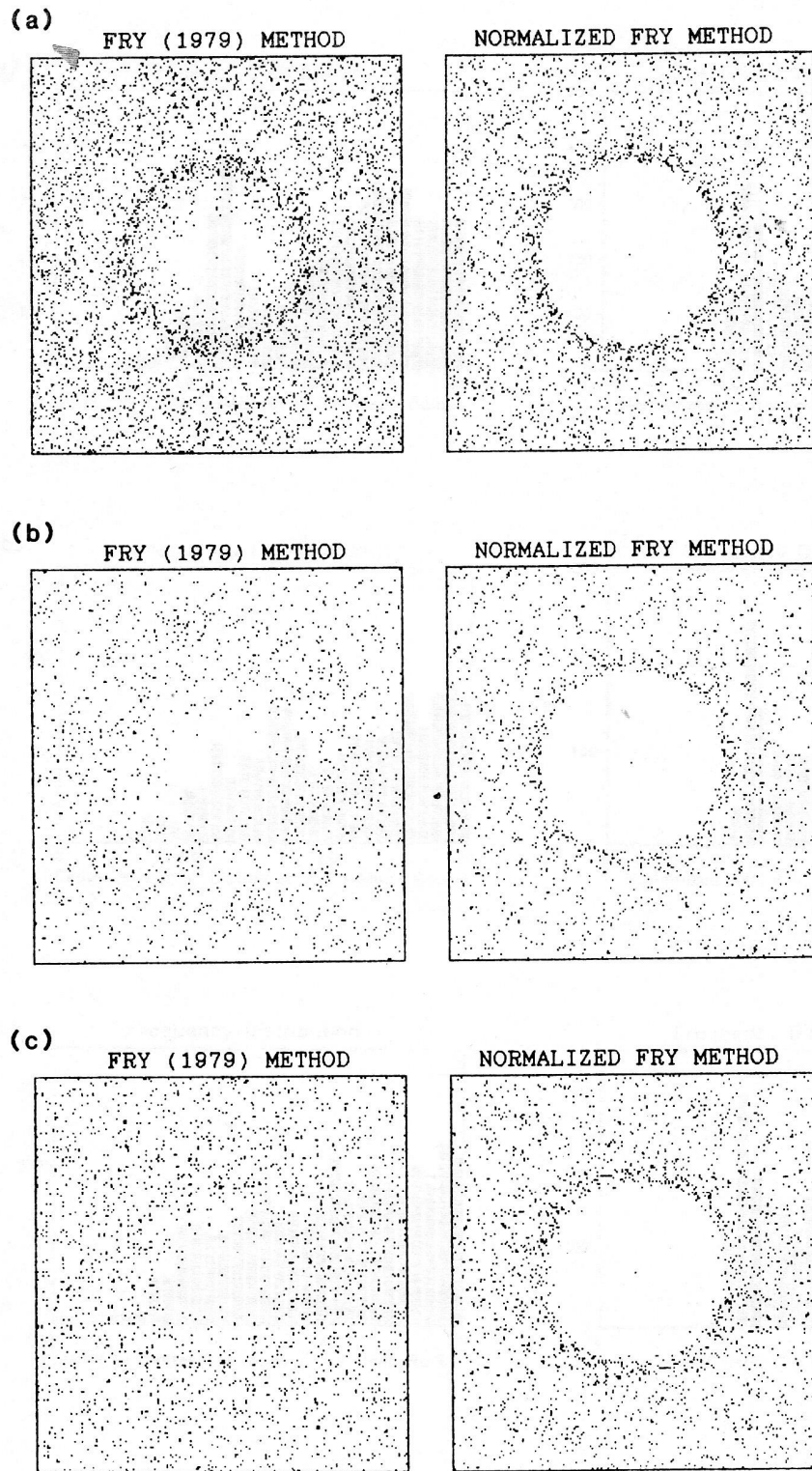


圖 1.8 以常態化的懷氏法重新處理 Fry (1979) 未受應力的資料。得到結果證明常態化的懷氏法解析度提高 (Erslev, 1988)。

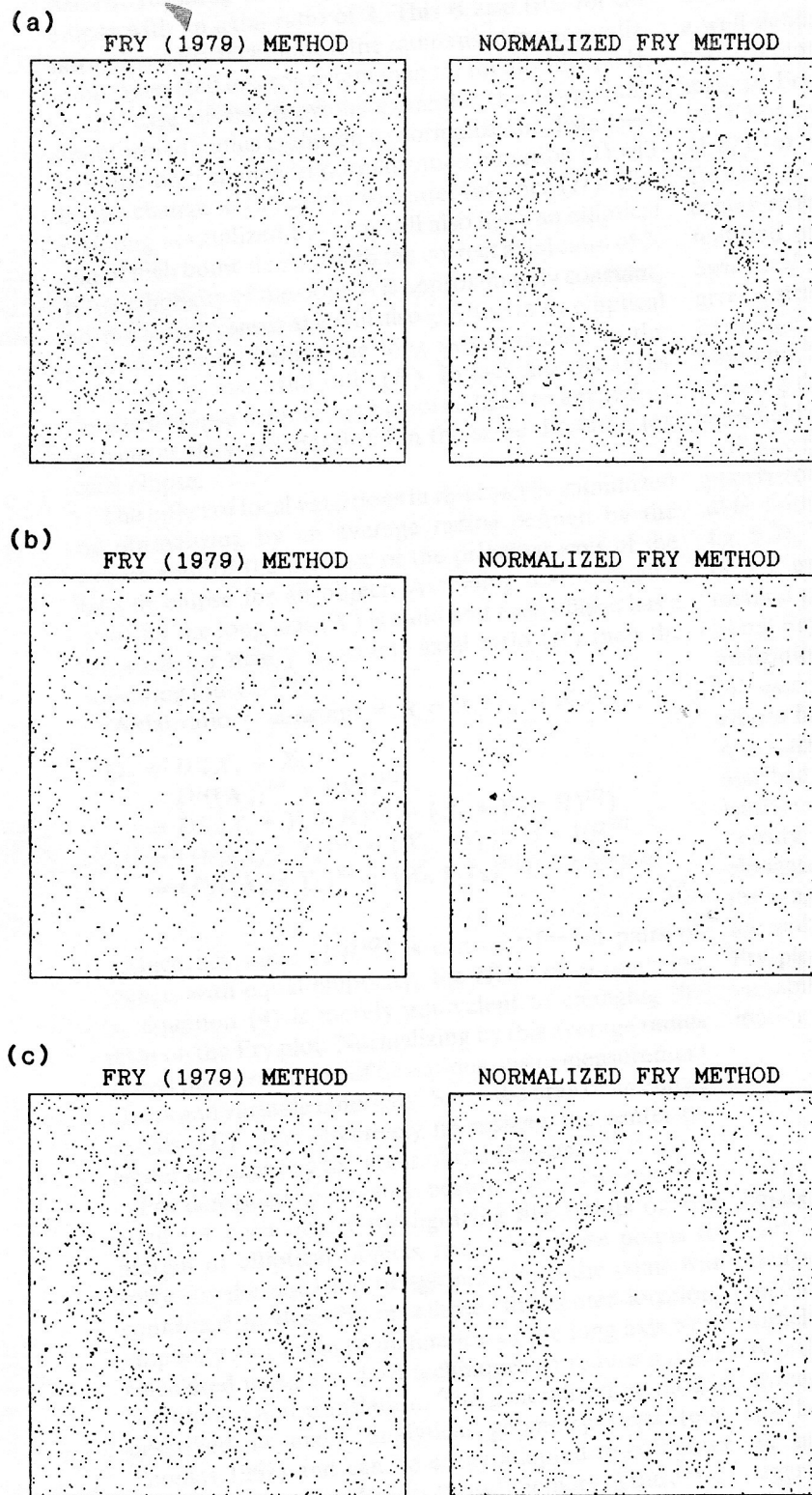
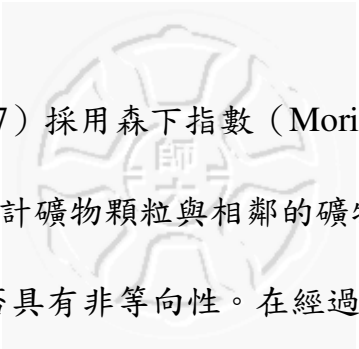


圖 1.9 以常態化的懷氏法重新處理 Fry (1979) 受應力作用後的資料。得到結果證明常態化的懷氏法解析度提高 (Erslev, 1988)。

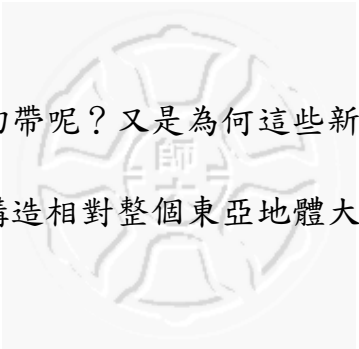


Genier 等人 (2007) 採用森下指數 (Morishita index) 來判斷岩石是否均質，也利用統計礦物顆粒與相鄰的礦物顆粒之間角度的累積長方圖來判斷岩石是否具有非等向性。在經過 Genier 等人將均質性與等向性的判斷方式量化之後，懷氏法又往前邁進了一大步。

雖然 Crespi、Erslev、Ge 和 Genier 等人看似成功的改善了懷氏法，但是事實上此方法仍有許多令人疑惑的地方。Crespi (1986) 自己曾提到，在許多應變分析的實驗中，最大的缺點就是缺乏能夠了解誤差總量對應變分析結果的影響，而懷氏法也不例外。Erslev (1988) 的實驗論證，雖然大大提升了堆積集合體 (packed aggregates) 的解析度，但是對於非堆積集合體 (unpacked aggregates) 的解析度卻無法解決。此外，懷氏法最大的缺憾是目前只能適用於顆粒支持，對於基質支持則處於實驗階段。

1.3 研究動機與目的

在中國四川省西部、雲南省西部，一直到越南北部、寮國北部，有條線性的剪切帶 (圖 1.10)，相對於印度—歐亞板塊碰撞時期所產生的構造 (大約 30—40 百萬年)，以及紅河剪切帶的構造事件 (大約 17—27 百萬年) 而言，這些新生代時期產生的剪切帶都是屬於相當年輕 (Roger et al., 1995)，在大地應力持續不斷且方向不變的情況下，



為何會產生這新的剪切帶呢？又是為何這些新的剪切帶位於此處呢？因此探究這些新構造相對整個東亞地體大架構之間的關係，就變得十分的重要。

紅河剪切帶是一條西北—東南向的斷層，在眾多的學者長期仔細的研究之下，我們知道紅河剪切帶的變動歷史中，曾經經歷了左移事件，最終展現出如現今所觀察到的右移狀態 (Tapponnier et al., 1982, 1986; Leloup et al., 1995)；奠邊府剪切帶則是一條南—北向轉東北—西南向的斷層，就目前所知奠邊府剪切帶的變動歷史是經歷了右移事件，現在看來則是左移的狀態 (Fontaine and Workman, 1997; Lepvrier et al., 2004)，整個變動事件的順序恰好與河紅剪切帶相反。由於奠邊府剪切帶與紅河剪切帶地理位置相近，變動歷史相反，不禁令人猜測這兩條剪切帶為共軛斷層的可能性。

在前人研究之中，對於鮮水河—小江、奠邊府剪切帶的研究一直侷限在用古地震事件、航照遙測、衛星影像以及全球定位系統 (Global Positioning System, GPS) 等方法對地表地形的錯動位移量做估算，直到近年來才有學者對此區域做定年 (Roger et al., 1995; 林德嫻, 2008)，但是並沒有人深入探討岩石圈變形定量構造分析、構造分期、運動學以及歷史演化。本研究主要目的是利用構造分期、懷氏法以及 R_f/ϕ 分析法等方法來探討這個區域內應力與應變之間的相互關係，

期望能夠藉由野外採集定向樣本所做的應變分析比對大尺度下的應力來源，達到探知這些新生代以來所產生的構造歷史。

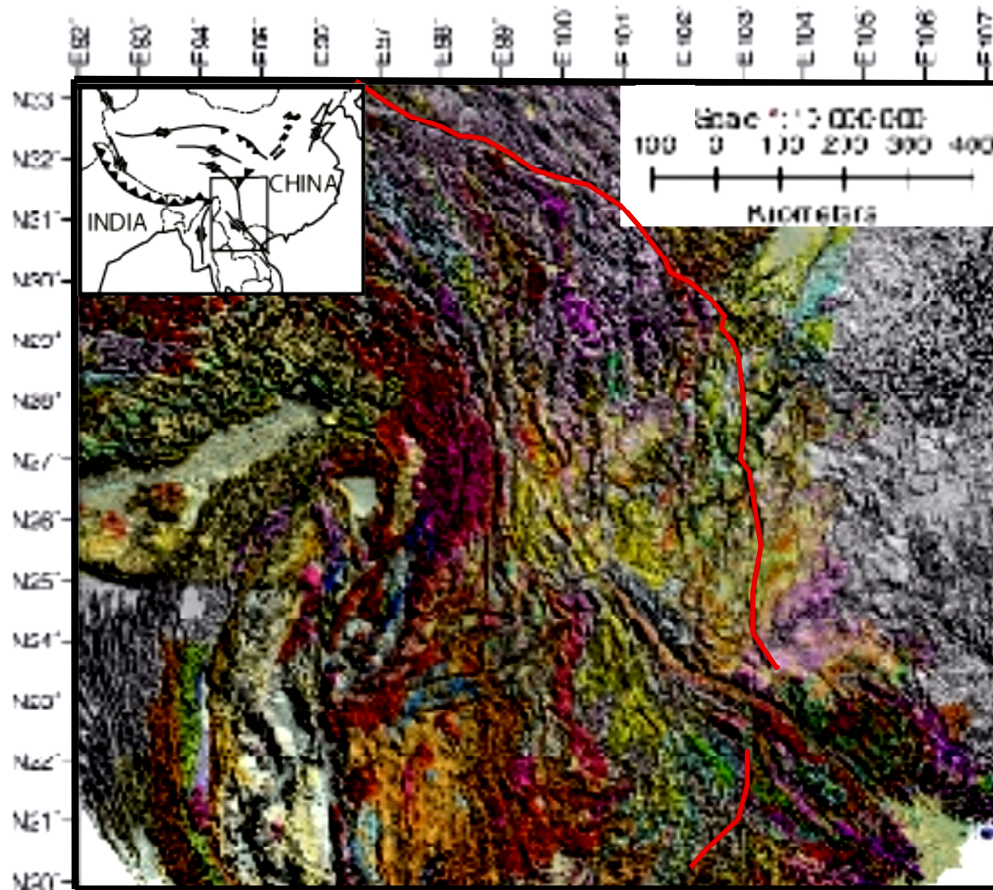
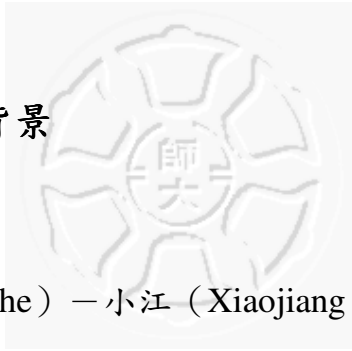


圖 1.10 鮮水河—小江、奠邊府剪切帶相關位置圖。中國四川省西部、雲南省西部，一直到越南北部、寮國北部，有條線性的剪切帶。左上方小圖為地理相關位置圖。



1.4 研究區域地質背景

1.4.1 前言

鮮水河 (Xianshuihe) – 小江 (Xiaojiang) 剪切帶起自中國四川省西邊迄至雲南省南邊，奠邊府 (Dien Bien Phu) 剪切帶北起中國與越南邊界，南至寮國北邊，甚至可能到達暹羅灣 (Wang et al., 1998) (圖 1.11)。此三條剪切帶在地形圖、衛星影像或是航空照片上，看起來首尾相接就好像是一條走向由西北–東南轉南–北再轉東北–西南的斷層一般。這三條剪切帶位處於西藏高原東南邊，是歐亞大陸板塊中活動最頻繁的剪切帶之一 (Allen et al., 1991 ; Holt et al., 1991) (圖 1.11)。在小江剪切帶與奠邊府剪切帶之間，被紅河剪切帶從中間橫斷而過，在這個區域裡的地體構造，在兩條走向不同的剪切帶互相影響之下更顯得錯綜複雜 (圖 1.11)。

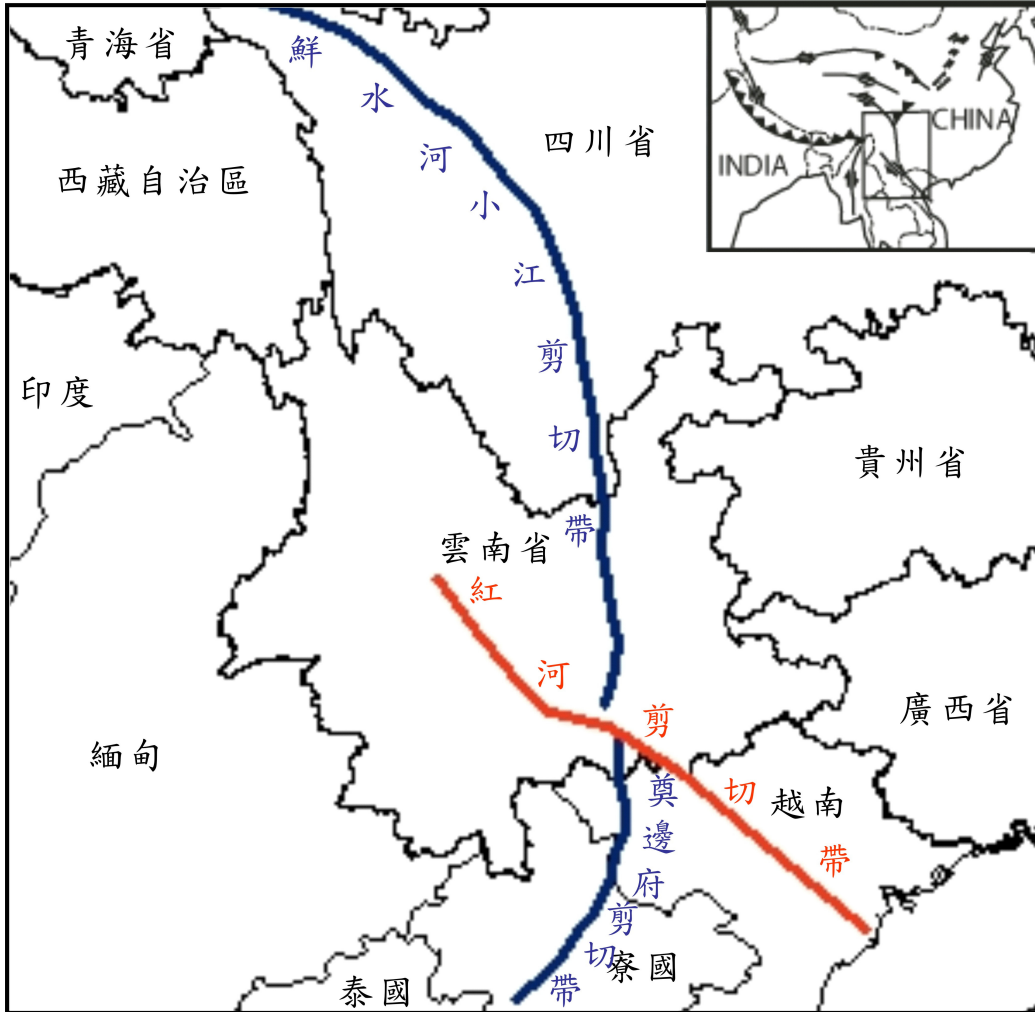
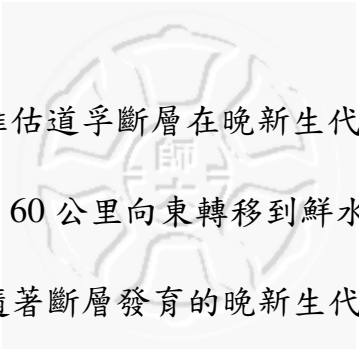


圖 1.11 鮮水河—小江、奠邊府剪切帶以及紅河剪切帶的地理位置與相對關係圖。

1.4.2 鮮水河剪切帶

鮮水河剪切帶，位於西藏高原東南部地區，四川省西部，走向大致呈現西北—東南向，本剪切帶可以分為東、西兩條斷層；西段為道孚斷層、東段為鮮水河斷層。根據唐等人（1993）、聞（2000）經由測量鮮水河剪切帶兩側地層錯動距離所得到的結果，鮮水河剪切帶晚第四紀左移位移量達 13 mm/yr。根據 Wang 等人（2000）利用水系位



移測量的研究結果，推估道孚斷層在晚新生代左移位移量大約 78—100 公里，其中有大約 60 公里向東轉移到鮮水河斷層上。鮮水河剪切帶最顯著的特徵是隨著斷層發育的晚新生代花崗岩（圖 1.12），Roger 等人（1995）曾對康定地區的折多山岩體進行 U-Pb 和 Rb-Sr 同位素定年，發現折多山岩體侵入的年代為 12.8 ± 1.4 百萬年；同地區採集的偉晶岩脈樣本的 Rb-Sr 定年所得到的變形最小年齡結果也是 10—12 百萬年。由於經歷強烈變形的糜嶺岩與未變形的花崗岩測得年代相同，由此推斷，剪切帶活動的時間跟花崗岩體侵入是同時期。

1.4.3 小江剪切帶

小江剪切帶是條極為複雜的剪切帶，就幾何學上來看，可以將此剪切帶分成北、中、南三段來討論。剪切帶北段北從巧家（Qiaojia）以北，向南經蒙姑（Menggu），止於蒙姑東南，走向為北北西—南南東，長度大約 50 公里長，此段因為切過群山以及金沙江河谷階地都留下明顯陡峭的斷層崖且少分枝，所以是整個小江剪切帶之中最容易判斷與觀察剪切帶出露地表的位置。剪切帶中段形狀類似菱形，左右邊界為 2 條走向南北向的左移斷層，各自稱為小江剪切帶東分枝及西分枝，東分枝北起蒙姑南至徐家渡，長度約 200 公里，西分枝北起達朵，南至橙江（Chenjiang）。東、西分枝大致上約略呈現平行，其

間距大約 15 公里左右，在東西分枝之間，發育有北東至北北東向的斷裂與褶皺。

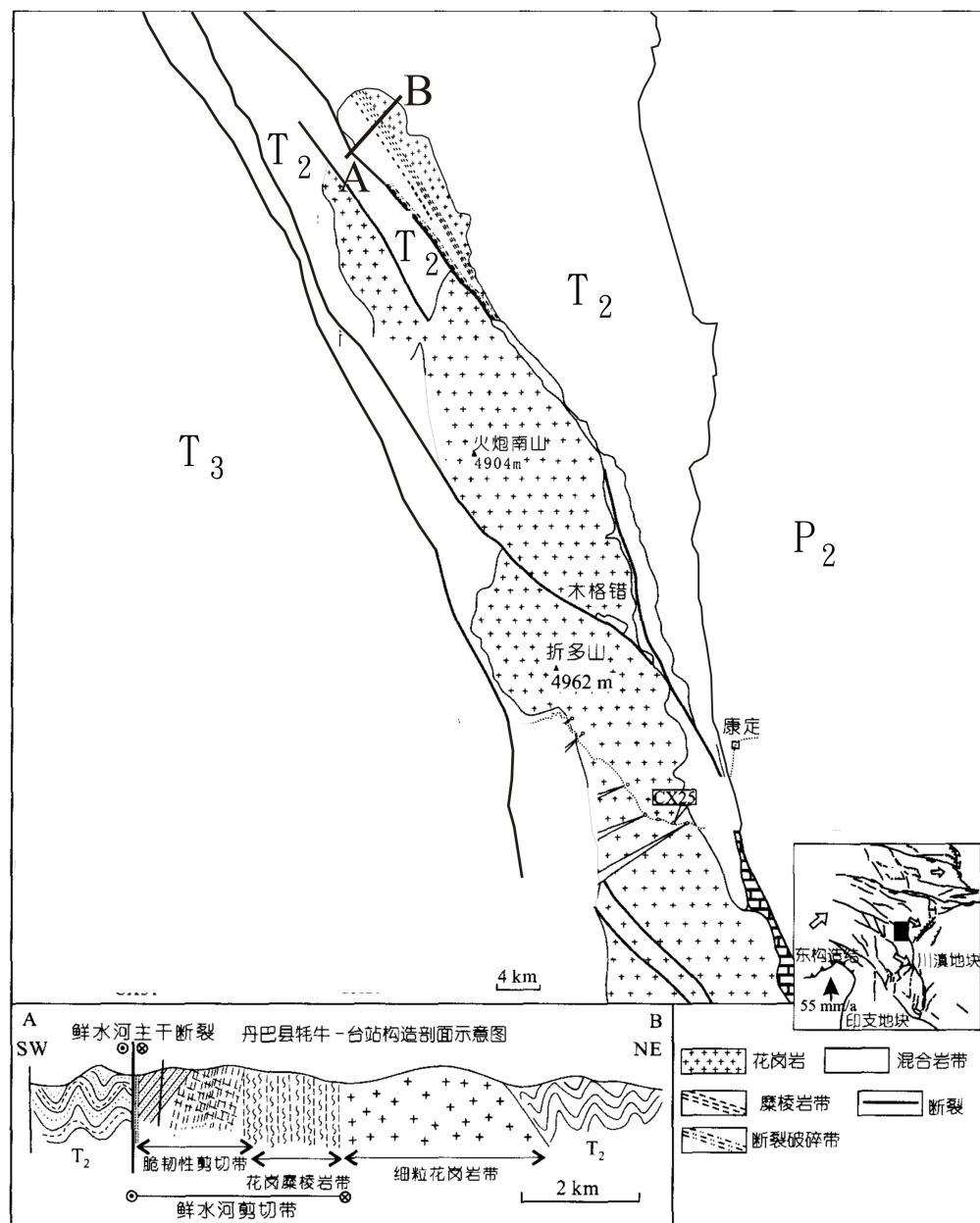
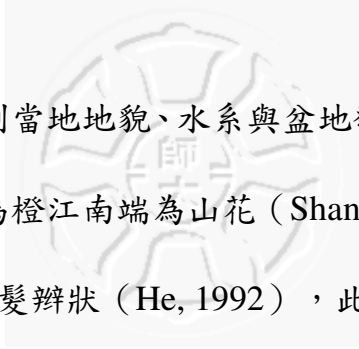


圖 1.12 鮮水河剪切帶康定段構造簡圖以及剖面圖。折多山花崗岩體隨著鮮水河剪切帶分布（修改自張岳橋，2004）。



這些構造成為控制當地地貌、水系與盆地發育的重要活動構造邊界。剪切帶南段北端為橙江南端為山花（Shanhua）長約 150 公里，寬約 25 公里，外型為髮辮狀（He, 1992），此段即是小江剪切帶東分枝向南的延伸。

小江剪切帶所通過的地層單元，包含了古生代、中生代以及少數罕見的新生代沉積岩，另外在剪切帶的北邊，還出現了低度變質的原生代變質岩（圖 1.13）這些原生代的低度變質岩被認為是揚子地台的岩基，而且這些變質岩就跟上覆在它之上未遭受變質的沉積岩一般，受到變形作用的影響（Wang et al., 1998）。

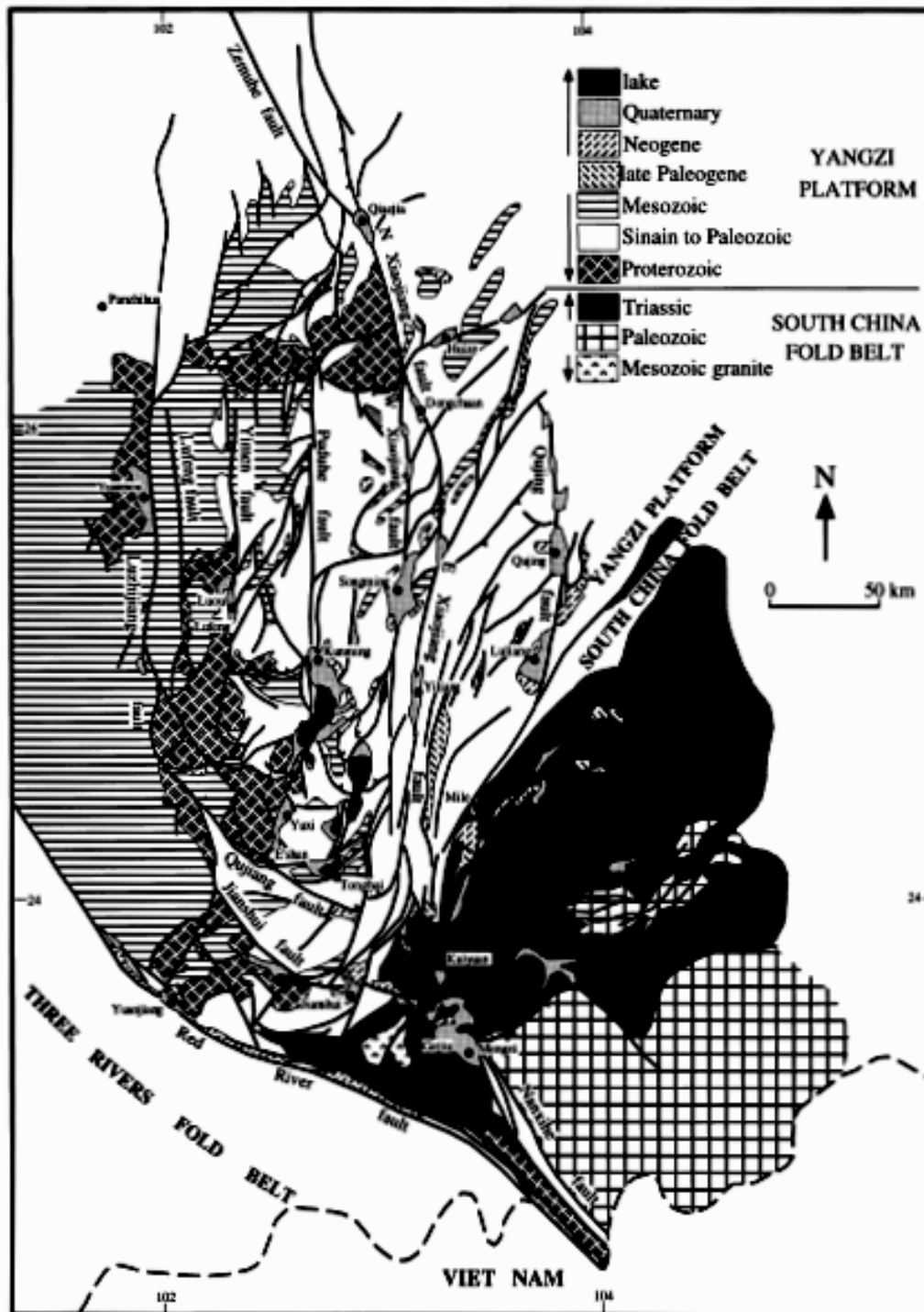


圖 1.13 小江剪切帶附近區域地質圖。小江剪切帶通過地層的單元，包括古生代、中生代以及新生代的沉積岩 (Wang et al., 1998)。



鮮水河—小江斷層系統是條凸向東，切穿西藏高原東南邊緣老地體構造，走向由西北—東南轉向南—北的左移活動剪切帶(Allen et al., 1991；Wang et al., 1998；Shen et al., 2003) 從 1725 到 1983 年在此系統區域共發生了 9 次芮氏規模介於 7—7.9 以及 13 次芮氏規模介於 6—6.9 的大地震，這些地震的最大深度大約距離地表 20 公里(Tang et al., 1993) Allen et al. (1991) 經過統計之後發現在鮮水河—小江斷層系統的西側位移量大約 15 ± 5 mm/yr，而東側則頂多 5 mm/yr。此系統通過了四個主要構造單元，由西北向東南分別是：松潘—甘孜褶皺帶 (Songpan-Ganzi fold belt) 龍門山逆衝帶 (Longmen Shan thrust belt) 揚子地台 (Yangzi platform) 和華南褶皺逆衝帶 (South China fold and thrust belts) 圖 1.14) 由地震資料觀察得知，在北段位移活動似乎都集中在 1—2 條斷層中，但是到了南端接近紅河剪切帶時，位移活動卻分散到幾條分枝的斷層系統上 (Wang et al., 1998；Shen et al., 2003) Wang 等人 (1998) 推論造成南北區別的最大原因，可能是因為斷層系統位處於北段的松潘—甘孜褶皺帶岩性是屬於較均質，而南段所處在的揚子地台是屬於較不均質。鮮水河—小江斷層系統不但控制了地形的變化也操縱了地體構造的發展，使得無論在地形圖上或是衛星影像上，都可以明顯的看到河流與構造線都受到此斷層系統的影響而改變方向 (Wang et al., 1998)。

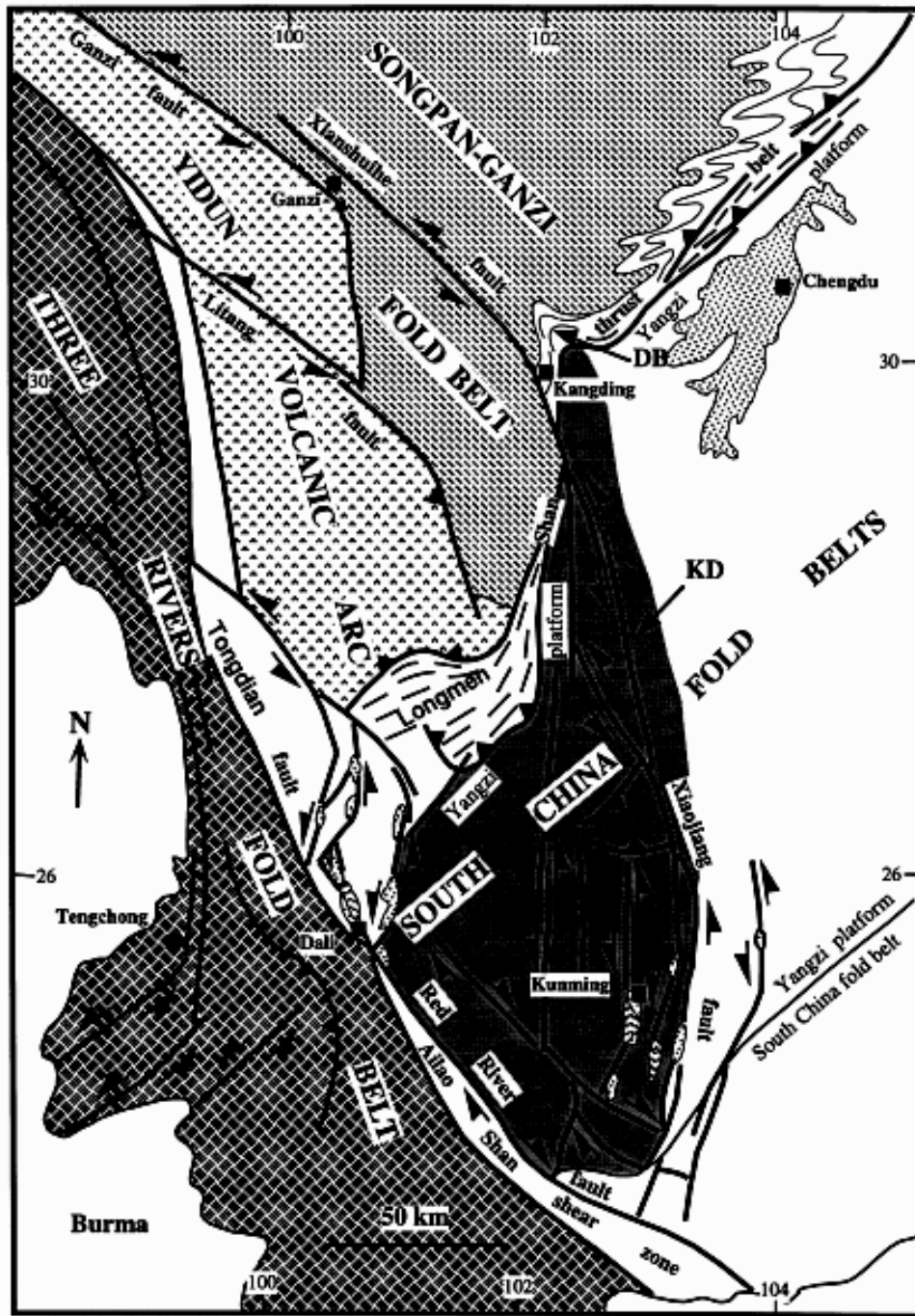


圖 1.14 鮮水河—小江斷層系統通過了四個主要構造單元：松潘—甘孜褶皺帶 (Songpan-Ganzi fold belt)、龍門山逆衝帶 (Longmen Shan thrust belt)、揚子地台 (Yangzi platform) 和華南褶皺逆衝帶 (South China fold and thrust belts) (Wang et al., 1998)。

1.4.4 奠邊府剪切帶

奠邊府 (Dien Bien Phu) 剪切帶是一條長約 500 公里的左移斷層 (Burchfiel, 2004) 北起中國—越南邊界的 Chieng Chai，經過越南的萊州省 (Lai Chau Province)、奠邊省 (Dien Bien Province) 最後終止在寮國的 Louang Phrabang 省 (Lacassin et al., 1997; Holt et al., 2000; Burchfiel, 2004)，甚至可能到達暹羅灣 (Wang et al., 1998)。

奠邊府斷裂帶斷層面的位態在北段部分是 60 度到 70 度向西，在南段部分則是 70 度到 80 度向西，甚至也會達到 90 度 (Hung and Vinh, 2001)。

就目前 GPS 的大地測量資料 (Zhang et al., 2004) 看來，奠邊府斷裂帶無疑是一條左移斷層，但是在衛星影像或是地質圖上可以發現此斷裂帶將晚侏羅紀形成的花崗岩大約右移錯動了 40 公里 (Wemmer et al., 1999) Lacassin 等人 (1997)、Hung and Vinh (2001) 推論新生代期間，奠邊府斷裂帶先後歷經了右移橫移斷層以及左移橫移斷層兩個主要構造發育階段，這兩個構造階段的邊界可能發生在上新世。

