

國立臺灣大學理學院地質科學系



碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master's Thesis

利用 InSAR 探討伊朗法爾斯弧

鹽貫入體造成之地表變形與構造活動

Using InSAR to Investigate Surface Deformation and Active  
Structures Caused by Salt Diapirs in the Fars Arc, Iran

尤琇琳

Hsiu-Lin Yu

指導教授：胡植慶 博士

Advisor: Jyr-Ching Hu, Ph.D.

中華民國 113 年 1 月

January, 2024



國立臺灣大學碩士學位論文  
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE  
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

利用 InSAR 探討伊朗法爾斯弧

鹽貫入體造成之地表變形與構造活動

Using InSAR to Investigate Surface Deformation and Active  
Structures Caused by Salt Diapirs in The Fars Arc, Iran

本論文係尤琇琳君 (R09224214) 在國立臺灣大學地質科學系研究所完成之碩士學位論文，於民國 113 年 1 月 26 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

口試委員：

胡植慶

(指導教授 Advisor)

謝嘉聲

蔡昇清

黃鐘

## 誌謝



回顧碩士三年半的求學生涯，這篇論文得以完成受惠於太多人的幫助，首先要感謝胡植慶老師的指導與建議，感謝老師不厭其煩幫我修改我的論文！雖然老師經常佈置一些艱困的任務，但過程中確實充實了我的能力與技巧。感謝口試委員謝嘉聲博士、蔡旻倩博士以及黃鐘博士細心的批註與建議，你們的建議使這本論文修改得更加完善。

感謝大地測量與遙測實驗室的夥伴們，在研究受阻時給予討論與精進的空間。謝謝俊諺解決了困擾我已久的電腦設備問題以及提供研究上的建議，每每偷能提出精闢並且犀利的見解。謝謝雅琳為我們處理大大小小的行政瑣事，謝謝曹博及婉玲學姊給予的意見，以及謝謝柏鈞、筠庭陪我一起奮鬥與討論，給我不少靈感與啟發，在為了研究數據忙到焦頭爛而時能有與你們聊天討論的喘息空間。感謝巧慈給我加油鼓勵，百忙之中還替我看論文跟投影片，也希望妳的研究生涯一片坦途。

感謝楠煙、竺寒、沉沉、育瑄，雖然妳們並非地質專業，卻依舊不厭其煩地聽我興致勃勃的科普，有你們的無條件支持，是我繼續前進的動力。感謝我的十年好友阿湯，陪我嘻笑怒罵，陪我從漫長的求學生涯中畢業，在我需要的時候及時給予幫助，希望未來的路途中友誼長存。

最後我要感謝我的家人，在我陷入低潮時給我經濟、精神與生理上的支持，讓我擺脫茫茫無助的恐慌，始終相信我能抵達終點，讓我毫無後顧之憂的去達成我的目標，雖然不能理解我的研究內容，卻認為我所做的一切都意義非凡。而我幸運得益於這份愛護，如今能夠順利完成學業，我的家人將是最大的功臣。

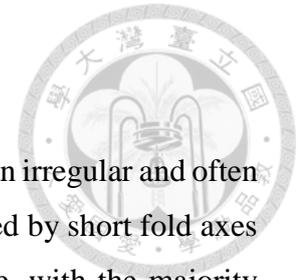
## 摘要



位於札格羅斯東南段的法爾斯弧為一個向南擴展的褶皺帶，與板塊碰撞相關的褶皺呈不規則狀並經常扭曲變形，褶皺軸短且兩翼不對稱。此區的斷層發育鮮少破裂至地表，且絕大多數都以盲斷層的形勢發生錯動，並且大地震好發於海拔 1250 公尺以下的簡單褶皺帶。埃迪卡拉紀至早寒武紀時期沉積的霍爾木茲鹽與晚始新世至早中新世時期沉積的法爾斯鹽影響鄰近波斯灣地區的地表形變，形成眾多衝出地表的鹽貫入體。鹽體的活動從早古生代延續至今，在霍爾木茲鹽沉積後不久就開始活動，這些早就存在的鹽貫入體影響後來沉積的地層與褶皺的走向和變形趨勢。本研究以法爾斯弧東南角為例，藉由合成孔徑雷達技術監測自 2020 年 1 月至 2022 年 12 月之地表變形，透過 GMTSAR 系統對衛星影像進行相位解纏，分解升軌與降軌影像所得之時間序列，拆解出垂直向與東西向的結果，並同時透過地震資料、時間序列數據分析構造的變形速度，藉此分析南波斯灣前陸盆地中鹽貫入體的變形行為。本研究結果顯示鹽貫入體波爾在時間序列中具有週期性變化，應是雨季造成的現象，是本研究區域內最為活躍的鹽貫入體。加希的圍岩活動性比中央鹽庫高，中心垂直抬升速度 12.88 mm/yr，推測其仍具有穩定的活動性。霍爾木茲具有受壓後向四周擴張的行為，並形成異地鹽，溢出的鹽翼下部存在兩條生長斷層，先是下沉之後再抬升，將鹽翼向上推擠，應是使東側抬升速度增加的主因。拉拉克具有平均約 25.83 mm/yr 的向東速度，變形應由鹽貫入體中央鹽庫的流動行為主控。本研究區域的鹽貫入體因新生代的擠壓事件已經發展出異地鹽翼的後期構造，造成本區的鹽貫入體在水平方向上存在變形差異，過去研究著重討論鹽貫入體的垂直變形行為，本研究認為應該考慮到後期構造造成鹽貫入體的側向流動行為。

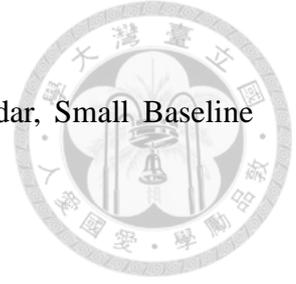
關鍵字：鹽貫入體、合成孔徑雷達技術、小基線子集法、札格羅斯山脈、南波斯灣

## Abstract



The Fars arc in the southeastern segment of the Zagros exhibits an irregular and often distorted pattern of folds associated with plate collision, characterized by short fold axes and asymmetric limbs. Faults in this region rarely reach the surface, with the majority exhibiting blind thrust faulting, and earthquakes are more common in Simple Fold Belts (SFB) below an elevation of 1250 meters. The deposition of Hormuz Salt during the Ediacaran to Early Cambrian and Fars Salt during the Late Miocene to Early Middle Miocene has influenced surface deformation in the neighboring Persian Gulf region, resulting in numerous salt diapirs penetrating the surface. The activity of these salt bodies has persisted from the Early Paleozoic to the present, initiating shortly after the deposition of Hormuz Salt. These pre-existing salt diapirs, active for a long time, have influenced the orientation and deformation trends of subsequently deposited strata and folds. Using the southeastern corner of the Fars arc as a case study, this research employs Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) to monitor surface deformation from January 2020 to December 2022. The GMTSAR software is used for the analysis of phase unwrapping in satellite images, and time series analysis of the resulting ascending and descending images is conducted to separate vertical and east-west components. Additionally, structural deformation rates are analyzed using seismic data and time series data to study the deformation behavior of salt diapirs in the South Persian Gulf Foreland Basin. The results indicate periodic variations in the time series of salt diapir Pol, making it the most active diapir in the study area. Gachin's surrounding rock activity is higher than the central salt dome, with a vertical uplift rate of 12.88 mm/yr, suggesting stable activity. Hormuz demonstrates radial expansion after compression, forming allochthonous salt. Two growth faults exist beneath the lower part of the salt wing, sinking first and then uplifting, pushing the salt wing upward and contributing to the increased uplift rate on the eastern side. Larak has an average eastward velocity of about 25.83 mm/yr, indicating that the deformation is primarily controlled by the flow behavior of the central salt reservoir in the salt diapir. The salt diapirs in this study area have developed late-stage structures with allochthonous salt wings due to Neogene compressional events, leading to horizontal deformation differences in these salt diapirs. While previous studies focused on vertical deformation, this study emphasizes considering lateral flow behavior caused by late-stage structures in salt diapirs.

*Keywords:* Salt diapir, Interferometric Synthetic Aperture Radar, Small Baseline Subset, Zagros Mountains, South Persian Gulf.



# 目次



口試委員會審定書 .....	i
誌謝 .....	ii
摘要 .....	iii
Abstract.....	iv
目次 .....	vi
圖次 .....	ix
表次 .....	xviii
<b>第 1 章 緒論.....</b>	<b>1</b>
1.1 前言 .....	1
1.2 前人研究 .....	3
1.2.1 札格羅斯山脈變形模式.....	3
1.2.2 法爾斯弧的變形及地表構造.....	4
1.2.3 鹽貫入體的演化機制.....	7
1.2.4 地質剖面.....	10
1.2.5 InSAR 對地表變形的應用.....	12
<b>第 2 章 地質背景與構造 .....</b>	<b>16</b>
2.1 演化歷史與造山帶 .....	16
2.1.1 被動大陸邊緣時期.....	16
2.1.2 古特提斯洋閉合.....	17
2.1.3 新特提斯洋擴張.....	17



2.1.4	新特提斯洋閉合與造山運動.....	17
2.1.5	造山帶分區.....	20
2.2	研究區域.....	22
2.2.1	地層序列.....	22
2.2.2	鹽貫入體的型態.....	25
2.2.3	研究區域構造特徵.....	29
<b>第 3 章</b>	<b>研究方法與資料處理 .....</b>	<b>32</b>
3.1	衛星遙測技術.....	32
3.1.1	差分干涉法 (D-InSAR) .....	32
3.1.2	合成孔徑雷達.....	35
3.1.3	影響成像的因素.....	37
3.2	資料處理軟體.....	39
3.2.1	小基線子集法時間序列處理.....	40
3.2.2	大氣校正.....	41
3.3	處理流程.....	42
3.4	使用資料.....	45
<b>第 4 章</b>	<b>研究成果.....</b>	<b>48</b>
4.1	視衛星方向速度場與 2.5D 速度場.....	49
4.2	速度場剖面與累積變形量.....	51
4.2.1	A 區：波爾 (Pol) 及加希 (Gachin) .....	51
4.2.2	B 區：霍爾木茲 (Hormuz) 及拉拉克 (Larak) .....	58
4.2.3	C 區：蓋維辛 (Gaverzin) 及亨賈姆 (Hengam) .....	66

<b>第 5 章</b>	<b>討論</b> .....	<b>69</b>
5.1	A 區：波爾 (Pol)、加希 (Gachin) .....	69
5.2	B 區：霍爾木茲 (Hormuz)、拉拉克 (Larak) .....	74
5.3	C 區：蓋維辛 (Gaverzin)、亨賈姆 (Hengam) .....	78
<b>第 6 章</b>	<b>結論</b> .....	<b>79</b>
參考文獻	.....	81
附錄	.....	87



## 圖次



- 圖 1-1 伊朗札格羅斯速度場 (修改自 Khorrami et al., 2019)。阿拉伯板塊斜向碰撞歐亞板塊，聚合速度由東南至西北遞減(以歐亞板塊為參考座標)。黃色箭頭：Reilinger et al. (2006)、綠色箭頭：Frohling et al. (2016)、藍色箭頭：Raeesi et al. (2017)、紅色箭頭：Khorrami et al. (2019) 將速度場轉換至 IPGN 參考框架。.....2
- 圖 1-2 伊朗地形與構造線圖。Kirkuk Arc 為基爾庫克弧凹；Lorestan Embayment 為洛雷斯坦弧凸；Dezful Embayment 為迪茲富勒弧凹；Fars Arc 為法爾斯弧凸；ZDF 為札格羅斯變形前緣 (Zagros Deformation Front)；MFF 為山前斷層 (Mountain Front Fault)；HZF 為高札格羅斯斷層 (High Zagros Fault)；MZF 為札格羅斯主要斷層 (Main Zagros Fault)；由西南至東北平行山脈的分區依序為簡單褶皺帶 (Simply Folded Belt)、疊瓦帶 (Zagros imbricate zone)、薩南達季—席爾詹區 (Sanandaj-Sirjan zone)、烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧 (Urumieh-Dokhtar Arc)。.....3
- 圖 1-3 伊朗歷史地震分佈圖 (修改自 Edey et al., 2019)。(a) 1900 至 2000 間地震矩規模大於 6 的地震分佈圖，A 代表阿爾伯茲 (Alborz) 地區，TIP 代表土耳其—伊朗高原，Z 為札格羅斯地區 (b) 札格羅斯地山脈地震分佈與震源機制解，紅線為海拔 1250 公尺等高線，藍色虛線為變形前緣，MZRF 為札格羅斯主要逆衝斷層 (Main Zagros Reverse Fault)，IZ 為伊澤斷層 (Izeh Fault)，K 為卡澤倫斷層 (Kazerun Fault)，OL 為阿曼線 (Oman line)；卡澤倫斷層與阿曼線為法爾斯的構造邊界。.....6