林德嫻 (2008) 以糜嶺岩中的雲母礦物，透過氬氬定年法探測奠邊府剪切帶活動的年代，定年的結果落在 198~158 百萬年，相當於印支期華南陸塊與中南半島聚合後，再與中國—緬甸—馬來—蘇門答臘地塊、思茅地塊聚合的時間。

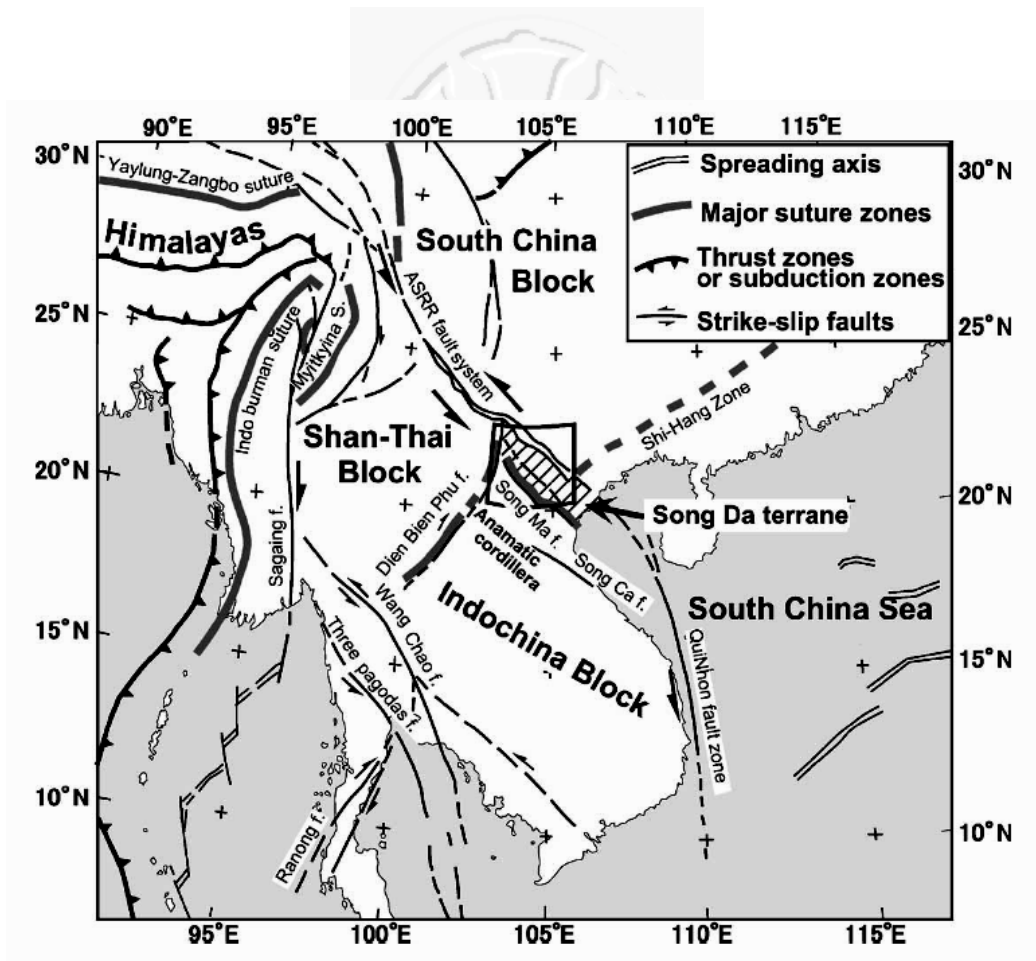


圖 1.15 莫邊府剪切帶附近構造簡圖 (Takemoto et al., 2005)。

第二章 研究方法

2.1 前言

本研究的工作流程如圖 2.1，由野外工作以及實驗室工作所組成。野外工作包括野外構造量測以及定向樣本採集；室內工作包括文獻蒐集、定向薄片製作、野外構造資料分析及分期、利用懷氏法與 R_f/ϕ 等方法做應變分析。再經由這些所有的分析做討論與結論。

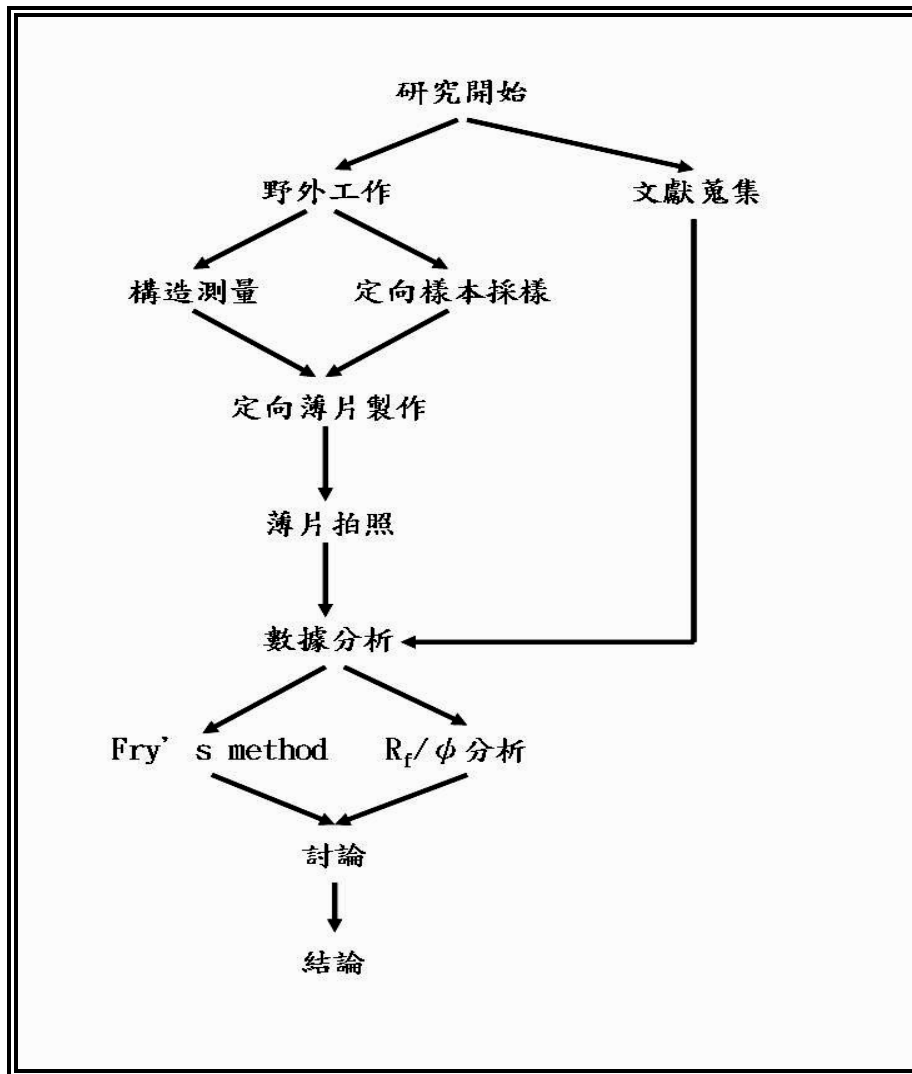


圖 2.1 本研究工作流程圖。

2.2 野外工作

本研究區域由於幅員廣大，東到東經 106 度，西到東經 96 度；北至北緯 34 度，南到北緯 14 度，由北而南經過鮮水河剪切帶、小江剪切帶、奠邊府剪切帶，此三條剪切帶所涵蓋範圍跨過中國四川省西部、雲南省西部、越南以及寮國北部（圖 1.10），野外調查工作總共經歷三次，總共量測 127 個點位，由於這個地區多山交通不便，再加上風化侵蝕嚴重，所以新鮮未風化的岩體出露可供採樣地點不多，一共只採集了 16 個定向樣本（表 2.1）小江剪切帶附近岩體多屬於石灰岩質，且風化侵蝕嚴重不利樣本分析，所以採樣樣本缺乏，定向樣本分布集中在鮮水河剪切帶與奠邊府剪切帶。鮮水河剪切帶的樣本包括：06XS02b、06XS03、06XS06、06XS10、06XS14a、06XS14b、06XS16、06XS17b、06XS17c、06XS18c、06XS21c（相關位置見圖 2.3）；奠邊府剪切帶的樣本包括：04DBP8a、04DBP8b、04DBP9、05DBP11a、05DBP11b（相關位置見圖 2.4），所有相關數據請參照表 2.1。另外在野外的項目除了採取定向、定性樣本外，在到達每個量測點時，也將肉眼所能觀測到的各項構造數據量測紀錄下來，包括：層面、葉理面、斷層面、解理面、褶皺軸面、斷層擦痕、線理等。

表 2.1 本研究定向樣本採集地點以及岩性。

地點	樣本編號	岩性	longitude	latitude
鮮水河區域	06xs02b	gneiss	101.93734	29.99078
	06xs03	gneiss(vein)	101.92002	29.98781
	06xs06	granite	101.44911	30.50222
	06xs10	mudstone	101.29987	30.79398
	06xs14a	mudstone	101.49603	30.48701
	06xs14b	mudstone	101.49603	30.48701
	06xs16	granite	101.54268	30.54386
奠邊府區域	06xs21c	gneiss	101.62990	30.55165
	04dbp8a	mudstone	103.03220	21.60640
	04dbp8b	mudstone	103.03220	21.60640
	04dbp9	limestone	103.16740	22.07410
	05dbp11a	gneiss	103.08670	21.69680
	05dbp11b	gneiss	103.08670	21.69680

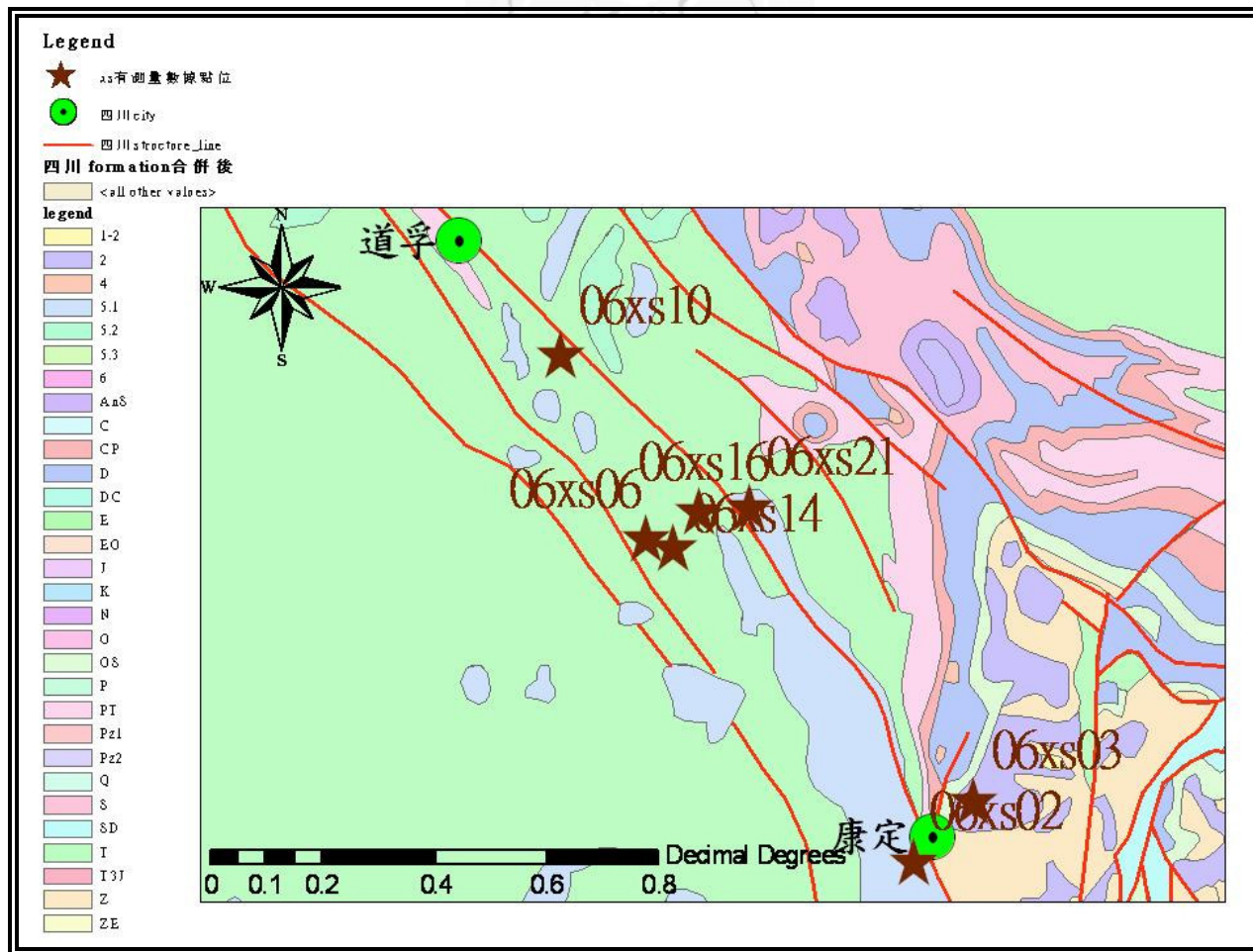


圖 2.2 鮮水河剪切帶區域地質圖與採樣點位分布圖。

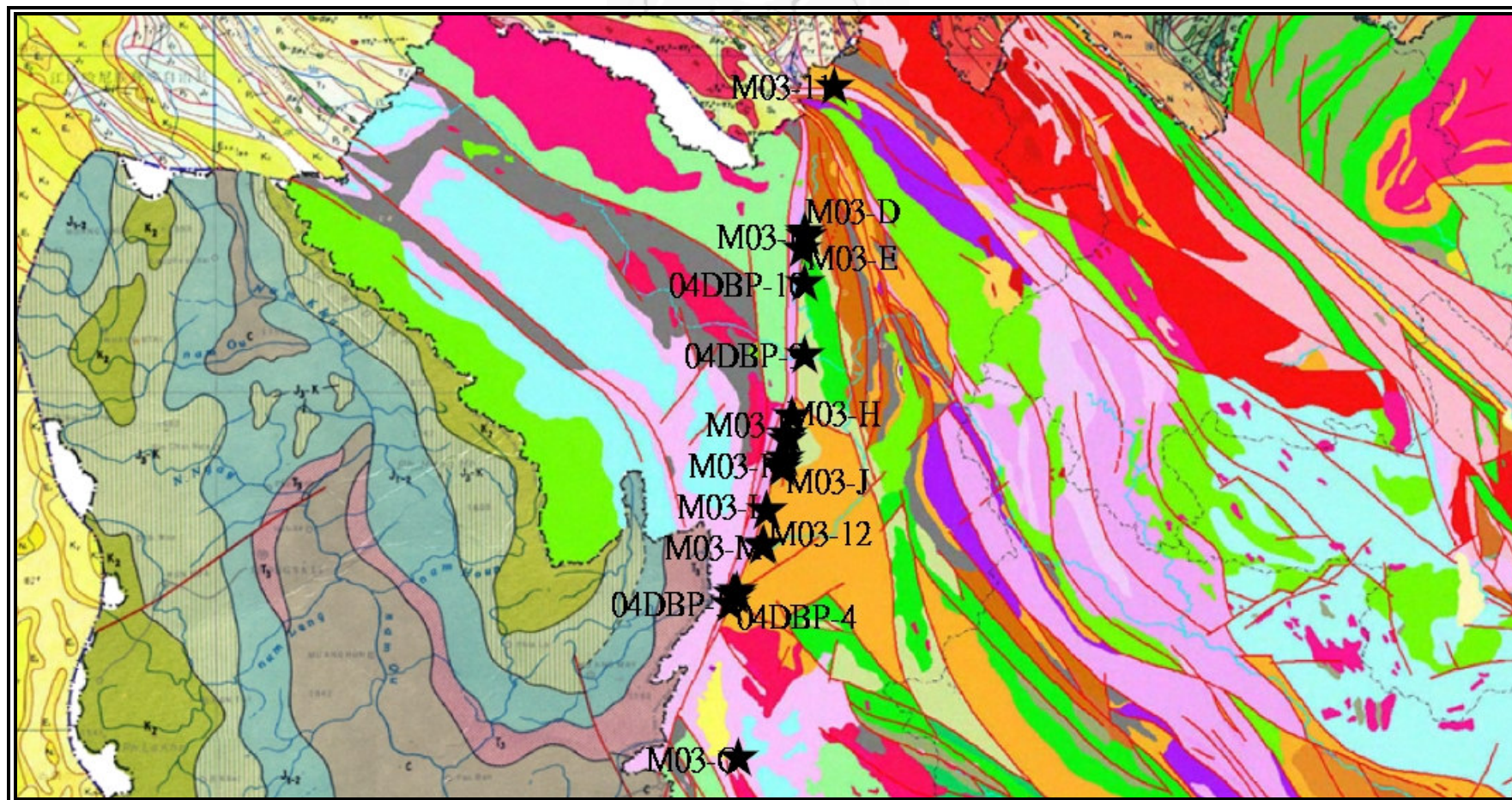


圖 2.3 奠邊府剪切帶區域地質圖與採樣點位分布圖。

2.3 標本處理

在定向標本的處理上，首先著重於回歸定向，將野外採集獲得的定向樣本在實驗室利用定向回歸儀回推到採樣時的位態，然後在定向標本上標示出水平面、南—北向，接著在定向標本上標出主葉理面以及礦物拉張線。

本研究為了探討研究區域受到應力作用之後所產生的應變結果，所以選定水平面、應變橢圓 X-Z 面（圖 2.4）：垂直葉理面平行礦物拉張線、應變橢圓 Y-Z 面：垂直葉理面垂直礦物拉張線等三面當作測量基準面。將野外採集獲得的定向樣本依照此基準製作岩石薄片，並紀錄每個面的走向與傾角，所有製作完成的薄片樣本都需要上蓋玻片，使得礦物顆粒的邊界銳利化，以利影像處理與應變分析。

將岩石薄片用偏光顯微照相系統將薄片影像數位化為電子圖檔，以 Adobe 公司出版的 Photoshop CS2 將分割的電子圖檔合併，合併後用美國 MediaCybernetics 公司影像分析軟體 Image Pro Plus 6.0 軟體分析，藉由色彩選取的方法，將礦物顆粒圈選出來，在有給予薄片背景比例尺的情況之下，Image Pro Plus 6.0 軟體就可以自動算出各圈選礦物的面積、長軸偏轉角度、軸長、半軸長以及長短軸比率等數據，這些數據可以直接輸出到 Microsoft 公司的 Excel 裡加以整理利用（附錄一）。

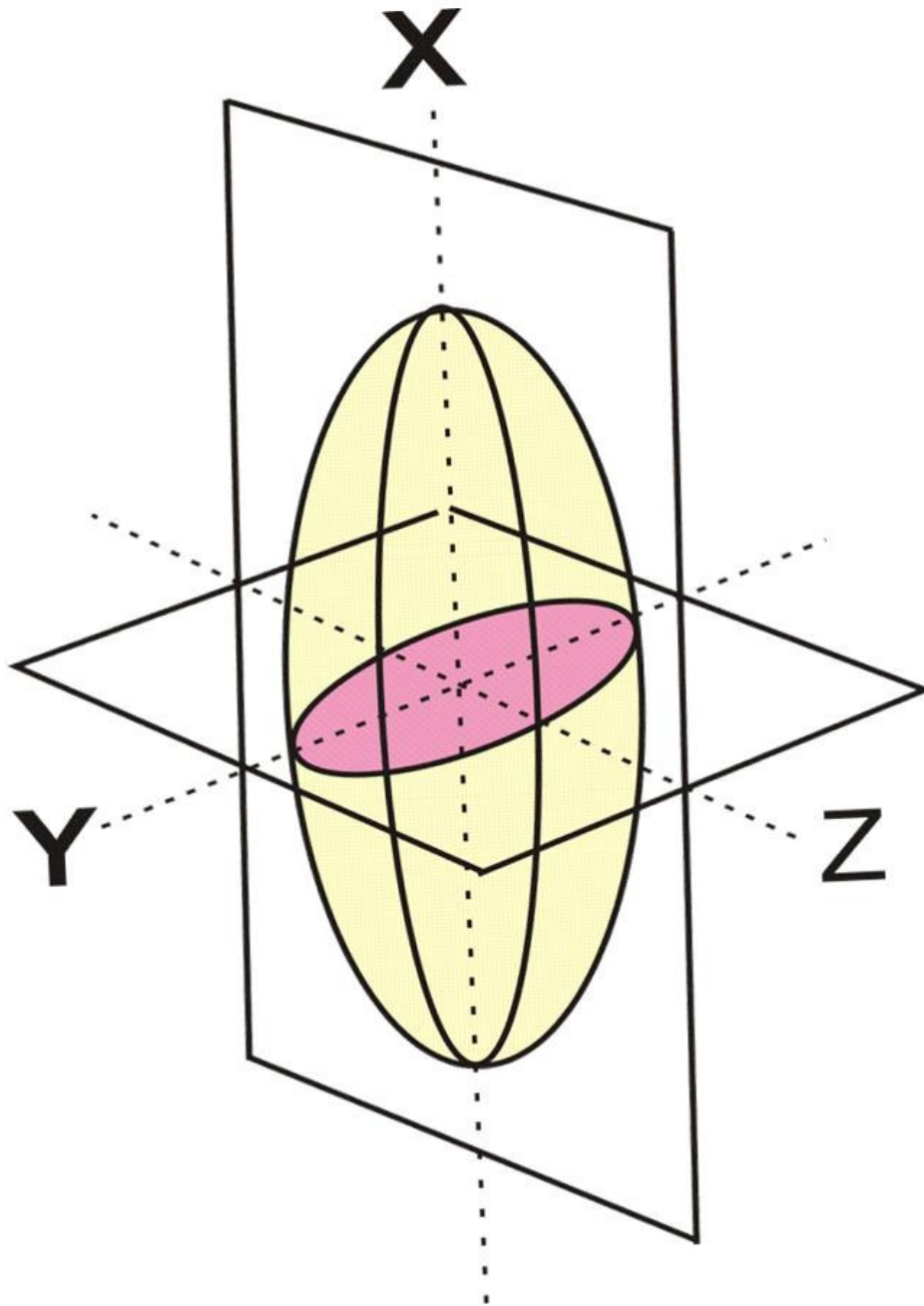


圖 2.4 應變橢圓的 X-Y 面、Y-Z 面、X-Z 面判定，是依照應變橢圓球體的三軸長短為基準。

2.4 懷氏法做法

懷氏法在傳統的做法上，需要耗費大量的時間在點選每顆相鄰礦物顆粒的中心，但是隨著電腦軟硬體以及影像處理的快速提升，有許多相關的電腦軟體程式被開發，在這些軟體的幫助之下可以從純人工圈選移動，進入半自動化的辨識，節省下大部分的時間。

在本研究中所選定的軟體程式是由 Eckart Wallbrecher, Graz 所研發的 Fabric 7，在 Fabric 7 軟體的介面下只要在岩石薄片的電子圖檔上點選礦物顆粒的中心位置以及礦物顆粒的半徑，就可以直接在岩石薄片的電子圖檔上做懷氏法運算（圖 2.5），由於薄片中的礦物顆粒大小落差過大，所以選用常態化懷氏測點（normalized Fry Plot）做運算，運算過後得到空白應變橢圓的圖形，接著在應變橢圓圖形上標示出我們所認定的長軸與短軸，經過 Fabric 7 軟體做內部運算之後，此軟體會將長短軸比例（ R ）以及長軸與水平線的夾角（ ϕ ）標示出來（圖 2.6） Fabric 7 軟體會以公式(1) 自動計算我們標示應變橢圓的每條直徑與水平線偏轉角度，畫出最符合此應變橢圓的趨勢曲線（圖 2.7 藍色曲線），另外，此軟體也會將我們所點的所有礦物中心以與水平線的夾角每 5 度做區間，計算在這區間內的算術平均數，把這些區間內的數值相連結做另一個趨勢曲線圖來加以比較（圖 2.7 紅色曲線）。兩個曲線圖波峰所處的角度即為長軸與水平線的夾角，藍色曲線反映

人工標定應變橢圓的長短軸比以及長軸與水平線的夾角；紅色曲線反映岩石薄片中心在不同角度區間的應變橢圓長短軸比以及長軸與水平線的夾角。

$$d = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1' \cos^2 \alpha + \lambda_2' \sin^2 \alpha}} - 1 \dots \dots \text{公式(1)}$$

$$\lambda_1' = \frac{1}{(1+e_1)^2} ; \lambda_2' = \frac{1}{(1+e_2)^2}$$

$\alpha = 0, \dots, 180^\circ$ (Ramsay & Huber, 1987)

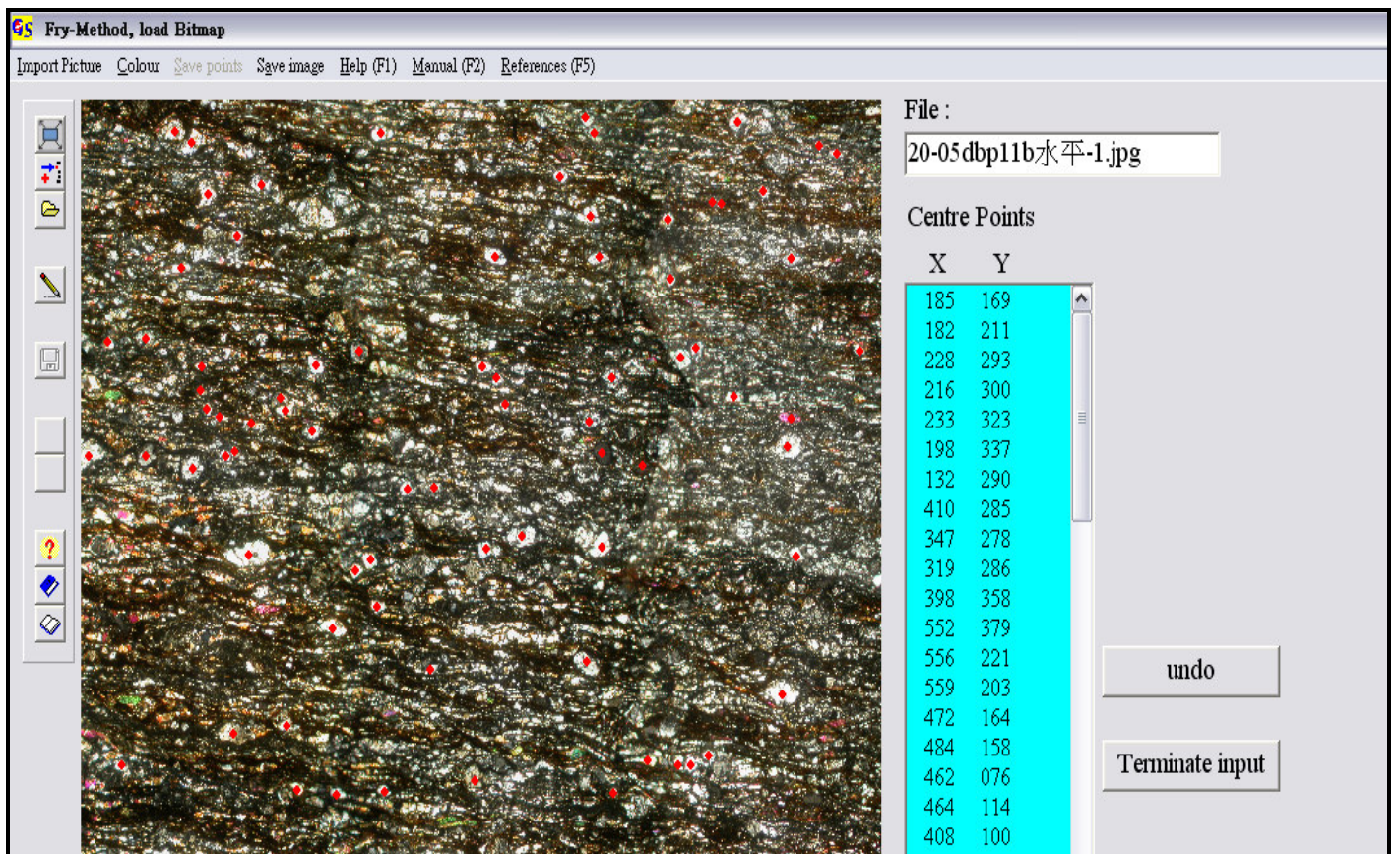


圖 2.5 運用 Fabric 7 軟體可以直接在薄片電子圖檔上做懷氏法的運算。

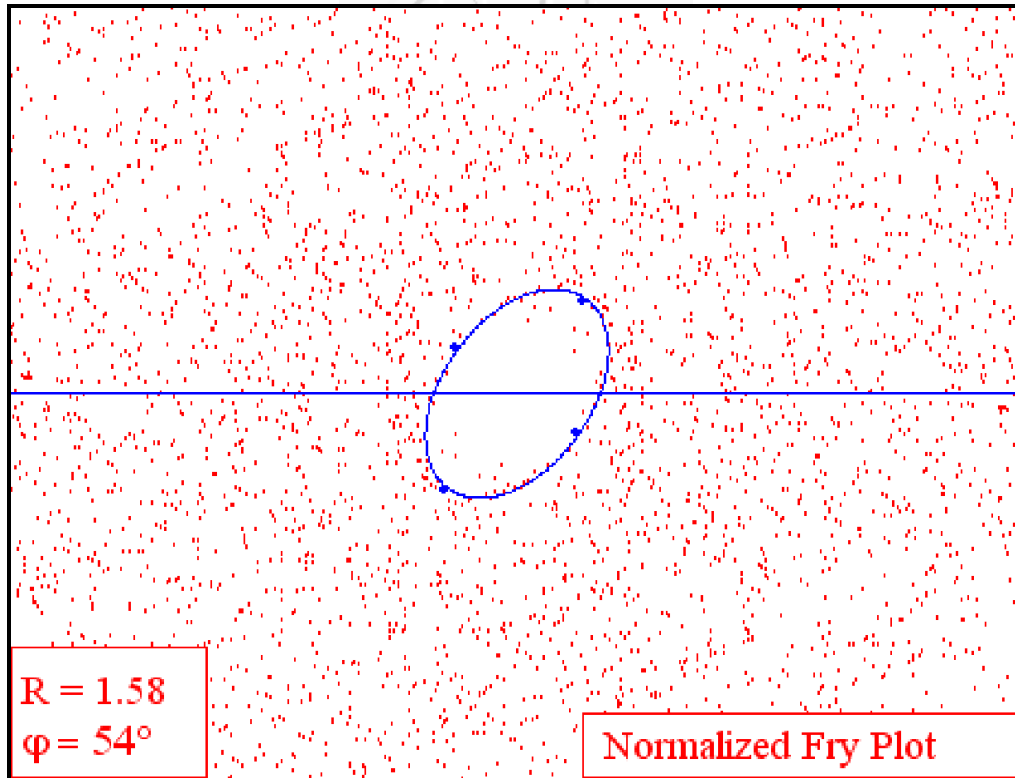


圖 2.6 紅點為每顆礦物的中心，經過手動點出橢圓後（藍色橢圓），會自動於左下角標示長短軸比例（ R ）以及長軸與水平線的夾角（ ϕ ）。

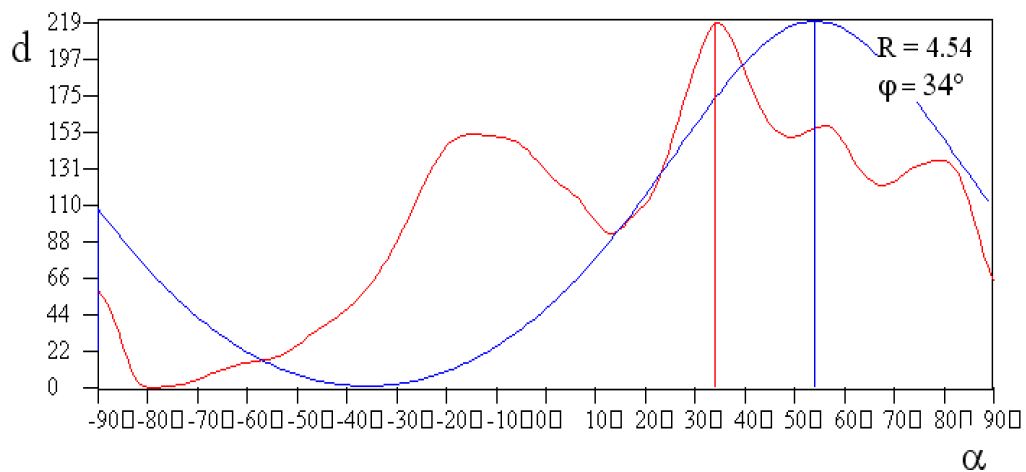


圖 2.7 Fabric 7 軟體自動計算我們標示應變橢圓的每條直徑與水平線偏轉角度，畫出最符合此應變橢圓的趨勢曲線（藍色曲線）。所有礦物中心與水平線的夾角每 5 度做區間，計算區間內的算術平均數，把這些區間內的數值相連結做另一個趨勢曲線圖（紅色曲線），右上角呈現的數據為紅色曲線算出來的數值。

2.5 R_f/ϕ

Ramsay 於 1967 年提出 R_f/ϕ 分析法的基礎，此方法是利用發生在變形橢圓上的系統形狀改變，用來測定含有橢圓形包體（碎屑、顆粒、團塊等）的岩石應變。之後經由 Dunnet (1969) 與 Lisle (1967, 1977, 1985) 的修正與改進，如今已經能夠成功的應用在各種不同的地質背景。

此方法的理論基礎是假設岩石中原本的所有物質都有自己原始的軸率 (R_i) 和位態 (θ)，經過應力作用之後，物質產生應變會形成新的一組新的軸率 (R_f) 和位態 (ϕ)。在最終應變發生之前，雖然岩石內含物質的形狀可能是多種型態，但是整體岩石應變橢圓當作是圓形；經歷最終應變之後，應變橢圓就受影響而改變（圖 2.8）。

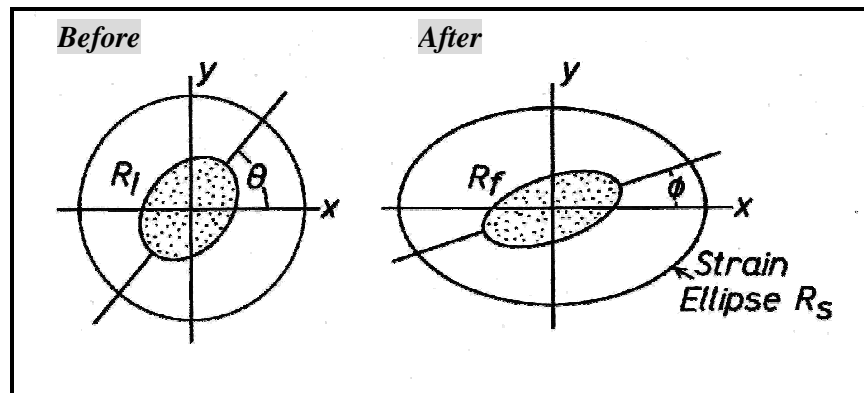


圖 2.8 左圖為應變發生前原始的軸率 (R_i) 與位態 (θ)；右圖為經過應變之後產生的新軸率 (R_f) 與新位態 (ϕ)（修改自 Lisle, 1985）。

Ramsay (1967) 從理論上指出，具有相同初始軸率 (R_i) 但長軸方位 (θ) 不同的一組橢圓形標示物，如果按他們的應變之後的狀態點在 R_f/ϕ 分析圖上，將會顯示出一種類似洋蔥圈狀的特殊線性，也就是所謂的 R_i 曲線 (圖 2.9)。相反的，具有相同長軸初始方位 (θ) 但是軸率不同數據經過應變後在 R_f/ϕ 圖上繪出的曲線叫做 θ 曲線 (圖 2.10)。

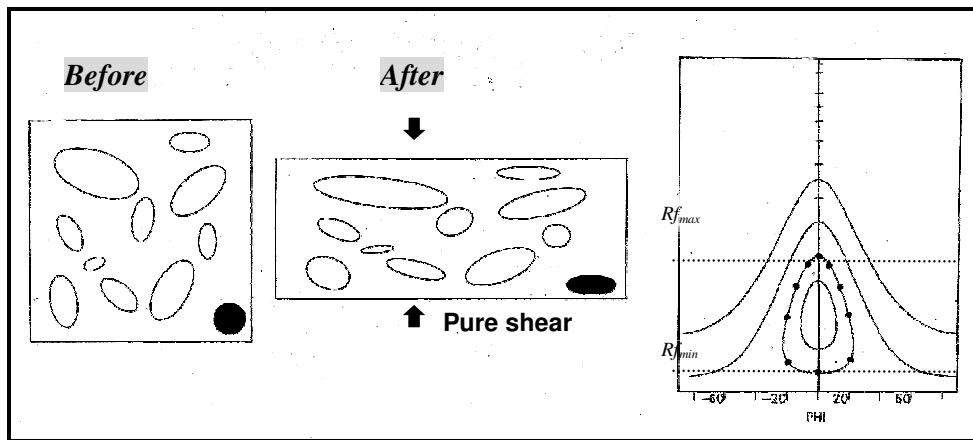


圖 2.9 R_i 曲線圖 (修改自 Lisle, 1985)。

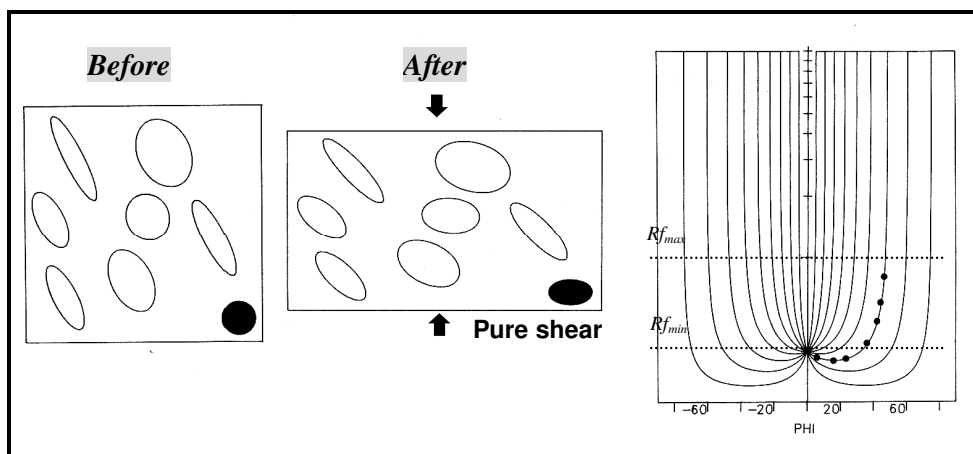


圖 2.10 θ 曲線圖 (修改自 Lisle, 1985)。

將相同應變量的 R_i 曲線簇和 θ 曲線簇畫在一起時，就會在 R_f/ϕ 圖上形成一個「標示物變形網」(deformation grid; 圖 2.11)。標示物變形網的形狀隨著應變量 R_s 的變化而改變型貌 (shape)。因此，如果我們把這種網套疊在 R_f/ϕ 數據點上，與數據點最吻合的曲線群所代表的 R_s 值就是最好的應變值 (Lisle, 1985)。

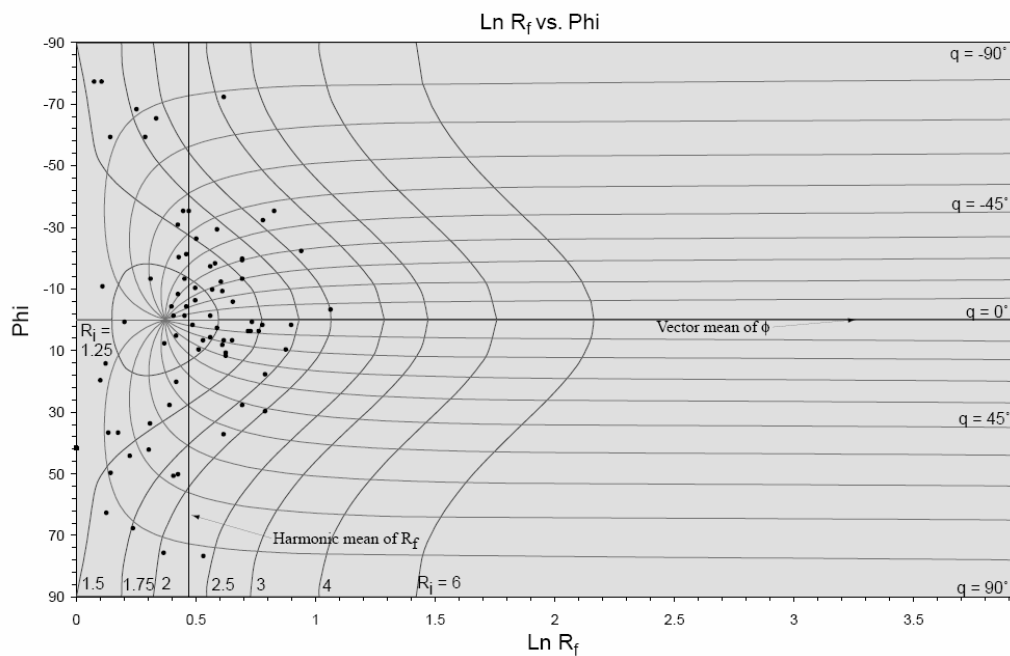


圖 2.11 標示物變形網。將相同應變的 R_i 曲線與 θ 曲線套疊在一起所組成。

第三章 分析結果

在本章節將呈現大地構造分析與應變分析的數據與結果，野外構造分析將分為塑性（褶皺、葉理、劈理等）與脆性（斷層）兩方面來探討，應變分析則分懷氏法與 R_f/ψ 來做比較。

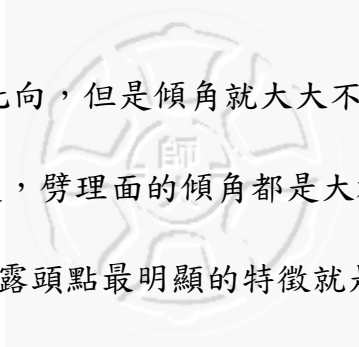
3.1 大地構造分析

大地構造分析的描述依照地點不同，可分為鮮水河剪切帶與莫邊府剪切帶，由於這兩個剪切帶的幅員廣闊，所以又各自分為北、中、南三段（圖 3.1、圖 3.2）。

3.1.1 鮮水河剪切帶構造分析

3.1.1.1 鮮水河剪切帶北段構造分析

鮮水河剪切帶北段介於道孚以南與折多山火成岩體之間，測量露頭點位有 06XS10、06XS11 兩個點位（圖 3.3）在此區域中存在許多斷層以及斷層擦痕，由於斷層面上的斷層擦痕保存完整，所以可以藉由斷層擦痕來判斷斷層種類與這些斷層產生的先後關係。06XS10 的岩性為受到輕度變質的頁岩，在此露頭點所測量到的層面走向與劈理



面走向都是近乎南—北向，但是傾角就大大不同，層面的傾角都是30度到40度的低角度，劈理面的傾角都是大於40度以上的高角度（圖 3.3） 06XS11 此露頭點最明顯的特徵就是褶皺（圖 3.4），由野外測量的褶皺軸面數據來看，走向大致都是南—北向，但是傾角卻可分成近垂直與近水平兩組，此點位的層面與劈理面位態幾乎一致，都是南—北向高角度。此區域的斷層型態都是接近垂直的高角度橫移斷層，但是可以區分成左移斷層與右移斷層兩種類型（圖 3.3）。

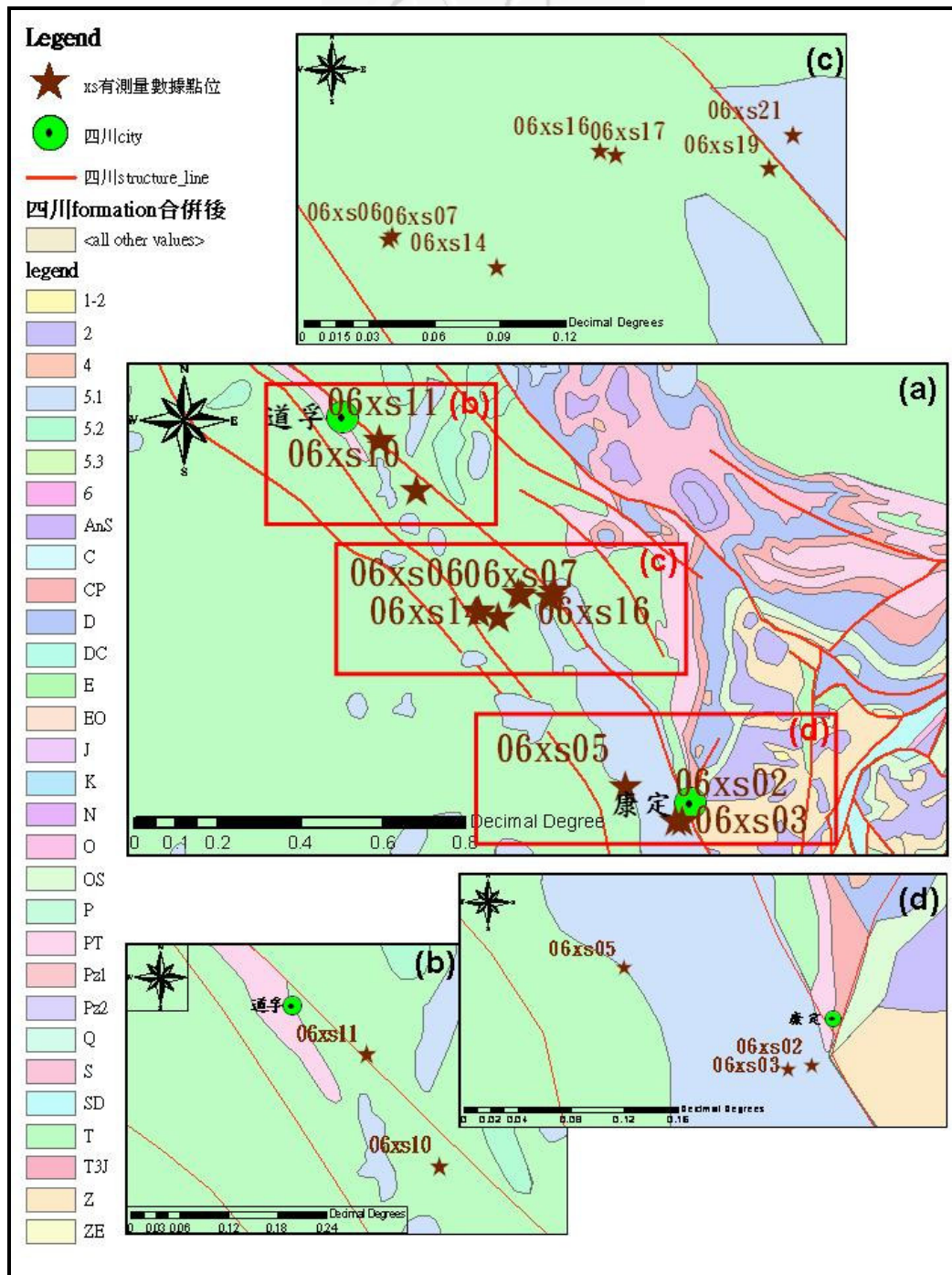


圖 3.1 鮮水河剪切帶部分研究區域地質圖與測量點位分布圖。(a) 鮮水河剪切帶 (b) 北段 (c) 中段 (d) 南段測量點位分布圖。

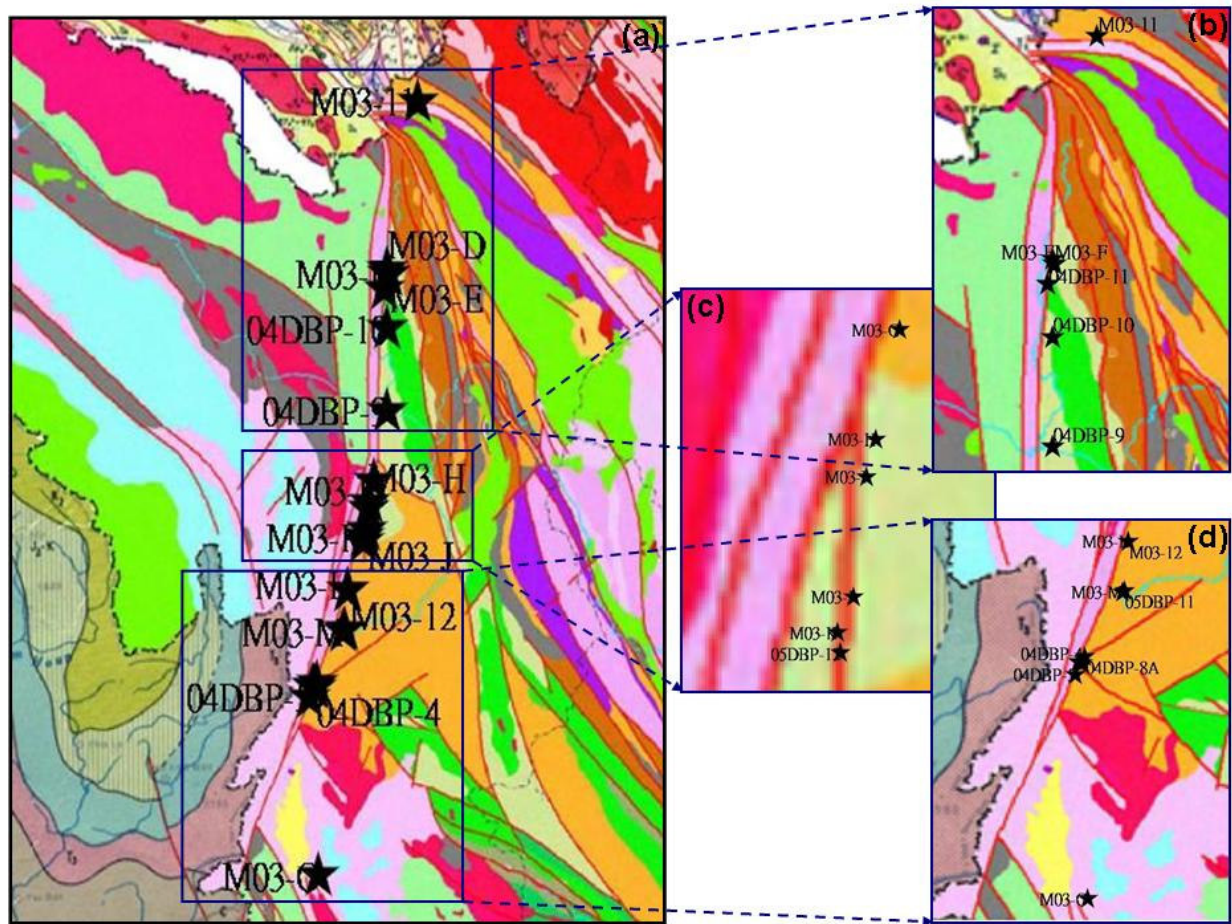


圖 3.2 奠邊府剪切帶部分研究區域地質圖與測量點位分布圖。(a) 奠邊府剪切帶 (b) 北段 (c) 中段 (d) 南段測量點位分布圖。

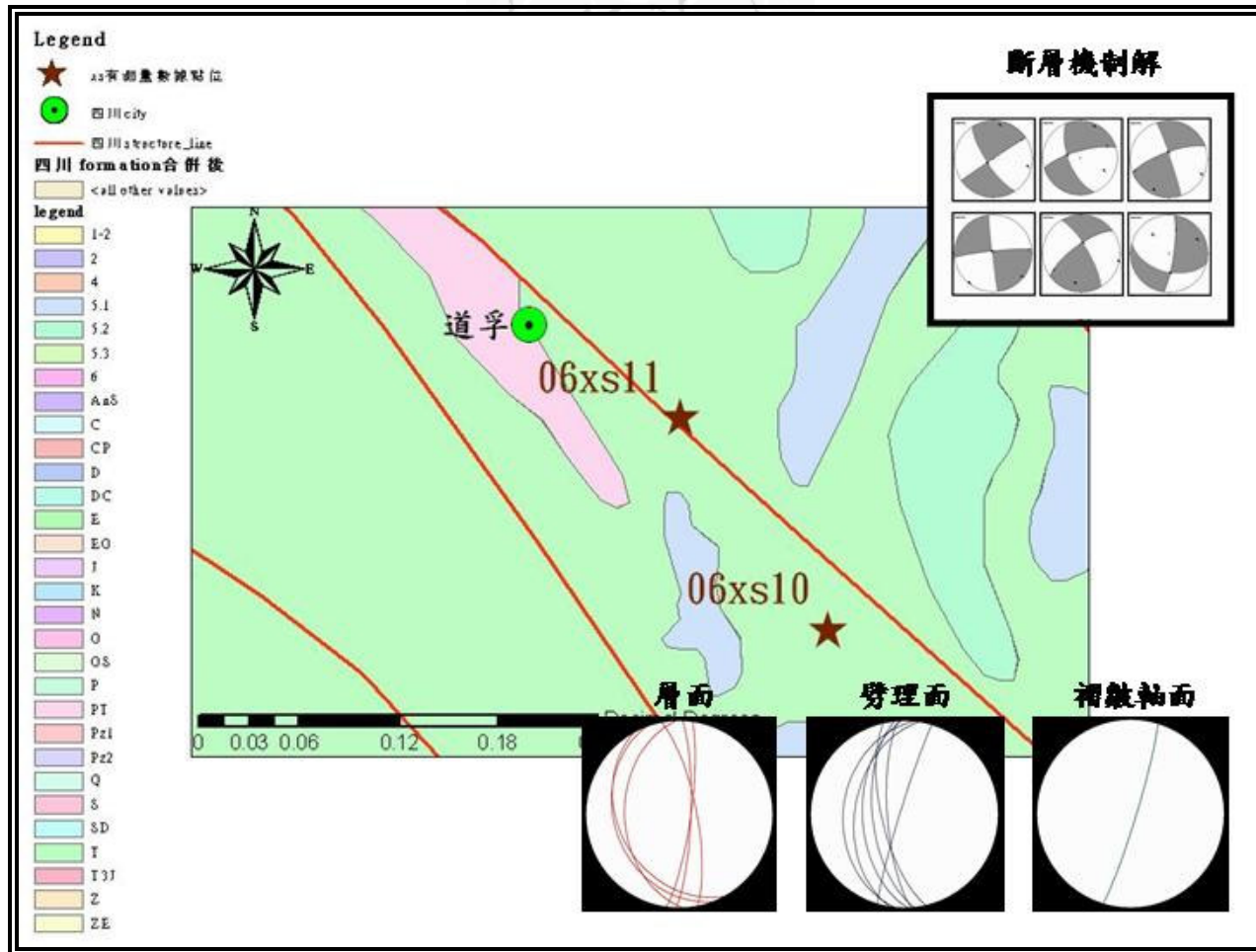
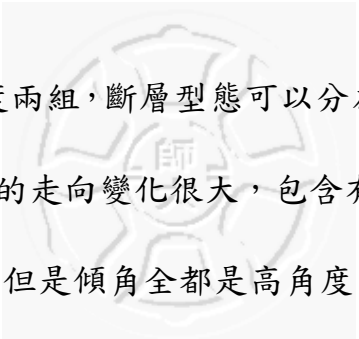


圖 3.3 鮮水河剪切帶北段構造分析。

3.1.1.2 鮮水河剪切帶中段構造分析

鮮水河剪切帶中段位於折多山火成岩體出露處的北端，總共有 06XS06、06XS07、06XS14、06XS16、06XS17、06XS19、06XS21 等 7 個採樣點（圖 3.4）。在 06XS06 測量到的主葉理面是南—北向緩角度，根據斷層面以及斷層擦痕所推測的斷層機制解顯示，此區域的斷層有正斷層跟逆斷層。在 06XS07 層面位態是東北—西南向接近垂直的高角度，劈理面是東—西向接近垂直的高角度，而斷層型態全都是正斷層。06XS14 所測量的層面位態都是東北—西南向接近垂直的高角度，主葉理面是南—北向接近垂直的高角度，劈理面則有東北—西南向以及西北—東南向兩組接近垂直的高角度，此測量點位的斷層可以大致區分為左移斷層、右移斷層及正斷層。06XS16 主葉理面的位態十分複雜，走向從西北—東南、南—北到東北—西南都有，測量到的傾角則從 26 度到 89 度都有，主葉理面前一期的葉理面走向則都是接近南—北向，傾角介於 35 度到 50 度之間，劈理面可以分為南北向接近垂直的高角度，以及東西向接近水平的低角度兩組，褶皺軸面的走向皆為南—北向，傾角介於 15 度到 50 度之間，此點位的斷層型態可以區分為左移斷層、右移斷層以及逆斷層。06XS17 的層面位態大多是南—北向高角度，只有少數是東北—西南向低角度，劈理面是東北—西南向高角度，褶皺軸面都是東北—西南向，但是可以明顯的



區分成高角度與低角度兩組，斷層型態可以分為左移斷層以及橫移逆衝斷層。06XS19 層面的走向變化很大，包含有東北—西南向、東—西向、西北—東南向，但是傾角全都是高角度，主葉理面的位態相較之下就十分簡單，全都位於西北—東南向的高角度，劈理面的位態也與主葉理面一致，斷層型態包含有左移斷層以及橫移正斷層。06XS21 的主葉理面位態幾乎一致，全部都是東—西向高角度，斷層型態則包含有左移斷層與右移斷層兩種類型。

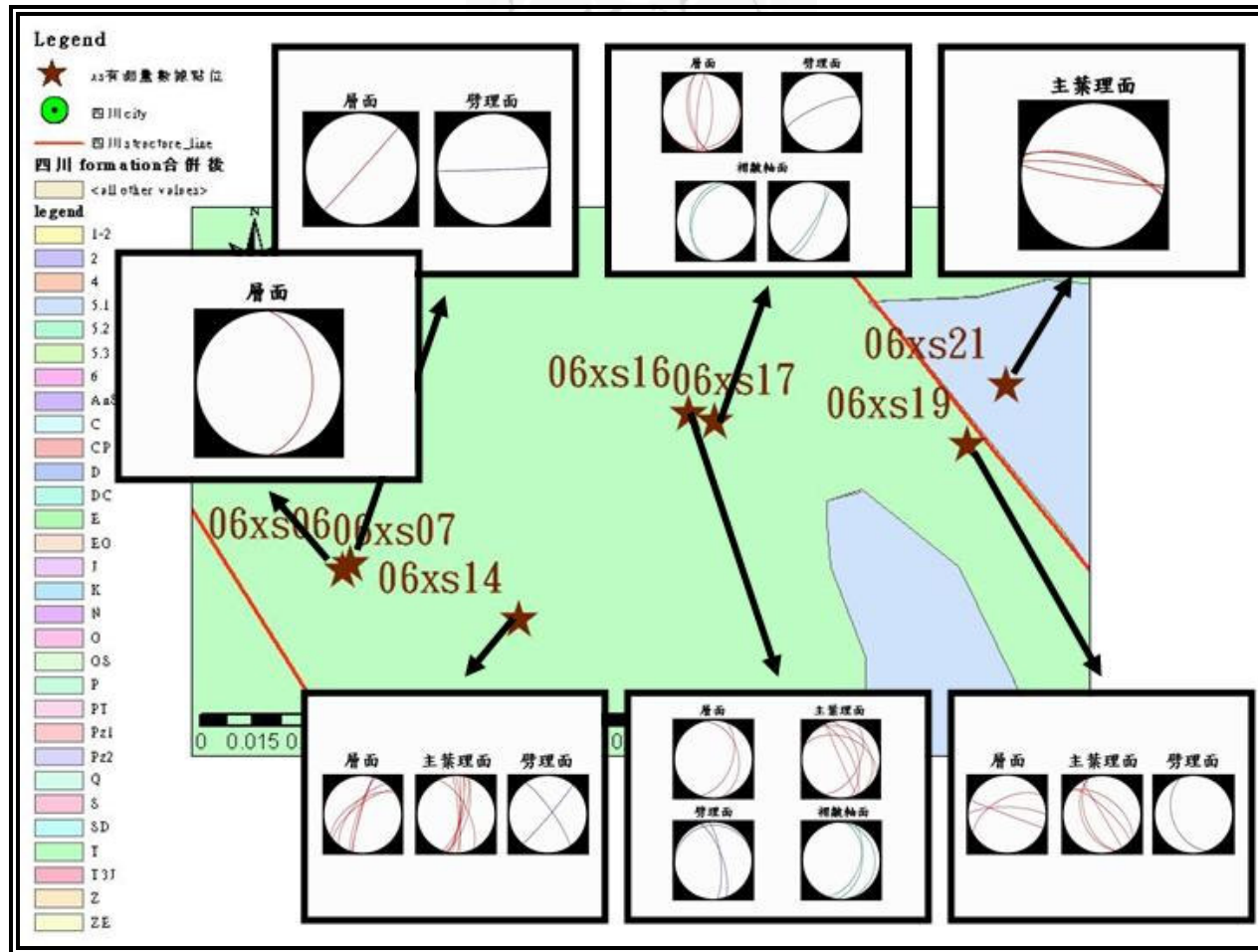


圖 3.4 鮮水河剪切帶中段構造分析。

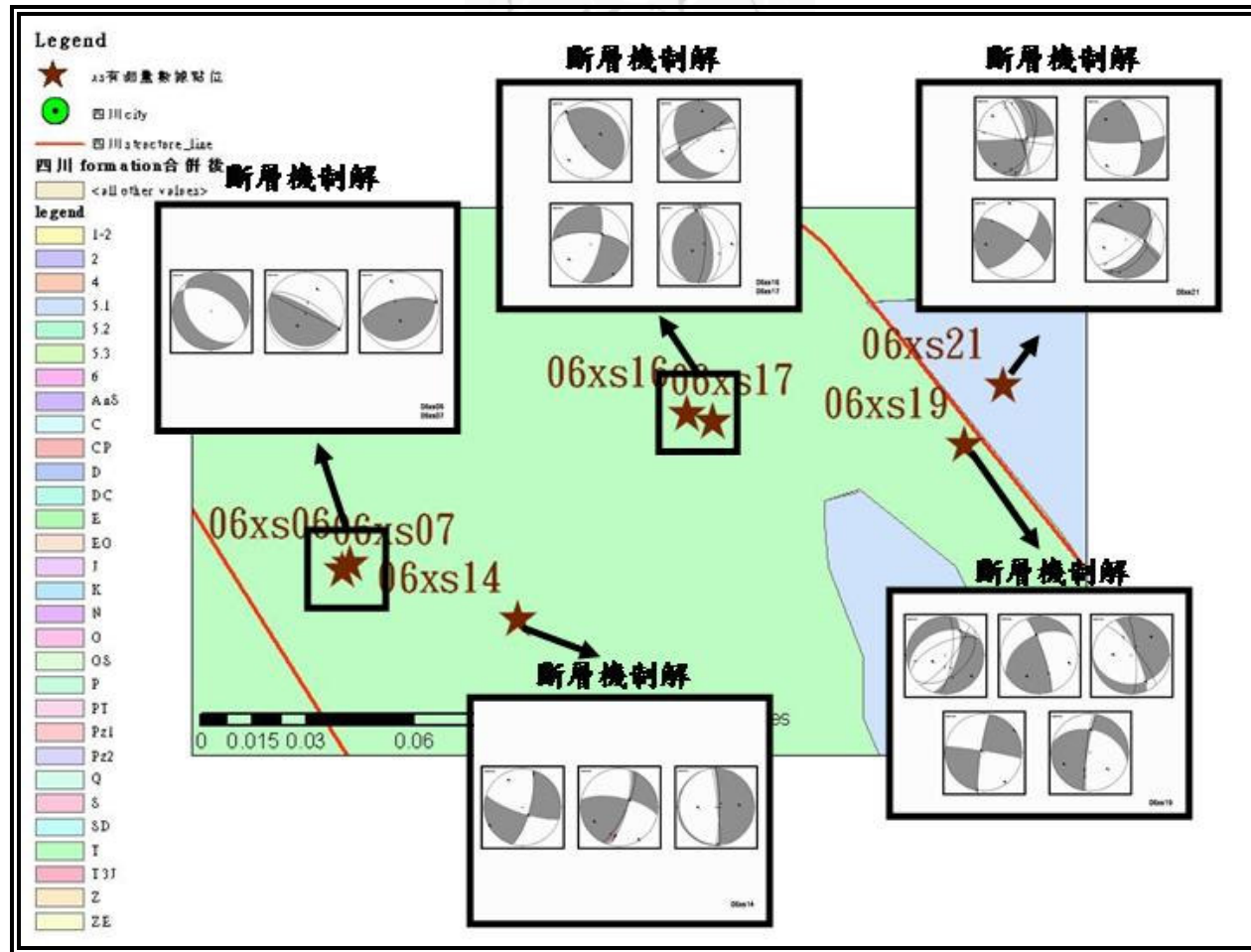


圖 3.5 鮮水河剪切帶中段斷層機制解。

3.1.1.3 鮮水河剪切帶南段構造分析

鮮水河剪切帶南段位於康定附近，總共量測了 06XS02、06XS03、06XS05 等三個點位（圖 3.6） 06XS02 測量到的主葉理面的走向大多是南—北向，有少數是西北—東南向，但是傾角全都是 60 度以上的高角度，褶皺軸面的位態是西北—東南向高角度，斷層型態以左移斷層為主，僅有少數橫移正斷層跟右移斷層。06XS03 的主葉理面、前一期葉理面以及褶皺軸面位態都是南—北向的高角度，斷層型態為斷層面位態接近南—北向的橫移逆斷層。06XS05 所量測到的層面位態皆為西北—東南向高角度，劈理面則大多為南—北向高角度，僅有少數為東北—西南向高角度，斷層型態可分為斷層面位態西北—東南向的左移斷層，以及斷層面位態接近東—西向的橫移正斷層。

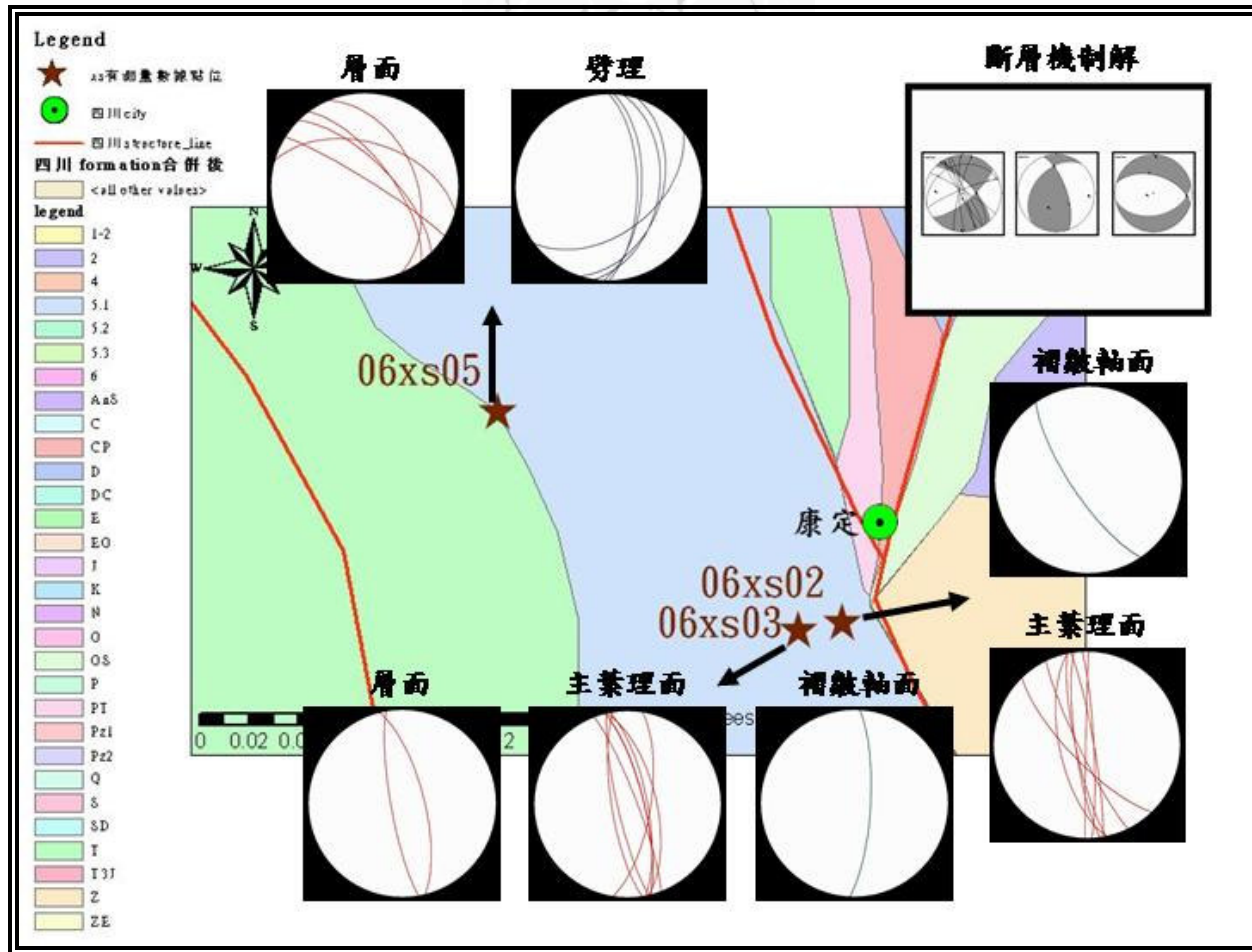
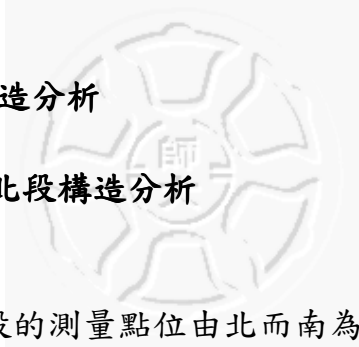


圖 3.6 鮮水河剪切帶南段構造分析。

3.1.2 奠邊府剪切帶構造分析

3.1.2.1 奠邊府剪切帶北段構造分析



奠邊府剪切帶北段的測量點位由北而南為 M03-11、M03-D、M03-E、M03-F、04DBP-11、04DBP-10、04DBP-9 共 7 個點位（圖 3.7） M03-11 主葉理面與劈理面的位態同樣都是接近東—西向高角度。M03-D 主葉理面的位態為南—北向接近垂直的高角度，劈理面的位態則是西北—東南向的高角度。M03-E 層面是南—北向的低角度，劈理面的位態為西北—東南向高角度。M03-F 層面的走向皆為南—北向，傾角則是介於 35 度到 50 度之間，劈理面的走向分佈的比較凌亂，有西北—東南向、東—西向、東北—西南向，但傾角都是高角度。在 04DBP-11 量測到大量的主葉理面數據資料，顯示此地區主葉理面的走向是南—北向，傾角介於 20 度到 55 度之間，劈理面的位態為東北—西南向的低角度。04DBP-10 層面的走向全部皆為南—北向，傾角介於 35 度到 55 度之間，劈理面可以分為兩期，早期的劈理面位態為南—北向的低角度，晚期劈理面的位態為東北—西南向以及東—西向的高角度，此地區量到三個褶皺軸面的位態，從野外可以判斷區分成兩期，但是位態卻大不相同。至於北段最後一個點位 04DBP-9，主葉理面的位態也是南—北向的高角度。

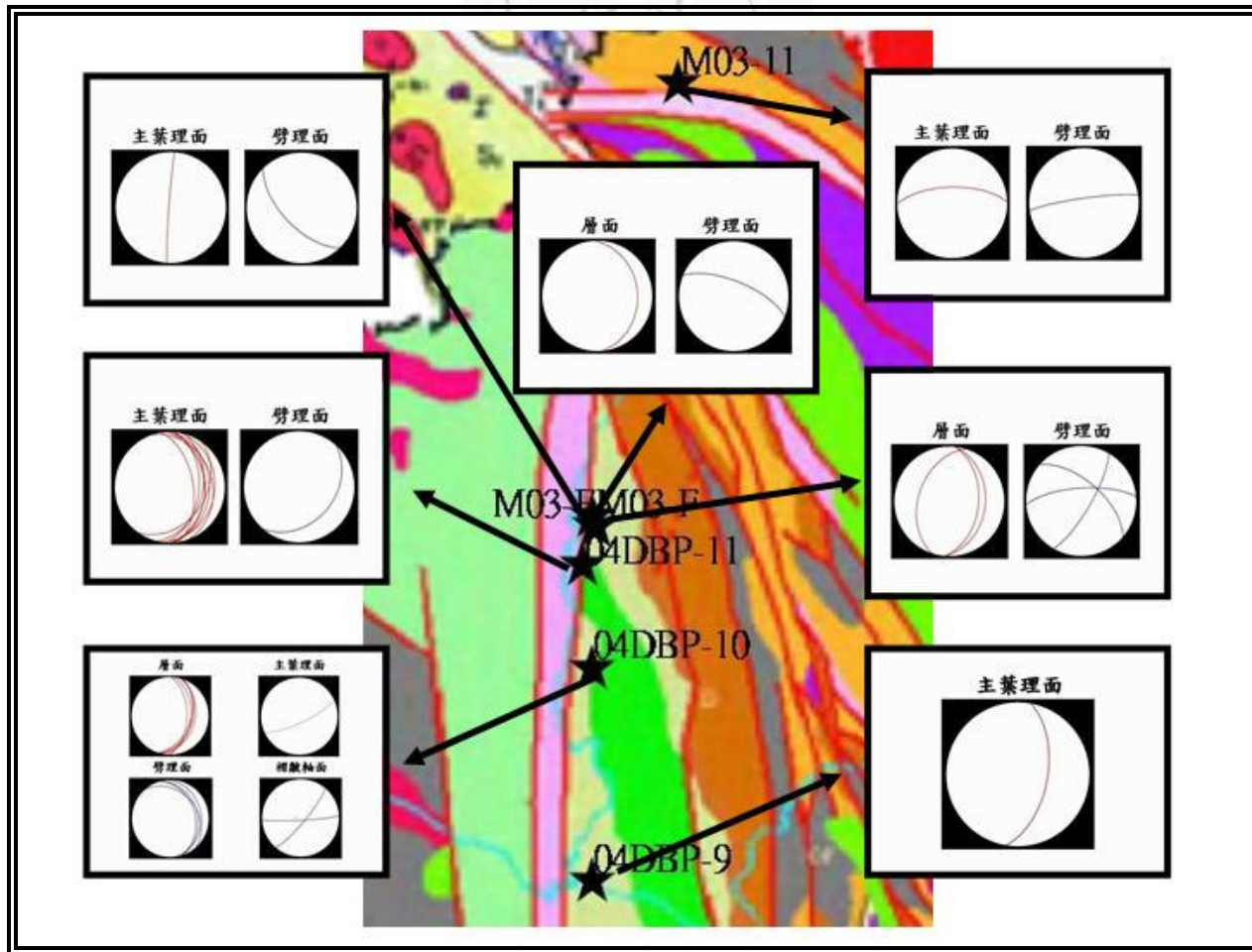


圖 3.7 奠邊府剪切帶北段構造分析。

3.1.2.2 莫邊府剪切帶中段構造分析

莫邊府剪切帶中段位於此剪切帶地表破裂地形的轉折處，由北而南共測量了 M03-G、M03-H、M03-I、M03-J、M03-K、05DBP-12 等 6 個點位（圖 3.8）。M03-G 的層面位態都是東北—西南向傾角接近 60 度左右，劈理面位態則有東—西向高角度與南—北向高角度。M03-H 點位量測到一組的褶皺軸面位態是東北—西南向傾角接近垂直，劈理面的位態除了少數與褶皺軸面位態一致，為東北—西南向高角度之外，其餘劈理面都是近南—北向的低角度，此地區的主葉理面位態分布十分混亂，不過大致上可以區分為位態東北—西南向與西北—東南向兩組，位態西北—東南向這組的傾角大約都在 30 度左右，而位態東北—西南向這組的傾角分布則從 30 度到 70 度都有。M03-I 點位的層面位態大致上都是西北—東南向高角度，只有少部分的位態是東—西向的高角度，而主葉理面與劈理面的位態也都是西北—東南向的高角度。M03-J 的層面位態皆為南—北向低角度，但是劈理面的位態就可以分為接近南—北向與東—西向兩組。M03-K 點位褶皺軸面、層面以及劈理面的位態都是南—北向高角度。05DBP-12 的褶皺軸面位態有三組，一組是南—北向高角度，與主葉理面位態一致，一組是東北—西南向低角度，與第一期劈理面的位態相同，最後一組是東北—西南向傾角近乎 90 度，與第二期劈理面位態相同。