- 圖 1-4 東西法爾斯動力學資料比較圖(摘自 Edey et al., 2019)。藍色箭頭為 GPS 數據方向，橘色箭頭為正交褶皺軸方向，白色箭頭為地震滑移向量，紅色箭頭為大地應力軸方向。 .....7
- 圖 1-5 霍爾木茲鹽分布圖(摘自 Motamedia and Gharabeigli, 2019)。白色虛線框起的半透明區域為霍爾木茲鹽的分布範圍。Dezful Embayment 為迪茲富勒弧，Fars Province 為法爾斯省，是霍爾木茲鹽主要的分布區域。 .9
- 圖 1-6 鹽構造示意圖(摘自 Hassanpour et al., 2019)。Salt wing 為鹽翼、Feeder 為鹽供給通道、Flaring diapir 為火焰狀貫入體、Salt keel 為供給通道關閉後鹽體下部向下尖滅的柱狀鹽構造。 .....9
- 圖 1-7 東札格羅斯與南波斯灣構造圖(修改自 Jahani et al., 2009)。標示出札格羅斯褶皺逆衝帶前緣與褶皺軸線分布；斜線區為阿曼山脈延伸出的中中新世不整合帶；虛線區為法爾斯鹽層分布區域；紅色為霍爾木茲鹽凸出地表的鹽丘；紅色線段為主要斷層構造線，實現出露地表而虛線深埋地底；藍線為地質剖面線。 ..... 11
- 圖 1-8 地質剖面圖(修改自 Jahani et al., 2009)。(a) 為切過喀什姆島南方的 A 剖面 (b) 為切過喀什姆島北方的 B 剖面。黑線為札格羅斯變形前緣。黑色粗箭頭標示縮短的情況。 .....12
- 圖 1-9 喀什姆島地震序列地震分佈圖與斷層模型與餘震分布剖面圖(修改自 Nissen et al., 2010)。(a) 喀什姆島的 Landsat 影像，褶皺軸以虛線標示 (b) 地震序列的地震震源機制(2005 年 11 月至 2009 年 7 月)和餘震，黑色海灘球是最大的九個事件的體波模型；灰色海灘球是三個較小事件的全球 CMT 機制，星號是第一次地震的震央 (c) 模型斷層面 271105A

	與 X-X'線上的餘震投影 (d) 模型斷層面 271105B 與 X-Y 線上的餘震投影 (e) 模型斷層面 271105C 到 X-Z 線上的餘震投影。.....	14
圖 1-10	2005/11/27 喀什姆島地震干涉環與斷層模型修正 (修改自 Nissen et al., 2010)。(a)(b) 經過斷層模型 271105C 修正後的干涉環 (c)(d) 模型 271105C 修正後的殘差。黑色虛線為模型模擬出的斷層面位置。.....	15
圖 2-1	札格羅斯地區自二疊紀至古新世的構造演化 (修改自 Liu et al., 2018)。 .....	18
圖 2-2	札格羅斯地區自晚白堊紀至始新世碰撞造山的構造演化 (修改自 Alavi, 2007)。ZFB 為札格羅斯前陸盆地 (Zagros Foreland Basin), OFB 為阿曼前陸盆地 (Oman Foreland Basin), UDMA 為烏爾米耶—杜赫塔爾火山帶 (Urumieh-Dokhtar Magmatic Assemblage), AMA 為阿爾伯茲火山帶 (Alborz Magmatic Assemblage), P.G. 為波斯灣 (Persian Gulf), R.S. 為紅海 (Red Sea), C.S. 為裏海 (Caspian Sea), B.S. 為黑海 (Black Sea)。 .....	19
圖 2-3	伊朗地質分區圖 (修改自 K.Motaghi et al., 2017)。SSZ: 薩南達季—席爾詹區 (Sanandaj-Sirjan zone); UDMA: 烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧 (Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage, UDMA)。 .....	21
圖 2-4	東南法爾斯沿岸地層與年代對照表 (修改自 Motamedia and Gharabeigli, 2019)。 .....	25
圖 2-5	東法爾斯鹽貫入體型態與分布圖 (摘自 Jahani et al., 2007)。紅框處為本研究範圍的鹽貫入體。 .....	27
圖 2-6	阿巴斯港附近地質圖 (修改自伊朗國家石油公司 250 萬分之一地質圖)。	



.....28

圖 2-7 法爾斯蒸發鹽岩相圖 (摘自 M. Snidero et al., 2020)。(a) 柱狀圖為簡易的地層厚度標示，紫紅色區域代表法爾斯鹽的分布情形。(b) 東法爾斯鹽盆地邊緣的西南——東北向地震剖面，並著重強調法爾斯鹽層在 Asmari 層上的幾何結構，左為原始震測剖面，右為地層著色標示後。法爾斯鹽橫向朝東北方尖滅。 .....30

圖 2-8 阿巴斯港附近構造線與鹽貫入體分布圖 (修改自 Talbot et al., 2009)。白色圓圈為鹽貫入體所在位置，紅色線段為背斜軸所在位置，黃色線段為左移斷層所在位置。本研究將著重討論波爾 (圖中編號 17)、加希 (圖中編號 12)、霍爾木茲 (圖中標號 10)、拉拉克 (圖中編號 11)、亨賈姆 (圖中編號 15) 以及未出露地表的盲鹽丘蓋維辛。 .....31

圖 3-1 差分干涉技術 (修改自 Hanssen, 2001)。A1、A2 為衛星拍攝前後的空間位置，B 為彼此間的基線長度，H 為衛星與地面的距離，y 為衛星與測量目標間的水平距離， $\theta$  為衛星視傾角，r 為第一次測量時衛星與測量目標的距離， $r+\delta$  為第二次測量時衛星與測量目標的距離， $\alpha$  為基線與水平面的夾角。 .....34

圖 3-2 重複軌道干涉示意圖 (修改自 Hanssen, 2001)。B 為基線，H 為衛星與地面的垂直距離，Z 為目標物的高程， $r_1$ 、 $r_2$  為先後觀測的測距， $\theta$  為衛星視傾角， $\alpha$  為基線與水平面夾角。 .....35

圖 3-3 合成天線陣列示意圖 (修改自黃孟涵，2006)。衛星在飛行的同時不斷發射與回收雷達波，P1、P2 為雷達發射與接收訊號的位置， $\theta$  為衛星的視傾角。 .....37

圖 3-4	雷達成像的幾何變化 (修改自 Lillesand et al., 2015)。	38
圖 3-5	雷達波接觸不同材質的回波模式示意圖。(a) 雷達波接觸水體產生全反射 (b) 雷達波接觸直角目標物產生兩次全反射 (c) 雷達波接觸凹凸不平的反射面產生漫射 (d) 雷達波接觸植被產生漫射。	39
圖 3-6	小基線反演模型與矩陣 (修改自 Schmidt and Burgmann, 2003)。	41
圖 3-7	估計平均大氣相位延遲的模型 (摘自 Tymofyeyeva and Fialko, 2015)。	42
圖 3-8	差分干涉處理流程圖。先進行影像愈處理，而後採取差分干涉獲取變形資訊，再將所得的變形數據進行解饒與座標轉換。	44
圖 3-9	視衛星方向地表變形之示意圖(修改自 Fuhrmann and Garthwaite, 2019)。	44
圖 3-10	使用的 Sentinel-1A 衛星影像覆蓋範圍示意圖。紅色框線為研究區域，綠色框線為升軌編號 57，藍色框線為降軌編號 166。紅色區域為研究區域內已出露地表之鹽貫入體，灰色區域為深埋於地底之鹽貫入體蓋維辛 (Gaverzin)。紅色實線為主要札格羅斯褶皺斷層，紅色虛線為高札格羅斯斷層，黑色虛線走向滑移斷層，分別穿過本研究區域的鹽貫入體波爾 (Pol)、加希 (Gachin)、霍爾木茲 (Hormuz) 及拉拉克 (Larak)。穿過波爾及加希的斷層為左滑斷層；穿過霍爾木茲及拉拉克的斷層為右滑斷層。	46
圖 3-11	升軌影像中干涉對之基線配對圖。紅色標註的點為 2021 年 6 月 22 日之影像，設為參考點。	47
圖 3-12	降軌影像中干涉對之基線配對圖。紅色標註的點為 2021 年 6 月 18 日之	



影像，設為參考點。 .....47

圖 4-1 升軌視衛星方向變形速度場圖。黃色星號為參考點測站 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)。正值為接近衛星，負值為遠離衛星。黑色箭頭標示衛星飛行與側視方向。 .....49

圖 4-2 降軌視衛星方向變形速度場圖。黃色星號為參考點測站 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)。正值為接近衛星，負值為遠離衛星。黑色箭頭標示衛星飛行與側視方向。 .....50

圖 4-3 東西向速度場。正值向東，負值向西。黃色星號為參考點測站 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)。 .....50

圖 4-4 垂直向速度場。正值向抬升，負值沉降。黃色星號為參考點測站 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)。 .....51

圖 4-5 A 區東西向速度場圖與剖面線。紅色圓點為時間序列的取點位置。紅色星號為測站位置。紅色圓圈標示時間序列取點位置與編號。 .....53

圖 4-6 A 區垂直向速度場圖與剖面線。紅色圓點為時間序列的取點位置。紅色星號為測站位置。紅色圓圈標示時間序列取點位置與編號。 .....53

圖 4-7 波爾北段速度場剖面。左圖為垂直走向的 aa'剖面，右圖為西南—東北向的 bb'剖面。紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。 .....54

圖 4-8 波爾南段速度場剖面。左圖為垂直走向的 cc'剖面，右圖為東南—西北向的 dd'剖面。紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。 .....54

圖 4-9 巴文背斜 (Bandar Anticline) 垂直背斜軸的 ee'剖面。 .....55

圖 4-10 加希速度剖面。左圖為東西向的 ff'剖面，右圖為南北向的 gg'剖面。紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。 .....55

圖 4-11	A 區 1 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.7218012609, 27.0863629691)。.....56
圖 4-12	A 區 2 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.7302442146, 27.0581640938)。.....56
圖 4-13	A 區 3 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.6793045924, 27.0436246242)。.....57
圖 4-14	A 區 4 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.6494823046, 27.0783377806)。.....57
圖 4-15	A 區 5 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.9233846925, 27.0960512004)。.....58
圖 4-16	A 區 6 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.936988, 27.1244686283)。.....58
圖 4-17	B 區東西向速度場圖與剖面線。紅色圓點為時間序列的取點位置與編號。 .....60
圖 4-18	B 區垂直向速度場圖與剖面線。紅色圓點為時間序列的取點位置與編號。 .....61
圖 4-19	霍爾木茲速度場剖面。左圖為東西的 hh'剖面，右圖為南北向的 ll'剖面。 紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。.....62
圖 4-20	拉拉克速度場剖面。左圖為東西的 jj'剖面，右圖為南北向的 kk'剖面。 紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。.....62
圖 4-21	B 區 1 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.461891189, 27.0668274313)。.....63

圖 4-22	B 區 2 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.4811808896, 27.0668262448)。.....63
圖 4-23	B 區 3 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.457174, 27.0379976327)。.....64
圖 4-24	B 區 4 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.457174, 27.0866508767)。.....64
圖 4-25	B 區 5 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.3540671047, 26.8690357038)。.....65
圖 4-26	B 區 6 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.3737262165, 26.8690361978)。.....65
圖 4-27	B 區 7 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.354851, 26.8512235498)。.....66
圖 4-28	C 區東西向速度場圖。.....67
圖 4-29	C 區垂直向速度場圖。.....68
圖 5-1	鹽貫入體波爾的鹽冰川示意圖 (影像來源: Google Earth)。.....71
圖 5-2	波爾北段與南段於 2020 至 2022 年間升軌與降軌之累積變形量。藍色為升軌，紅色為降軌。.....71
圖 5-3	阿巴斯港平均月累積降雨量(資料來源: © WeatherSpark.com)。使用美國太空總署 NASA 的 MERRA-2 現代時期回顧性分析之結果，以 50 公里的網格重建全球每小時的歷史天氣。.....72
圖 5-4	加希衛星影像 (影像來源: Google Earth)。紅色線段為鹽與圍岩接觸帶。.....72