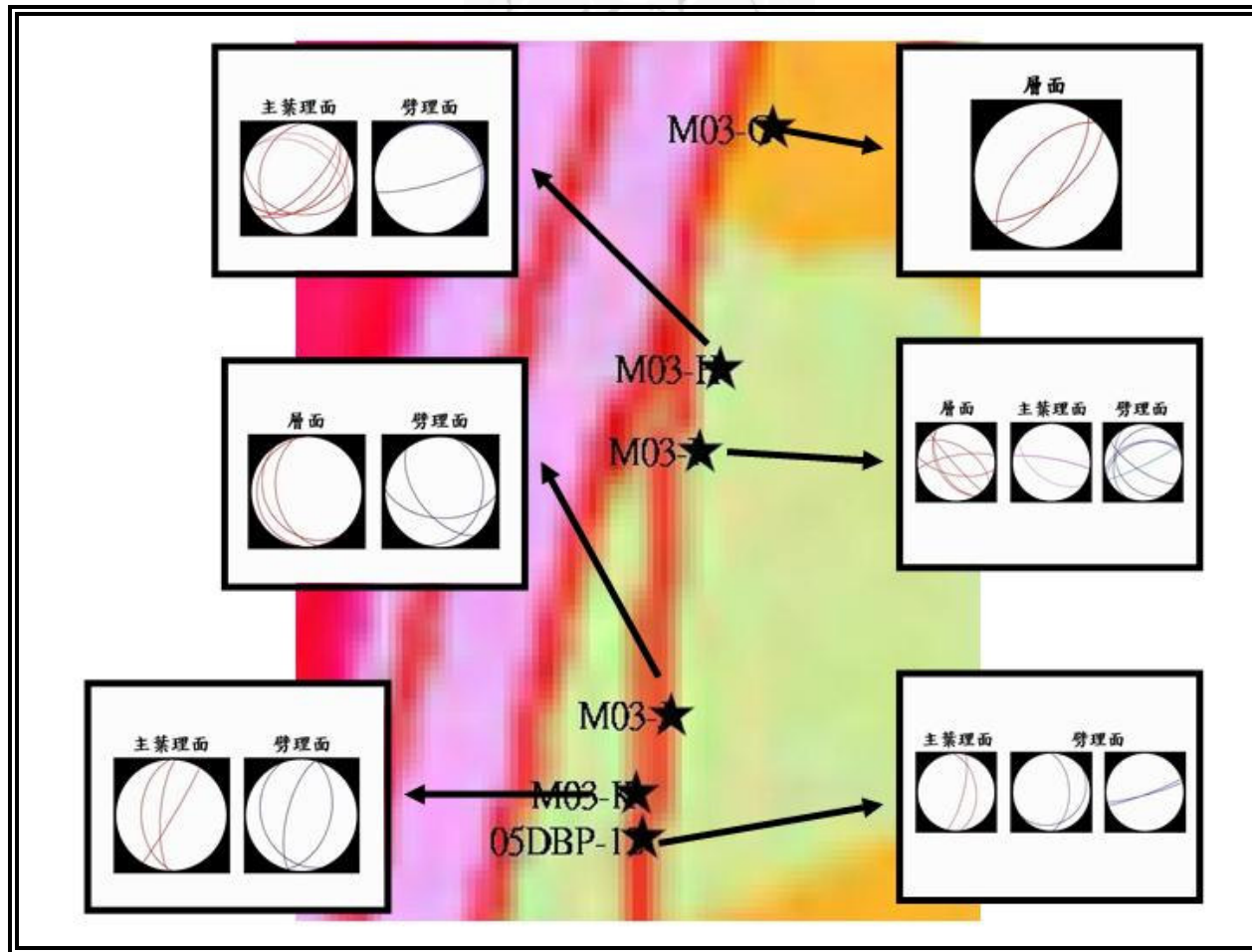
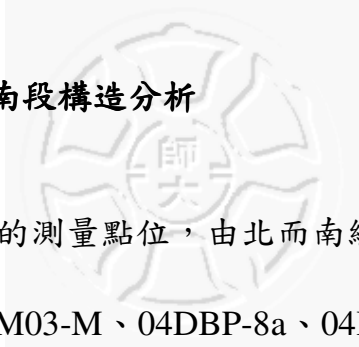



圖 3.8 莫邊府剪切帶中段構造分析。

3.1.2.3 奠邊府剪切帶南段構造分析



奠邊府剪切帶南段的測量點位，由北而南總共包含了 M03-L、M03-12、05DBP-11、M03-M、04DBP-8a、04DBP-8b、04DBP-8c、04DBP-8d、04DBP-8e、04DBP-2、04DBP-3、04DBP-4、04DBP-5，共 13 個測量點位（圖 3.9）。M03-L 的褶皺軸面位態為東北—西南向低角度，主葉理面的位態則有西北—東南向以及東北—西南向偏南—北向兩組。M03-12 所量測到的褶皺軸面與層面位態可分為南—北向高角度以及東—西向高角度兩組，但是劈理面的位態則有東北—西南向高角度、東—西向高角度以及西北—東南向接近水平的低角度。05DBP-11 的主葉理面位態全部都是南—北向接近垂直的高角度，劈理面位態為西北—東南向傾角都大於 75 度以上的高角度。M03-M 的主葉理面與劈理面位態都是南—北向接近 70 度的高角度。04DBP-8a 的層面為西北—東南向高角度，但是此地區的主葉理面、劈理面以及褶皺軸面的位態都是東北—西南向高角度。04DBP-8b 的層面以及褶皺軸面位態為東北—西南向接近東—西向的高角度，劈理面則可以分成南—北向低角度及東北—西南向低角度兩組，主葉理面的位態為西北—東南向接近東—西向，傾角約 40 度。04DBP-8c 的層面以及褶皺軸面位態為東北—西南向接近東—西向的高角度，劈理面的位態為東北—西南向，傾角皆為小於 30 度的低角度，主葉理面的位態則為東



北—西南向的高角度。04DBP-8d 的層面主葉理面以及褶皺軸面位態為東北—西南向接近東—西向的高角度，劈理面位態則分為東北—西南向高角度與西北—東南向高角度。04DBP-8e 的褶皺軸面以及劈理面位態為南—北向高角度，主葉理面可以分為兩期，前期的位態有東北—西南向高角度與西北—東南向高角度，後期的位態則是東西向高角度。04DBP-2 的主葉理面位態皆為南—北向傾角小於 30 度的低角度，劈理面的位態為東北—西南向的高角度與西北—東南向的高角度。04DBP-3 的層面位態由南—北向高角度至東北—西南向高角度都有，主葉理面的位態為南—北向高角度，劈理面的位態為東北—西南向的高角度。04DBP-4 的層面位態為東北—西南向高角度，褶皺軸面的位態有南—北向高角度與西北—東南向高角度兩組，劈理面位態則分成東北—西南高角度與西北—東南高角度。04DBP-5 此地區層面、主葉理面以及劈理面的位態，大致上都是呈現南—北向高角度的狀態。

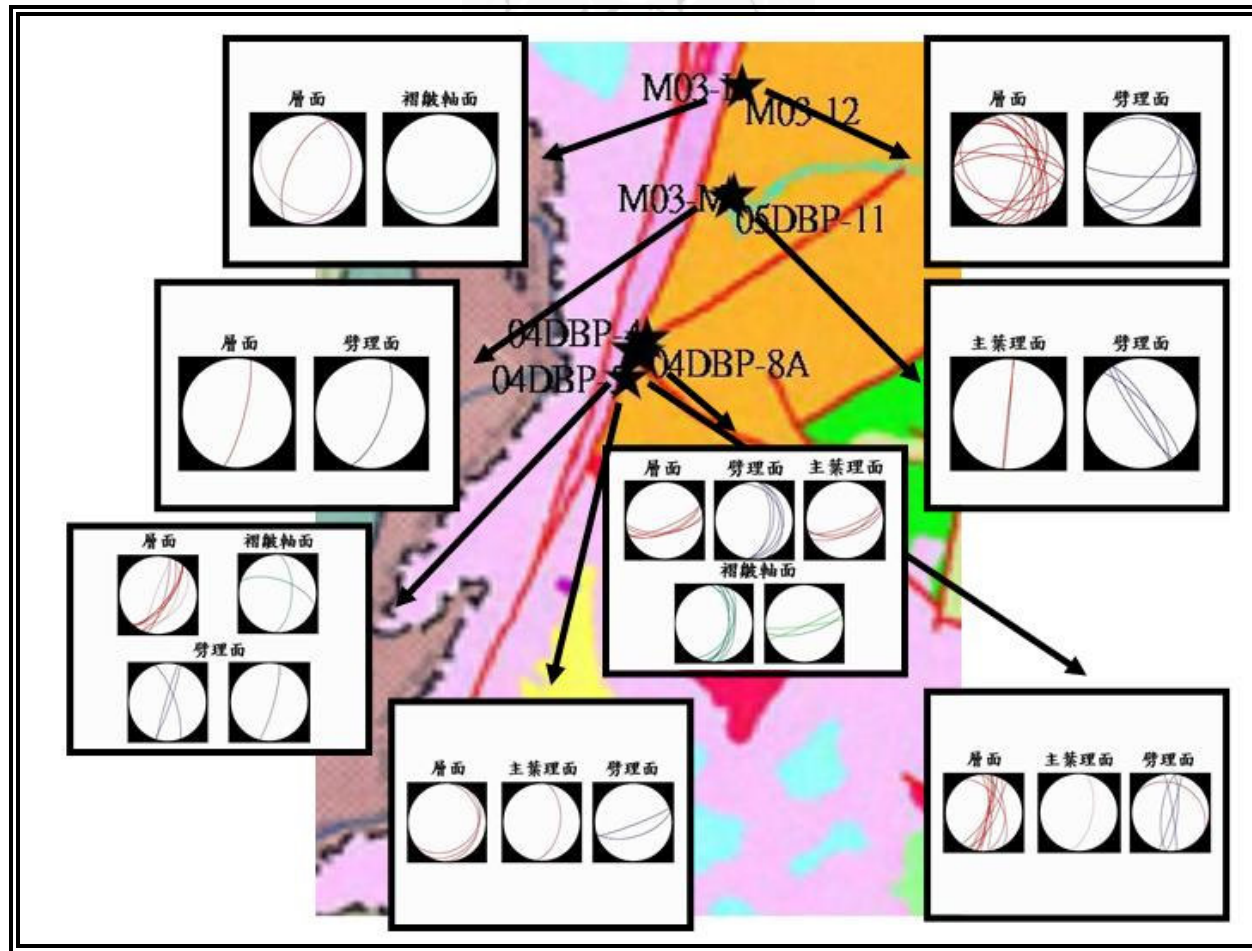



圖 3.9 奠邊府剪切帶南段構造分析。

3.2 應變分析

3.2.1 懷氏法分析數據



本研究位於鮮水河剪切帶的標本數計有 06XS02b、06XS03、06XS06、06XS10、06XS14a、06XS16、06XS21c 等 7 個樣本(圖 3.10)，位於奠邊府剪切帶的採樣點位計有 04DBP-9、04DBP-11a、04DBP-11b 等 3 個樣本(圖 3.11)。透過軟體程式 Fabric 7 做懷氏法分析，將所採集手標本岩石薄片的電子圖檔加以分析，可以得到各採樣點的懷氏圖以及應變趨勢曲線圖(圖 3.12~圖 3.27) 從中取得各採樣點的長短軸比例 (R) 以及長軸與水平線的夾角 (ϕ) 如表 3.1。在表 3.1 中水平薄片的 ϕ 角以正北為 0° ，向東偏轉為正、向西偏轉為負；垂直薄片的 ϕ 角以水平為 0° ，面向北時，逆時針為正、順時針為負，X 表示無數據。