圖 5-5	波爾的演化過程與背斜被鹽拱起的示意圖（修改自 Talbot et al., 2009）。 藍色箭頭為底部鹽流動方向，紅色箭頭為背斜軸抬升。.....	73
圖 5-6	霍爾木茲斷層帶震測剖面與鹽冰川示意圖。（修改自 Jahani et al., 2009）。 .....	76
圖 5-7	（a）霍爾木茲於 google Earth 中的影像，紅線為本研究速度場剖面，黑 線為前人之震測剖面（b）鹽丘東側的震測剖面與速度場剖面對照圖（修 改自 Hassanpour et al, 2019）。.....	76
圖 5-8	褶皺軸頂部張裂示意圖。.....	77
圖 5-9	（a）拉拉克於 google Earth 中的影像；（b）正切拉拉克的震測剖面圖與 速度剖面對照圖（修改自 Hassanpour et al, 2019）。.....	77
圖 5-10	拉拉克的演化過程示意圖（修改自 Hassanpour et al, 2019）。.....	78

# 表次



表 1	雷達波段表 (修改自何世紀, 2006)。	36
表 2	本研究所使用 Sentinel-1A 的 SAR 影像參數	45
附表 1	升軌影像之對應日期。	87
附表 2	降軌影像之對應日期。	88
附表 3	升軌干涉對與垂直基線差。	89
附表 4	降軌干涉對與垂直基線差。	93

# 第1章 緒論



## 1.1 前言

中新世早期，新特提斯洋板塊 (Neo-Tethys) 隱沒到歐亞板塊之下，阿拉伯板塊與歐亞板塊互相碰撞並形成綿延超過 2000 公里的札格羅斯山脈，呈現西北—東南的走向，北至土耳其、南至莫克蘭過度帶 (Makran)，由於板塊斜向碰撞的緣故，聚合速度由東南至西北遞減，在札格羅斯東南部的速度約 22 mm/yr，阿拉伯板塊向正北碰撞聚合，至札格羅斯西北部速度降至 18 mm/yr，方向順時針轉至向東北聚合 (圖 1-1)。

褶皺逆衝帶中發育了許多平行的褶皺與逆衝斷層，此區為簡單褶皺帶 (Simply Folded Belt, SFB)，有利於油氣的儲存，因此是伊朗重要的油田，使伊朗成為世界重要產油國之一。札格羅斯東南方的法爾斯弧 (Fars Arc) 為一個簡單褶皺帶向南擴展弧凸 (圖 1-2)，與板塊碰撞相關的褶皺呈不規則狀並經常扭曲變形，褶皺帶長可達一百公里、寬約八至十公里。此區的鹽貫入體分布極為廣泛，埃迪卡拉至早寒武紀時期沉積的霍爾木茲鹽 (Hormuz salt) 與晚始新世至早中新世時期沉積的法爾斯鹽 (Fars salt) 影響鄰近波斯灣地區的地表形變。鹽體的活動從早古生代延續至今，即在霍爾木茲鹽沉積後不久就開始活動，這些早就存在的鹽貫入體 (salt diapir) 影響後來沉積的地層與褶皺的走向和變形趨勢。

由於大部分位於法爾斯弧的鹽貫入體在札格羅斯山脈造山前就已經存在，受到板塊擠壓後已產生扭曲變形，不利於探討鹽貫入體的形成機制與變形行為，因此本研究以法爾斯弧的東南角的南波斯灣為例，其位在受到干擾較小並且鹽丘構造保存良好的前陸盆地，藉由合成孔徑雷達技術監測地表變形，利用差分干涉影像進行速度場分析，透過小基線計算地表的變形趨勢，並藉由地震資料、震測影像、形態學分類、視衛星數據研究構造的變形速度，由此分析鹽貫入體的變形特性，以及與新生代後期構造如何影響其變形模式。

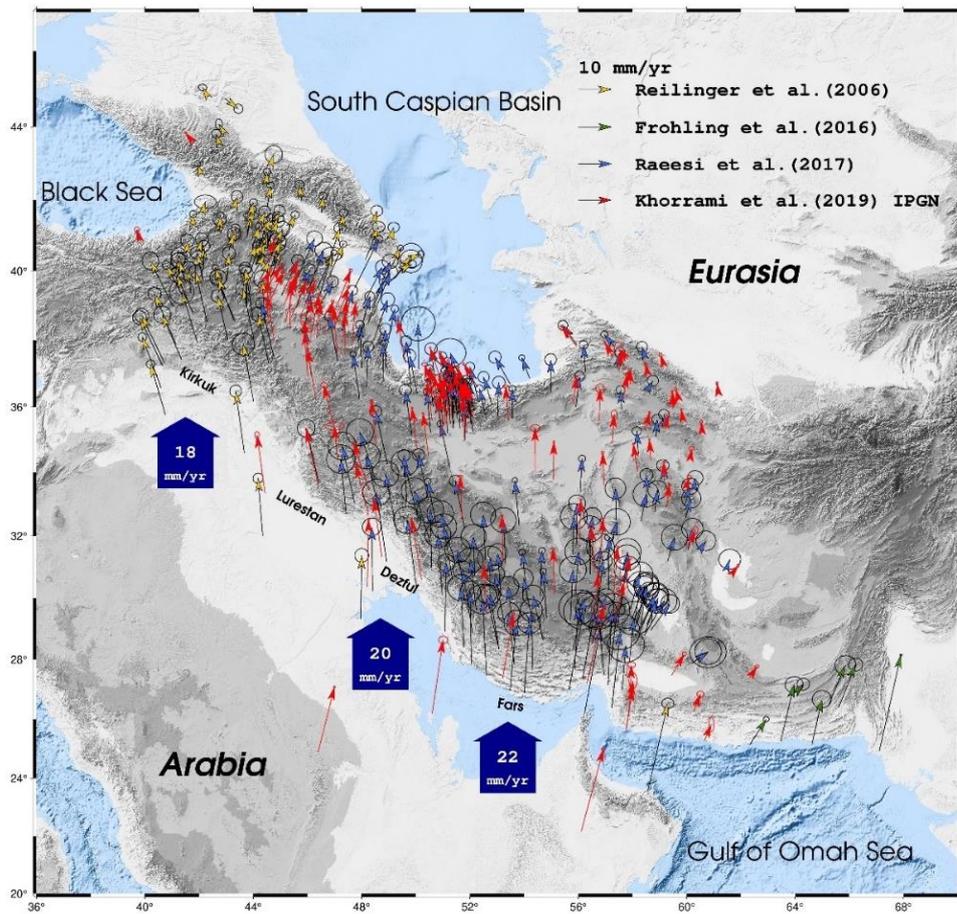


圖 1-1 伊朗札格羅斯速度場 (修改自 Khorrami et al., 2019)。阿拉伯板塊斜向碰撞歐亞板塊，聚合速度由東南至西北遞減 (以歐亞板塊為參考座標)。黃色箭頭：Reilinger et al. (2006)、綠色箭頭：Frohling et al. (2016)、藍色箭頭：Raeesi et al. (2017)、紅色箭頭：Khorrami et al. (2019) 將速度場轉換至 IPGN 參考框架。

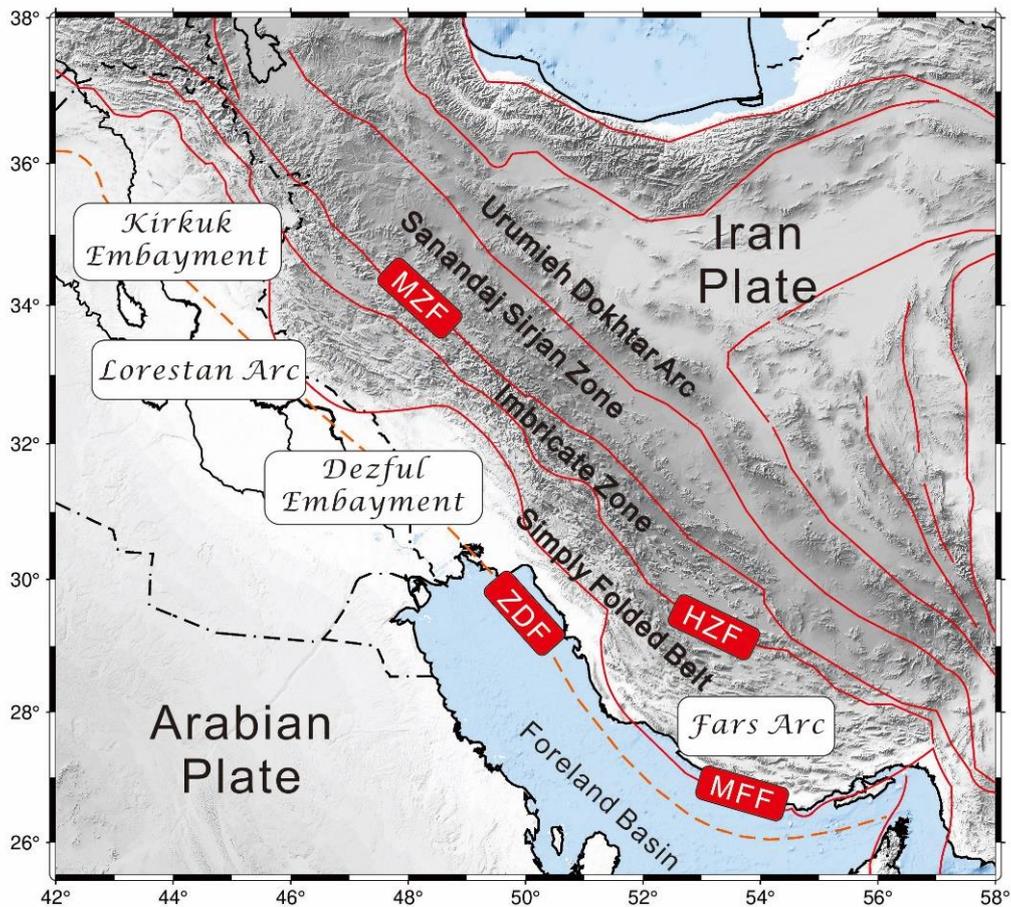


圖 1-2 伊朗地形與構造線圖。Kirkuk Arc 為基爾庫克弧凹；Lorestan Embayment 為洛雷斯坦弧凸；Dezful Embayment 為迪茲富勒弧凹；Fars Arc 為法爾斯弧凸；ZDF 為札格羅斯變形前緣 (Zagros Deformation Front)；MFF 為山前斷層 (Mountain Front Fault)；HZF 為高札格羅斯斷層 (High Zagros Fault)；MZF 為札格羅斯主要斷層 (Main Zagros Fault)；由西南至東北平行山脈的分區依序為簡單褶皺帶 (Simply Folded Belt)、疊瓦帶 (Zagros imbricate zone)、薩南達季—席爾詹區 (Sanandaj-Sirjan zone)、烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧 (Urumieh-Dokhtar Arc)。

## 1.2 前人研究

### 1.2.1 札格羅斯山脈變形模式

根據 GPS 數據顯示，札格羅斯的碰撞仍然活躍，阿拉伯板塊向東北聚合速度大約每年  $20 \pm 2$  mm (圖 1-1)，由於板塊斜向碰撞的緣故，速度由東南至西北遞減，碰撞角度大約為 60 度，因此具有右旋的分量，促使右移斷層的發育，而另一



個分量垂直札格羅斯山脈，使札格羅斯受擠壓變形。

早期研究認為札格羅斯山脈的造山模式應為薄皮構造 (Thin-skin)，地層沿著基底滑脫面滑移，並且在淺部地層呈現拱彎形褶皺，然而透過地震資料分析發現，許多大地震好發於基盤中，以及透過地化分析，發現霍爾木茲鹽中夾雜著屬於基盤的火成岩碎屑，代表基盤受到斷層影響而破碎，因此基盤也屬於札格羅斯造山的一環 (Alavi, 2007)。透過對基盤受斷層破裂的研究，Verges et al. (2011) 提出札格羅斯山脈應該是屬於薄皮與厚皮同時作用的造山模式，薄皮構造影響沉積層中的滑脫褶皺 (detachment folds)，而基盤的破裂與變形則屬於厚皮構造。

### 1.2.2 法爾斯弧的變形及地表構造

法爾斯弧位於札格羅斯造山帶最南端，範圍是從卡澤倫斷層 (Kazerun) 以東到莫克蘭過度帶 (Makran) 之間大約 700 公里寬的區域，與莫克蘭地區以阿曼線 (Oman line, OL) 為界，位於三個地質系統的交會處：札格羅斯山脈、莫克蘭增生楔 (Makran accretionary prism)、阿曼山脈。在卡澤倫斷層以東分佈著許多右移斷層，斷層通常長約數十公里而且不連續。透過地震資料可知在簡單褶皺帶中的斷層多以盲斷層的形式存在，斷層鮮少破裂至地表，並且地震活動多發生於海拔 1250 公尺以下的區域 (Edey et al., 2019) (圖 1-3)。

法爾斯弧向南凸出，以  $53^{\circ}\text{E}$  為界，以西的地區 GPS 向量、地震滑動向量、褶皺軸趨勢的正交方向皆朝向大約  $218^{\circ}$  對齊，以東的地區只有 GPS 向量朝向  $208^{\circ}$ ，其他數據皆朝向  $190^{\circ}$  (圖 1-4)。Edey et al. (2019) 認為東法爾斯的斷層塊 (fault blocks) 主要以逆時針旋轉，長約 20 至 40 公里，而西法爾斯的順時針旋轉式主要發生在右移斷層上——例如卡澤倫斷層，多條右移斷層錯動促使塊體旋轉。然而東法爾斯卻沒有找到與西法爾斯對應的左移斷層以解釋塊體逆時針旋轉，或是左移斷層並不如西法爾斯的右移斷層那般活躍。法爾斯的褶皺具有特殊的縱橫比，即半波長與軸向長度的比值，褶皺軸短、排列緊湊且呈現不規則走向，經常會扭曲成「之」字形 (Jahani et al., 2009)。

由於法爾斯東西兩側存在構造邊界，即阿曼線 (Oman line, OL) 及卡澤倫斷層 (Kazerun)，基底結構限制了法爾斯弧水平向發展，再加上伊朗高原海拔超過 2000 公尺，存在著重力位能 (gravitational potential energy)，考慮到海拔 1250 公尺以下

的簡單褶皺帶小規模地震不斷，此處的地殼相對軟弱，軟弱的地殼有助於重力傳播，而且法爾斯東西側邊緣皆存在構造邊界，限制弧的橫向發展，因此法爾斯弧有向前陸盆地擴展的趨勢，弧逐漸向南凸出，隨著時間推移，法爾斯弧會越來越向南彎曲。

阿拉伯板塊於晚前寒武紀時期與非洲板塊的東北緣發生碰撞 (Beydoun, 1991)，而此次碰撞事件導致阿拉伯板塊形成一系列南北走向的構造，這些構造在晚前寒武紀一早寒武紀時期形成南北走向的裂谷，並控制了阿拉伯板塊北部區域霍爾木茲鹽 (Hormuz salt series) 分布的範圍 (圖 1-5)。

與其他地區相比，法爾斯地區地表具有眾多鹽丘與鹽穴，從北部的縫合帶一路延伸到南部的波斯灣。霍爾木茲鹽系列也被認為是法爾斯向南擴展的因素之一，此鹽層廣泛分布於法爾斯至位於法爾斯西北部的迪茲富勒 (Dezful)，鹽層分布於約 10 公里厚的沉積層底部，軟弱且具有流動性，提供橫向滑移的有利條件。大部分的鹽貫入體在造山運動之前就已經存在 (Alavi, 1996; Jahani et al., 2007)。Letouzey et al. (1995) 以及 Vendeville and Nilsen (1995) 都推斷板塊的擠壓作用會觸發鹽貫入體間歇性的抬升。根據 Letouzey 和 Sherkati (2004) 比對迪茲富勒與法爾斯的鹽貫入體分布，發現相較於中札格羅斯的平移及逆衝斷層經常受到已經存在的鹽丘影響，東南札格羅斯卻鮮少有鹽丘與斷層系統直接相關。

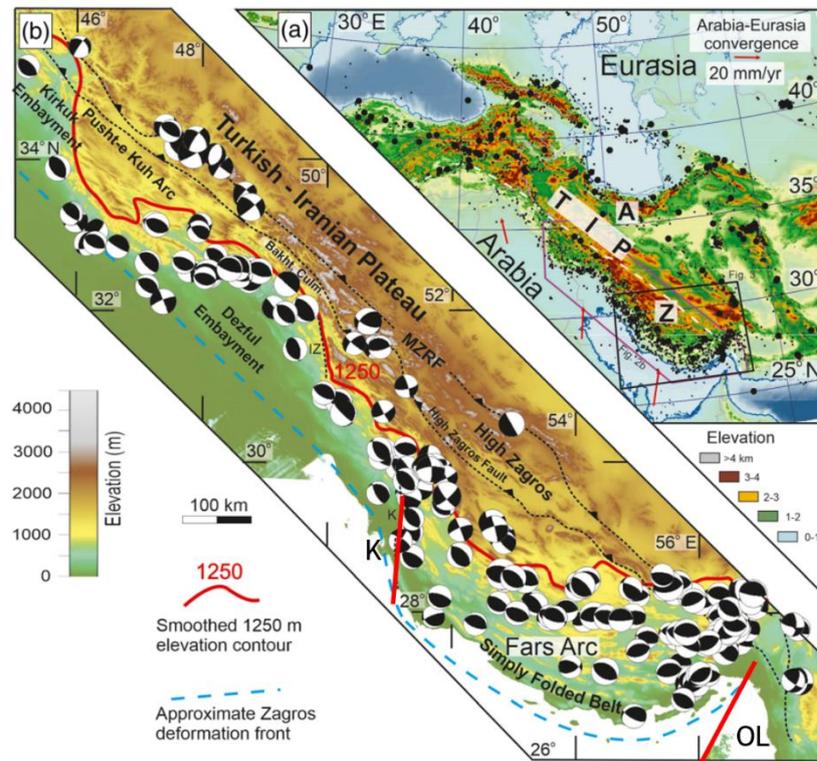
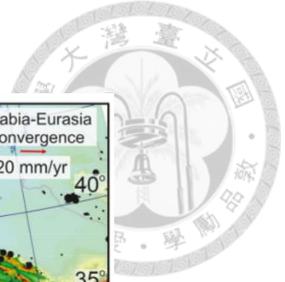


圖 1-3 伊朗歷史地震分佈圖 (修改自 Edey et al., 2019)。(a) 1900 至 2000 間地震矩規模大於 6 的地震分佈圖，A 代表阿爾伯茲 (Alborz) 地區，TIP 代表土耳其-伊朗高原，Z 為札格羅斯地區 (b) 札格羅斯地山脈地震分佈與震源機制解，紅線為海拔 1250 公尺等高線，藍色虛線為變形前緣，MZRF 為札格羅斯主要逆衝斷層 (Main Zagros Reverse Fault)，IZ 為伊澤斷層 (Izeh Fault)，K 為卡澤倫斷層 (Kazerun Fault)，OL 為阿曼線 (Oman line)；卡澤倫斷層與阿曼線為法爾斯的構造邊界。

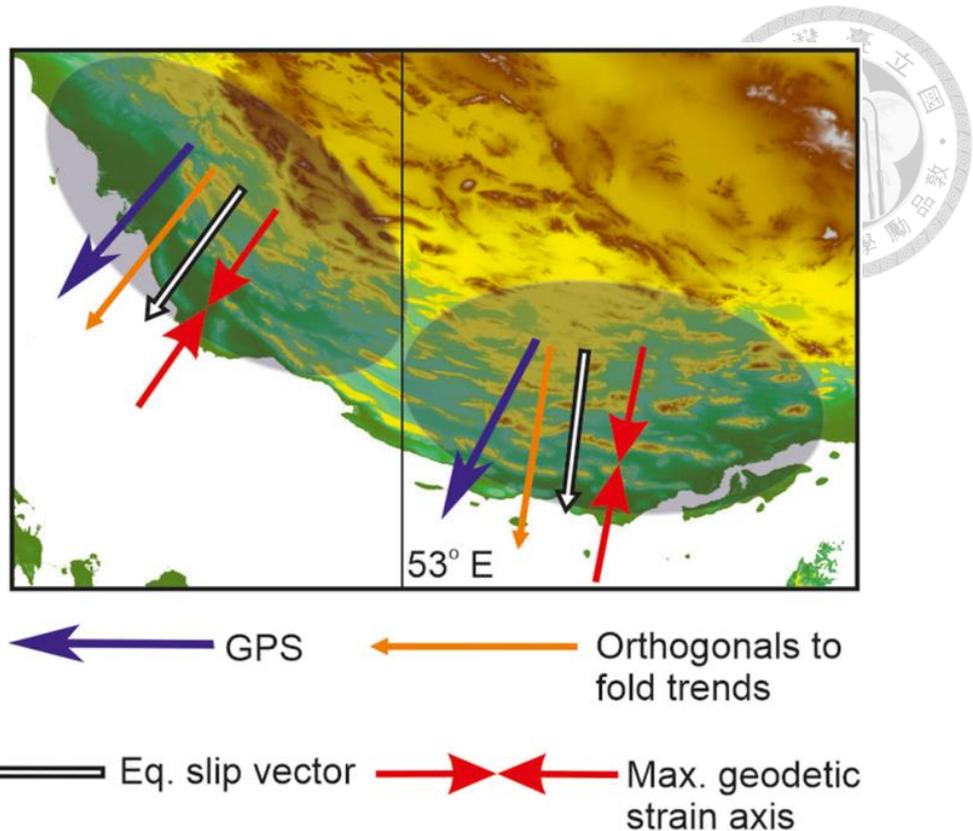


圖 1-4 東西法爾斯動力學資料比較圖 (摘自 Edey et al., 2019)。藍色箭頭為 GPS 數據方向，橘色箭頭為正交褶皺軸方向，白色箭頭為地震滑移向量，紅色箭頭為大地應力軸方向。

### 1.2.3 鹽貫入體的演化機制

鹽層形成於封閉的海洋盆地內，由於蒸發作用帶走水分，鹽分則逐漸沉積，經長年累月的上覆沉積物覆蓋，形成大規模的蒸發鹽層。沉積序列中的鹽層可能是由純鹽岩組成，但通常含有其他礦物，例如硬石膏、石膏和黏土礦物。鹽的機械性非常弱，具有高導熱性、不透水性，以及黏性，表現行為具有流體的性質，即使是在地表也能像流體一樣流動。

由於純鹽岩的密度小 ( $2.16 \text{ g/cm}^3$ )，比大多數碳酸鹽岩的密度低，再加上即使在非常深的埋藏深度，鹽幾乎不可壓縮，因此也無法被壓得更緻密，所以當覆蓋層被壓實後密度提升並且密度高於鹽層時，鹽體就會因密度較小而上衝，形成鹽貫入體 (salt diapir)。矽質的碎屑沉積物在埋藏深度達到一至兩公里深時密度往往會超過  $2.2 \text{ g/cm}^3$ ，當覆蓋層的平均密度超過鹽層時，鹽層會變得非常不穩定，同時岩層上方覆蓋的岩層與沉積物也會形成荷重並向下擠壓，也就是大約在這個深度會發

生鹽體貫入。

鹽貫入體的活動並沒有在初始上衝之後就停止，當沉積作用持續進行，圍岩厚度增加，密度與荷載也持續增加，鹽就會順著已經上衝的貫入通道緩慢且持續的向地表流出。鹽沖出地表之後會形成拱丘狀，後期沉積的沉積物會傾向於堆積在鹽丘的周圍，形成小範圍的迷你沉積盆地 (minibasins)，成環狀圍繞在鹽丘周圍。而這些迷你盆地也深深影響後期鹽層的分布型態與流動趨勢 (Hassanpour et al., 2019)。

在伊朗，霍爾木茲鹽層在札格羅斯東南段扮演非常重要的角色，此鹽層遍佈法爾斯、波斯灣，也擴及迪茲富勒弧凹 (Dezful) (圖 1-2、圖 1-5)，是前寒武紀在封閉海域的沉積盆地沉積的蒸發鹽層，平均厚約一公里，衍生出範圍極廣的鹽構造 (salt tectonics)，在地表上常見直徑數公里至數十公里的圓拱狀構造。由於鹽層具有流體的性質，因此容易帶動上下岩層水平移動，加上鹽體上衝，造成上覆岩層強制褶皺 (forced fault) 或破裂。

除去霍爾木茲鹽為鹽構造的主體，後期沉積的法爾斯鹽也會影響鹽丘的型態。法爾斯鹽沉積於晚新世至早中新世，沉積時的型態也並非原始水平，原因是霍爾木茲鹽形成的拱丘形成地形高區，而圍繞在鹽丘附近的區域形成迷你沉積盆地，在鹽丘的周遭具有環形的背斜構造，這些都使法爾斯鹽沉積時的厚度分布不均。覆蓋在法爾斯鹽上方的覆蓋層因沉降作用向下擠壓，由於鹽具有流動性，法爾斯鹽遭到擠壓排出，向外形成鹽牆 (salt walls) 和鹽背斜 (salt anticlines)，向內合併到霍爾木茲鹽的鹽丘邊緣。