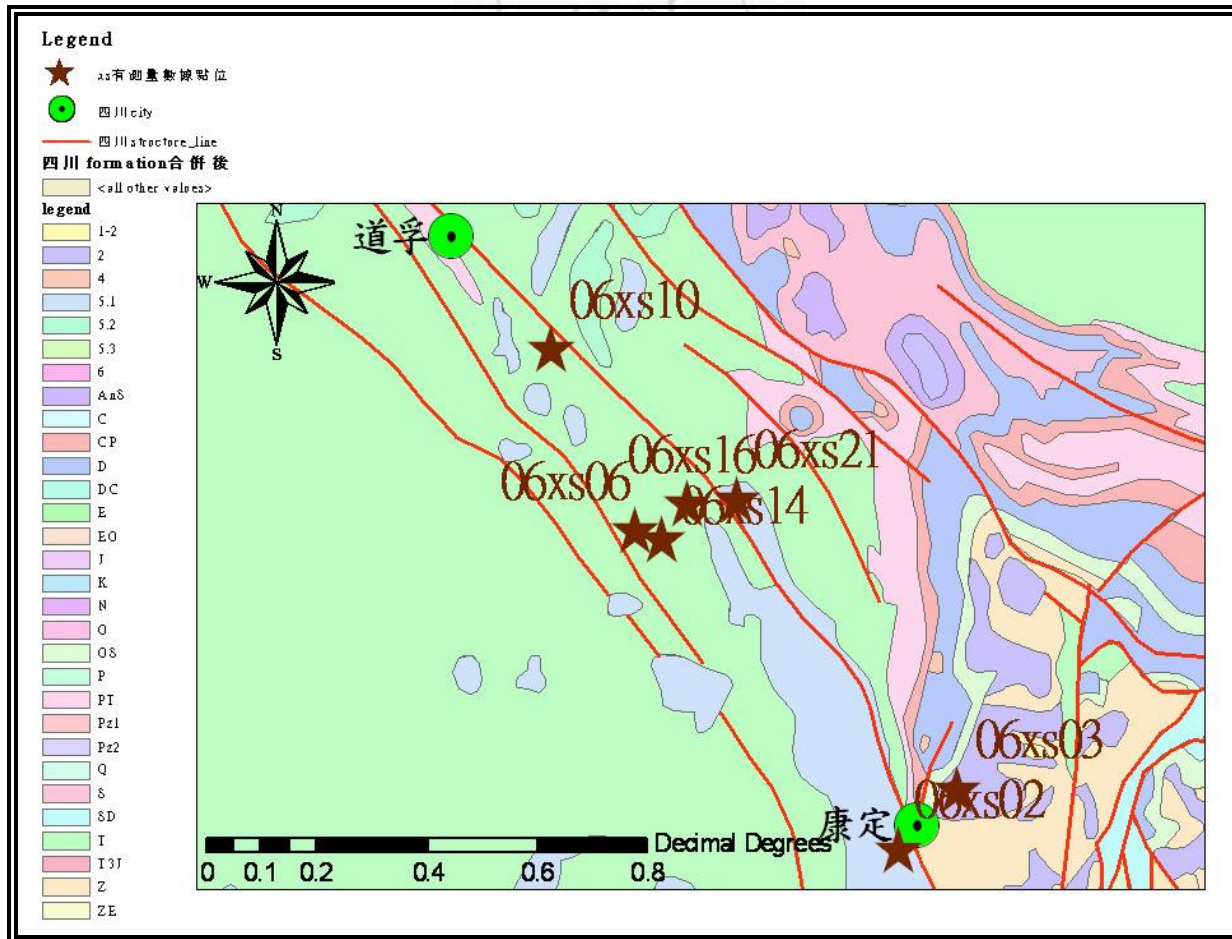


圖 3.10 鮮水河剪切帶採樣點位分布圖。

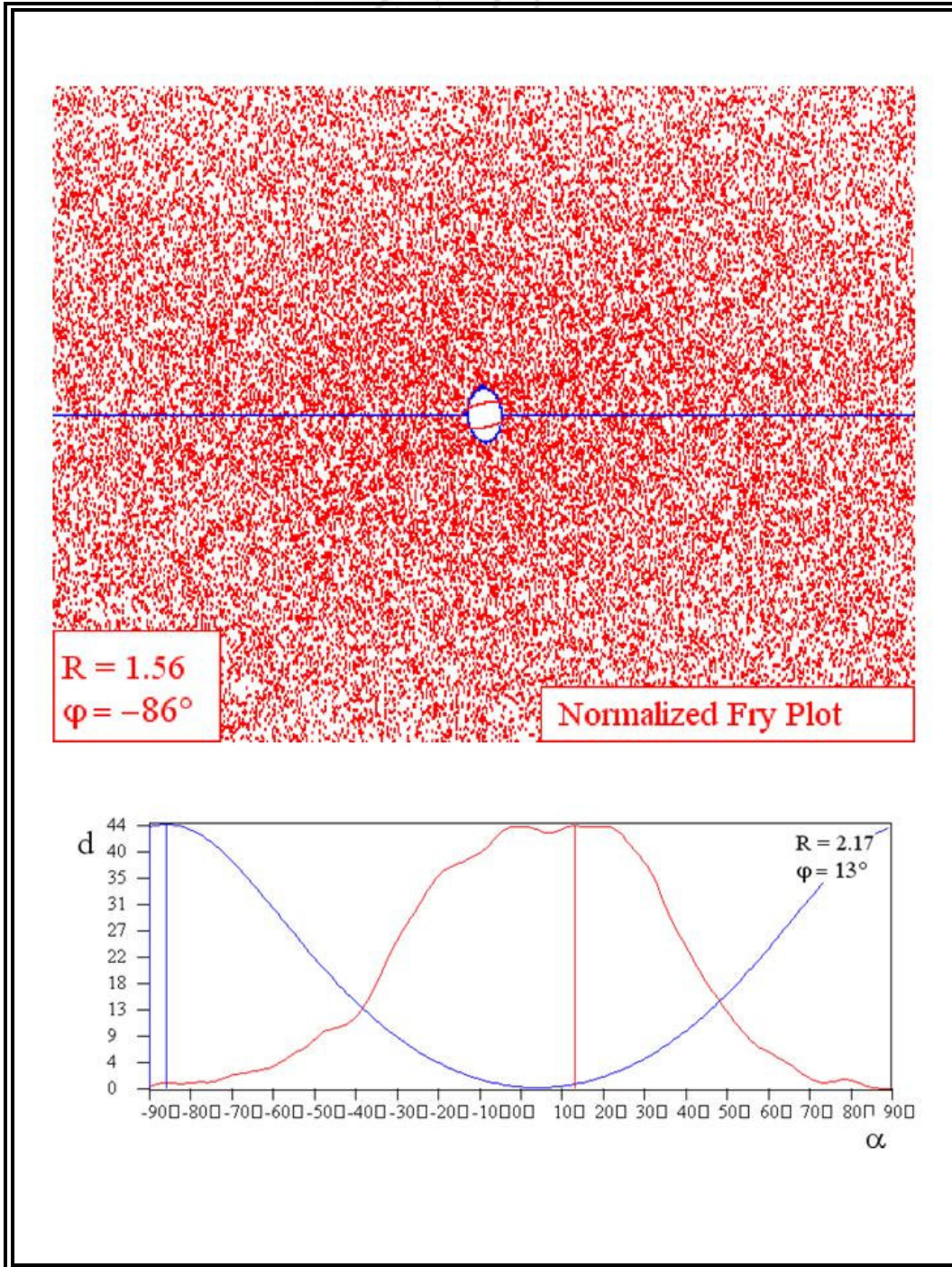


圖 3.12 06XS02 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

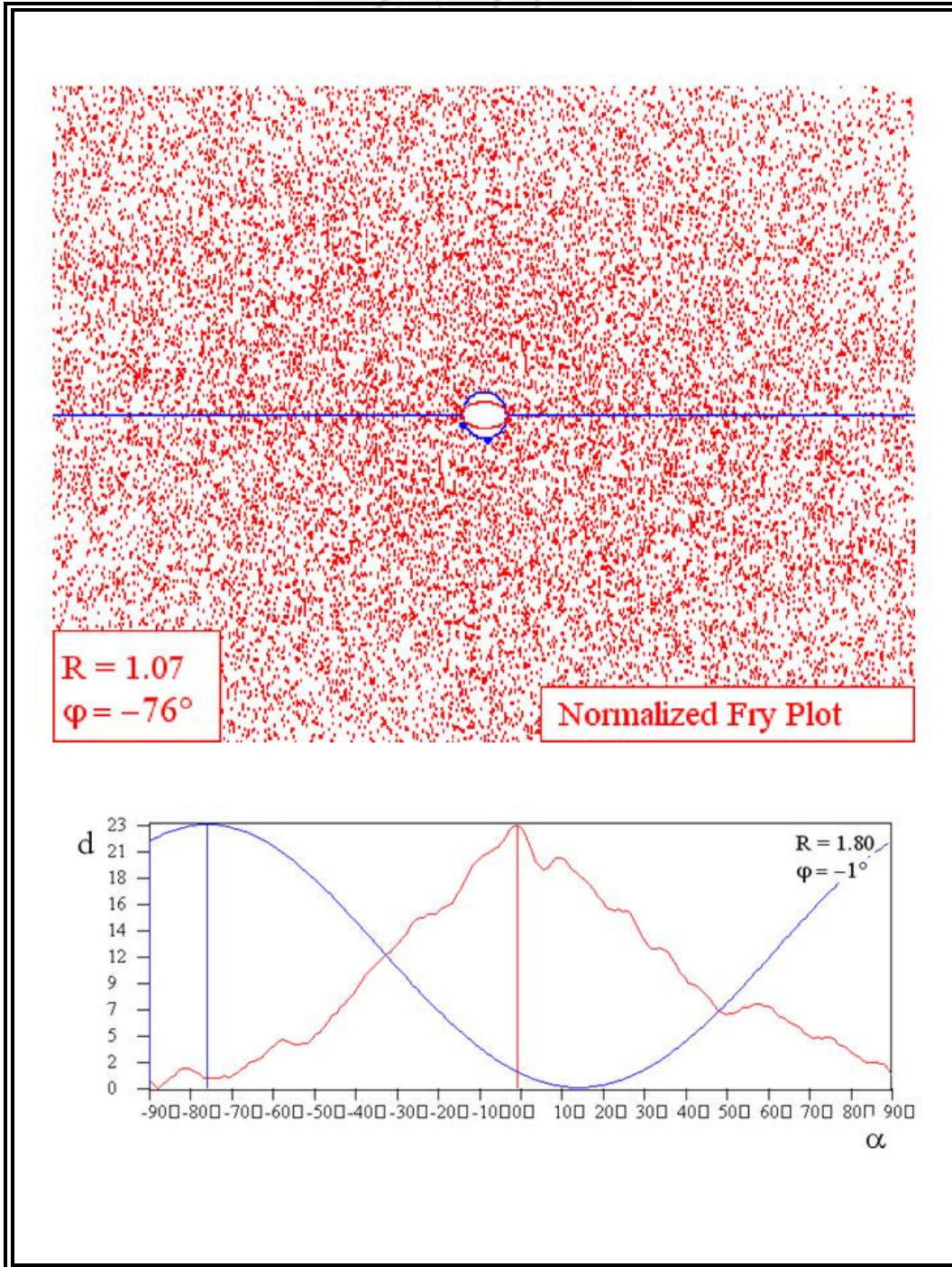


圖 3.13 06XS02 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

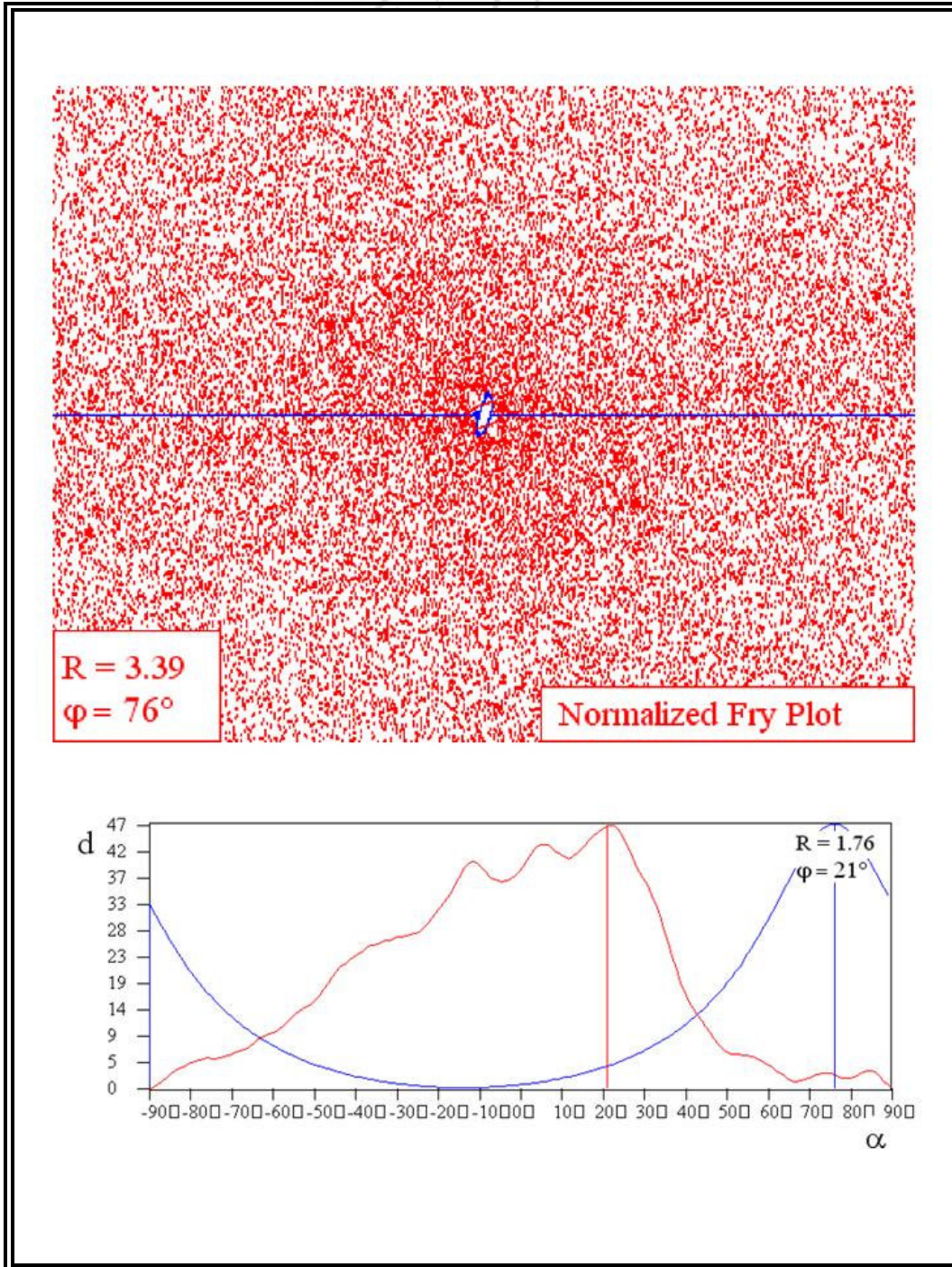


圖 3.14 06XS03 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

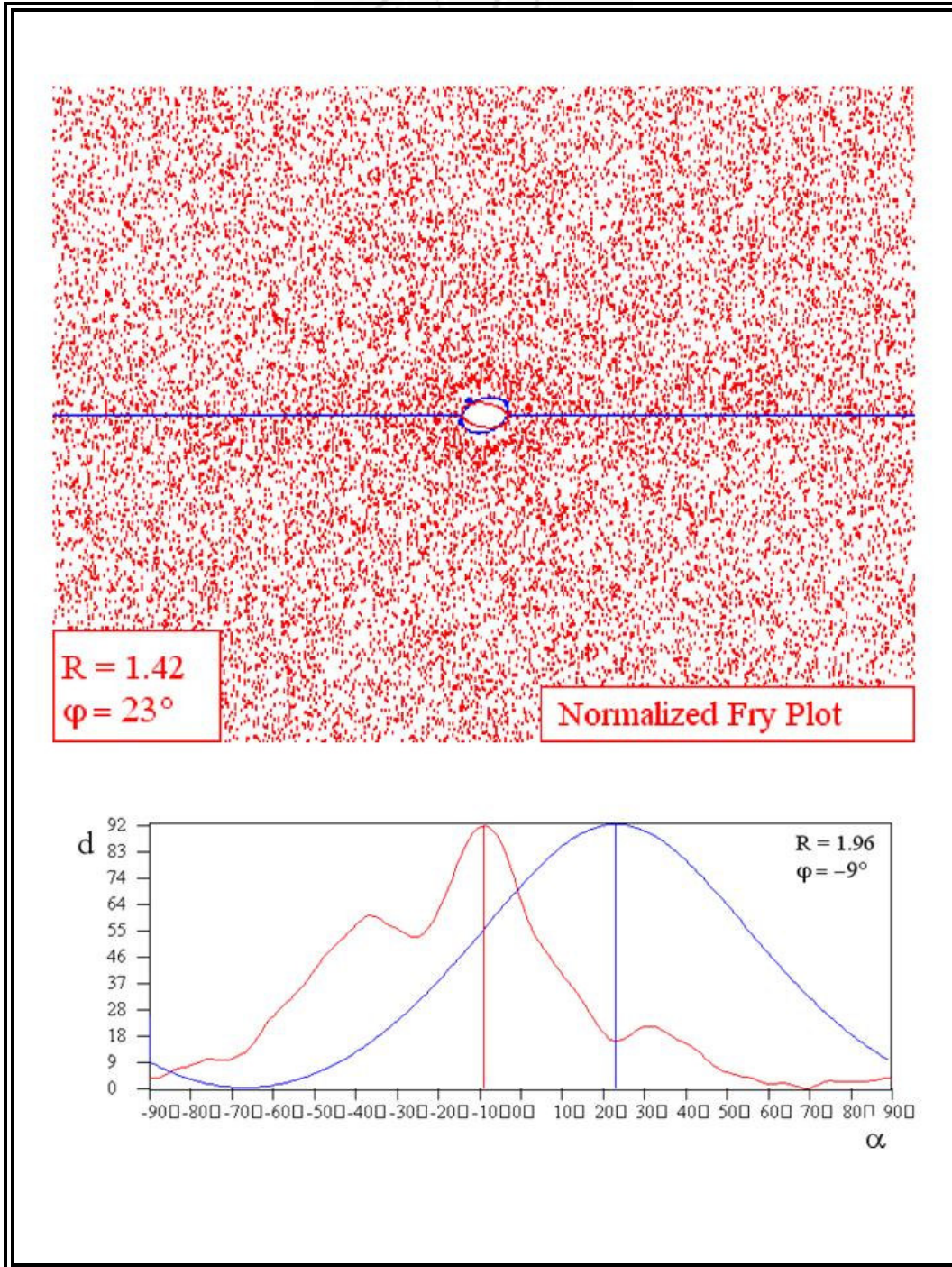


圖 3.15 06XS06 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

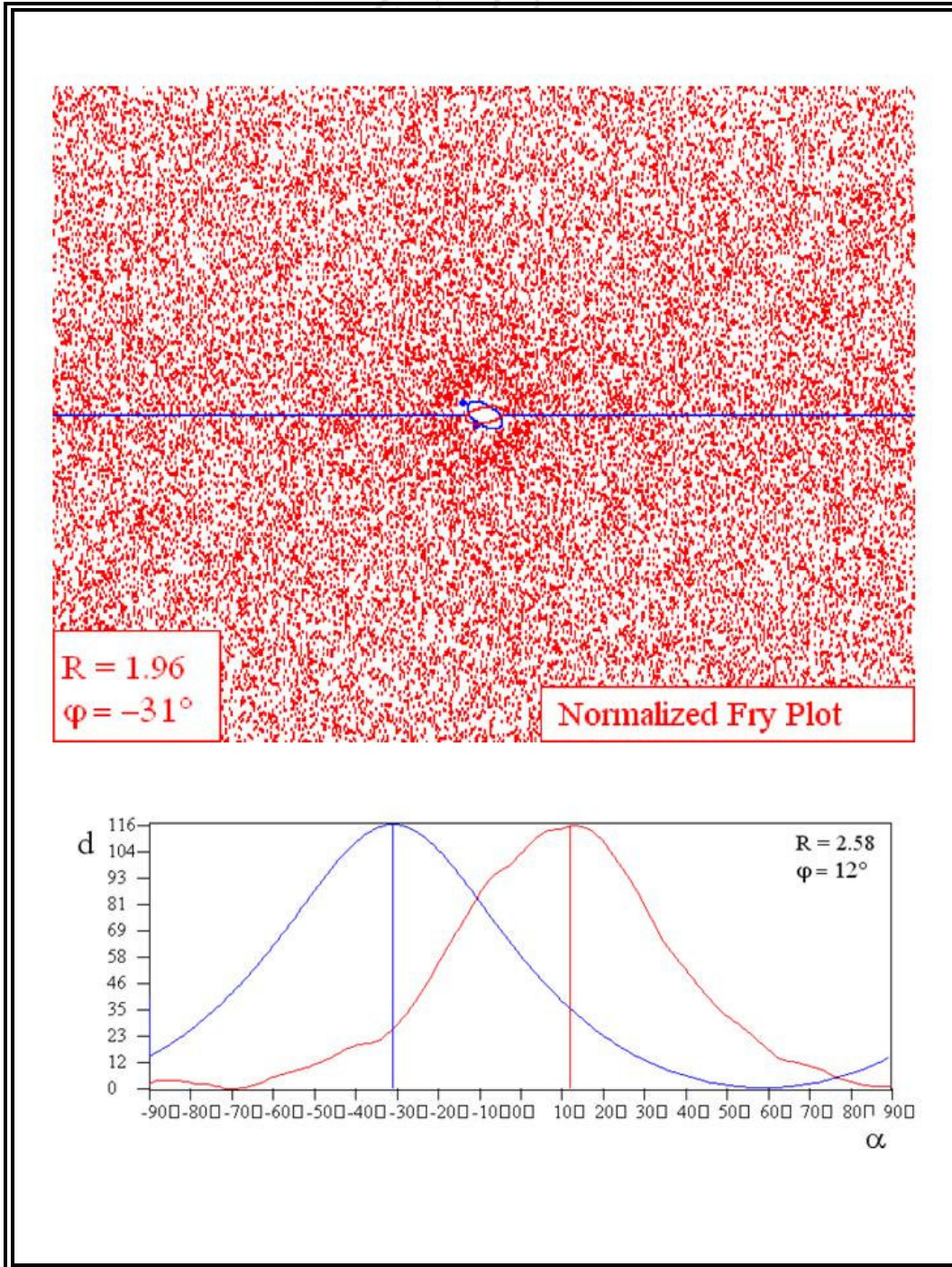


圖 3.16 06XS06 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

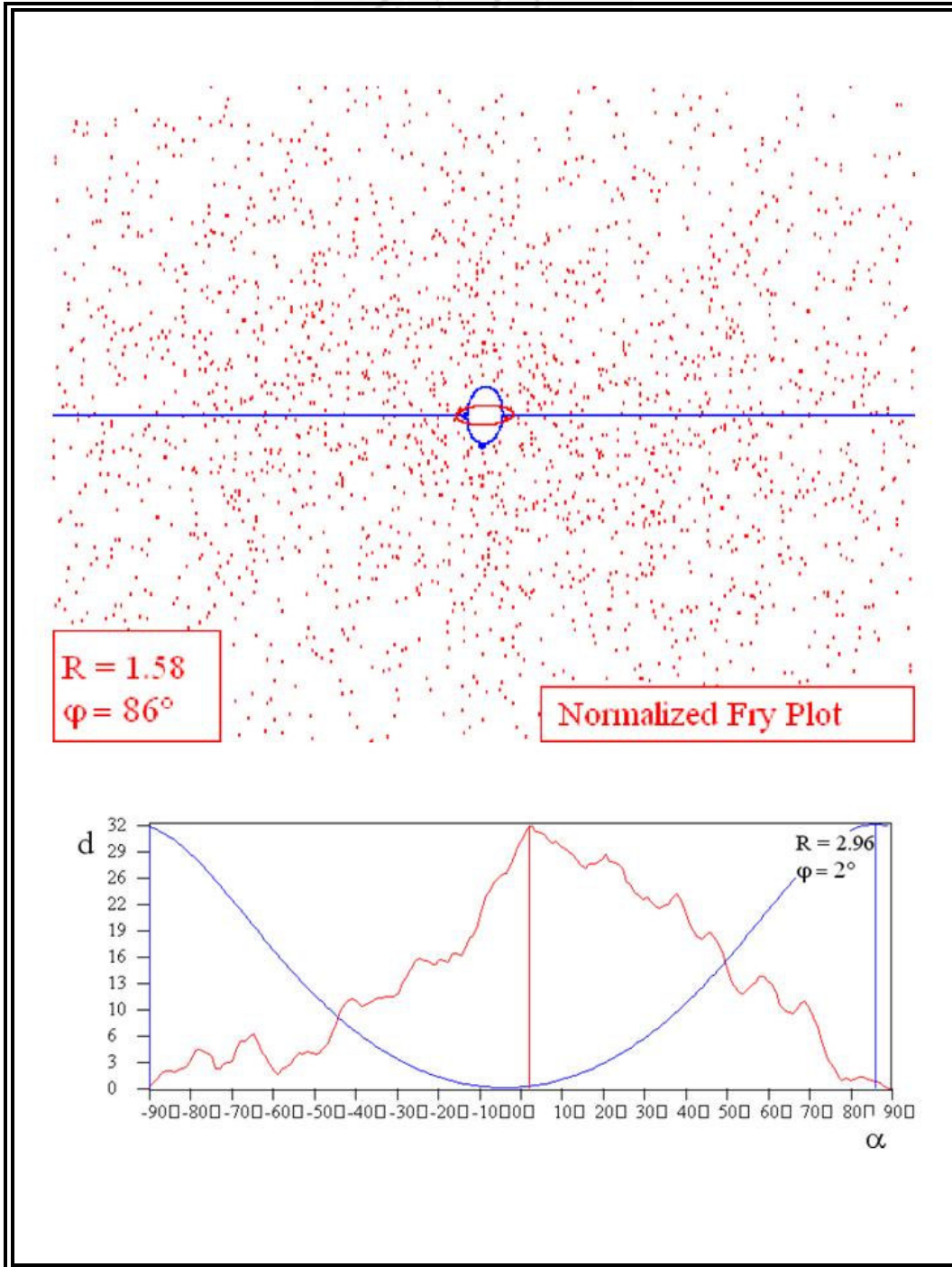


圖 3.17 06XS10 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

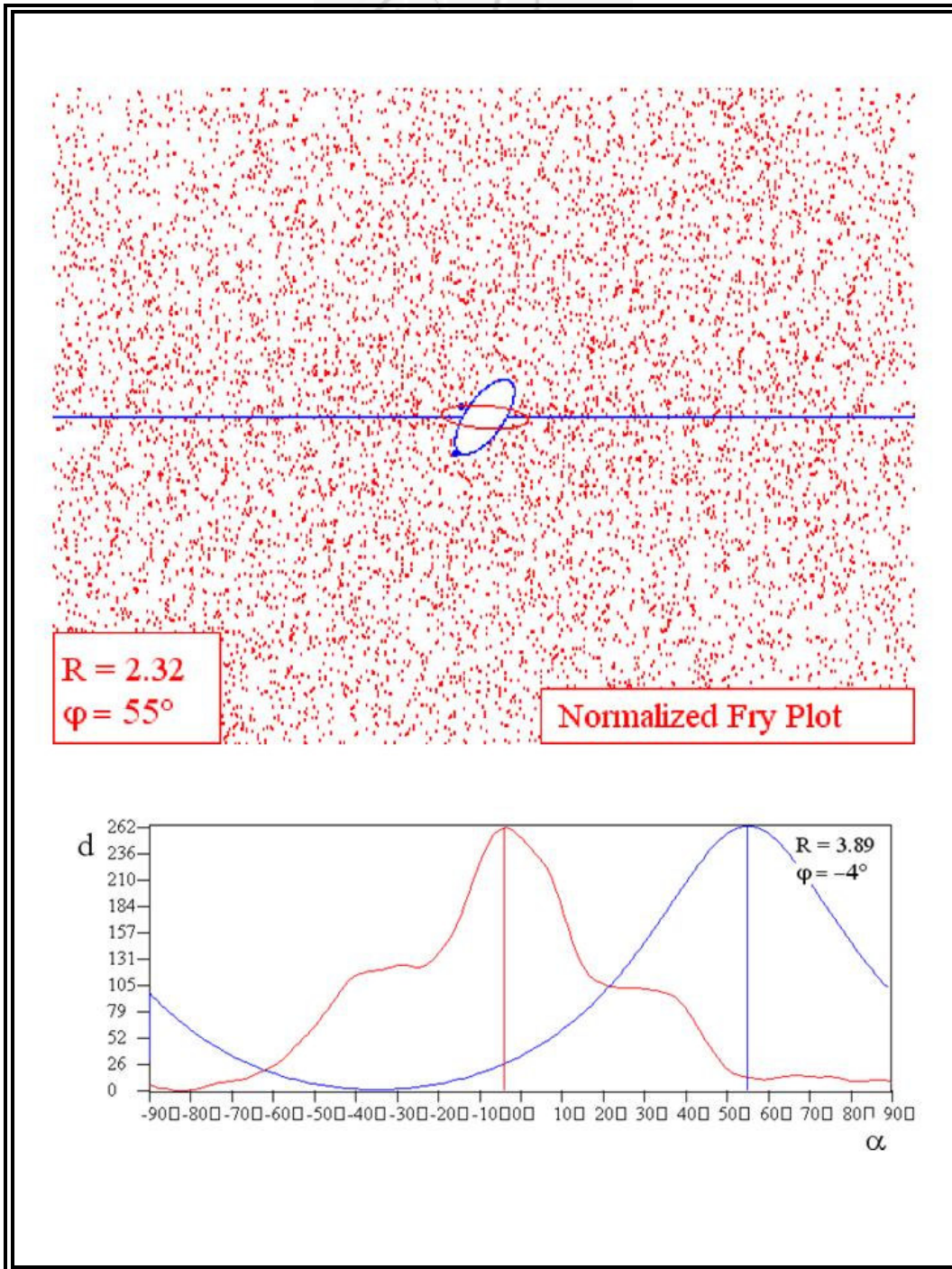


圖 3.18 06XS14a 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

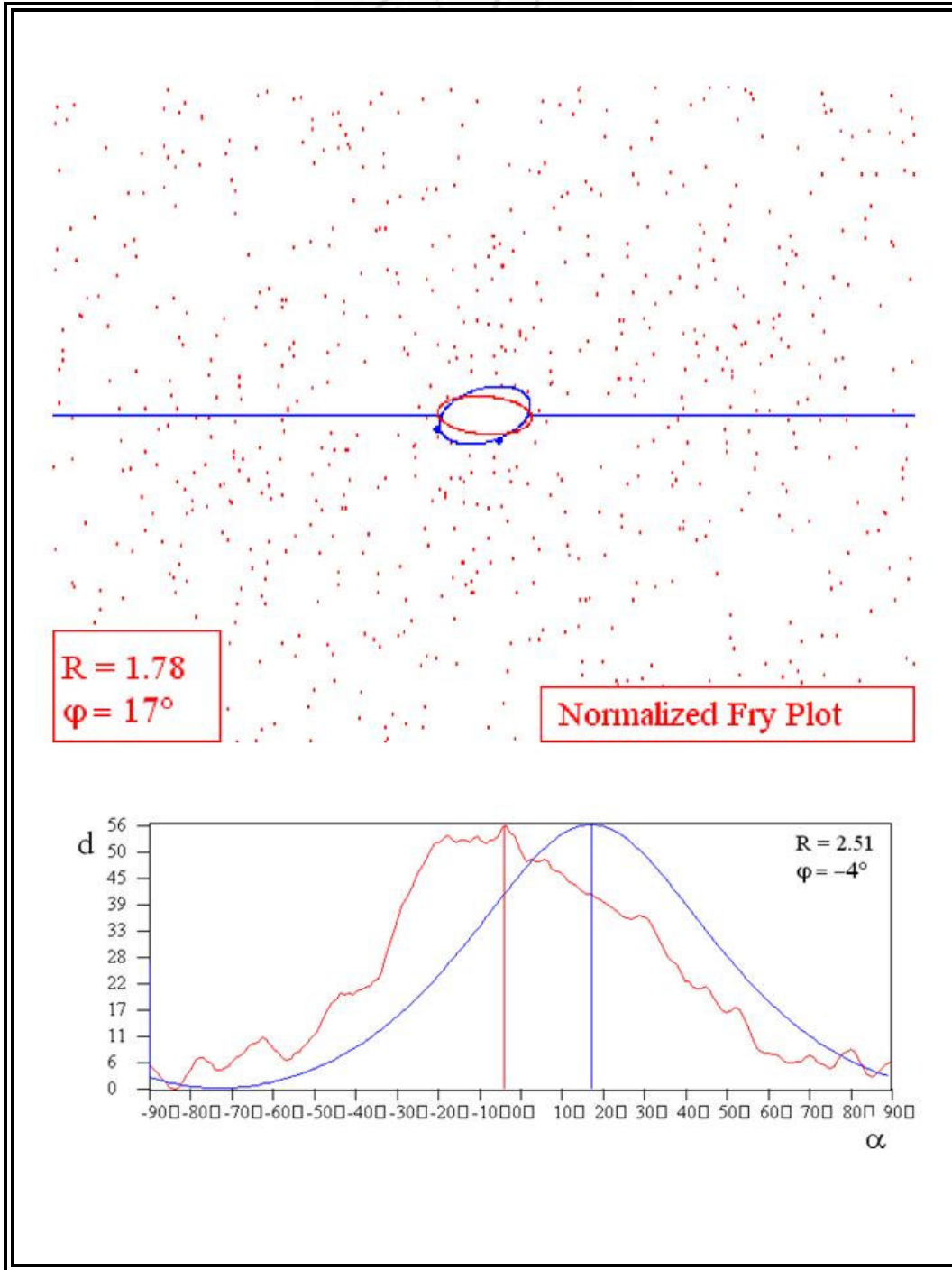


圖 3.19 06XS14a 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

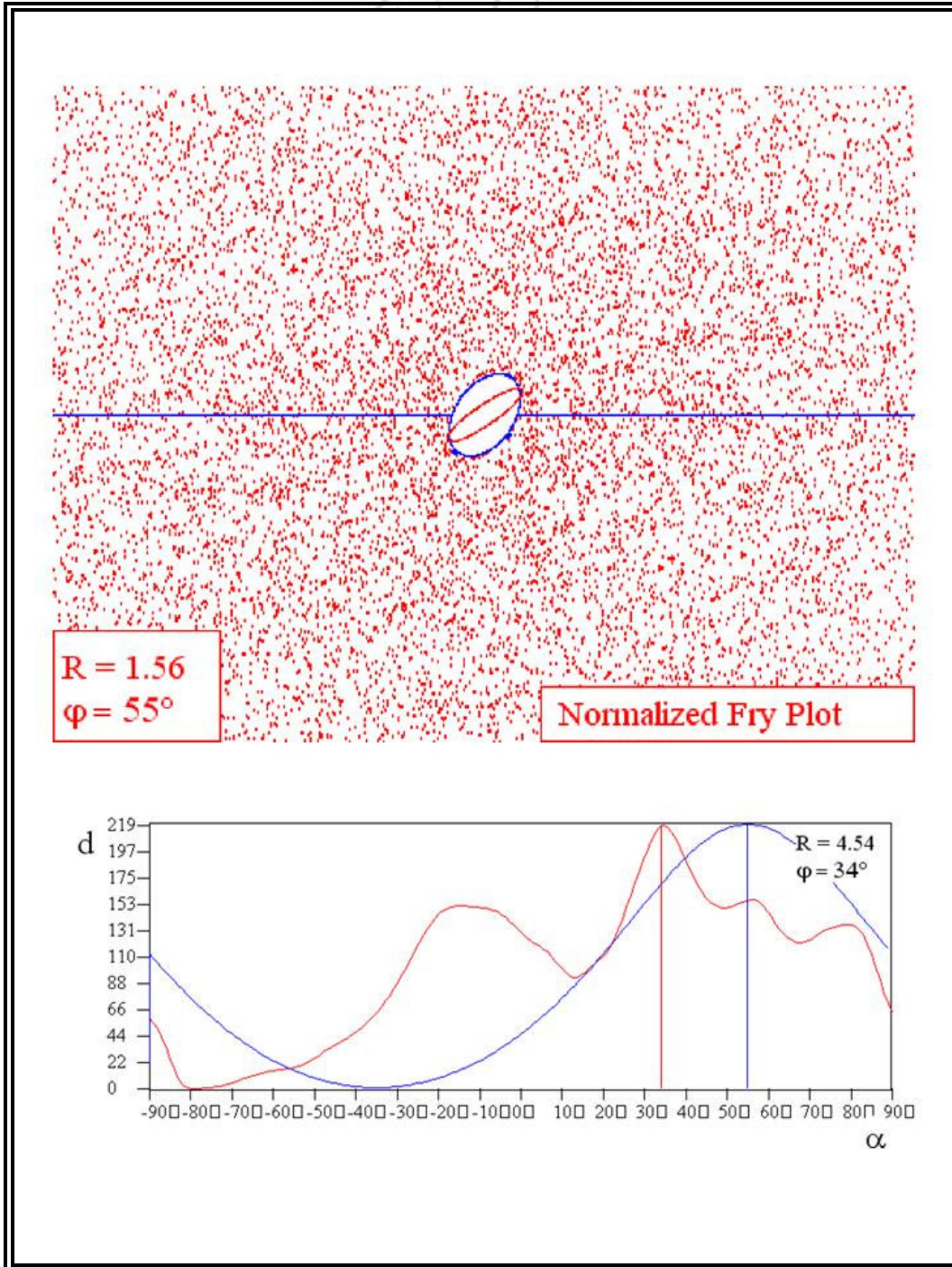


圖 3.20 06XS16 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

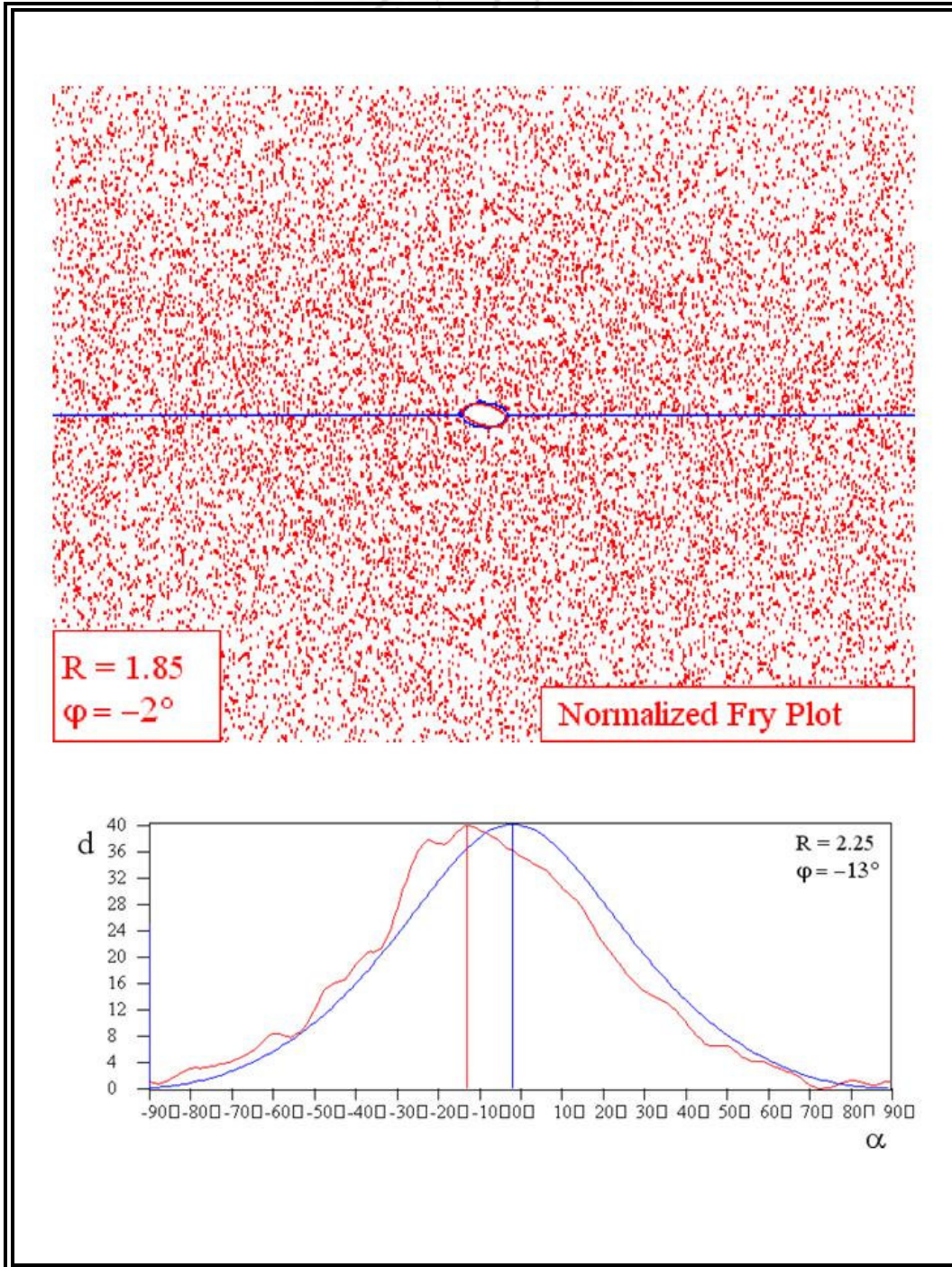


圖 3.21 06XS21c 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

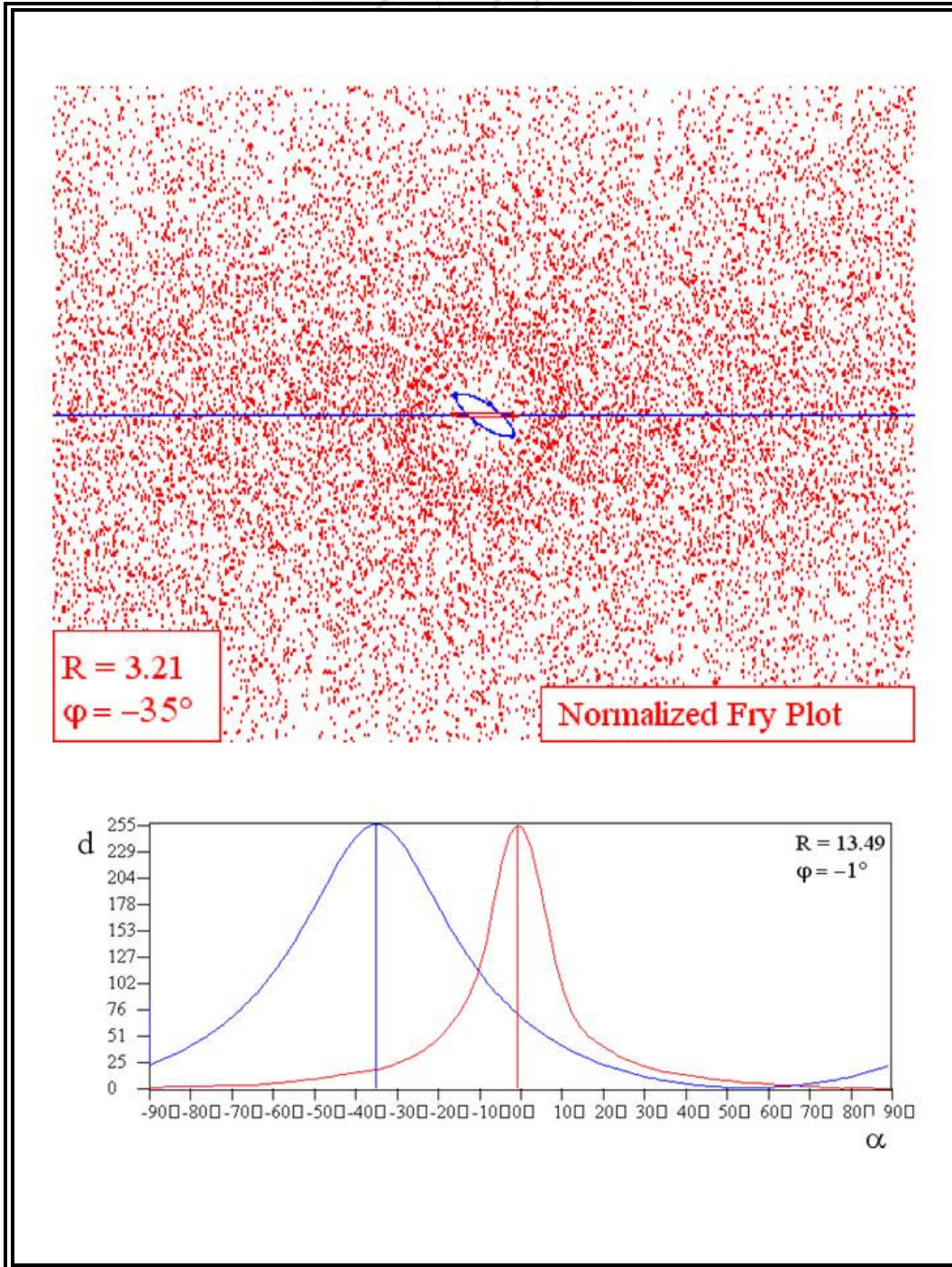


圖 3.22 06XS21c 垂直平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

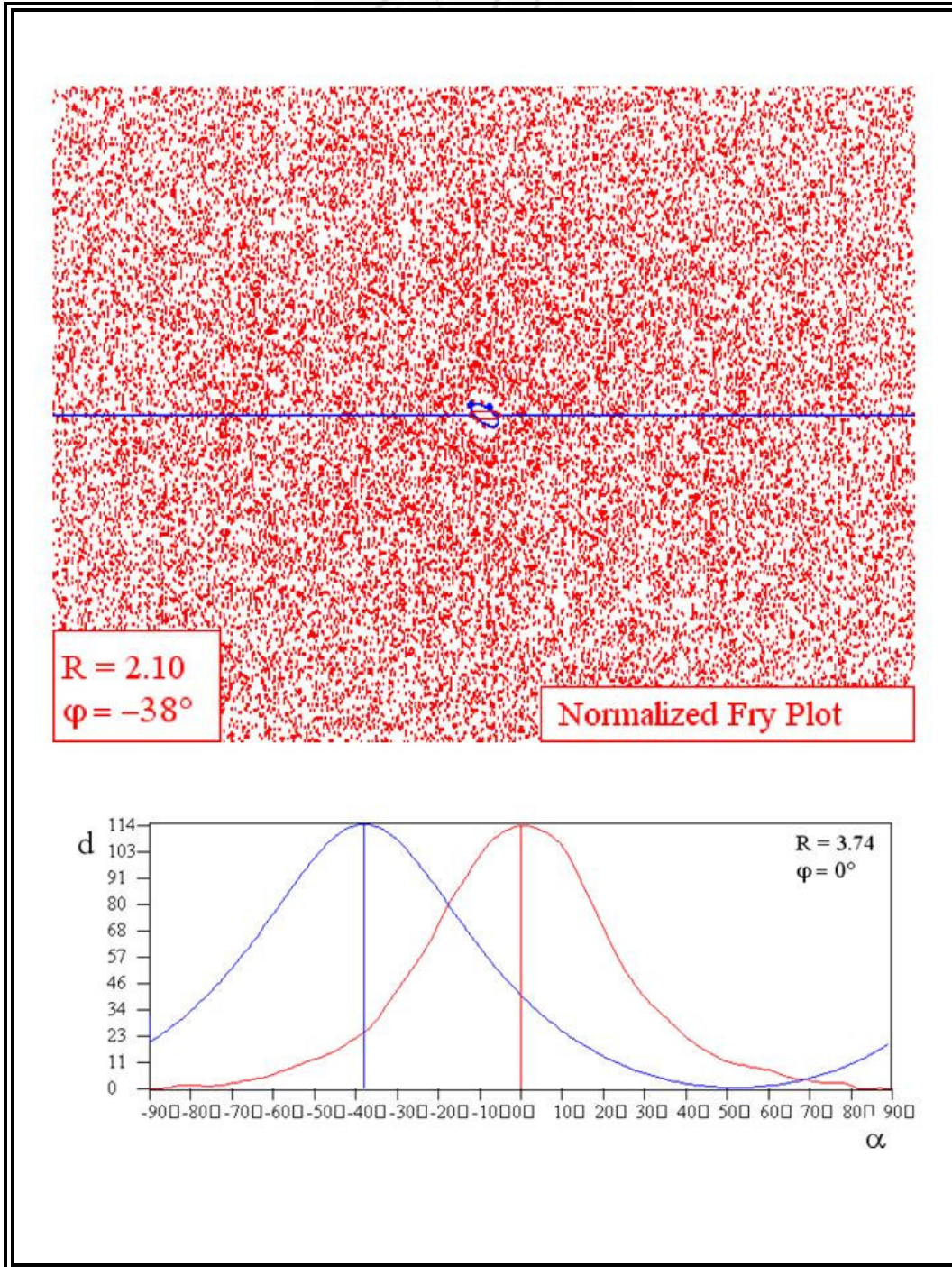


圖 3.23 04DBP-9 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

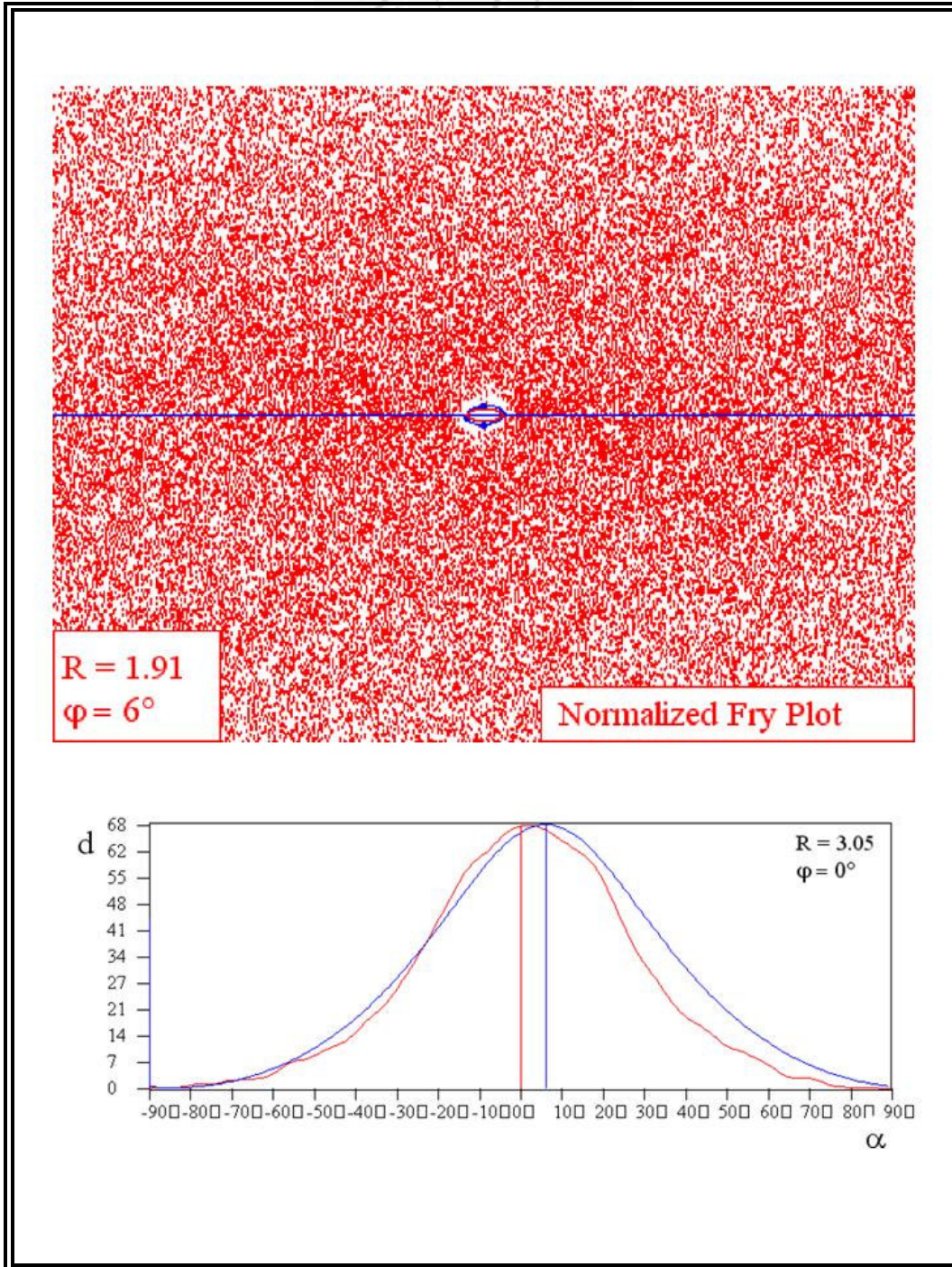


圖 3.24 05DBP-11a 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

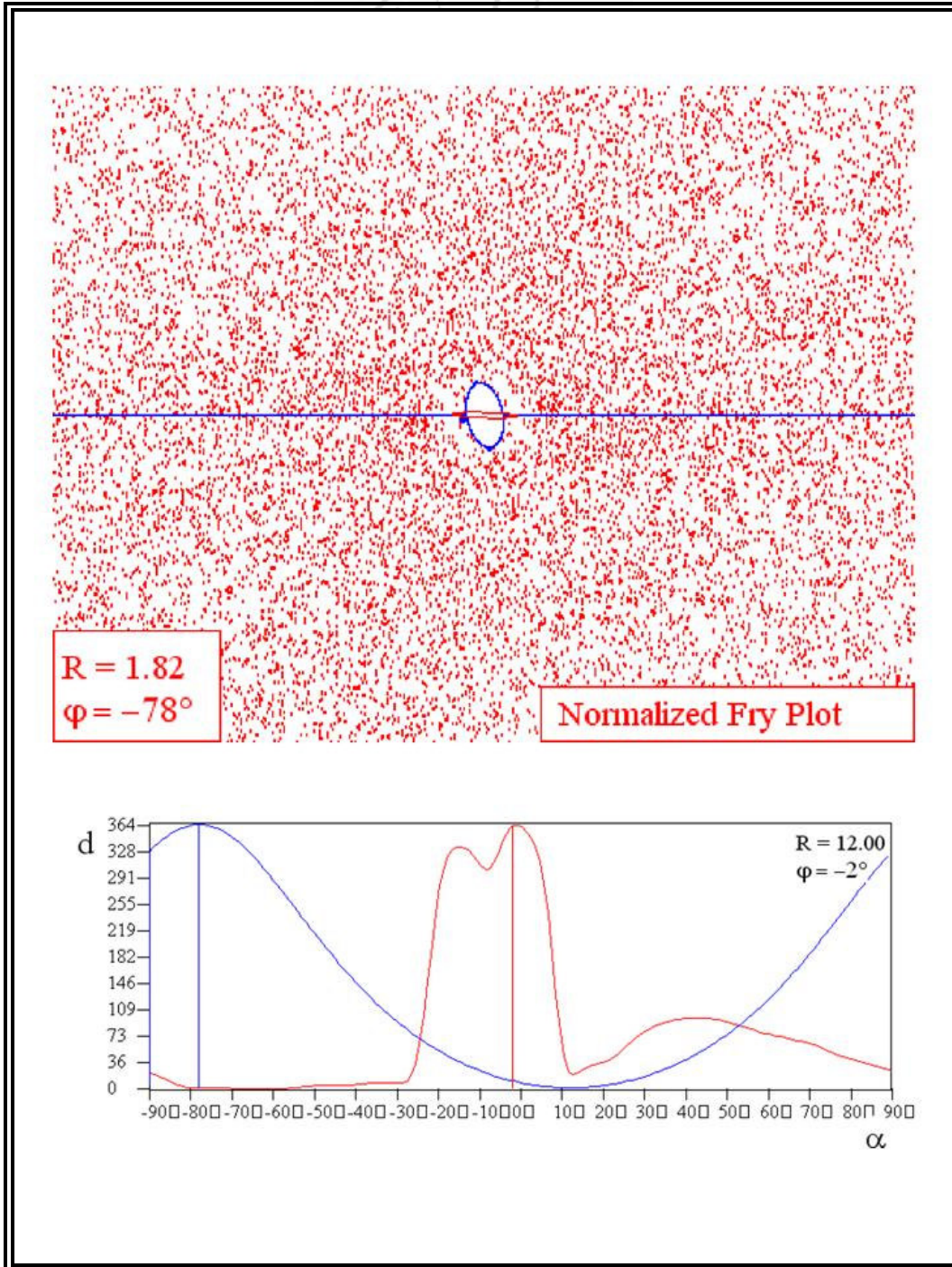


圖 3.25 05DBP-11a 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

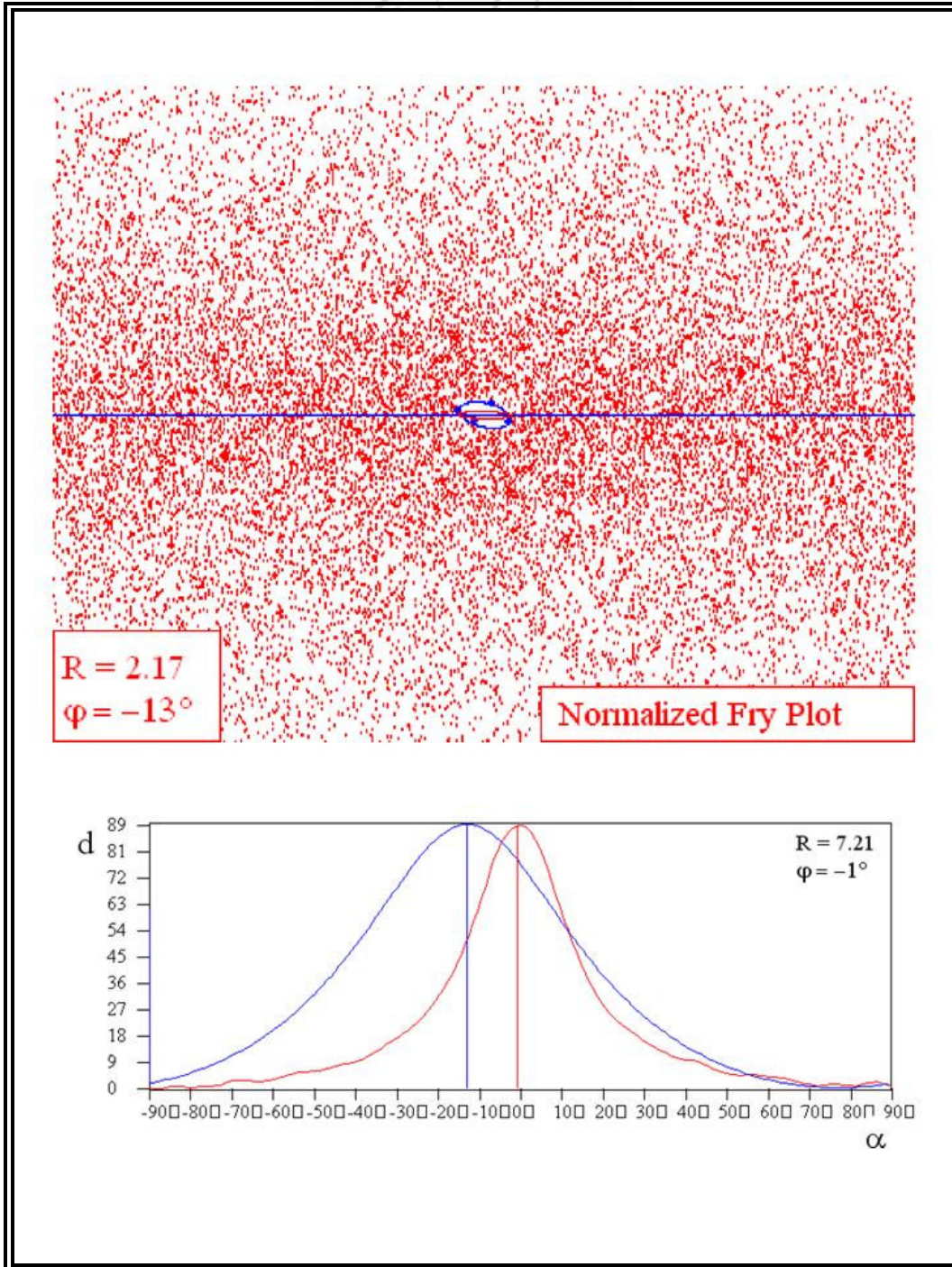


圖 3.26 05DBP-11b 水平面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

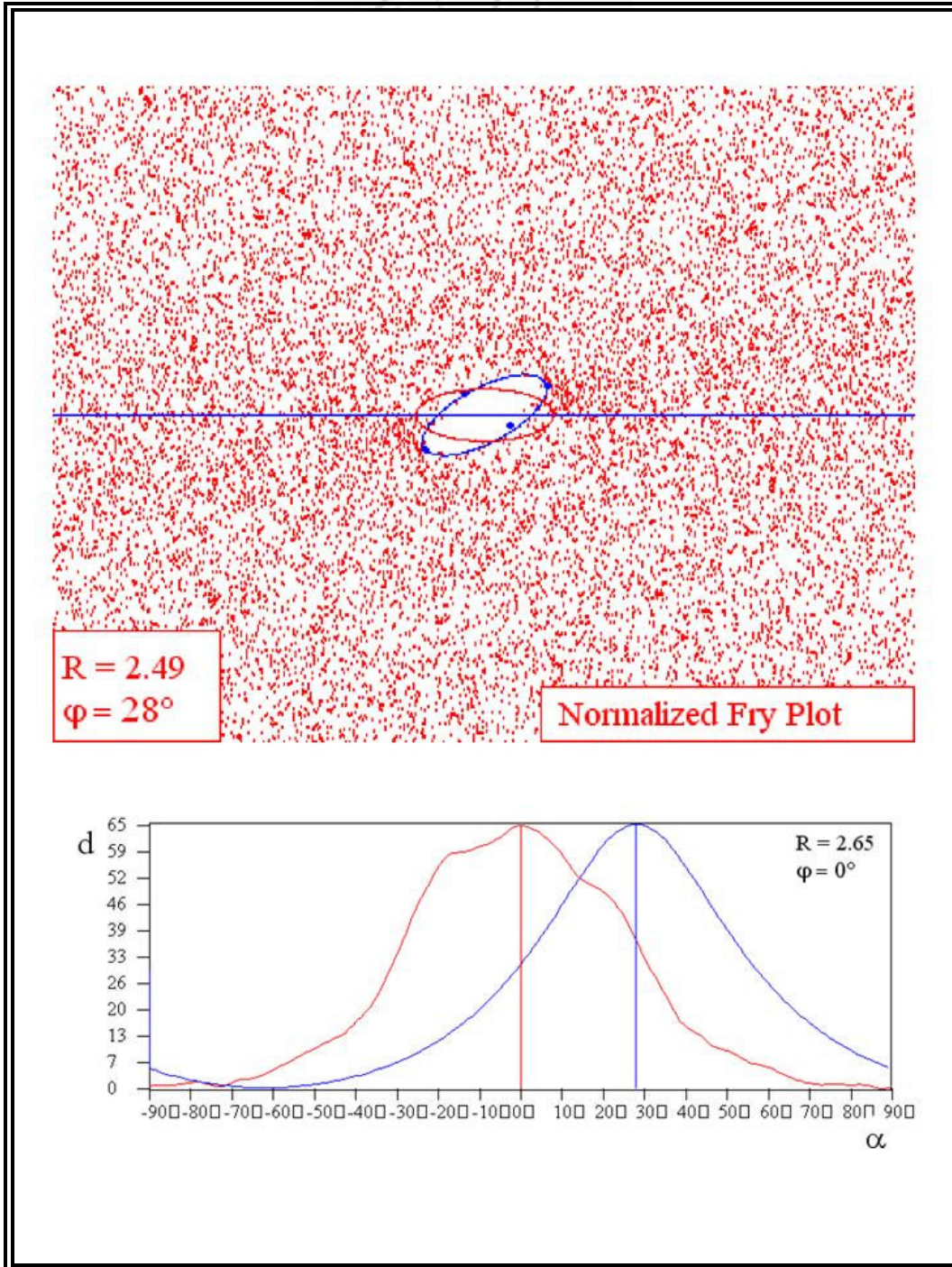


圖 3.27 05DBP-11b 垂直面上的懷氏圖與應變趨勢曲線圖。

表 3.1 各採樣點岩性與懷氏法分析數據。

sample	岩性	N	fry		Center-to-center	
			R	ϕ	R	ϕ
06XS02b(水平)	gneiss	503	1.56	-86	2.17	13
06XS02b(垂直)	gneiss	260	1.07	-76	1.8	-1
06XS03(水平)	gneiss(vein)		x	x	x	x
06XS03(垂直)	gneiss(vein)	577	3.39	76	1.76	21
06XS06(水平)	granite	665	1.42	23	1.96	-9
06XS06(垂直)	granite	786	1.96	-31	2.58	12
06XS10(水平)	mudstone	73	1.58	86	2.96	2
06XS14a(水平)	mudstone	502	2.32	55	3.89	-4
06XS14a(垂直)	mudstone	85	1.78	17	2.51	-4
06XS16(水平)	granite	544	1.56	55	4.54	34
06XS21c(水平)	gneiss	304	1.85	-2	2.25	-13
06XS21c(垂直)	gneiss	600	3.21	-35	13.49	-1
04DBP-9(水平)	limestone	628	2.1	-38	3.74	0
05DBP-11a(水平)	gneiss	600	1.91	6	3.05	0
05DBP-11a(垂直)	gneiss	613	1.82	-78	12	-2
05DBP-11b(水平)	gneiss	300	2.17	-13	7.21	-1
05DBP-11b(垂直)	gneiss	600	2.49	28	2.65	0