鹽層受擠壓排出之後，被鹽層間隔開的地層縫合在一起，此為接合作用 (welding) (圖 1-6)。主要鹽丘的鹽源層若被完全排出導致上下地層接合在一起的位置為主要鹽接合帶 (primary salt weld)；鹽上湧之後形成柱狀的供給通道，若供給通道中的鹽被耗盡而使圍岩橫向接合在一起為次要鹽接合帶 (secondary salt weld)，通常是因為受到側向的擠壓作用；當鹽丘頂部橫向發展並且鹽完全排出，上下岩層接合，此為第三級接合帶 (tertiary salt weld)，是在鹽丘發展到更晚期的構造 (Hassanpour et al., 2019)。

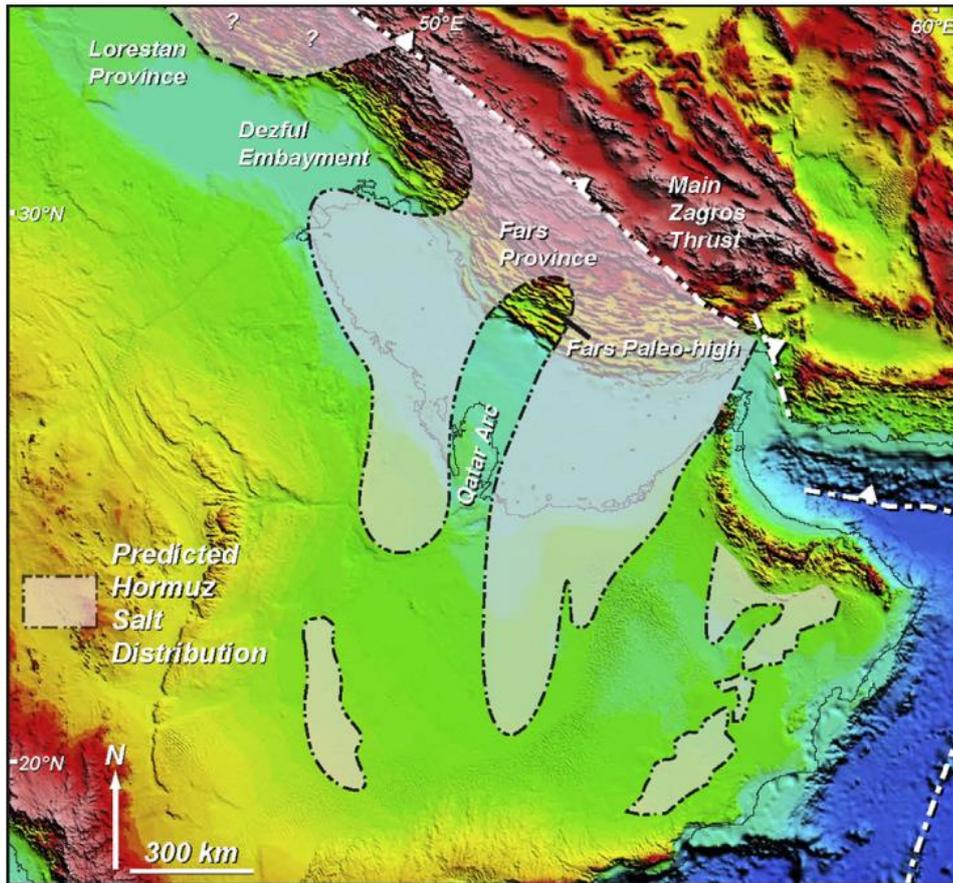


圖 1-5 霍爾木茲鹽分布圖 (摘自 Motamedia and Gharabegli, 2019)。白色虛線框起的半透明區域為霍爾木茲鹽的分布範圍。Dezful Embayment 為迪茲富勒弧，Fars Province 為法爾斯省，是霍爾木茲鹽主要的分布區域。

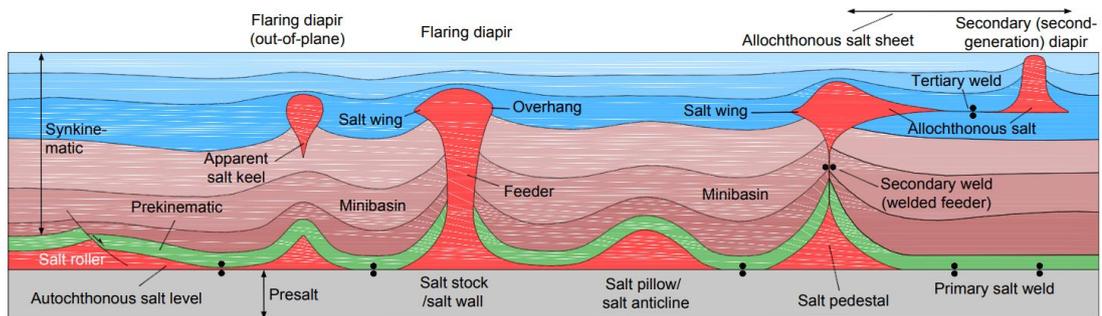


圖 1-6 鹽構造示意圖 (摘自 Hassanpour et al., 2019)。Salt wing 為鹽翼、Feeder 為鹽供給通道、Flaring diapir 為火焰狀貫入體、Salt keel 為供給通道關閉後鹽體下部向下尖滅的柱狀鹽構造。

#### 1.2.4 地質剖面

圖 1-7、圖 1-8 修改自法爾斯地區的剖面圖 (Jahani et al., 2009)，兩條剖面切過法爾斯東部，最為靠近研究本區域，透過剖面可知東法爾斯的地質構造特徵。本研究區域位於南波斯灣，波斯灣位於現今札格羅斯山脈的前陸盆地，目前波斯灣幾乎沒有受到褶皺變形的影響。

A 剖面全長 243 公里，其中 171 公里切過札格羅斯褶皺逆衝帶 (Zagros fold-thrust belt, ZFTB)，72 公里切過波斯灣。在海上的部分切過數個鹽丘與鹽脊，這些都是來自中新世的法爾斯鹽層，由於年輕的鹽構造掩埋了深層的結構，加上鹽丘的拱狀頂部所在位置淺，側向的速度變化快，使震測的成像難以顯示深層結構。而在陸地的部分，該剖面切過兩個霍爾木茲鹽丘，分別為 Ilcheh 和 Shab (或稱為 Shu)，Ilcheh 是個中空的坑洞，是已經不再活躍的霍爾木茲鹽構造遺跡，依然可以在坑中觀察到霍爾木茲鹽的殘留；Shab 位於背斜的頂點，最早於晚白堊紀時活動，仍然活躍的拱狀圓頂嵌入侏羅紀至漸新世地層中 (Jahani et al., 2007)。此外剖面還切過六個中央以鹽為核心的滑脫背斜，背斜平均波長為 15 公里，以早中新世的法爾斯鹽作為中間滑脫層。中新世的法爾斯鹽在沉積盆地中厚度分布不均，在霍爾木茲鹽形成的鹽丘周圍有向中心流動或向外形成白齒狀鹽牆的趨勢。

B 剖面全長約 168 公里，120 公里切過褶皺帶，26 公里切過前陸盆地，剖面的最南端在震測剖面上觀察到中中新世時期的不整合面。該剖面切過四個鹽丘，Kalat、Khurgu、Handun 和 Finu，並且剖面的端點鄰近研究區域拉拉克島 (Larak island)，島上有出露地表的霍爾木茲鹽露頭。剖面還截切了霍爾木茲斷層區 (Hormuz Fault Zone)，呈現一個花型的構造 (flower structure)，由於阿曼山脈隆起造山，這條斷層帶於早中新世破裂並開始活動。沿著這條斷層帶發育的鹽貫入體受到拉張或擠壓而重新活躍，例如 Larak 和 Hormuz。這條斷層過去為拉張環境，同為生長斷層，因此在上盤沉積較厚的中新世地層，而後受擠壓作用轉變成高角度逆斷層。

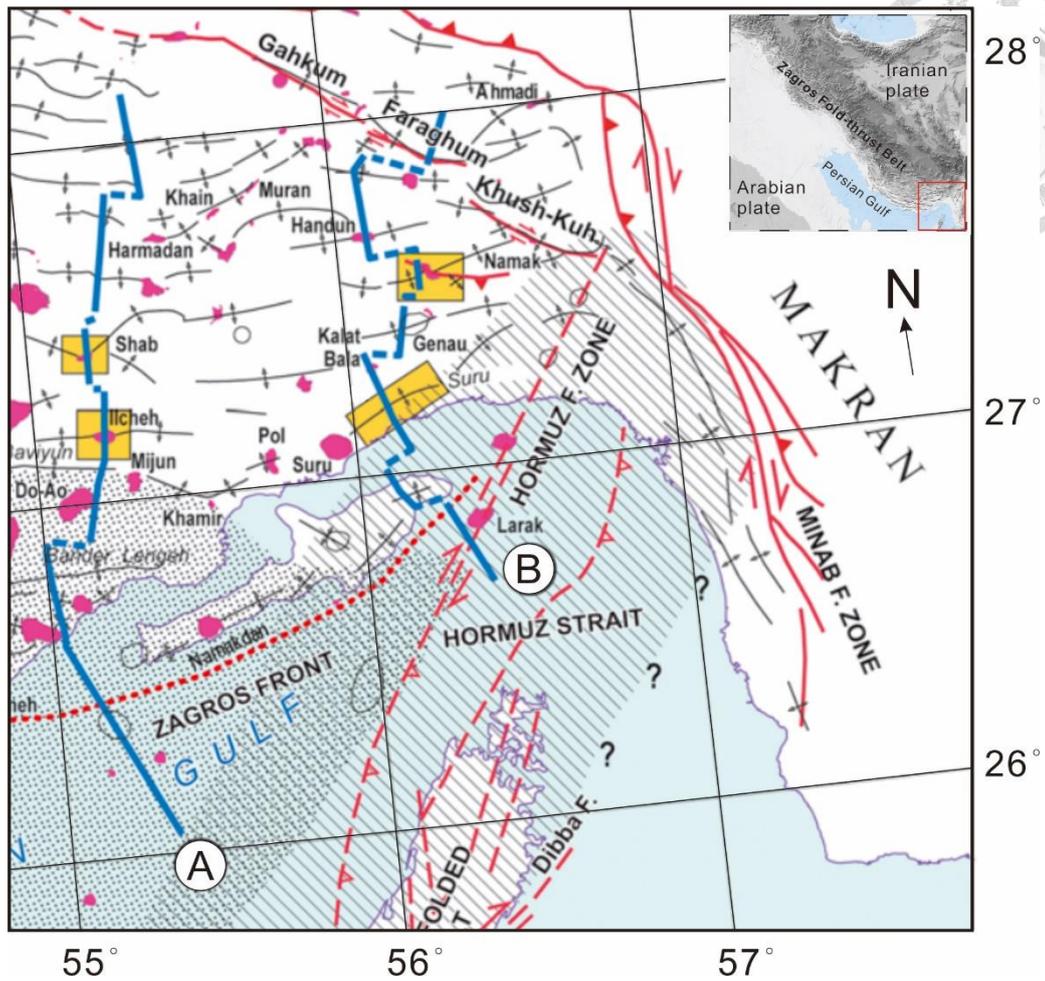


圖 1-7 東札格羅斯與南波斯灣構造圖 (修改自 Jahani et al., 2009)。標示出札格羅斯褶皺逆衝帶前緣與褶皺軸線分布；斜線區為阿曼山脈延伸出的中中新世不整合帶；虛線區為法爾斯鹽層分布區域；紅色為霍爾木茲鹽凸出地表的鹽丘；紅色線段為主要斷層構造線，實現出露地表而虛線深埋地底；藍線為地質剖面線。

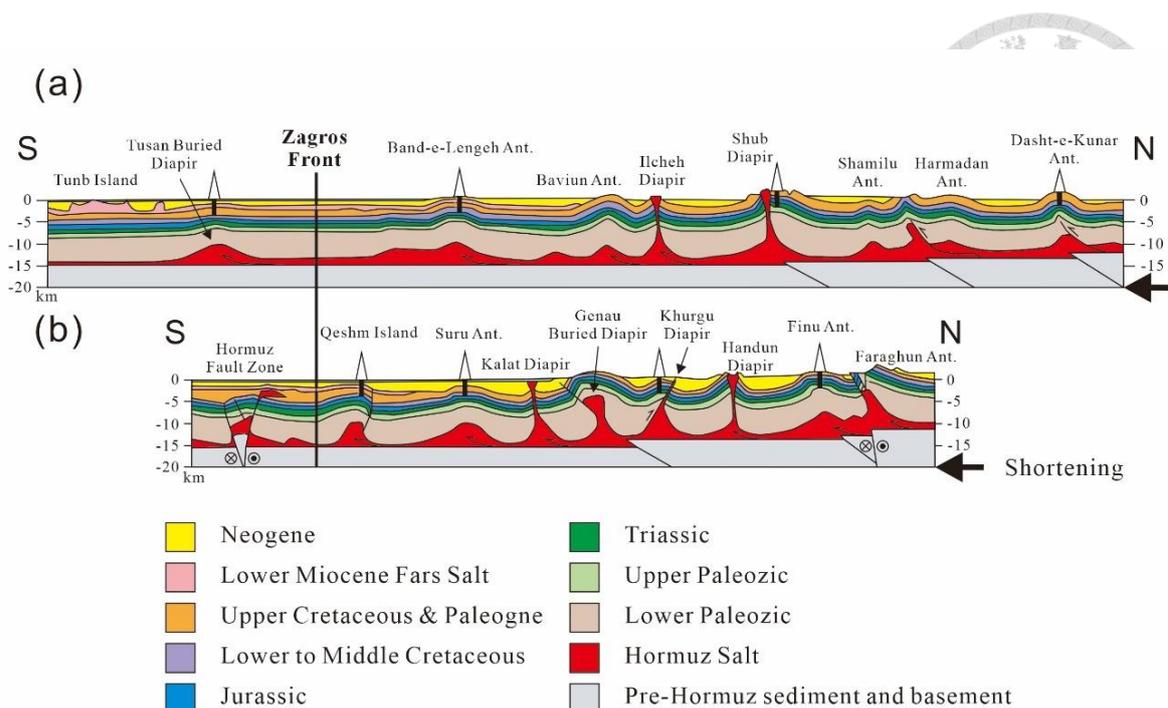


圖 1-8 地質剖面圖 (修改自 Jahani et al., 2009)。(a) 為切過喀什姆島南方的 A 剖面 (b) 為切過喀什姆島北方的 B 剖面。黑線為札格羅斯變形前緣。黑色粗箭頭標示縮短的情況。

### 1.2.5 InSAR 對地表變形的應用

合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 是一種遙測應用技術，利用兩幅以上的合成孔徑雷達影像並根據回波的相位差進行地表變形的高程計算，具有經度高、範圍廣、時間性連續等優點，此外合成孔徑雷達 (SAR) 是主動遙測的形式，由天線傳輸並接收從影像區域反射的訊號，因此不受日夜照明的影響，可以應用於構造上的形變——例如地震造成的地表變形。詳細應用方法會詳述在第三章研究方法。透過分析升軌與降軌的干涉圖像，由此獲取真實的地表變形，並且推估地下構造，有助於更加了解地質結構。

札格羅斯山脈的沉積層橫跨古生代至新生代，沉積層厚度達到 10 至 15 公里。地層由碳酸鹽岩和蒸發岩、泥灰岩組成的地層構成。過去的研究認為地表少有地震破壞的痕跡是因為札格羅斯山脈較大的地震主要涉及的斷層位在基盤內部 (Walker et al., 2005)，根據 Nissen et al. (2011) 的研究，札格羅斯褶皺逆衝帶的地震活動基本上聚集在基底基盤的部分，深度約 20 公里，某些地方能到 30 公里深。但近年來

透過 InSAR 技術判斷地震深度的範圍，地震矩規模大於 5 的地震震源深度大多在約 4 到 14 公里之間 (Nissen et al., 2007; Roustaei et al., 2010)，而其餘震卻發生在基盤深度約 10 到 20 公里深的位置，這樣的發現顯示位在覆蓋層的主震與餘震之間在垂直方向上存在垂直分離的情況。

Nissen et al. (2010) 利用合成孔徑雷達干涉技術對發生在喀什姆島 (Qeshm island) 自 2005 至 2009 年間的地震序列做遙測分析 (圖 1-9)，透過調查 2005 年 11 月到 2009 年 7 月四年間的逆斷層地震深度和形狀，在 10 公里厚的沉積蓋層下部發生破裂，利用 InSAR 和遠震紀錄中中等規模的事件、長周期波長，以及使用當地地震網中的微震數據進行分析，發現斷層模型推估盲斷層的走向垂直上方的拉夫特背斜 (Laft Anticline)，呈現東北—西南走向 (圖 1-10)。如果斷層上的滑動與上覆褶皺的生長之間存在相關性，那麼褶皺軸應該與斷層的走向平行而不是垂直，因此拉夫特背斜必須與斷層垂直分離 (vertical separation)，並且可能是一個分離褶皺 (detachment fold)，褶皺與斷層之間沿著一層薄弱的蒸發岩或石灰岩，由於密山 (Mishan) 石灰岩在拉夫特背斜中心部分出露於地表，加上斷層破裂深度為 2 至 3 公里，滑脫層應位於古爾珠 (Gurpi) 石灰岩中。透過合成孔徑雷達推知拉夫特背斜 (Laft Anticline) 下方有一條垂直切過的東北—西南向向西傾的斷層，透過地震序列可知該斷層仍在活躍，可能會影響到鄰近且尚未出露於地表的鹽貫入體加希 (Gaverzin)。

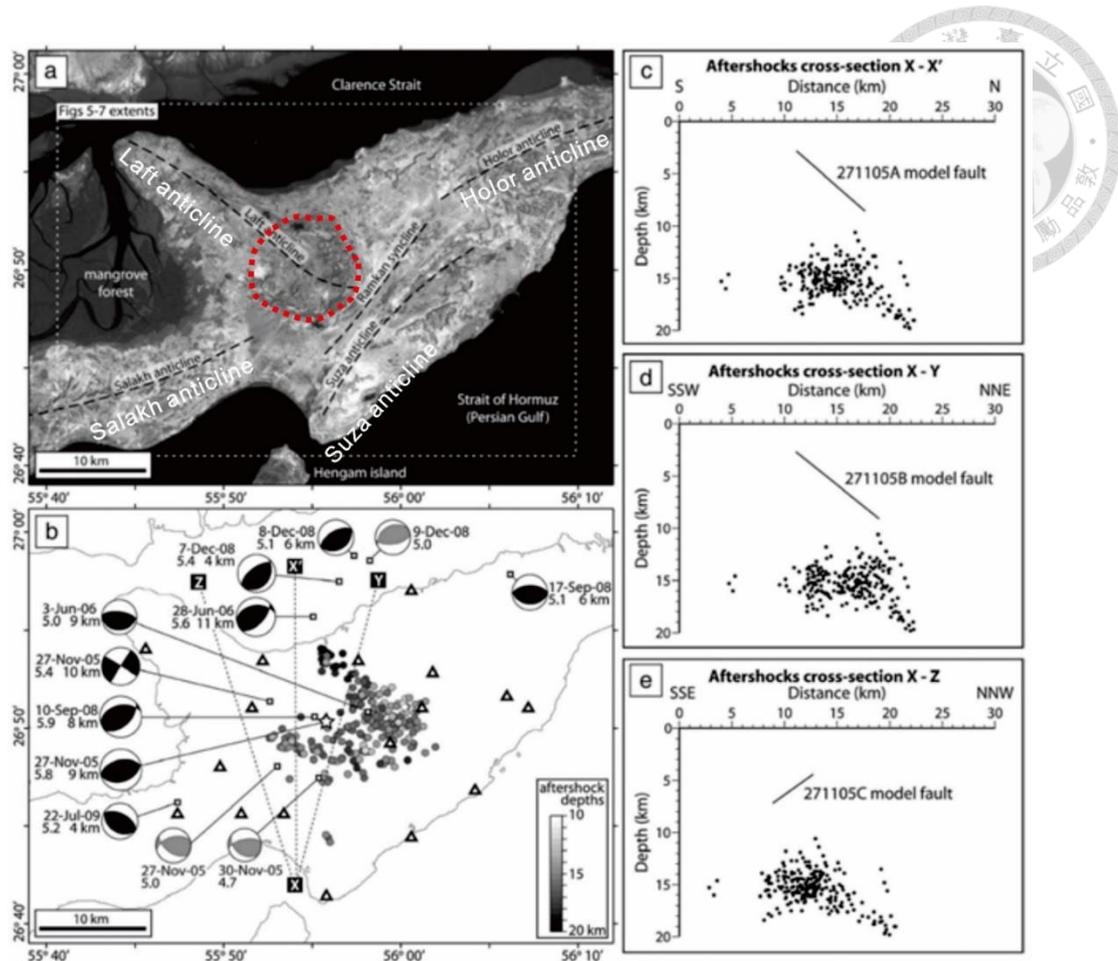


圖 1-9 喀什姆島地震序列地震分佈圖與斷層模型與餘震分布剖面圖（修改自 Nissen et al., 2010）。(a) 喀什姆島的 Landsat 影像，褶皺軸以虛線標示 (b) 地震序列的地震震源機制（2005 年 11 月至 2009 年 7 月）和餘震，黑色海灘球是最大的九個事件的體波模型；灰色海灘球是三個較小事件的全球 CMT 機制，星號是第一次地震的震央 (c) 模型斷層面 271105A 與 X-X' 線上的餘震投影 (d) 模型斷層面 271105B 與 X-Y 線上的餘震投影 (e) 模型斷層面 271105C 到 X-Z 線上的餘震投影。271105 代表的是 2005 年 11 月 27 日 10:22 UTC 發生的規模 5.8 之地震事件。紅色虛線標示出未出露的鹽貫入體蓋維辛 (Gaverzin) 的位置。

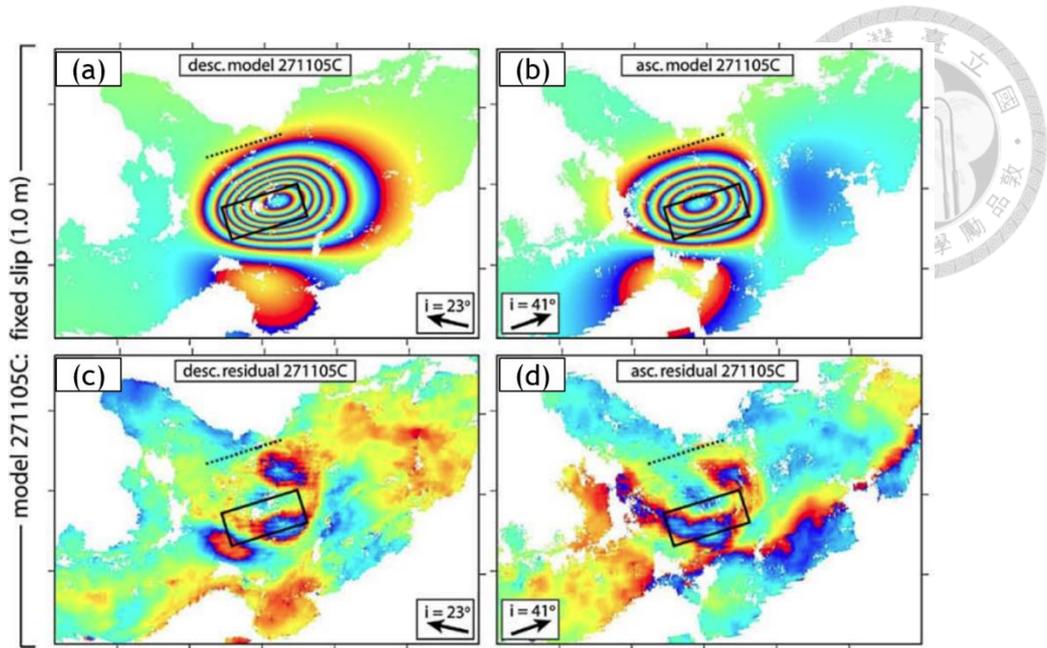


圖 1-10 2005/11/27 喀什姆島地震干涉環與斷層模型修正 (修改自 Nissen et al., 2010)。(a)(b) 經過斷層模型 271105C 修正後的干涉環 (c)(d) 模型 271105C 修正後的殘差。黑色虛線為模型模擬出的斷層面位置。

法爾斯弧位於札格羅斯東南段，霍爾木茲鹽 (Hormuz salt) 在此形成眾多衝出地表的鹽貫入體 (Salt diapirs)，研讀前人研究之後判斷這些構造應當仍在活躍，並且可能因為受到斷層、褶皺等構造影響而再度活躍，因此期待本區鹽貫入體不只在垂直方向上存在抬升或消退沉降，其有可能受構造影響而產生側向變形行為。本研究藉由合成孔徑雷達技術 (Interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 對法爾斯東南角進行長期衛星監測，透過 2.5D、時間序列與震測剖面等對鹽貫入體進行構造討論，新生代的後期構造是否對該區的鹽造成影響。