3.2.2 R_f/ϕ 分析數據

本研究中 R_f/ϕ 分析採用 Chew (2003) 所製作的 Excel 試算表作為分析工具，其優點在於格式易於編寫，試算表的結構也可以自行修改，最後做出的 R_f/ϕ 圖更能夠輕易的匯出至任何繪圖軟體如 Adobe Illustrator 甚至是 Word 來做編輯。Excel 的格式不僅方便任何支援 Office 軟體的電腦平台使用此分析工具，也讓整個運算的過程透明化，使用者可以任意檢視各個統計參數和運算結果之間的關係 (Chew, 2003)。

透過 Chew 所製作的 Excel 試算表，可以得到各採樣點 R_f/ϕ 應變分析的數據，包括物質產生應變後所形成新的一組軸率 (R_s) 和位態 (ϕ) 如表 3.2。在表 3.2 中水平薄片的 ϕ 角以正北為 0° ，向東為正、向西為負；垂直薄片的 ϕ 角以水平為 0° ，面向北時，順時針為正、逆時針為負，X 表示無數據。

表 3.2 各採樣點岩性與 R_f/ϕ 分析數據。

sample	岩性	R_f/ϕ		
		N	R_s	ϕ
06xs02b(水平)	gneiss	503	1.11	-11.79
06xs02b(垂直)	gneiss	260	1.23	8.3
06xs03(水平)	gneiss(vein)	x	x	x
06xs03(垂直)	gneiss(vein)	577	1.2	0.28
06xs06(水平)	granite	665	1.01	-32.99
06xs06(垂直)	granite	786	1.04	2.63
06xs10(水平)	mudstone	73	1.34	-13.69
06XS14a(水平)	mudstone	502	1.3	74.28
06xs14a(垂直)	mudstone	85	1.12	-23.58
06xs16(水平)	granite	544	1.01	-64.42
06xs21c(水平)	gneiss	304	1.24	-23.15
06xs21c(垂直)	gneiss	1878	1.16	69.69
03vncb003-1(水平)	granite	531	1.18	22.07
04dbp-9(水平)	limestone	628	1.26	24.48
05dbp-11a(水平)	gneiss	1122	1.3	74.98
05dbp-11a(垂直)	gneiss	613	1.14	1.3
05dbp-11b(水平)	gneiss	1600	1.56	-86.55
05dbp-11b(垂直)	gneiss	1306	1.5	-17.63

第四章 討論

4.1 大地構造史

4.1.1 鮮水河剪切帶的構造歷史

統整野外測量所得到大地構造數據並加以分析的結果，可以勾勒出鮮水河剪切帶的構造歷史。鮮水河剪切帶的構造分期可以分為早期的塑性變形以及晚期的脆性變形，其中早期的塑性變形又可依照不同的葉理型態分為三期（表 4.1、表 4.2），晚期的脆性變形也可以區分出三期斷層作用（表 4.3）經過比對之後，得知鮮水河剪切帶的構造歷史共可分為五期。第一期構造事件（D1）只有南段有記錄到葉理面，表現出來的是褶皺軸面位態為西北—東南方向高角度的同斜褶皺（53/67）；第二期構造事件（D2）也是同斜褶皺，不過這次北、中、南三段的葉理面都有紀錄到這次事件，而且三段葉理面位態大致相同，此次事件的同斜褶皺軸面位態為趨近南—北向高角度（91/84）；第三期構造事件（D3）有紀錄到的只有北段與中段，產生的是走向趨近南—北向的逆衝斷層伴隨著低角度的劈理面（263/16）；第四期構造事件（D4）為斷層面走向西北—東南向的左移斷層，；最後一期（D5）的斷層構造活動事件斷層面走向依然是西北—東南向，但是斷層活動則轉為正斷層的型式。

由已得知的鮮水河剪切帶構造歷史加上前人研究，我們可以推論出第一期 (D1) 相當於 60Ma.，印度板塊碰撞歐亞板塊初期，鮮水河區域遭受東北西南方向的應力，形成西北—東南方向高角度的同斜褶皺 (53/67)。當板塊碰撞持續進行，到了第二期 (D2)，印度板塊持續對歐亞板塊作用，鮮水河區域受到的應力轉成東—西方向的擠壓力，產生了南—北向傾角接近垂直的同斜褶皺 (91/84)，此時期大約 40Ma. 為東亞地區構造線發育時期。第二期 (D2) 之後，東—西方向的擠壓力依然持續作用。到了第三期 (D3)，鮮水河區域產生了走向趨近南—北向的逆衝斷層，使得原本的同斜褶皺開始變形，進而轉變成偃臥褶皺 (263/16)。第四期 (D4) 由於西藏抬升，地殼應力增大，使得下部地殼產生塑性流動，並以東喜馬拉雅構造結為中心、鮮水河剪切帶為邊界產生順時針方向旋轉 (Burchfiel, 2004) 鮮水河區域因此產生左移運動，所以斷層形式由逆衝斷層轉變為左移斷層 (表 4.4) 此時期推論為鮮水河剪切帶啟動的時間，大約為 12.8 ± 1.4 百萬年前 (Roger et al., 1995)。第五期 (D5) 所看的正斷層，推論應該是因為鮮水河剪切帶左移運動下，產生拉張盆地所形成。

表 4.1 鮮水河剪切帶葉理分析結果統整。


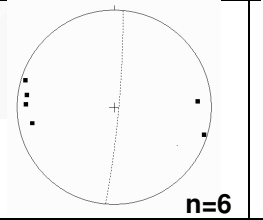
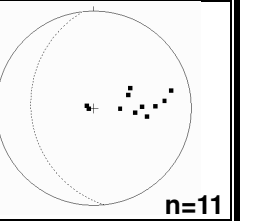
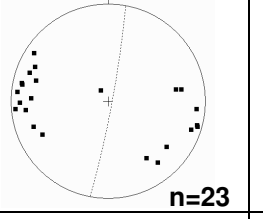
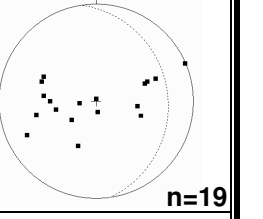
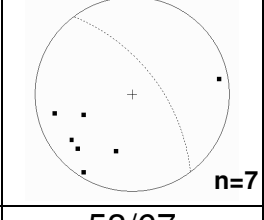
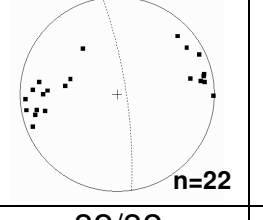
構造事件		D1	D2	D3
鮮水河北段大地構造資料分析	葉理分析		 n=6	 n=11
	平均位態		95/86	264/36
	褶皺型態		同斜褶皺	偃臥褶皺
鮮水河中段大地構造資料分析	葉理分析		 n=23	 n=19
	平均位態		100/87	82/27
	褶皺型態		同斜褶皺	偃臥褶皺
鮮水河南段大地構造資料分析	葉理分析	 n=7	 n=22	
	平均位態	53/67	82/82	
	褶皺型態	同斜褶皺	同斜褶皺	



表 4.2 鮮水河剪切帶葉理分析結果。

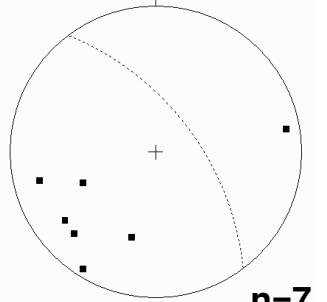
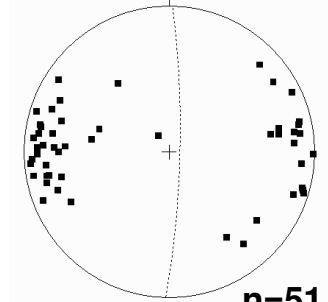
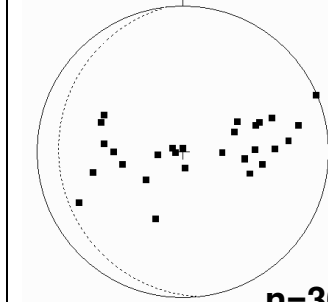
構造事件		D1	D2	D3
鮮水河剪切帶 大地構造資料分析	葉理分析			
	褶皺型態(平均位態)	n=7 同斜褶皺(53/67)	n=51 同斜褶皺(91/84)	n=30 偃臥褶皺(263/16)

表 4.3 鮮水河剪切帶斷層機制解分析結果。

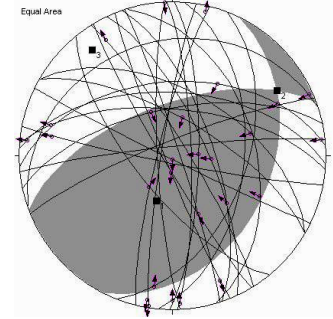
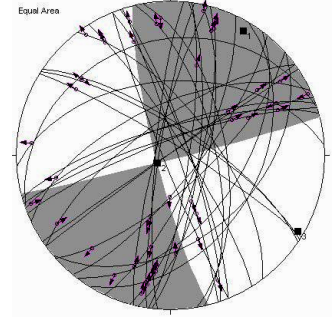
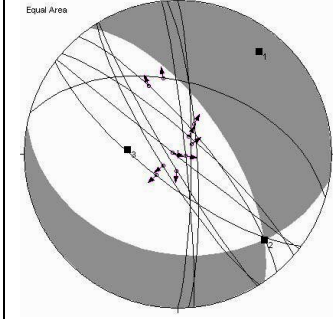
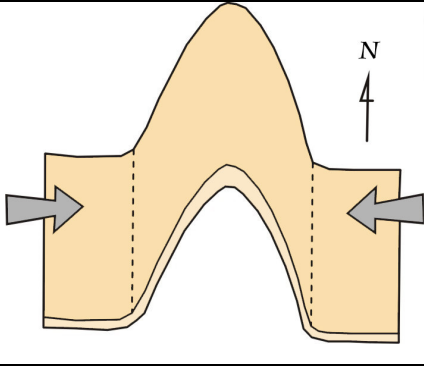
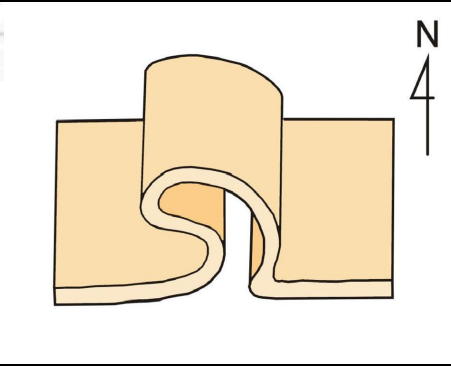
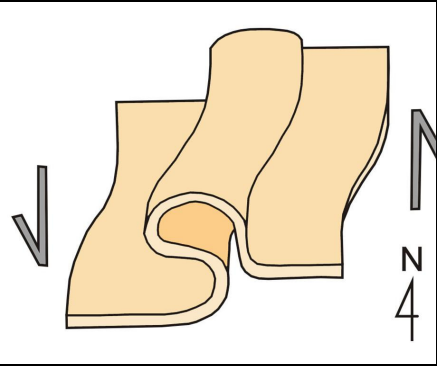
構造事件		D3	D4	D5
鮮水河剪切帶 大地構造資料分析	斷層機制解分析			
	斷層型態	逆斷層	左移斷層	正斷層

表 4.4 鮮水河剪切帶構造演化簡圖。

時間	D2	D3	D4
構造演化簡圖			
說明	<p>受到來自東 - 西方向的擠壓力，產生了褶皺軸面走向為南 - 北向的同斜褶皺。</p>	<p>持續不斷的受到東 - 西方向的擠壓力作用，產生了逆衝斷層，使得原本的同斜褶皺開始變形，進而轉變成偃臥褶皺。</p>	<p>在此時左剪應力啟動影響之下，偃臥褶皺也逐漸產生變形。</p>

4.1.2 奠邊府剪切帶的構造歷史

在奠邊府剪切帶所量測到的大地構造數據，依照北、中、南三段分別加以分析整理後，發現在整條奠邊府剪切帶中，無論北段、中段、南段都經歷了相同順序的構造事件，這些構造事件共分為三期（表 4.5、表 4.6），第一期構造事件（D1），印度板塊碰撞歐亞板塊產生同斜褶皺（96/58）；第二期構造活動事件（D2）所表現出來的是位態東北—西南向，傾角十分低緩（129/19）的偃臥褶皺；最後一期的構造活動位態依舊是東北—西南向，但是傾角轉為高角度（150/68）型態也變為同斜褶皺。

由奠邊府剪切帶構造歷史加上前人研究，可以得知奠邊府地區曾經在 240 百萬年前歷過華南陸塊與中南半島的聚合事件（Lan, 1999），產生了馬河縫合帶（Song ma）。奠邊府剪切帶啟動的時間大約是在 198~158 百萬年前（林德嫻, 2008），運動模式為右移斷層，且切過了馬河縫合帶（Fontaine and Workman, 1997；Lepvrier et al., 2004）。

將整個奠邊府剪切帶的構造事件統整之後，發現在最後一期的構造事件（D3）中，由北往南的主葉理面位態有順時針旋轉的現象，恰巧符合了 Burchfiel（2004）提出的下部地殼流體模式（lower crustal flow model）在此模式中推論當印度板塊碰撞歐亞大陸板塊時，南—

北向的應力作用造成陸塊內的變形，使得西藏抬升，地殼應力增大，由於應力增大使得下部地殼產生塑性流動，並以東喜馬拉雅構造結為中心，向東沿鮮水河、小江、奠邊府這一系列剪切帶發生順時針旋轉。

在奠邊府剪切帶所量測到的大地構造資料中，所有葉理面位態都是南—北向或是東北—西南向，但是在剪切帶北段與中段都出現有位態西北—東南向的葉理面，雖然此組葉理面量測到的數據不多，但是由於位態相差甚大，所以顯得十分突兀。由此組葉理面的位態與奠邊府剪切帶北段、中段相關構造線的比對，推論此組葉理面的出現應該是屬於馬河縫合帶殘留下來的痕跡。

表 4.5 奠邊府剪切帶葉理分析結果統整。

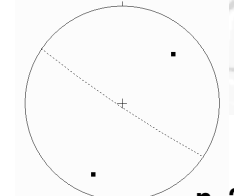
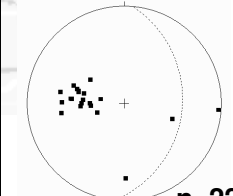
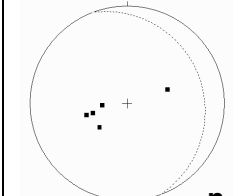
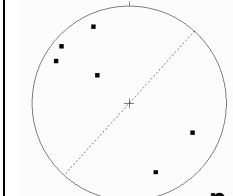
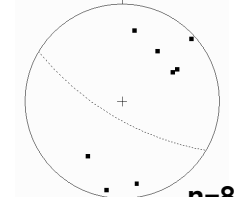
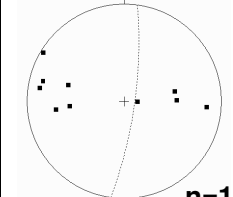
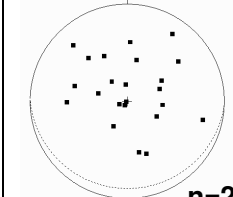
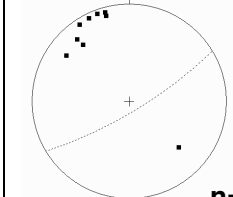
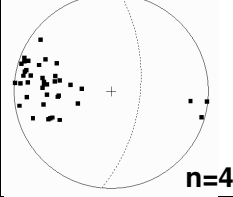
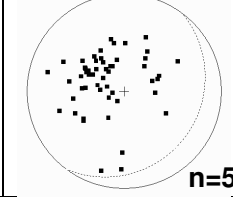
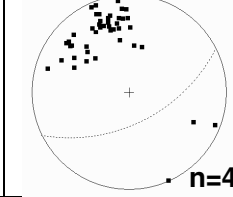
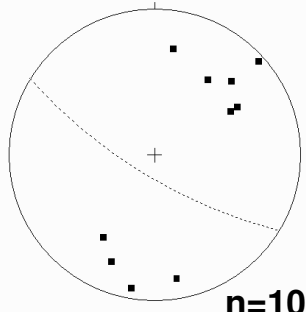
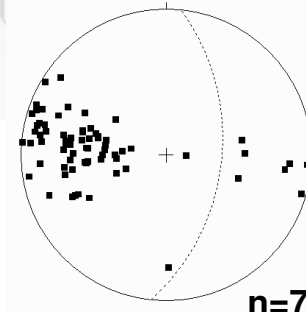
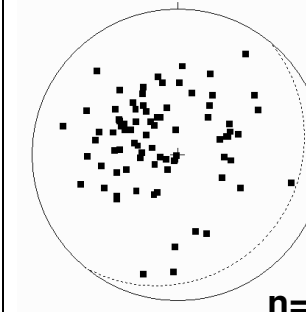
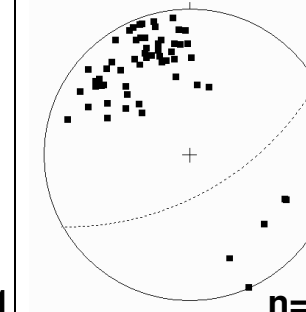
構造事件		Song ma D	D1	D2	D3
奠邊府北段大地 構造資料分析	葉理分析	 n=2	 n=22	 n=5	 n=7
	平均位態	214/87	95/40	69/22	312/89
	褶皺型態	同斜褶皺	同斜褶皺	偃臥褶皺	同斜褶皺
奠邊府中段大地 構造資料分析	葉理分析	 n=8	 n=10	 n=23	 n=9
	平均位態	211/75	98/81	181/11	149/81
	褶皺型態	同斜褶皺	同斜褶皺	偃臥褶皺	同斜褶皺
奠邊府南段大地 構造資料分析	葉理分析		 n=40	 n=53	 n=44
	平均位態		96/66	127/23	153/63
	褶皺型態		同斜褶皺	偃臥褶皺	同斜褶皺

表 4.6 奠邊府剪切帶葉理分析結果。

構造事件		Song ma D	D1	D2	D3
鮮水河剪切帶大地構造資料分析	葉理分析	 n=10	 n=72	 n=81	 n=60
	褶皺型態 (平均位態)	同斜褶皺 (211/78)	同斜褶皺 (96/58)	偃臥褶皺 (129/19)	同斜褶皺 (150/68)

4.2 應變分析

4.2.1 懷氏法分析結果

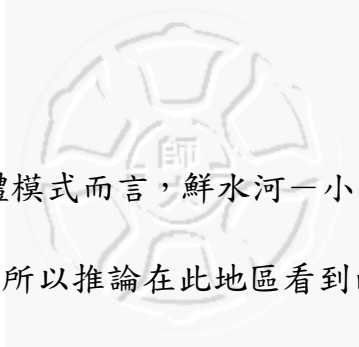


由懷氏法分析可以得到最終應變 (finite strain)，為了可以清楚了解到最終應變在空間上的意義，所以將分析所得最終應變結果以應變橢圓的型態表示，並且依照確實的地理位置、位態標示在地質圖上(圖 4.1~圖 4.4)。

將鮮水河—小江剪切帶與奠邊府剪切帶的應變橢圓資料分別比對構造地形、下部地殼流體模 (Burchfiel, 2004) 式以及地震剪力波分離模式 (Sol et al., 2007)。

在構造地形上，將鮮水河—小江剪切帶水平面上的應變橢圓長軸方向大致與剪切帶走向一致，可以推論這些樣本有受到剪切帶作用的影響。奠邊府剪切帶水平面上的應變橢圓呈現東北—西南走向近東—西向 (圖 4.3) 雖然奠邊府剪切帶的構造線都是近南—北向，乍看之下應變橢圓似乎無法反映這區域應力與應變的關係，但是若再將奠邊府剪切帶大地構造的資料帶入一起討論，會發現這些應變橢圓的長軸方向與 D3 時期的主葉理面走向一致 (表 4.5) 推測可能是最後一期作用力影響的結果。在垂直面上應變橢圓長軸是表示與葉理面的交線，所以可以代表葉理面的傾角方向，比對原始野外構造測量的葉理面數據，5 個應變橢圓中有 3 個符合，由於樣本數量不足，所以無法

再加以深入討論。



依照下部地殼流體模式而言，鮮水河—小江、莫邊府剪切帶是地殼順時針旋轉的邊界，所以推論在此地區看到的應變長軸應該是平行剪切帶，依照本研究的數據來看，鮮水河—小江剪切帶的應變長軸是符合此模式，莫邊府剪切帶的應變長軸不符合此模式。假設下部地殼流體模式是驅動整個東亞地體運動的應力方式，也許可以推論下部地殼流體模式的作用力已經傳達到鮮水河—小江剪切帶，但是仍未作用至莫邊府剪切帶。

在與地震剪力波分離模式的對比中發現，無論是鮮水河—小江剪切帶或是莫邊府剪切帶，應變長軸的數據都與周圍測到的地函剪利波長軸方向一致，比對構造地形之後，鮮水河—小江剪切帶為耦合機制，莫邊府剪切帶為非耦合機制。

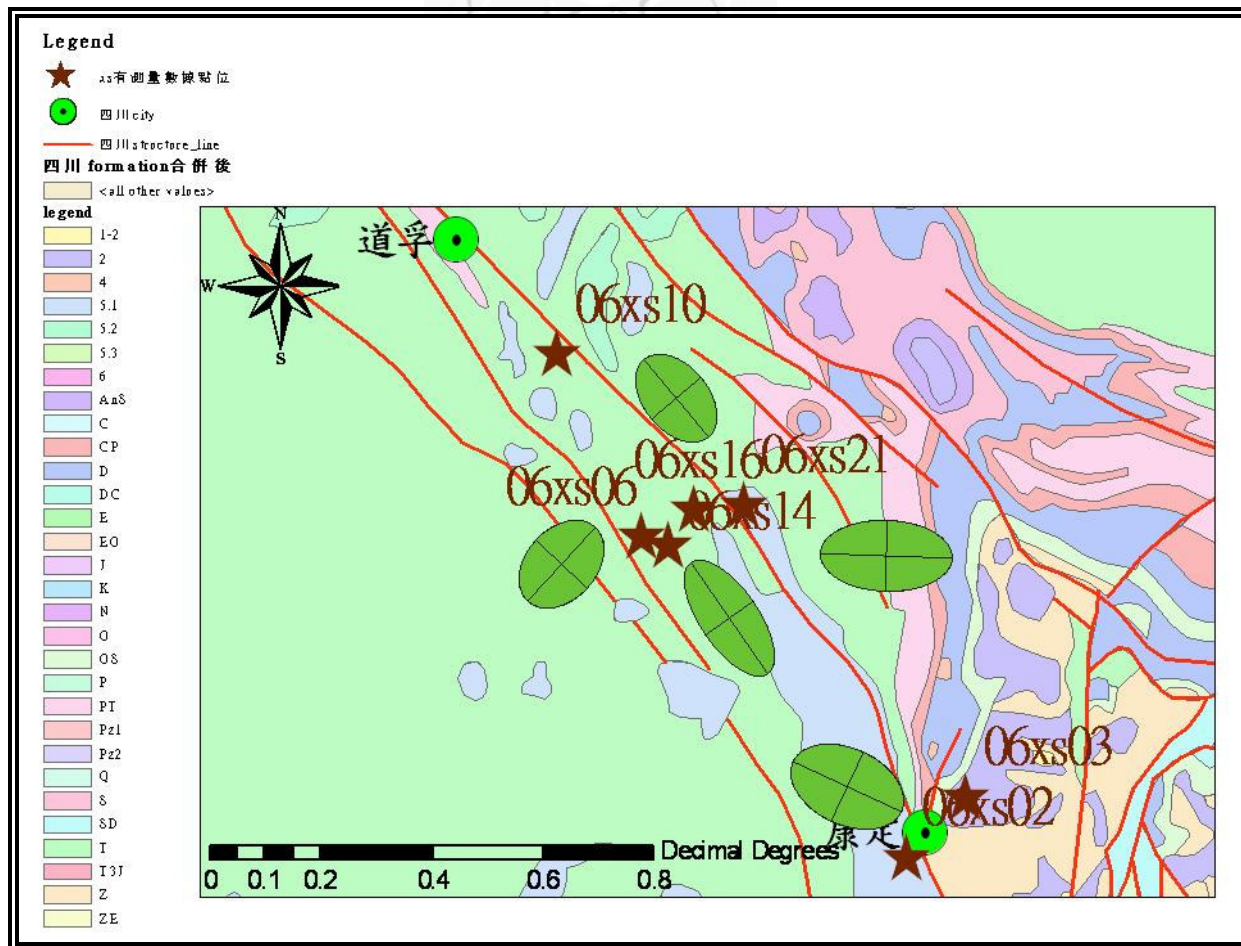


圖 4.1 鮮水河剪切帶在水平面上的應變橢圓分布圖（懷氏法）。

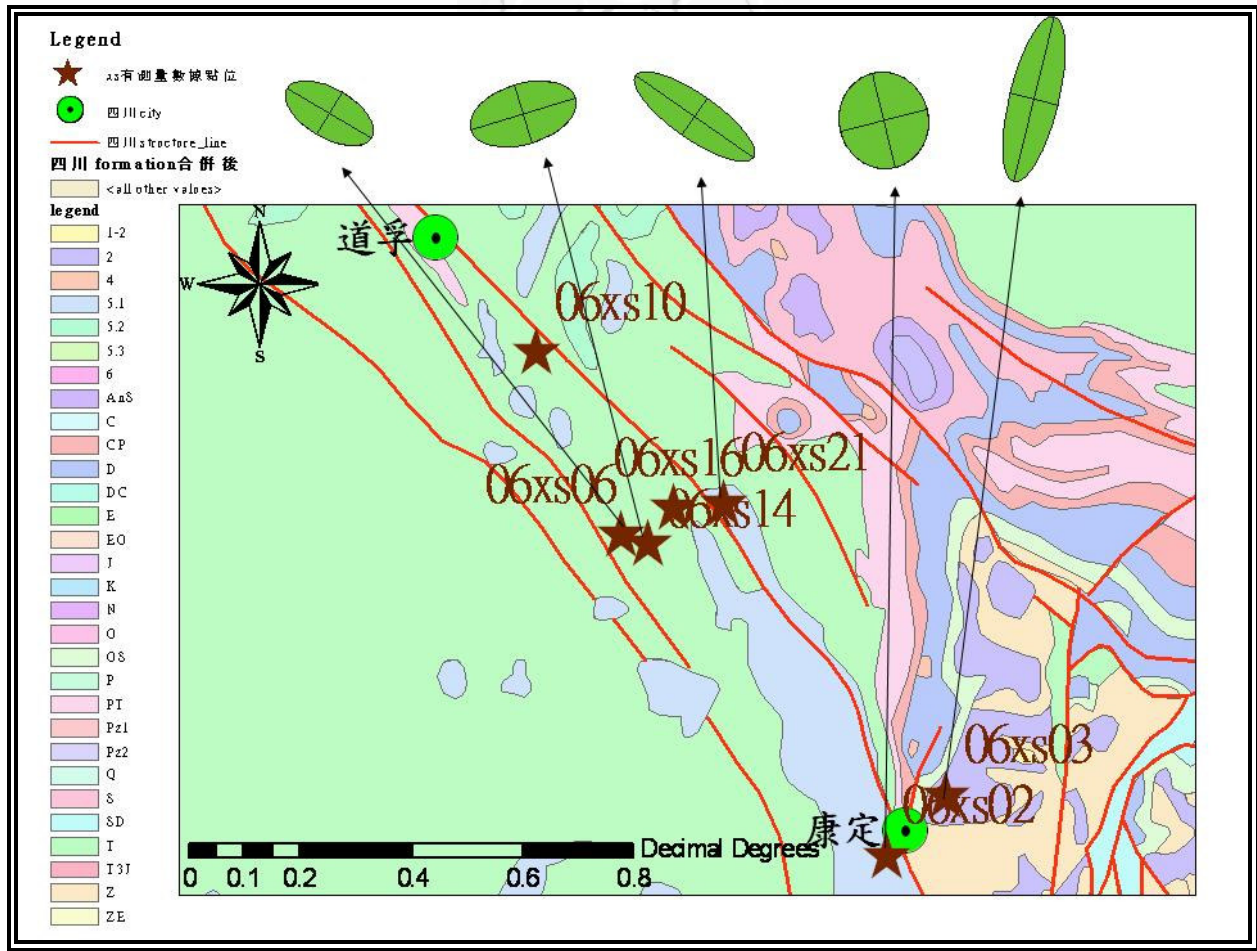


圖 4.2 鮮水河剪切帶在垂直面上的應變橢圓（懷氏法）。

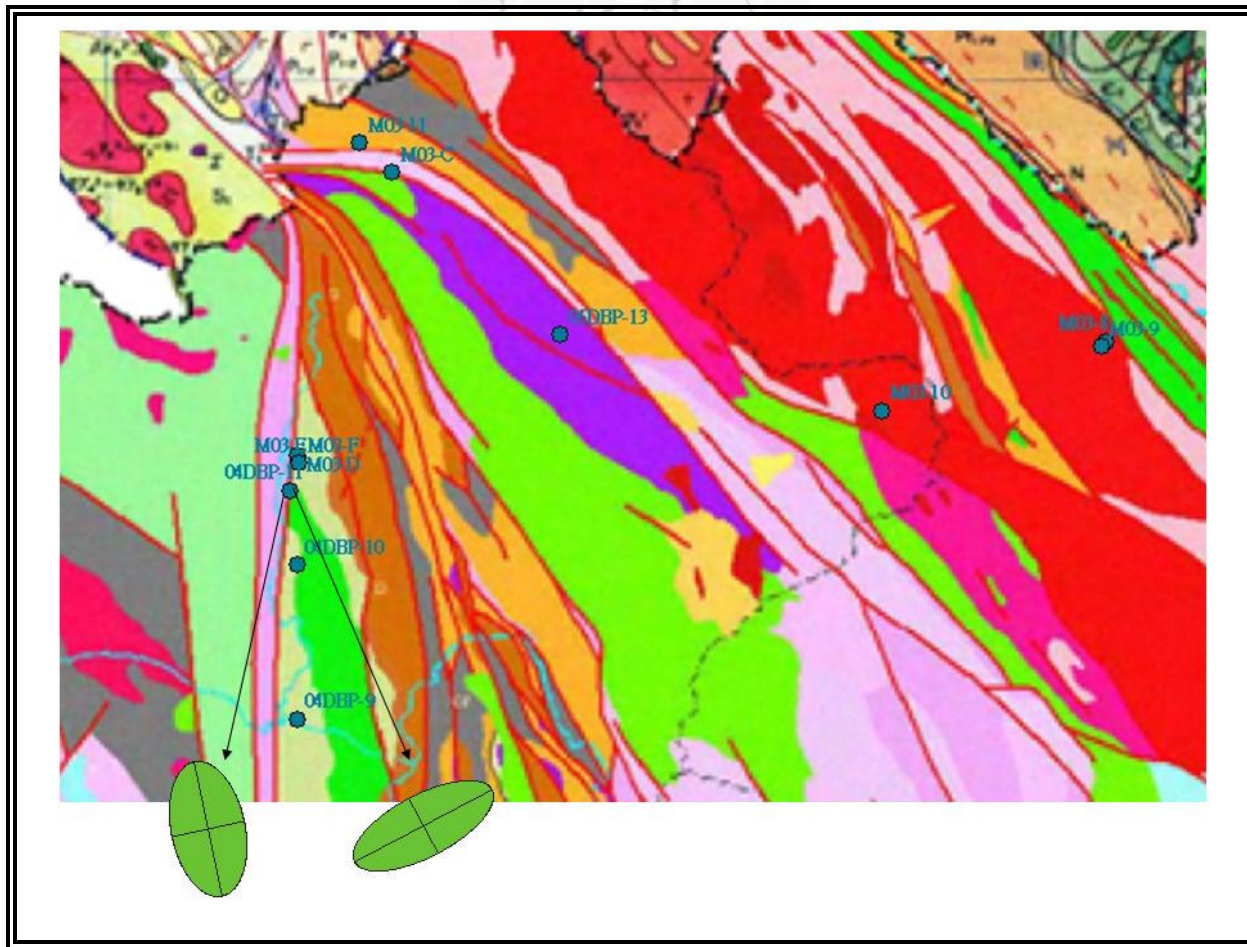


圖 4.4 莫邊府剪切帶在垂直面上的應變橢圓（懷氏法）。

4.2.2 R_f/ϕ 分析結果

R_f/ϕ 分析法同樣得到的是最終應變 (finite strain)，以與懷氏法相同的分析方法分析 (圖 4.5~圖 4.8) 並且同樣比對構造地形、下部地殼流體模式 (Burchfiel, 2004) 以及地震剪力波分離模式 (Sol et al., 2007)。

雖然在整個鮮水河—小江剪切帶或是奠邊府剪切帶中，無論水平面或是垂直面上，以 R_f/ϕ 分析做出來應變橢圓的軸率數值都不大，但是對比構造地形之後，依然還是可以看出水平面上有平行主構造線的方向，在垂直面上看到的應變長軸方向都是近乎水平的，但是原始野外構造的葉理面數據紀錄到的都是大於 70 度的高角度。

比對下部地殼流體模式發現，無論是鮮水河—小江剪切帶或是奠邊府剪切帶，應變長軸的數據都與此模式中的假設一致，代表鮮水河—小江剪切帶、奠邊府剪切帶都受到順時針旋轉應力的影響，呈現出左移運動模式。

在與地震剪力波分離模式的對比中發現，鮮水河—小江剪切帶的應變長軸與周圍測到的地函剪利波長軸以及構造地形一致，呈現耦合狀態。而奠邊府剪切帶應變長軸的數據與地函剪利波長軸的方向明顯不同。所以以 R_f/ϕ 分析法做出來的應變橢圓是不符合地震剪力波分離模式。

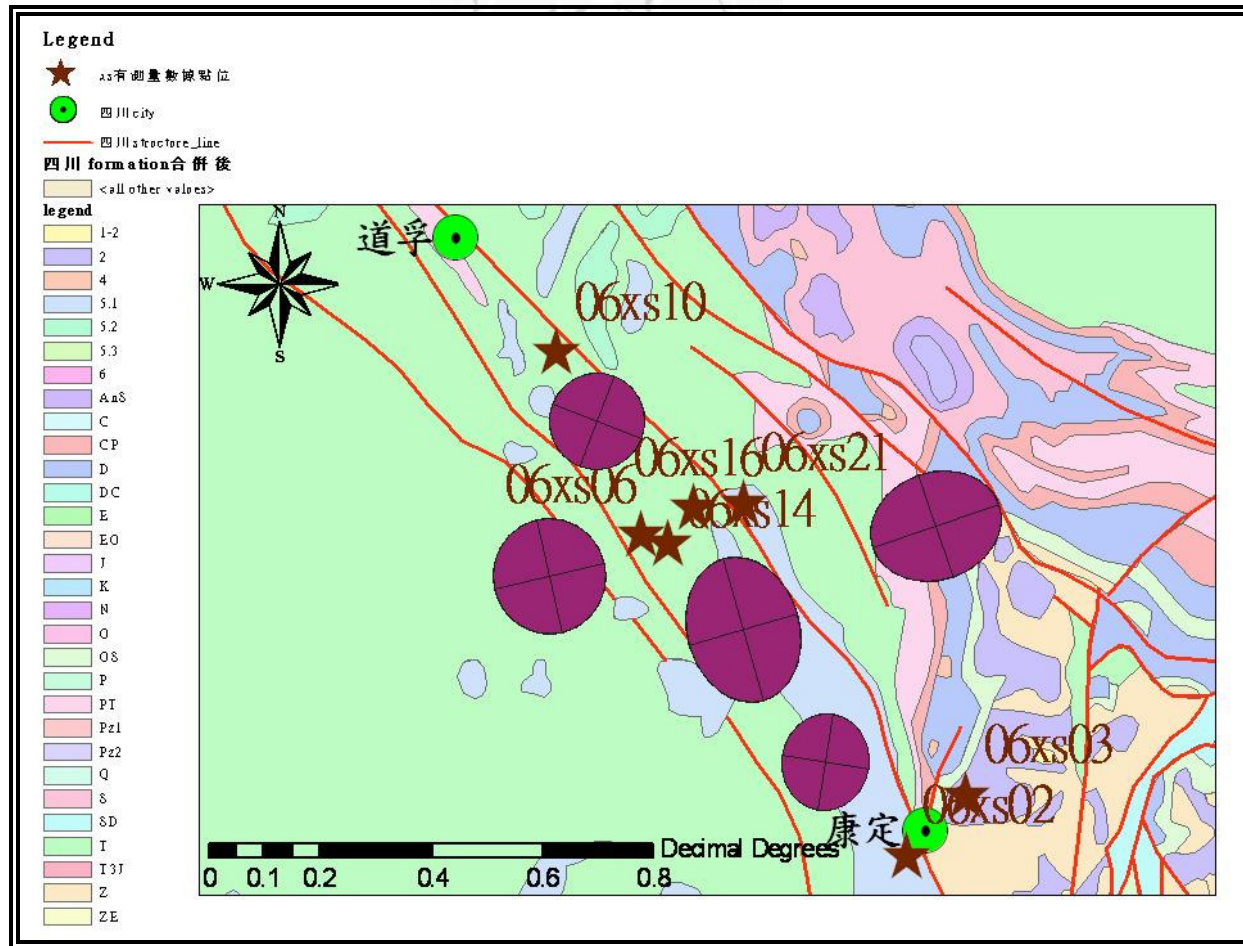


圖 4.5 鮮水河剪切帶在水平面上的應變橢圓 (R_f/ψ)。

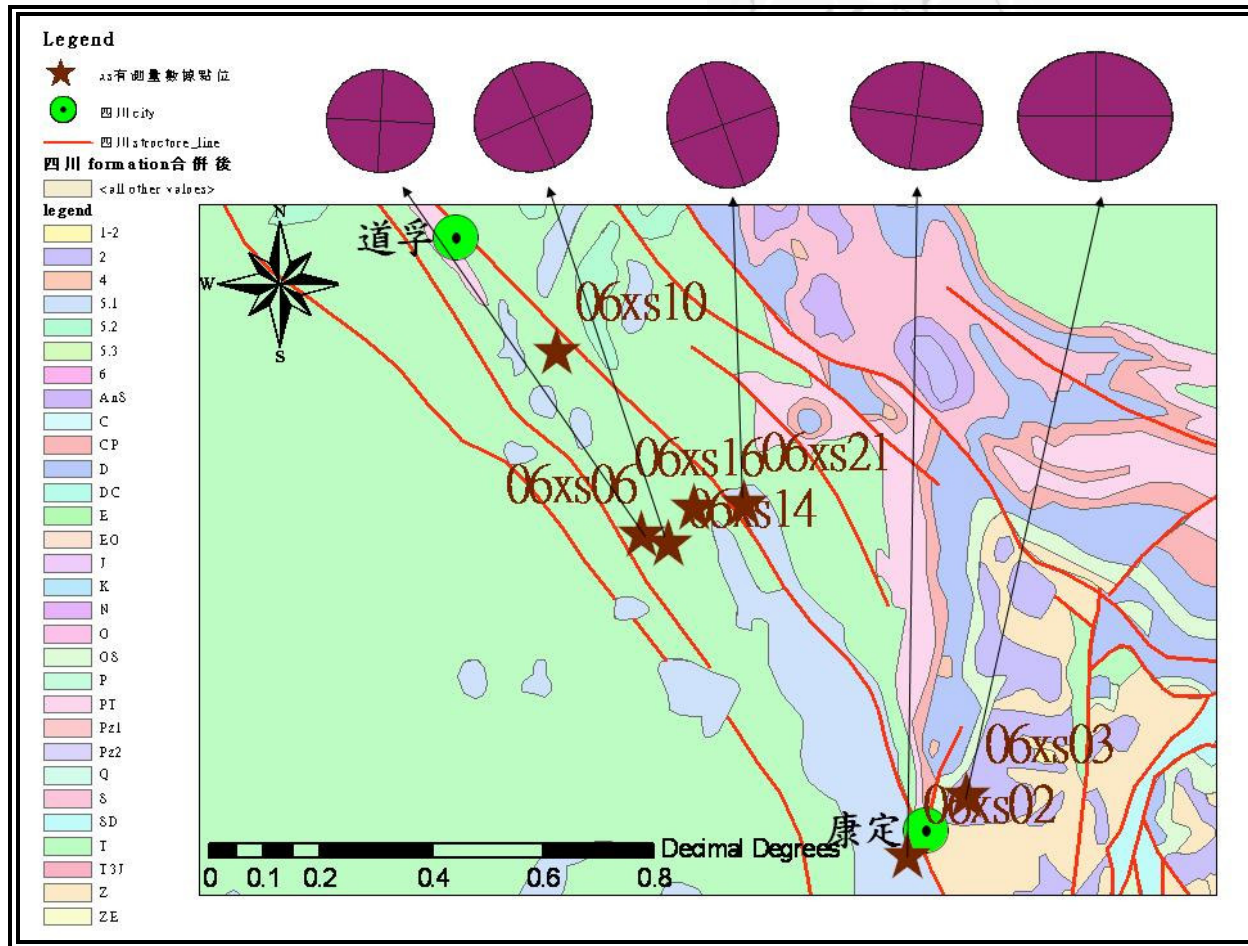


圖 4.6 鮮水河剪切帶在垂直面上的應變橢圓 (R_f/ψ)。

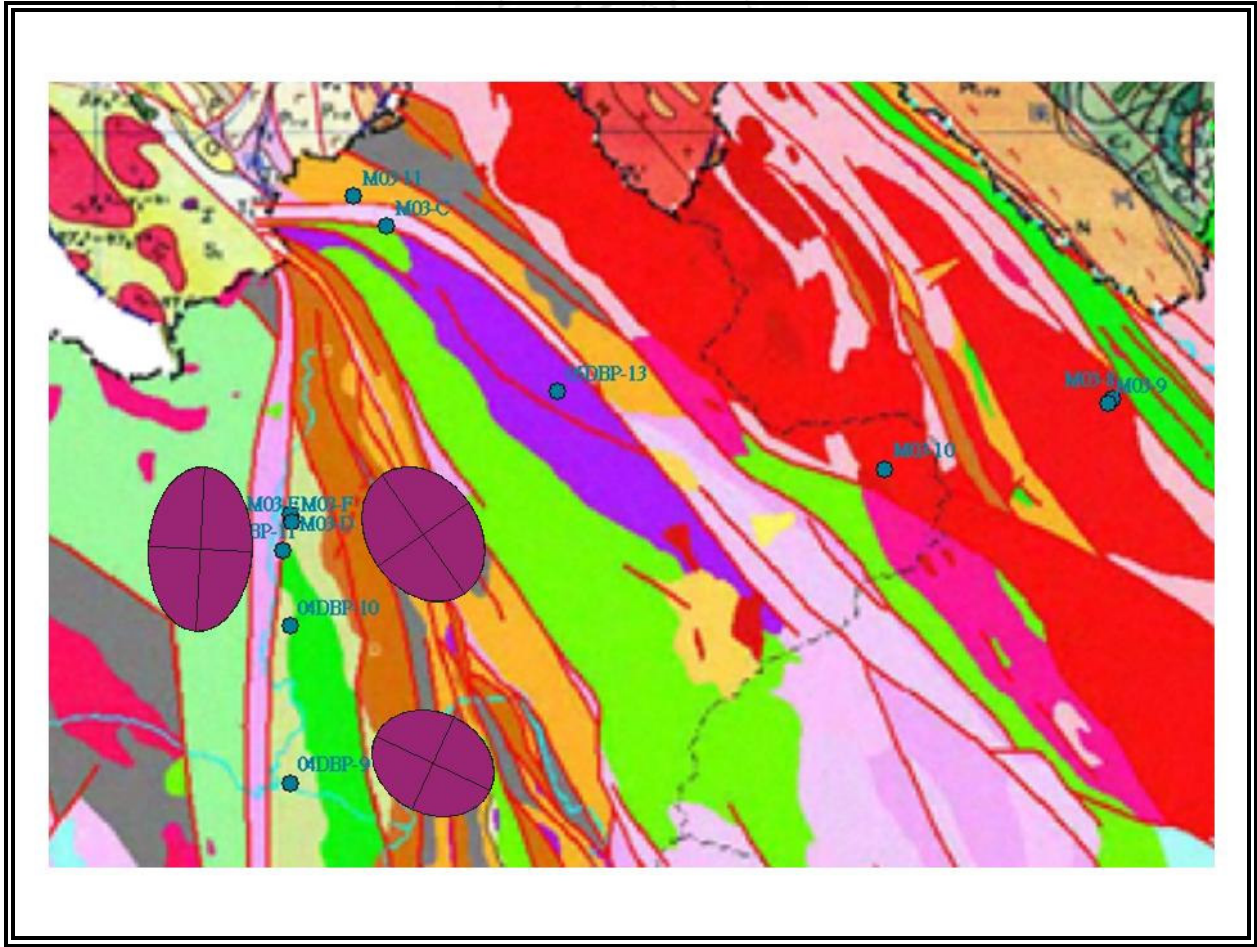


圖 4.7 莫邊府剪切帶在水平面上的應變橢圓 (R_f/ψ)。

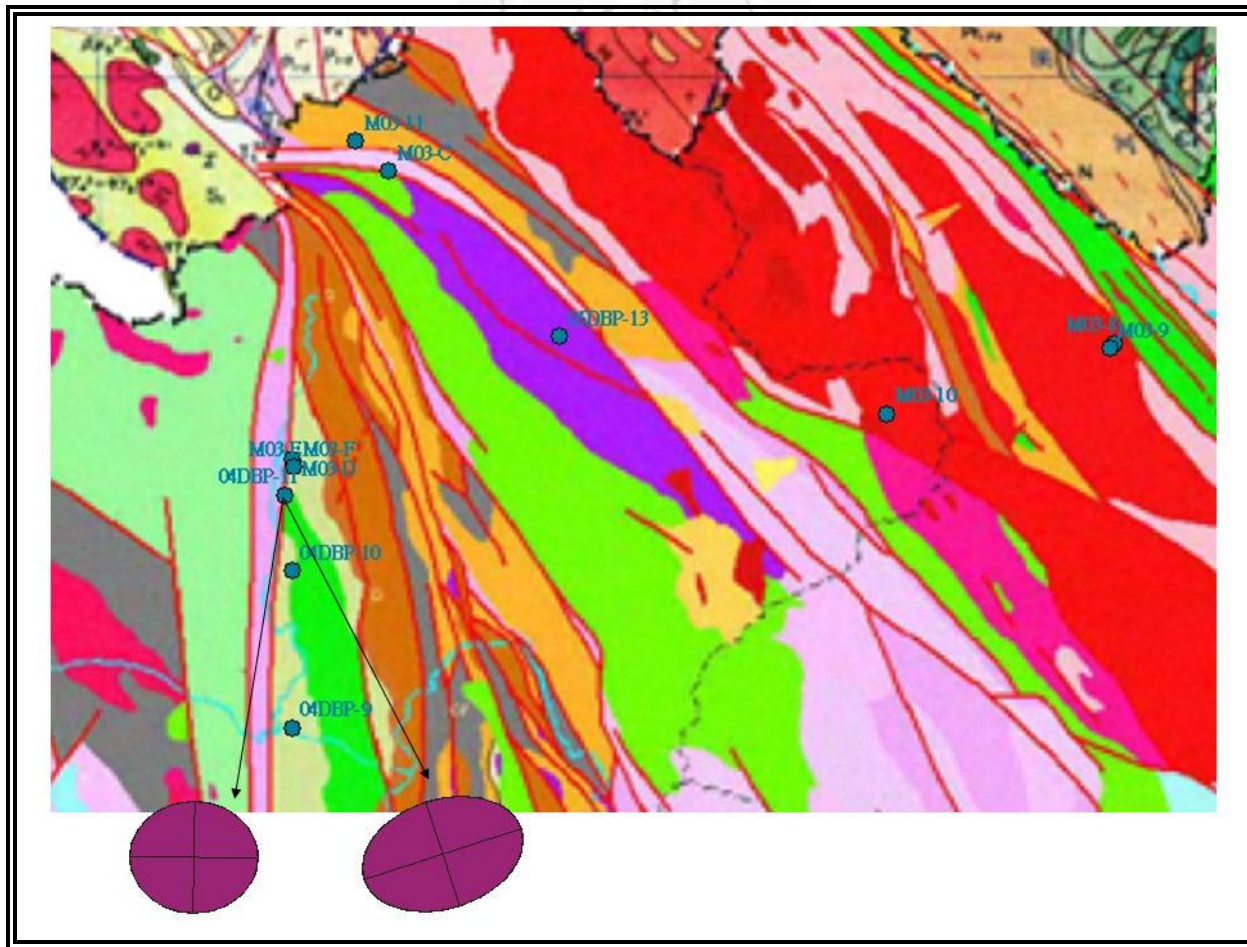


圖 4.8 莫邊府剪切帶在水平面上的應變橢圓 (R_f/ϕ)。

4.3 福林氏圖解 (Flinn diagram)

福林氏圖解是以斜率 $k = 1$ 的平面應變 (plane strain) 來作為型態區分的標準，兩個極端值是 $k = 0$ ，代表完全壓扁的應變 (flattening strain)； $k = \infty$ 則代表完全壓縮的應變 (constrictional strain) (圖 4.9, Flinn, 1962)。

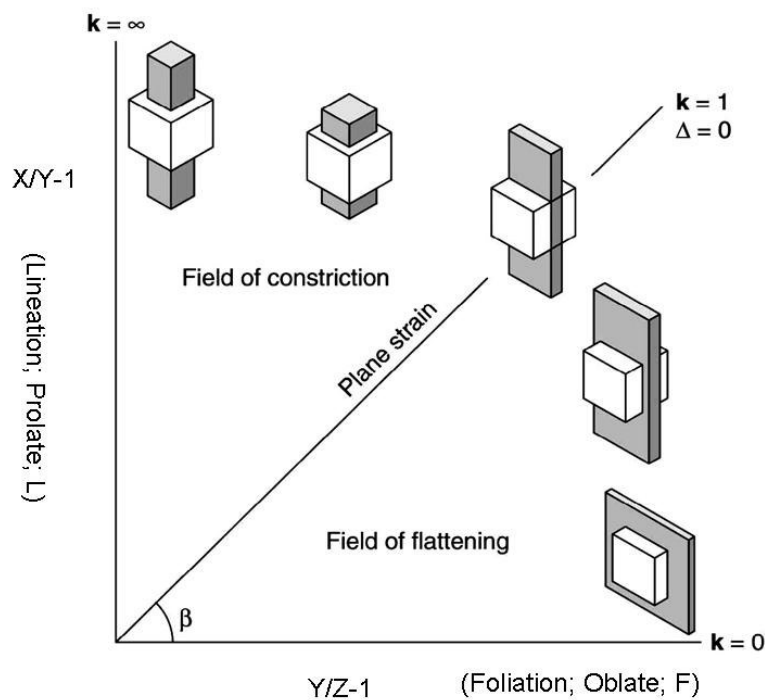


圖 4.9 福林氏圖，用來表示各種不同的應變型態 (修改自 Flinn, 1962)。

藉由福林氏圖形呈現鮮水河—小江、奠邊府剪切帶的應變型態 (圖 4.10、圖 4.11) 發現全部的數據都集中在 $k > 1$ 的區域，呈現出雪茄狀的變形型態，雖然可以看出此地區有受應變拉張趨勢，但是由於樣本數量不足，所以無法深入探討這些應變型態代表的意義。

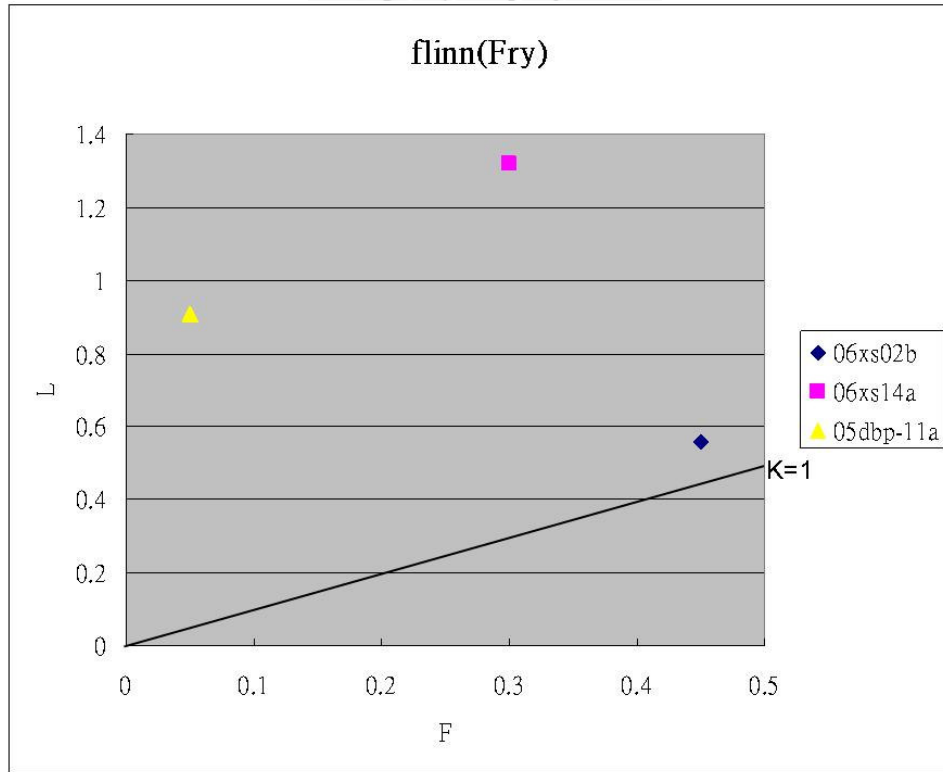


圖 4.10 以懷氏法分析的數據呈現的應變狀態。

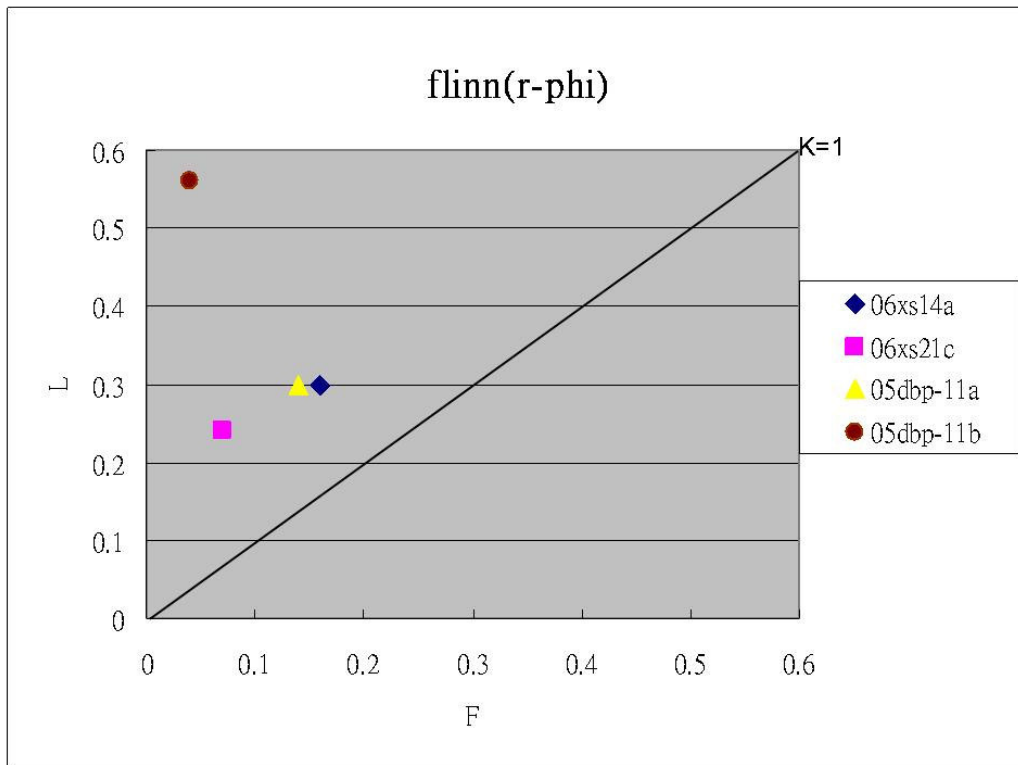


圖 4.11 以 R_f/ψ 分析的數據呈現的應變狀態。

4.4 顆粒度分析

本研究經由 Image Pro Plus 6.0 軟體圈選礦物，取得各礦物的面積、長軸偏轉角度、軸長、半軸長以及長短軸比率等數據，藉由這些數據資料做應變分析，所以這些數據的適用性檢驗變得十分重要。

Ramsay (1983) 曾經探討過礦物顆粒數量與應變軸率 (Mean R_s) 的關係，如果礦物顆粒所測得的數據對於應變是適用的，可以得到一條趨近穩定的趨勢線，在本研究中也嘗試以礦物顆粒的數量與應變軸率做相對關係圖，期望能驗證數據資料的適用性。

透過礦物顆粒數量與應變軸率做的相對關係圖 (圖 4.12~圖 4.27)，可以發現無論原始挑選礦物數量多寡，只要礦物顆粒數量大於 50 顆，應變軸率曲線就會趨近穩定，但是在 05DBP-11a、05DBP-11b 這兩個標本的 4 個薄片數據中，只有 05DBP-11a 垂直薄片有趨於穩定的趨勢，其他 3 個薄片看不出有穩定的趨勢，而是呈現顯示隨著數量漸增，應變軸率先增大再轉小的趨勢。由於這兩個地點的岩性是糜嶺岩，與其他地點的岩性明顯不同，所以推論是否是因為糜嶺岩的應變軸率與其他地點有顯著不同而導致趨勢線不同，但是透過礦物顆粒數量與應變比率做的相對關係圖，可以發現無論岩性是否相同，在整個區域所量測出來的應變軸率都相似，數值都介於 1.45~2.11 之間。