## 第2章 地質背景與構造



### 2.1 演化歷史與造山帶

要了解鹽對札格羅斯地區的影響，就必須回溯到前寒武紀時期岡瓦納大陸的分裂，寒武紀晚期因走向滑移斷層形成拉張盆地而沉積了影響札格羅斯地區甚巨的霍爾木茲鹽。到了晚泥盆紀時期，古特提斯洋板塊開始向南方的岡瓦納大陸隱沒。到了晚二疊紀時期，阿拉伯板塊的東北角發生張裂作用並形成裂谷，在日後形成新特提斯洋，分裂出去的部分向北漂移與歐亞大陸碰撞在一起。之後一直到白堊紀都沒有發生顯著的構造活動，新特提斯洋內因而沉積了厚層的碳酸鹽地層。晚白堊紀時期，新特提斯洋板塊向東北隱沒至伊朗下方，並引發一系列火山活動，在馬斯垂克期火山弧與阿拉伯板塊碰撞，海洋板塊隱沒至始新世，阿拉伯板塊與歐亞板塊開始陸陸碰撞，板塊持續碰撞造山至今仍未停歇。圖 2-1 為札格羅斯地區自二疊紀至古新世的構造演化，描述從古特提斯洋閉合至札格羅斯碰撞造山的地質演化過程，圖 2-2 為札格羅斯地區自晚白堊紀至始新世的構造演化，描述碰撞造山對札格羅斯地區造成的構造變形。

札格羅斯造山帶的演化大致可分為四個時期：被動大陸邊緣時期、古特提斯洋閉合、新特提斯洋擴張、新特提斯洋隱沒後碰撞造山。

#### 2.1.1 被動大陸邊緣時期

由克拉通 (Craton) 增生而成的岡瓦納大陸 (Gondwana) 存在於新元古代至侏羅紀前期 (575 Ma ~ 180 Ma)，這個由阿拉伯、非洲與南美洲等陸塊增生而成的超級大陸又被稱為南方大陸，大陸的北部分裂成現今的伊朗、阿拉伯、土耳其及印度等板塊，與之相鄰的古特提斯洋位於大陸的北側，兩者之間為被動大陸邊緣。

到了寒武紀晚期，西北—東南向的納吉走向滑移斷層 (Najd strike-slip fault) 發育並截切岡瓦納大陸北部，破壞南北向的大構造，錯動促使大陸北部形成拉張環境。拉張結束後一直至泥盆紀晚期都處於穩定的被動大陸邊緣，大量的蒸發岩與碎屑岩沉積於拉張盆地內，其中也包括遍佈伊朗南部的霍爾木茲鹽系列。



### 2.1.2 古特提斯洋閉合

古特提斯洋位於岡瓦納大陸的北方，在泥盆紀期開始向南方的岡瓦納大陸下方隱沒，古特提斯洋開始閉合。隱沒過程中與阿拉伯板塊碰撞產生擠壓並抬升，同時期岡瓦納大陸與勞亞大陸（Euramerica）碰撞，逐漸形成盤古大陸（Pangaea），此運動稱之為海西造山運動（Hercynian orogeny）。

隱沒作用促使弧後張裂，形成裂谷，為後續新特提斯洋的張裂做鋪墊，同時火山活動十分活躍，劇烈的板塊活動也加劇地殼抬升，志留紀到石炭紀時期的地層大部分都被抬升後侵蝕，因此經常會發現這時期的地層缺失造成的不連續面。

### 2.1.3 新特提斯洋擴張

海西運動一直持續到二疊紀晚期，岡瓦納大陸的東北緣處於張裂環境，地殼張裂使阿拉伯板塊撕裂出西北—東南向的裂谷，並在海水入侵後形成新特提斯洋。

新特提斯洋隨板塊張裂而擴張，同時被撕裂出去的陸塊也逐漸向東北飄移，隨後在三疊紀晚期與歐亞大陸發生碰撞並合而為一，成為現今的伊朗、阿富汗等地塊。板塊拉張運動結束於三疊紀，之後的新特提斯洋一直處於穩定的沉積環境，大規模的構造活動趨於平緩，大量的淺海有機質緩慢沉降，富含有機質的碳酸鹽層成為伊朗東南部日後生產石油的基礎。

### 2.1.4 新特提斯洋閉合與造山運動

侏羅紀至白堊紀時期，新特提斯洋向東北方的伊朗隱沒，札格羅斯造山運動開始。造山運動總共分成三階段。

首先，新特提斯洋向東北方的伊朗隱沒，隱沒作用引起一系列的火山運動，形成烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧（Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage, UDMA），由於隱沒的傾角高，甚至接近垂直，造成地表火山弧形狀狹長。

到了白堊紀晚期，伊朗板塊的大陸邊緣仰衝（obducted）至阿拉伯板塊上，由海洋地殼與上部地函物質組成的蛇綠岩被抬升並堆積在阿拉伯板塊的邊緣，使大陸邊緣重力荷載增加，導致地層彎曲下陷，形成札格羅斯的前陸盆地，此運動一直持續到坎帕期（Campanian, 83.6~72.1 Ma），其中盆地內的矽質碎屑沉積來自於蛇

綠岩。

在馬斯垂克期 (Maastrichtian, 72.1~66 Ma) 烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧因與阿拉伯板塊碰撞而縮短，新特提斯洋板塊持續隱沒至早始新世，新特提斯洋關閉使阿拉伯版塊與歐亞板塊發生陸—陸碰撞，板塊碰撞造山形成札格羅斯山脈，至今造山運動尚未結束，札格羅斯造山帶仍是世界上活躍的造山帶之一。詳細碰撞造山的演化過程可以詳見圖 2-2。

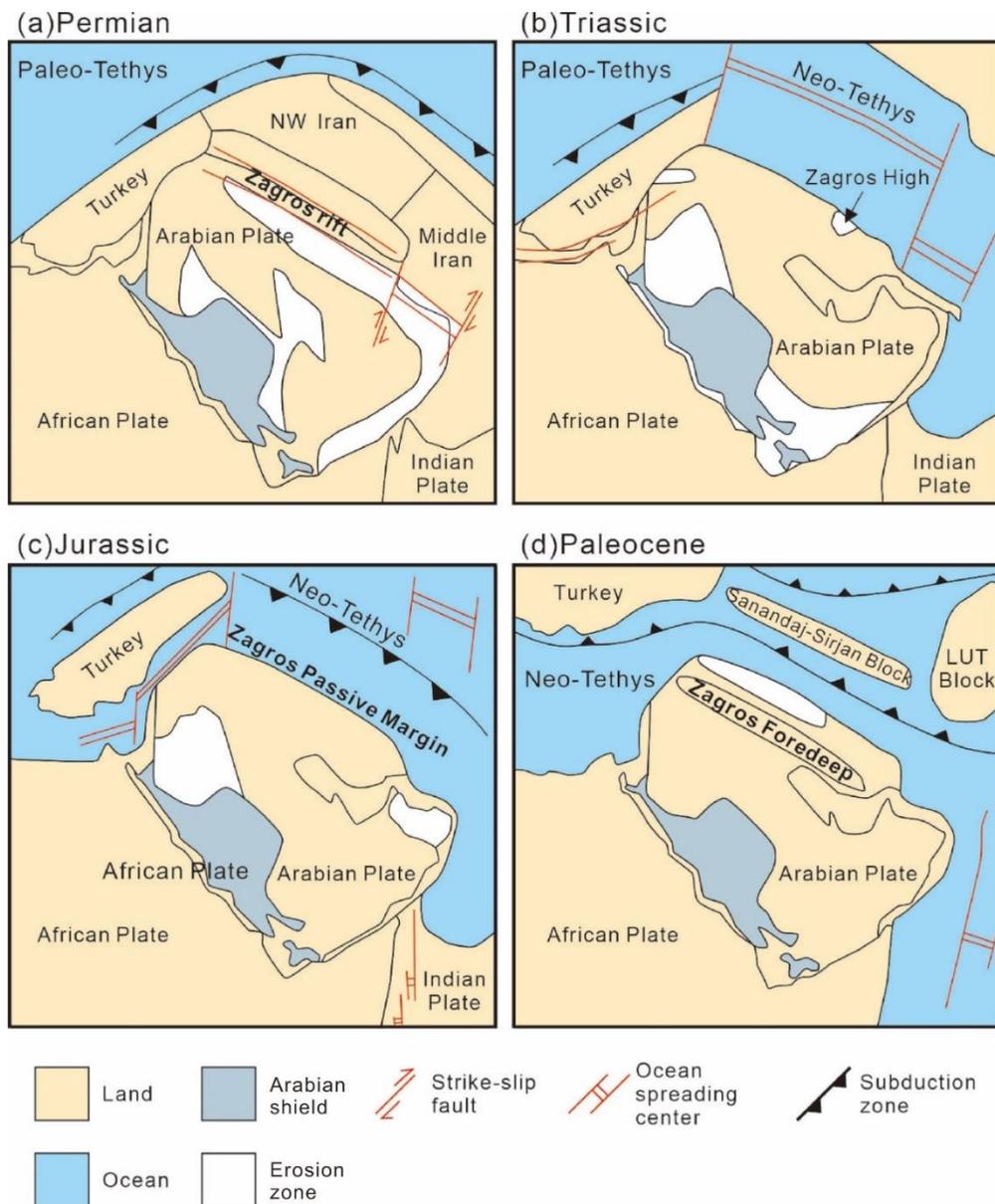


圖 2-1 札格羅斯地區自二疊紀至古新世的構造演化 (修改自 Liu et al., 2018)。

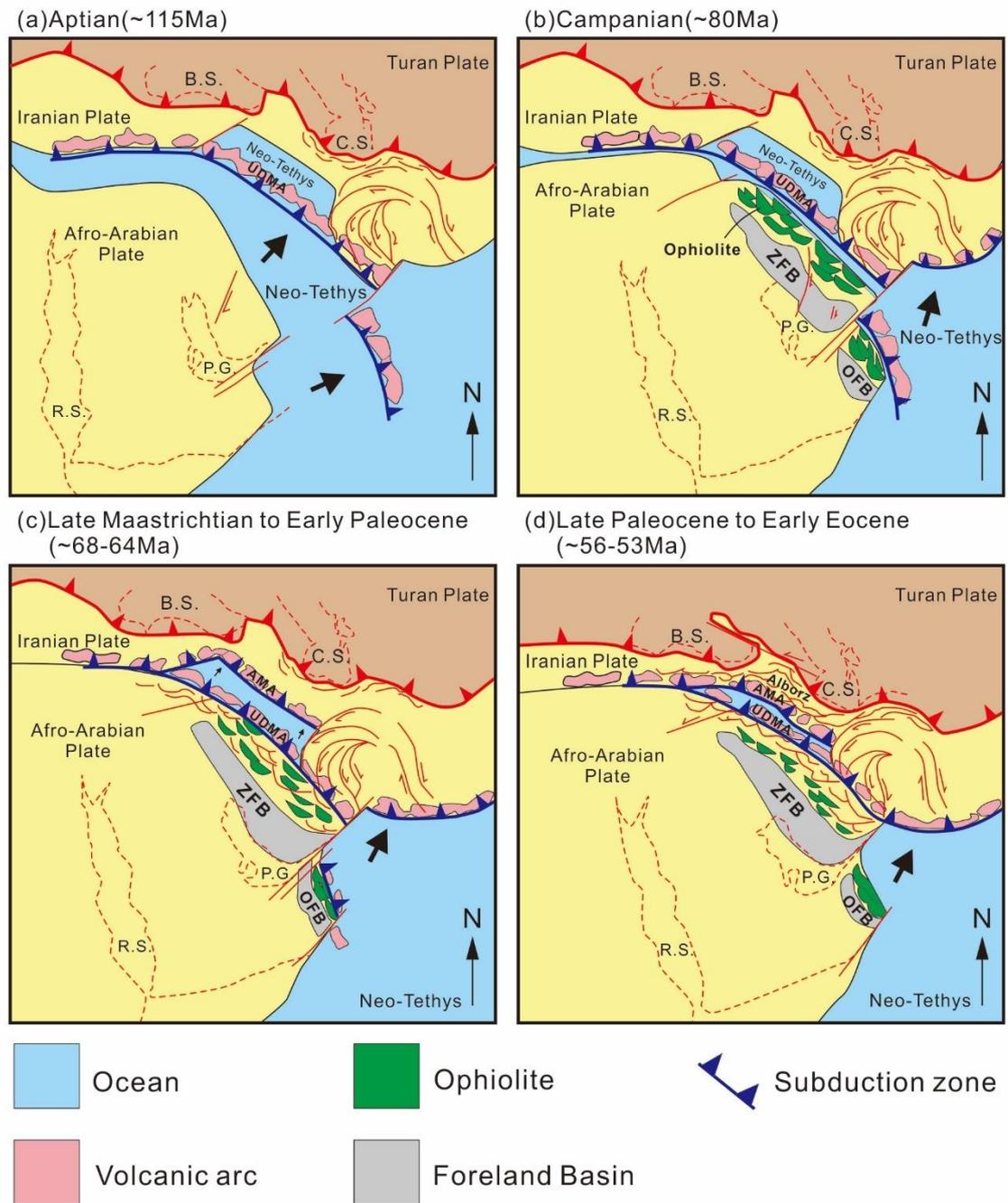


圖 2-2 札格羅斯地區自晚白堊紀至始新世碰撞造山的構造演化 (修改自 Alavi, 2007)。ZFB 為札格羅斯前陸盆地 (Zagros Foreland Basin)，OFB 為阿曼前陸盆地 (Oman Foreland Basin)，UDMA 為烏爾米耶—杜赫塔爾火山帶 (Urumieh-Dokhtar Magmatic Assemblage)，AMA 為阿爾伯茲火山帶 (Alborz Magmatic Assemblage)，P.G. 為波斯灣 (Persian Gulf)，R.S. 為紅海 (Red Sea)，C.S. 為裏海 (Caspian Sea)，B.S. 為黑海 (Black Sea)。