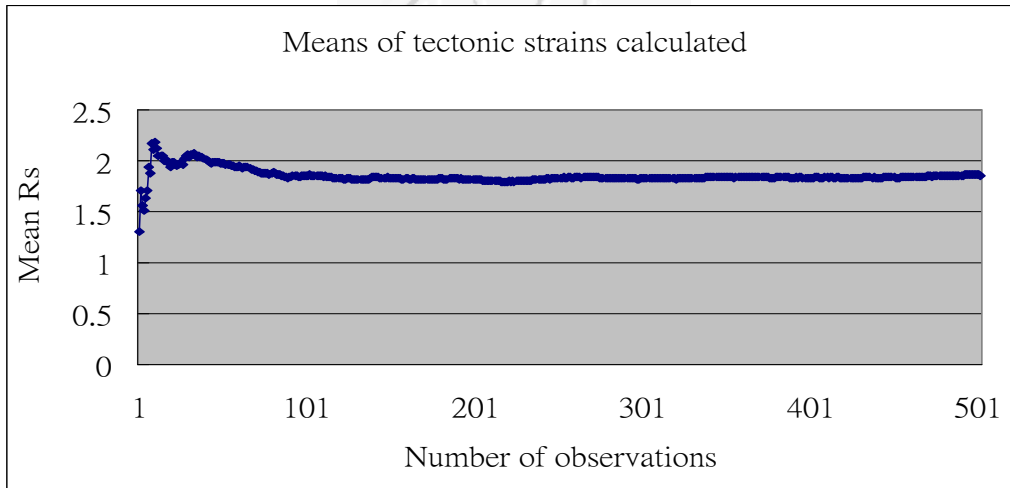


圖 4.12 06XS02b 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

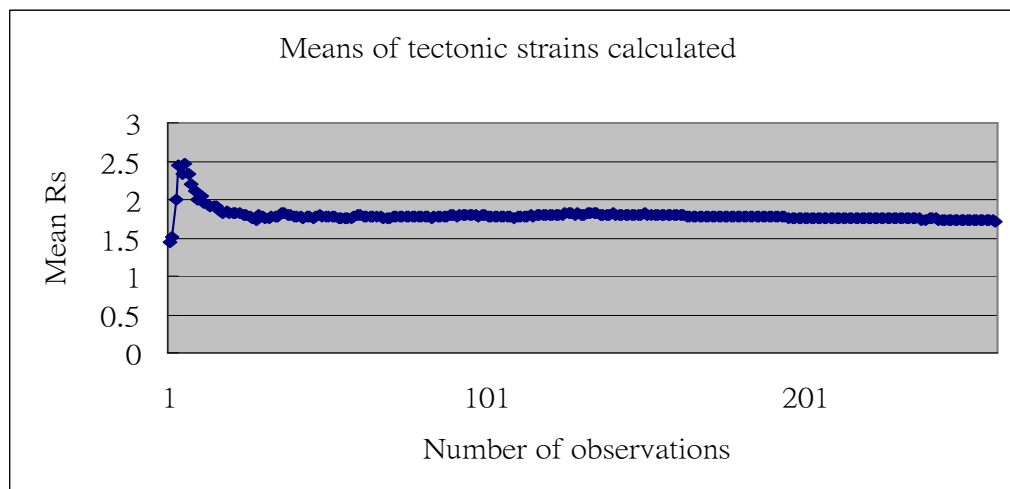


圖 4.13 06XS02b 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

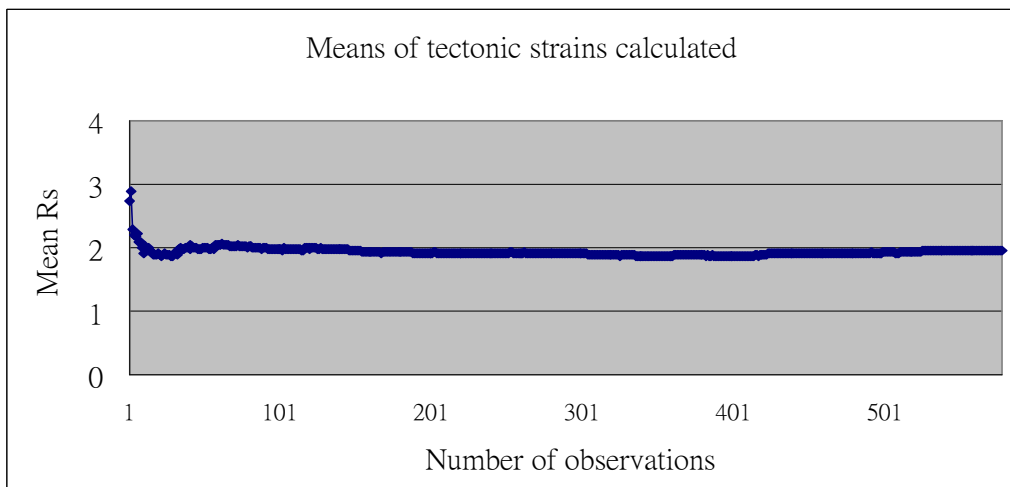


圖 4.14 06XS03 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

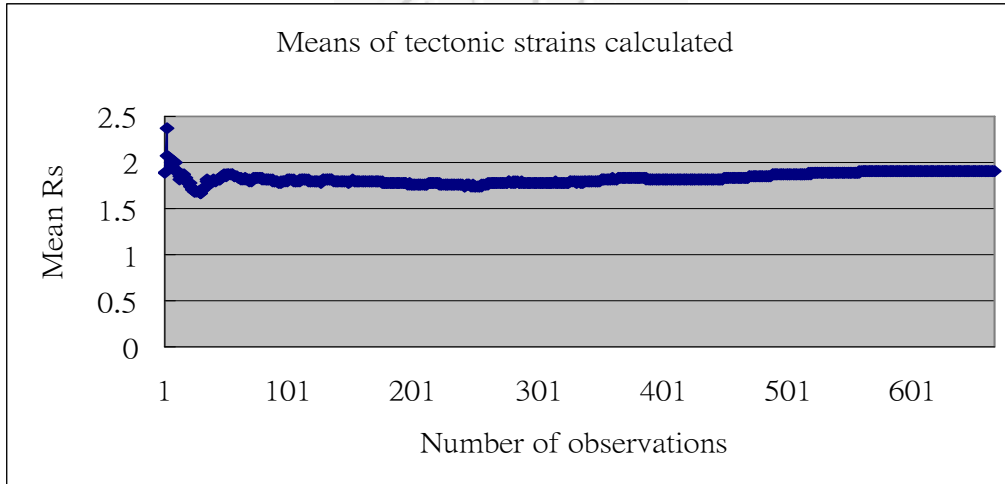


圖 4.15 06XS06 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

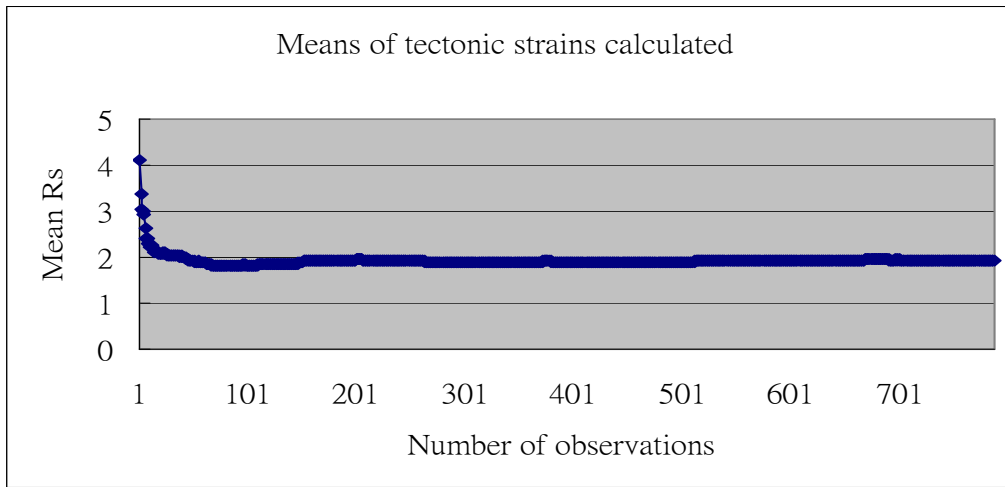


圖 4.16 06XS06 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

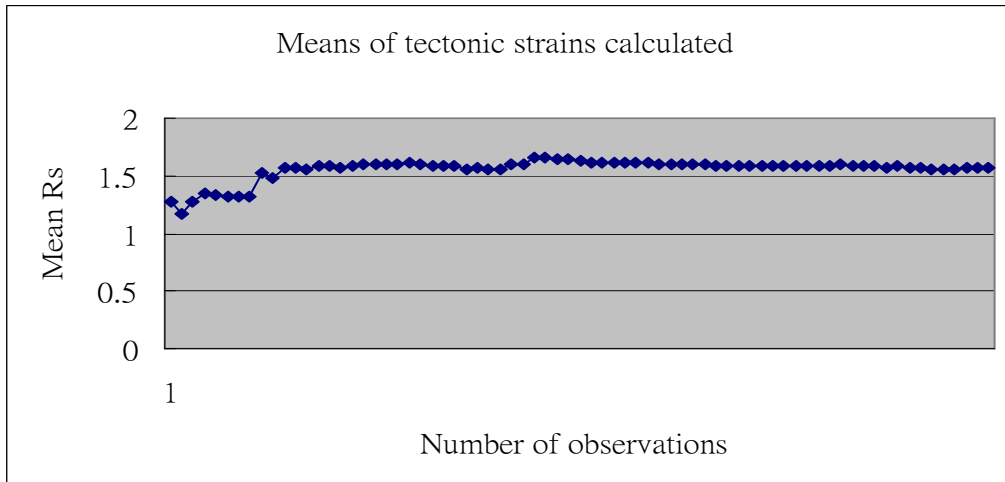


圖 4.17 06XS10 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

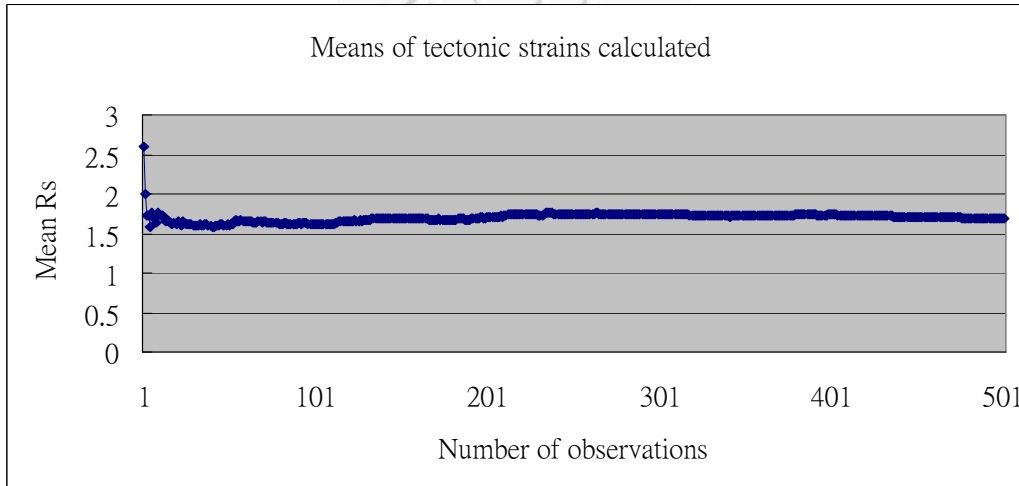


圖 4.18 06XS14a 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

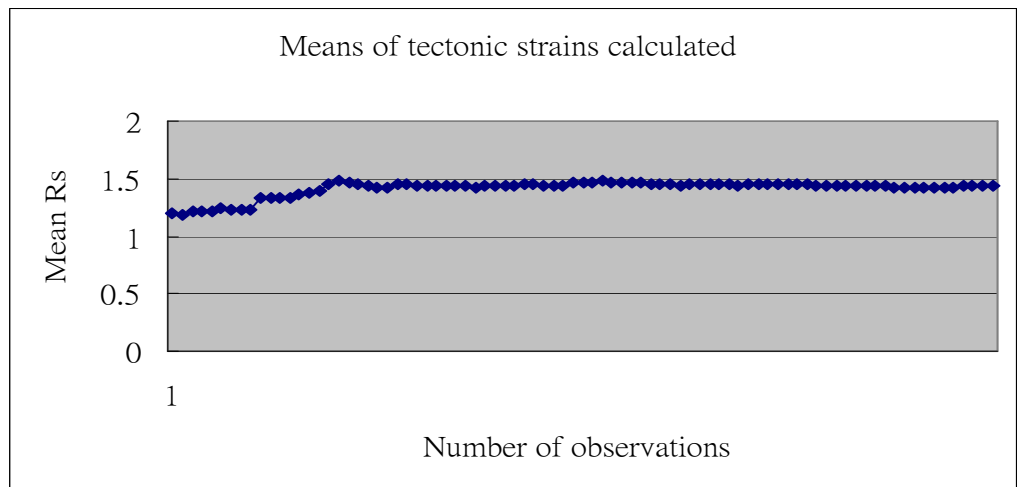


圖 4.19 06XS14a 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

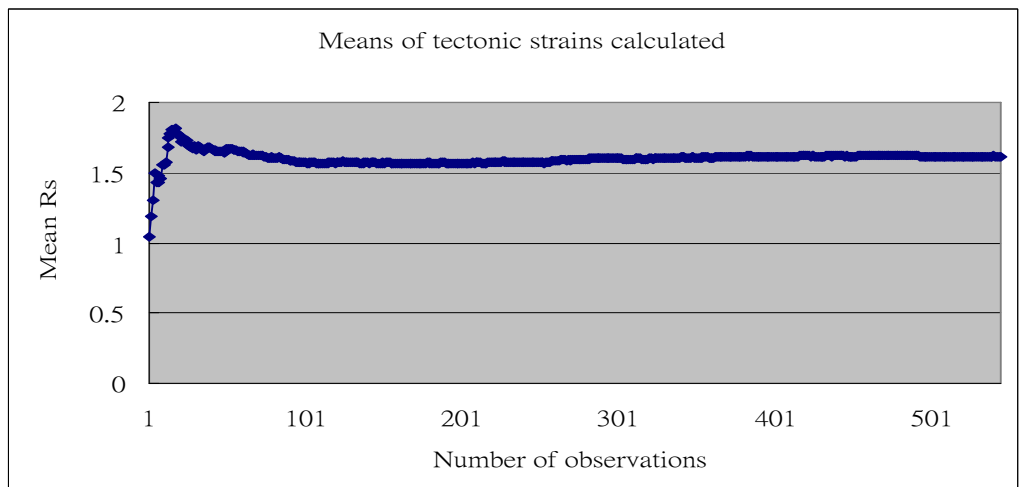


圖 4.20 06XS16 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

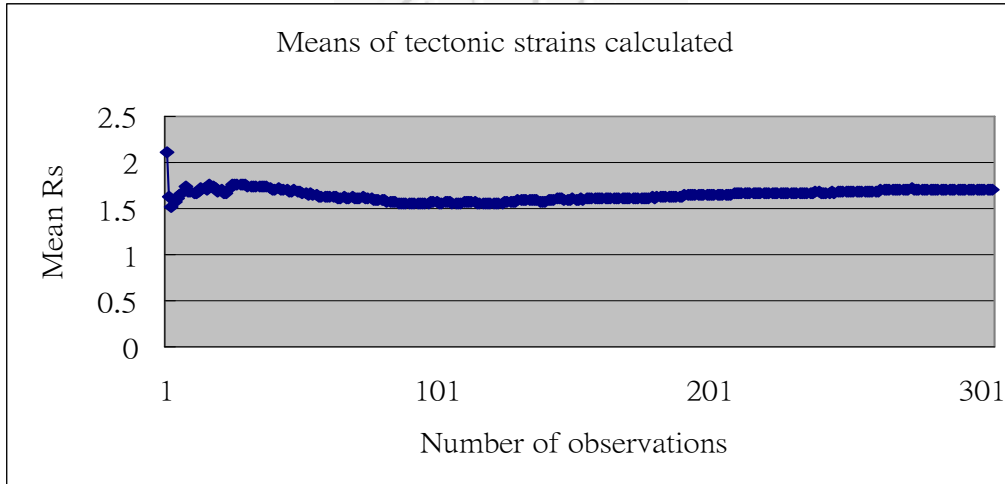


圖 4.21 06XS21c 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

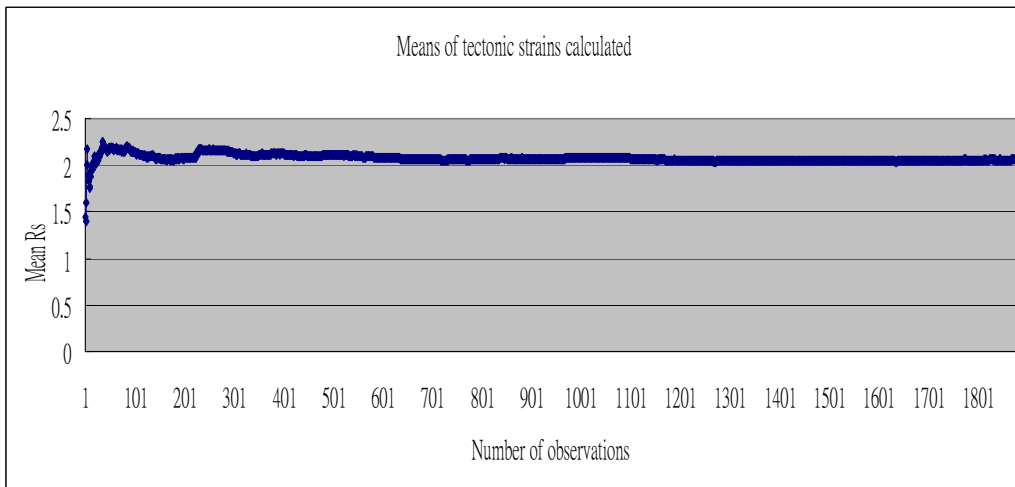


圖 4.22 06XS21c 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

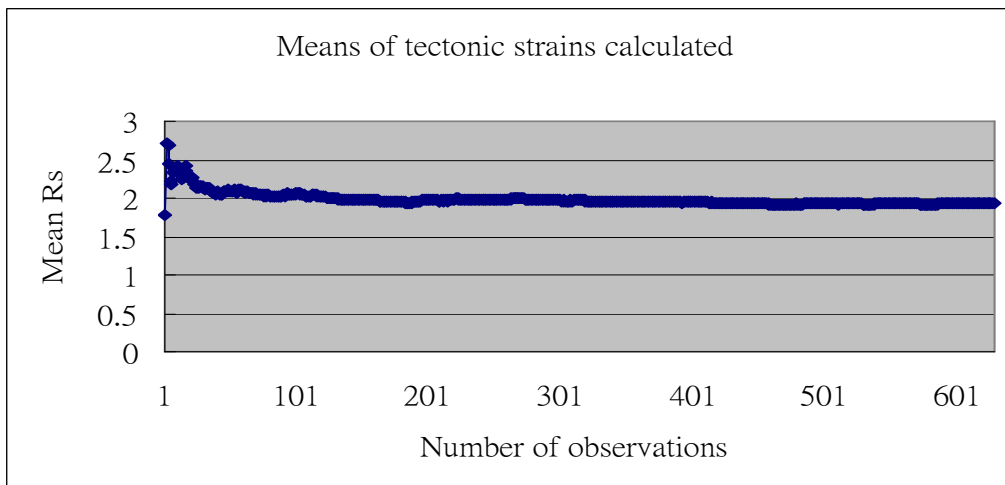


圖 4.23 04DBP-9 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

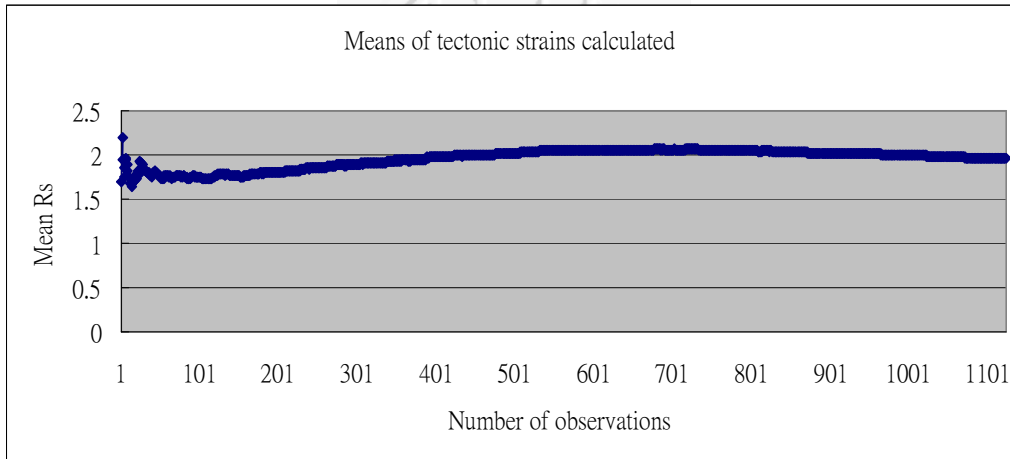


圖 4.24 05DBP-11a 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

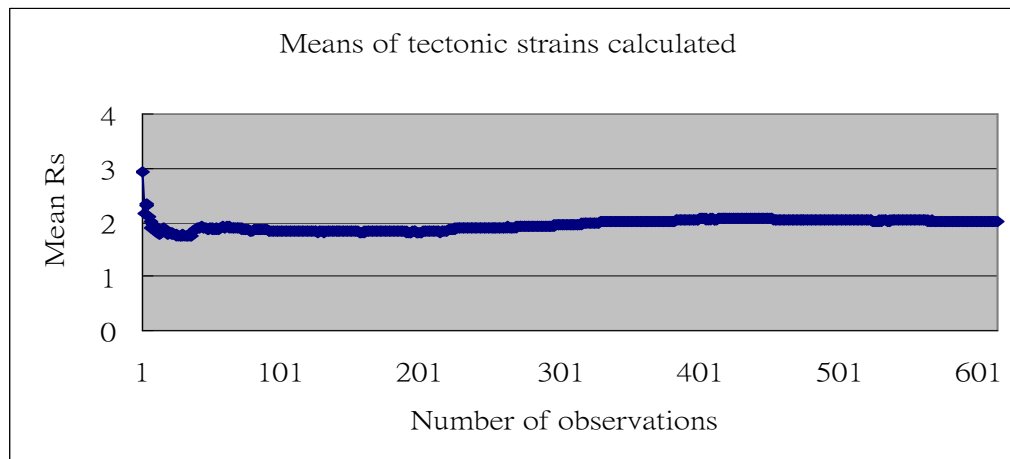


圖 4.25 05DBP-11a 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

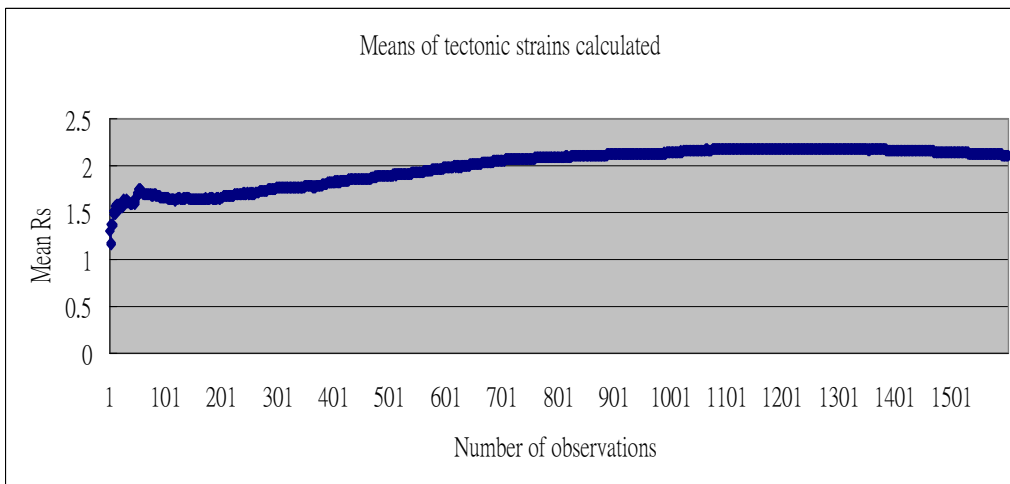


圖 4.26 05DBP-11b 水平面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

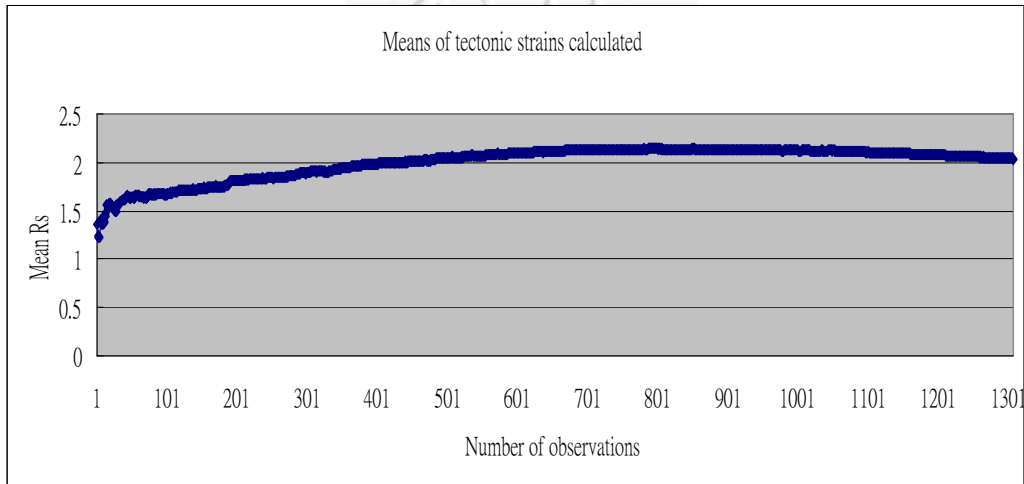


圖 4.27 05DBP-11b 垂直面上應變比率與礦物顆粒度數量關係圖。

進一步探討各標本礦物顆粒大小與顆粒數的相對關係，可以得知除了 06XS21c 這個標本之外，其他標本中的礦物顆粒大小都集中在 0.01 到 0.001 之間（圖 4.28）。如果將礦物顆粒面積取對數與礦物顆粒累積數量做比較，會得到一條線性（圖 4.29），比對這條線性的斜率跟應變軸率（ R_s ）的關係（圖 4.30），發現所有點的排列有一個相關性：當線性斜率越大，應變軸率值就越小。這個結果可以推論為，線性的斜率越大，代表標本中的礦物顆粒越不均質，所以應變軸率反應出來的數據就越小；相反的，當線性的斜率越小，標本中的礦物顆粒越均質，應變軸率反應出來的數據就越大。

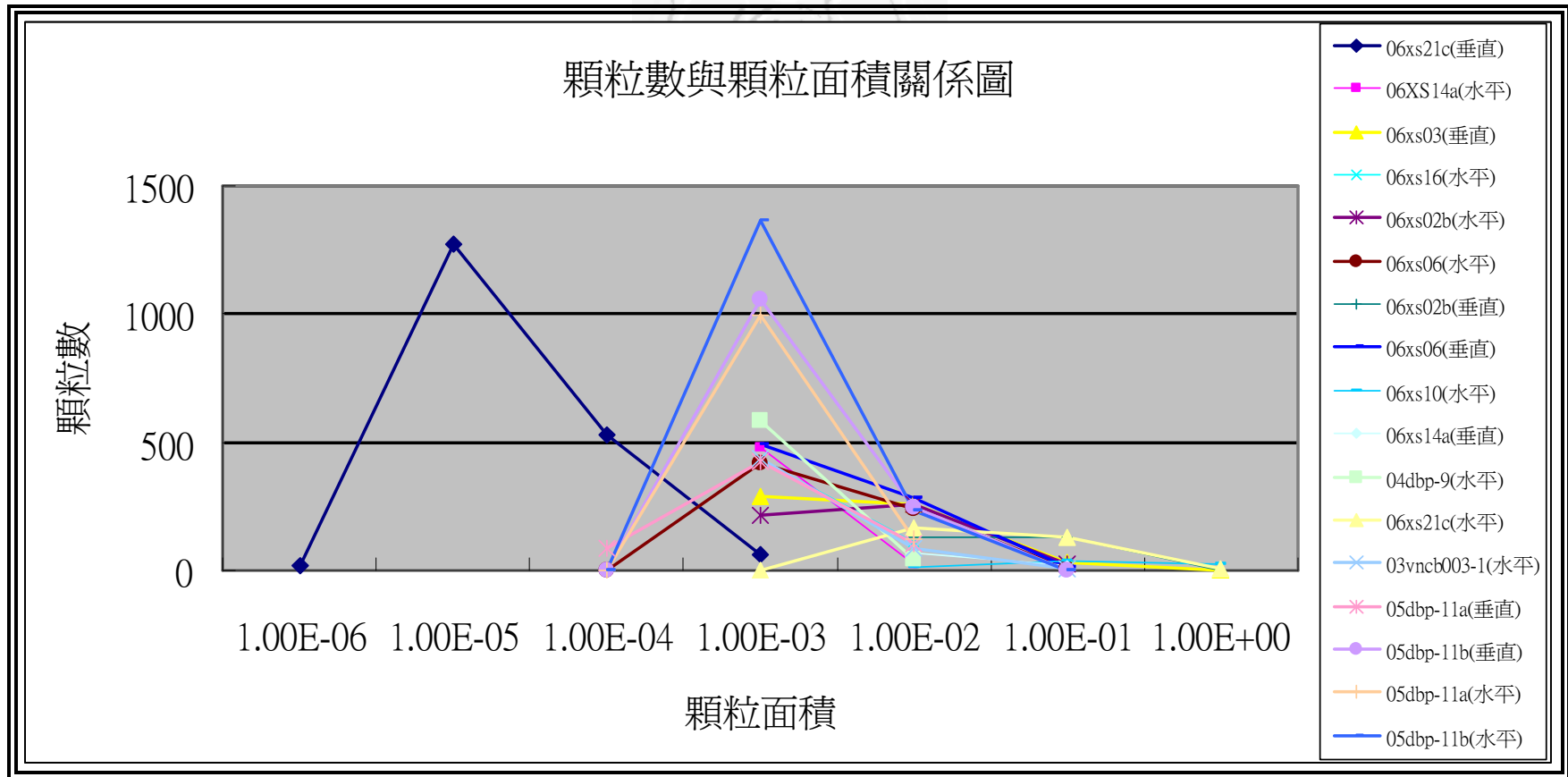


圖 4.28 礦物顆粒大小與顆粒數的相對關係圖。

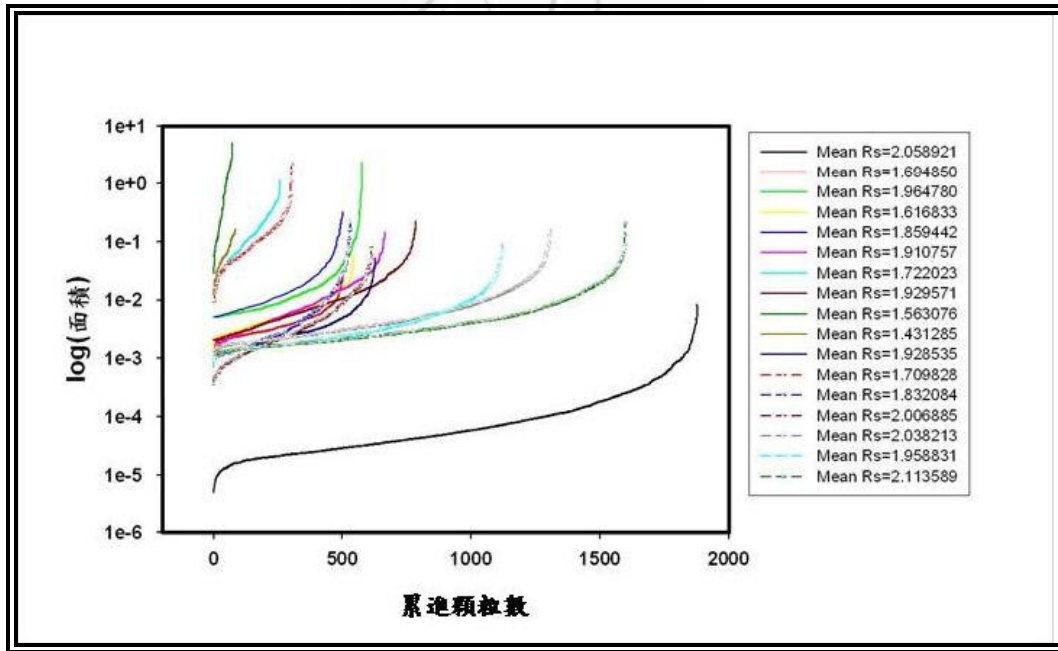


圖 4.29 礦物顆粒的面積取對數與礦物顆粒累積數量的相對關係圖。

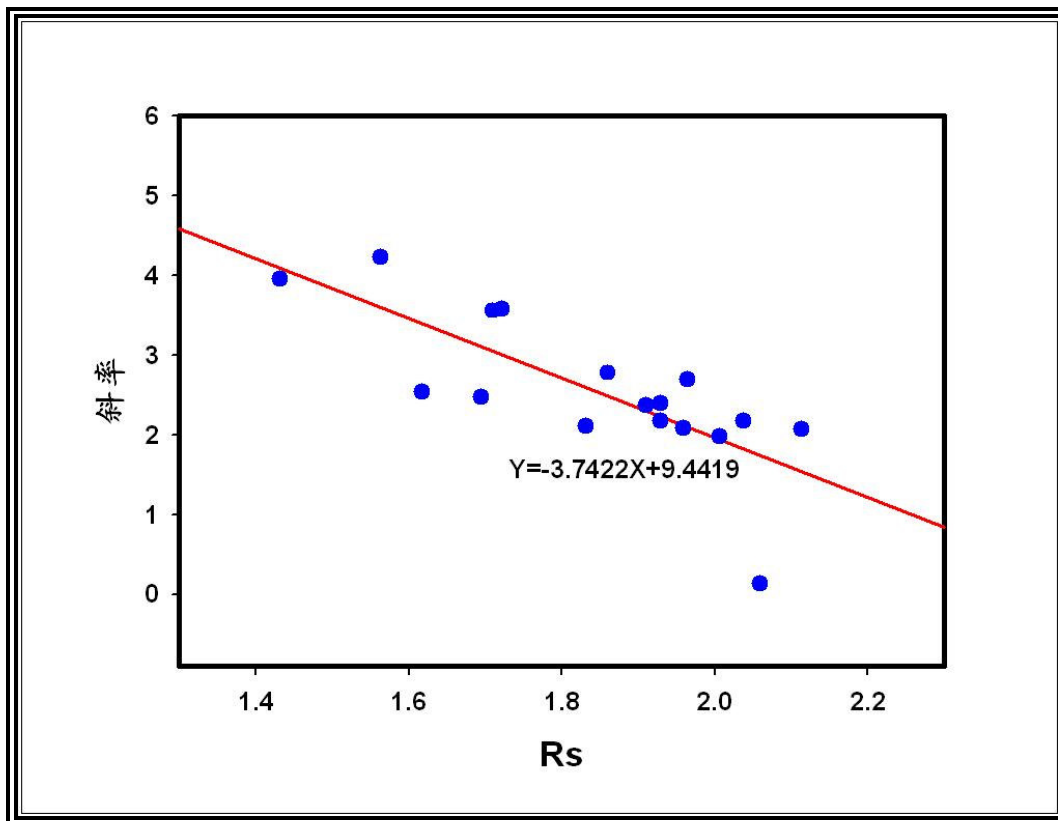


圖 4.30 斜率跟應變軸率 (R_s) 的相對關係圖。

第五章 結論

一、鮮水河—小江剪切帶構造歷史可以分為以下五期：第一期 (D1)，鮮水河區域遭受東北西南方向的應力，相當於印度板塊碰撞歐亞大陸板塊初期。第二期 (D2)，印度板塊持續對歐亞板塊作用，鮮水河區域受到的應力轉成東—西方向的擠壓力。第三期 (D3)，鮮水河區域受到逆衝斷層作用影響，使得同斜褶皺轉變成偃臥褶皺。第四期 (D4)，由於西藏抬升，地殼應力增大，使得下部地殼產生塑性流動，並以鮮水河剪切帶為邊界產生旋轉 (Burchfiel, 2004) 啟動了鮮水河剪切帶，此時間大約為 $12.8 \pm 1.4\text{Ma}$ (Roger, 1995)。第五期 (D5)，鮮水河剪切帶因左移運動作用帶動拉張盆地形成正斷層。

二、在 198~158 百萬年前 (林德嫻, 2008)，莫邊府剪切帶啟動時以右剪運動模式切過馬河縫合帶 (Fontaine and Workman, 1997; Lepvrier et al., 2004)，由葉理分析可將莫邊府剪切帶歷史分為以下三期：第一期 (D1)，受到東—西方向應力產生同斜褶皺。第二期 (D2)，受到西北—東南向應力產生偃臥褶皺。第三期 (D3)，西北—東南向應力持續作用，產生同斜褶皺。

三、莫邊府剪切帶第三期 (D3)，由北往南的主葉理面位態有順



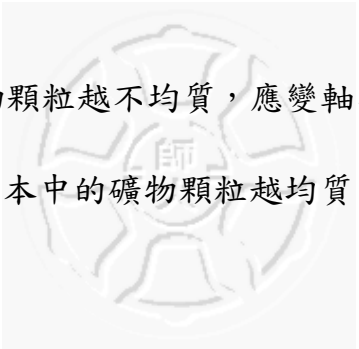
時針旋轉的現象，符合了 Burchfiel (2004) 提出的下部地殼流體模式 (Lower crustal level flow model)。

四、奠邊府剪切帶大地構造分析中出現位態西北—東南向的葉理面，是馬河縫合帶殘留下來的痕跡。

五、以懷氏應變分析結果與構造地形比對，大致上是受最後一期構造事件影響；與下部地殼流體模式比對，鮮水河小江剪切帶的應變長軸符合此模式，但是奠邊府剪切帶的應變長軸不符合；與地震剪力波分離模式比對，鮮水河—小江剪切帶為耦合，奠邊府剪切帶為非耦合。

六、以 R_f/ϕ 應變分析結果來看，大致上是平行剪切帶方向；與下部地殼流體模式比對，實驗結果完全符合此模式；與地震剪力波分離模式比對， R_f/ϕ 應變分析的數據完全不符合。

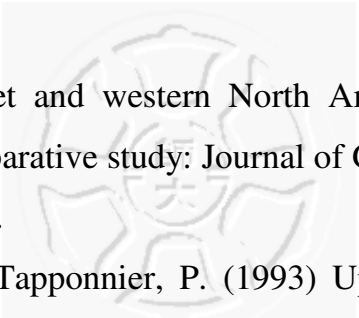
七、從應變分析的結果來看，無論是懷氏法或是 R_f/ϕ 的應變數據都呈現鮮水河—小江、奠邊府剪切帶的應變型態是雪茄狀 (prolate ellipsoids)，但是以應變長軸與構造的對比上，懷氏法所呈現的分析結果與現地情況較為相符。



八、標本中的礦物顆粒越不均質，應變軸率 (R_s) 反應出來的數據就越小；相反的，標本中的礦物顆粒越均質，應變軸率反應出來的數據就越大。

參考文獻

- 方穎，江在森，牛安福 (2005) 川滇菱形塊體東邊界地殼形變研究：
Geodesy and Geodynamics(大地測量與地球動力學), v. 25, p.
81-85.
- 宋方敏，汪一鵬，俞維賢，曹忠權，申旭輝，沈軍 (1998) 小江活動
斷裂帶: 地震出版社, 237p.
- 李通藝 (2008) 東亞地體構造演化研究的回顧與展望：科學發展月
刊，v. 28(10), p. 754-763.
- 林德嫻 (2008) 從熱定年學看東喜馬拉雅山結外圍主要斷裂帶的活動
歷史及其大地構造演示: 國立台灣大學理學院地質科學研究所
博士論文，120p.
- 唐榮昌，韓渭賓 (1993) 四川活動斷裂與地震:地震出版社，p. 1-368.
- 張岳橋，陳文，楊晨 (2004) 川西鮮水河斷裂帶晚新生代剪切變形
 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 測年及其構造意義:中國科學期刊，p. 613-621.
- 聞學澤 (2000) 四川西部鮮水河-安寧河-則木河斷裂帶的地震破裂分
段特徵: 地震地質，v. 22(3), p. 239-249.
- Allen, C. R., Lio, Z., Qian, H., Wen, X., Zhou, H. and Huang, W. (1991)
Field study of a highly active fault zone: The Xianshuihe fault of
southwestern China: Journal of Geological Society of America
Bulletin, v. 103, p. 1178-1199.
- Barazangi, M., and Ni, J. (1982) Velocities and propagation
characteristics of Pn and Sn beneath the Himalayan arc and
Tibetan plateau : Possible evidence for underthrusting of Indian
continental lithosphere beneath Tibet: Geology, v. 10(4), p.
179-185.
- Beghoul, N., Barazangi, M., and Isacks, B. L. (1993) Lithospheric



structure of Tibet and western North America: Mechanisms of uplift and a comparative study: *Journal of Geophysical Research*, v. 98, p. 1997-2016.

Briais, A., Patriat, P., Tapponnier, P. (1993) Updated interpretation of magnetic anomalies and sea floor spreading stages in the South China Sea : Implications for the Tertiary tectonics of SE Asia: *Journal of Geophysical Research*, v. 98, p. 6299–6328.

Burchfiel, B. C. (2004) New technology; new geological Challenges: *GSA Today*, v. 14 (2) , p. 4-10.

Charusiri, P., Imsamut, S., Zhuang, Z., Ampaiwan, T., Xu, X. (2006) Paleomagnetism of the earliest Cretaceous to early late Cretaceous sandstones, Khorat Group, Northeast Thailand: Implications for tectonic plate movement of the Indochina block: *Gondwana Research*, v. 9, p. 310-325.

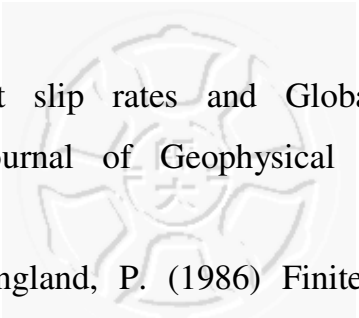
Chew, D.M., 2003. An Excel spreadsheet for finite strain analysis using the R_f/ϕ technique. *Computers & Geosciences*, v. 29, p. 795–799.

Crespi, J. M. (1986) Some guidelines for the practical application of Fry's method of strain analysis: *Journal of Structural Geology*, v. 8(7), p. 799-808.

Dewey, J. F., Burke, K. C. A. (1973) Tibetan, Variscan, and Precambrian basement reactivation : Products of continental collision: *Journal of Geology*, v. 81, p. 683-692.

Duong C. C., Yun. H. -S., and Cho, J. M. (2006) GPS measurements of horizontal deformation across the Lai Chau- Dien Bien (Dien Bien Phu) fault, in Northwest of Vietnam, 2002- 2004: *Earth Planets Space*, v. 58, p. 523-528. Tanner, D., C., Behrmann, J. H. (1997) Study of strain and partial-melt transfer in a banded migmatite: *Journal of Structural Geology*, v. 19(11), p. 1405-1417.

- England, P., and Houseman, G. (1986) Finite strain calculations of continental deformation, 2, Comparison with the India-Asia collision zone: *Journal of Geophys. Research*, v. 91, p. 3664-3676.
- Erslev, E. A. (1988) Normalized center-to-center strain analysis of packed aggregates: *Journal of Structural Geology*, v. 10(2), p. 201-209.
- Erslev, E. A., and Ge, H. (1990) Least-squares center-to-center and mean object ellipse fabric analysis: *Journal of Structural Geology*, v. 12 (8) , p. 1047-1059.
- Feigl, K. L., Duong C. C., Becker, M., Tran D. T., Neumann, K., and Nguyen Q. X. (2003) Insignificant horizontal strain across the Red River fault near Thac Ba, Vietnam from GPS measurements 1994-2000: EGS- AGU- EUG Joint Assembly.
- Flinn, D. (1978) Construction and computation of three dimensional progressive deformations: *Journal of Geology Society London*, v. 135, p. 291-305.
- Fry, N. (1979) Random point distributions and strain measurement in rocks: *Tectonophysics*, v. 60, p. 89-105.
- Genier, F., Epard, J. -L. (2007) The Fry method applied to an augen orthogneiss: Problems and results: *Journal of Structural Geology*, v. 29 (2) , p. 209-224.
- He, H. (1992) The discussion on the seismogenic structures in the wedge area of east Yunnan: *Seismology and Geology*, v. 14, p. 55-66.
- Holt, W. E., Terry, J. F. N., Wallace, C., and Haines, A. J. (1991) The active tectonics of the eastern Himalayan syntaxis and surrounding regions: *Journal of Geophysical Research*, v. 96, p. 14595-14632.
- Holt, W. E., Chamot-Rooke, N., Le Pichon, X., Haines, A. J., Shen-Tu, B., and Ren, J. (2000) Velocity field in Asia inferred from



Quaternary fault slip rates and Global Positioning System observations: *Journal of Geophysical Research*, v. 105, p. 19185-19209.

Houseman, G., and England, P. (1986) Finite strain calculations of continental deformation, 1, Method and general results for convergent zones: *Journal of Geophysical Research*, v.91, p. 3651-3663.

Houseman, G., and England, P. (1993) Crustal thickening versus lateral expulsion in the Indian-Asian continental collision: *Journal of Geophysical Research*, v. 98, p. 12233-12249.

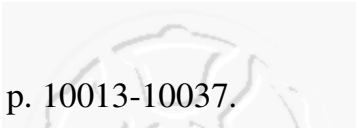
Houseman, G., and England, P. (1996) A lithospheric-thickening model for the Indo-Asia collision: collision: in Yin, A., and Harrison, M., *The Tectonic evolution of Asia*: Cambridge, Cambridge University Press, p. 1–17.

Hung, N. V., Vinh, H. Q. (2001) Moving characteristics of the Lai Chau-Dien Bien fault zone during Cenozoic: *Journal of Geology*, p. 65-77.

King, R. W., Shen, F., Burchfiel, B. C., Chen, Z., Li, Y., Liu, Y., Royden, L. H., Wang, E., Zhang, X., and Zhao, J. (1997) , Geodetic measurement of crustal motion in southwest China: *Geology*, v. 25, p. 1279-1282.

Lacassin, R., Scharer, U., Leloup, P. H., Arnaud, R., Tapponnier, P., Liu, X., and Zhang, L. (1996) Tertiary deformation and metamorphism of SE Tibet: The folded tiger-leap decollement of NW Yunnan, China: *Tectonics*, v. 15, p. 605-622.

Lacassin, R., Maluski, H., Leloup, P. H., Tapponnier, P., Chaiyan Hinthong, Kanchit Siribhakdi, Saengathit Chuaviroj, and Adul Charoenravit (1997) Tertiary diachronic extrusion and deformation of western Indochina: *Journal of Geophysical*



Research, v. 102, p. 10013-10037.

Lan, C.Y., Chung, S.L., Shen, J.J.S., Lo, C.H., Wang, P.L., Hoa, T.T., Thanh, H.H., Mertzman, S.A. (2000) Geochemical and Sr-Nd isotopic characteristics of granitic rocks from northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 18, p. 267–280.

Leloup, P. H., Lacassin, R., Tapponnier, P., Scharer, U., Zhong, D., Liu, Z., Zhang, L., Ji, S., and Phan, T. T. (1995) The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina: *Tectonophysics*, v. 251, p. 3-84.

Lindsay, M., Schoenbohm, B. C. B., Chen Liangzhong, Yin Jiyun (2006) Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper-crustal rotation, and lower-crustal flow: *Geological Society of America Bulletin*, v. 118, p. 672-688.

Malay Mukul, G. M. (1997) Finite strain and strain variation analysis in the Sheeprock Thrust Sheet: an internal thrust sheet in the Provo salient of the Sevier Fold-and-Thrust belt, Central Utah: *Journal of Structural Geology*, v. 20(4), p. 385-405.

McNaught, M. A. (2002) Estimating uncertainty in normalized Fry plots using a bootstrap approach: *Journal of Structural Geology*, v. 24, p. 311-322.

Mukul, M. (1998) A spatial statistics approach to the quantification of finite strain variation in penetratively deformed thrust sheets: An example from the Sheeprock Thrust Sheet, Sevier Fold-and-Thrust belt, Utah: *Journal of Structural Geology*, v. 20(4), p. 371-384.

Mulchrone, K. F. (2002) Application of Delaunay triangulation to the nearest neighbour method of strain analysis: *Journal of Structural Geology*, v. 25, p. 689-702.

Ramsay, J. G. (1967) *Folding and Fracturing of Rocks*: McGraw Hill,

New York, p. 568.

Ramsay, J. G., Huber, M. I. (1987) *The Techniques of Modern V.2: Folds and Fractures*, Academic Press, Structural Geology, London, 700p.

Roger, F., Calassou, S., Lancelot, J., Malavieille, J., Mattauer, M., Xu, Z., Hao, Z., and Hou, L. (1995) Miocene emplacement and deformation of the Konga Shan granite (Xianshui He fault zone, west Sichuan, China): Geodynamic implications: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 130, p. 201-216.

Royden, L. H., Burchfiel, B. C., King, R. W., Wang, E., Chen, Z. L., Shen, F., and Liu, Y. P. (1997) Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet: *Science*, v. 276(5313), p. 788-790.

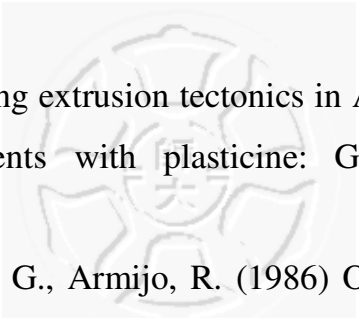
Sol, S., Meltzer, A., Bürgmann, R., van der Hilst, R. D., King, R., Chen, Z., Koons, P. O., Lev, E., Liu, Y. P., Zeitler, P. K., Zhang, X., Zhang, J., Zurek, B. (2007) Geodynamics of the southeastern Tibetan Plateau from seismic anisotropy and geodesy: *Geology*, v.35(6), p. 563-566.

Shen, J., Wang, Y., Song, F. (2003) Characteristics of the active Xiaojiang fault zone in Yunnan, China: A slip boundary for the southeastward escaping Sichuan-Yunnan Block of the Tibetan Plateau: *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 21, p. 1085-1096.

Takemoto, K., Halim, N., Otofujii, Y., Tri, T. V., De, L. V., Hada, S. (2005) New paleomagnetic constraints on the extrusion of Indochina: Late Cretaceous results from the Song Da terrane, northern Vietnam: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 229, p. 273– 285.

Tapponnier, P., Molnar, P. (1976) Slip-line field theory and large-scale continental tectonics: *Nature*, v. 264(5584), p. 319-324.

Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., Armijo, R., and Cobbold, P.

- 
- (1982) Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine: *Geology*, v. 10(12), p. 611-616.
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Armijo, R. (1986) On the mechanics of the collision between India and Asia, in Coward, M. P., and Ries, A. C., eds., *Collision tectonics: Geological Society of London Special Publication*, v. 19, p. 115–157.
- Waldron, J. W. F., and Wallace, K. D. (2007) Objective fitting of ellipses in the centre-to-centre (Fry) method of strain analysis: *Journal of Structural Geology*, v. 29, p. 1430-1444.
- Wang, E., Burchfiel, B. C., Royden, L. H., Chen, L., Chen, J., Li, W., and Chen, Z. (1998) Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali Fault System of Southwestern Sichuan and Central Yunnan, China: *Geological Society of America Special paper*, 327, 108pp.
- Wang, J., Yin, A., Harrison T. M. (2001) A tectonic model for Cenozoic igneous activities in the eastern Indo-Asian collisional zone: *Journal of Earth Planetary Science Letters*, v. 188, p. 123-133.
- Wang, S., Fan, C., Wang, G., Wang, E. (2008) Late Cenozoic deformation along the northwestern continuation of the Xianshuihe fault system, Eastern Tibetan Plateau: *Geological Society of America Bulletin*, v.120, p. 312-327.
- Zhang, P. Z., Shen, Z., Wang, M., Gan, W. J., Bürgmann, R., Molnar, P. (2004) Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data: *Geology*, v.32(9), p. 809-812.