### 2.1.5 造山帶分區

札格羅斯造山帶為一個西北—東南走向的山脈，綿延超過 2000 公里，平均寬度約 300 公里，以北以東安納托利亞斷層（East Anatolian Fault）為界，以南以阿曼線（Oman line, OL）為界。札格羅斯造山帶主要由三個平行山脈走向的區域構成，由東北至西南分向依序是烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧（Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage, UDMA）、札格羅斯疊瓦帶（Zagros imbricate zone, ZIZ）、札格羅斯褶皺逆衝帶（Zagros fold-thrust belt, ZFTB）（Alavi, 2007）（圖 2-3）。

烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧形成於新特提斯洋向東北隱沒到伊朗之下時形成的火山島弧，最早的火成岩年代落在早白堊紀，中白堊紀至晚白堊紀的火成岩位在火山弧的中部與西北部，而岩漿噴發最為活躍的時期應在始新世。此區火成岩厚度約 4 公里，岩性以安山岩、石英安山岩、流紋岩為主，伴隨著火山碎屑沉積物，隨後被花崗岩入侵。

札格羅斯疊瓦帶包含兩個區域，分別是薩南達季—席爾詹區（Sanandaj-Sirjan zone）和札格羅斯逆衝帶（Zagros thrust zone）（Stocklin, 1974）。薩南達季—席爾詹區和札格羅斯逆衝帶的邊界在過去被視為阿拉伯板塊與伊朗板塊的交界，但根據 Alavi (1994) 的地質調查結果，札格羅斯逆衝帶並沒有發現顯著的地震活動，因此將板塊邊界推至東北方、與火山弧交界處，將此交界認定為板塊的接合帶。此區的地層從東北至西南越來越年輕，包含了從古生代到新生代的地層序列、烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧（Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage, UDMA）殘餘的火成岩碎屑以及蛇綠岩系，並且伴隨著強烈的變形作用。

札格羅斯褶皺逆衝帶又被稱為簡單褶皺帶（Simple Folded Belt, SFB），平均寬度大約為 300 公里，位於造山帶的最外側，變形程度相對札格羅斯疊瓦帶較小，與疊瓦帶之間的邊界為高札格羅斯斷層（High Zagros Fault）。此區逆衝斷層長約 150 至 200 公里長，並且發育出眾多鯨背（whale-back）形狀的背斜，沉積蓋層厚度約 7 到 12 公里厚，在簡單褶皺帶中南部至東南部受到近 120 個鹽貫入體入侵。此區位於西南方與美索不達米亞平原的邊界由札格羅斯變形前緣定義。

札格羅斯褶皺逆衝帶受到基底滑脫面主導而發展出兩個凹陷的弧凹與兩個凸出的弧凸，由西北至東南分別是基爾庫克弧凹（Kirkuk）、洛雷斯坦弧凸（Luristan）、迪茲富勒弧凹（Dezful）、法爾斯弧凸（Fars）。而主要的基底滑脫面則是本研究的

重點——霍爾木茲鹽系列，其廣泛分布於簡單褶皺帶中，從古生代沉積後受到板塊碰撞擠壓影響而上湧至地表。後面章節將會詳述其特徵與型態。

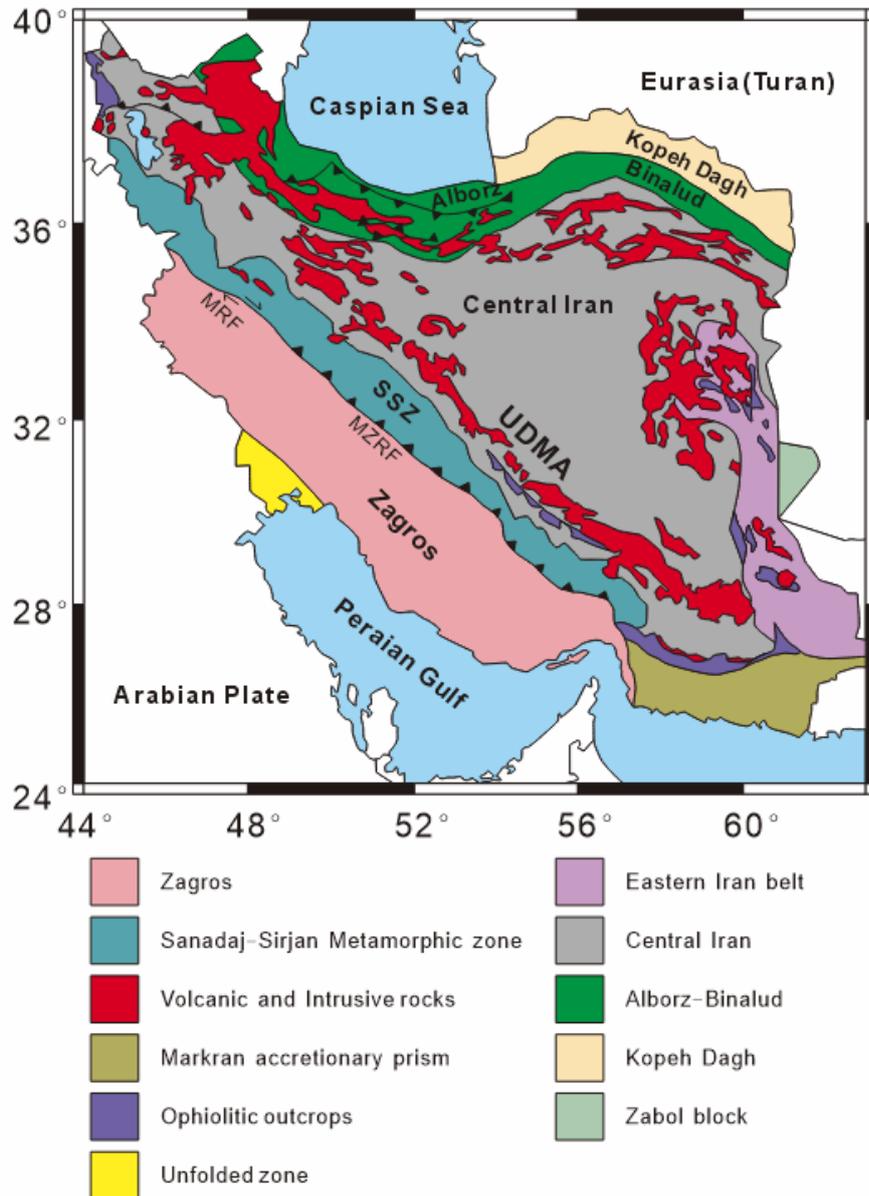


圖 2-3 伊朗地質分區圖（修改自 K.Motaghi et al., 2017）。SSZ：薩南達季—席爾詹區 (Sanandaj-Sirjan zone)；UDMA：烏爾米耶—杜赫塔爾火山弧 (Urumieh-Dokhtar magmatic assemblage, UDMA)。



## 2.2 研究區域

### 2.2.1 地層序列

札格羅斯地區的地質歷史橫跨前寒武紀至整個顯生元，根據 Alavi (2004) 研究，通過研究地層柱分析露頭和井測資料，歸類統整出札格羅斯地區包含了四組岩石，每一組都是由多個互相之間經由不整合面隔開的巨大序列 (megasequences) 組成，分別代表不同時期的沉積環境。

最古老的地層組年代落在前寒武紀晚期至泥盆紀，最底層由厚層蒸發岩層與基底火層岩構成，上覆砂質沉積岩與碳酸鹽岩。此地層組含有兩個巨大系列，分別為晚前寒武紀至早寒武紀時期的地層 (巨大層序 I) 和中寒武紀至晚寒武紀時期的地層 (巨大層序 II)。層序 I 被認為是受到岡瓦納大陸東北方的內志走滑斷層系統 (Najd strike-slip fault system) 的影響，斷層的擴展使沉積環境處於拉張，同時沉積了霍爾木茲鹽系列，在褶皺逆中帶中扮演重要滑脫層的角色。層序 II 與層序 I 之間存在一個不整合面，沉積環境位於大陸棚。而後由於海西運動造成地殼抬升而使地層缺失，一直到早二疊紀的沉積環境都難以確定，但在較年輕的地層中發現了火山沉積物，應與古特提斯洋隱沒有關。

第二組包含二疊紀 (巨大層序 III) 與三疊紀 (巨大層序 IV) 兩大序列，二疊紀到三疊紀時期此處為溫暖的淺海環境，受到新特提斯洋的海進海退影響。層序 III 主要組成為礫岩、長石砂岩和石英砂岩，是在海進時期沉積的；而後沉積的白雲岩、蒸發岩以及高能環境下沉積的生物碎屑石灰岩則是在海退時沉積，這個序列從阿拉伯地區向東北延伸，並深入伊朗中部。層序 IV 是向東北延伸的一套蒸發岩與白雲岩相互交替沉積的層序，並且夾雜來自東北方的淺海相石灰岩。於晚三疊紀時期地層上方存在著一個不整合面，這個不整合面的形成與岩漿活動、斷層擴展以及變質作用有關。

第三組由年代從早侏羅紀至晚土倫期期間沉積的四個序列組成 (巨大層序 V 到 VIII)，此時新特提斯洋位於赤道。從層序 V 到 VIII 同時也顯示了沉積環境從西南沿海的碎屑沉積、蒸發岩到東北淺水海域的石灰岩，最後到深海的泥岩，側向上的變化反應在這些地層層序中。

第四組包含三個巨大序列，年代從晚土倫期至現今，主要組成為近海、瀉湖與

陸源沉積物，主要來源為東北方的歐亞大陸，沉積出砂質碎屑岩、淺海及深海的碳酸鹽岩，以及局部地區沉積的蒸發岩，主要沉積趨勢呈現西北—東南向，沿著札格羅斯變形前緣分布（巨大層序 IX、X 以及 XI）。而褶皺逆衝帶的前陸沉積物在地層受到隆起抬升的過中不斷受到侵蝕，因此殘餘的部分只剩薄薄的覆蓋在部分地區的地層中。

在探討札格羅斯的構造變形時就必須談到其蒸發岩序列，蒸發岩層為一個軟弱的層，容易形成上下地層之間的滑脫層，影響區域的變形模式。除了霍爾木茲鹽系列之外，此區域的蒸發岩系列還有：二疊紀的 Dalan 組、三疊紀的 Dashtak 組、侏羅紀的 Alan 組、Adaiyah 組、Gotnia 組和 Hith 組及晚中新世的 Gachsaran 組，以及其他薄層的頁岩和泥灰岩，例如 Gurpi 組、Pabdeh 組。在地層中的序列關係可以參考圖 2-4 的地層柱。

Gachsaran 層為早中新世沉積的地層，期組成為硬石膏與石灰岩交互穿插，夾雜頁岩、鹽岩以及泥灰岩，為重要的蒸發岩層。

Pabdeh 層於古新世至始新世時期沉積，由深海相的頁岩組成，間夾泥質石灰岩與結核狀的燧石，雖然並非蒸發岩系列的地層，但卻是法爾斯地區重要的滑脫層之一。

Gurpi 層為白堊紀時期沉積的地層，主要組成為泥灰岩與頁岩，間夾深海相的泥質石灰岩，厚度約 100 至 550 公尺厚，此層也是法爾斯地區的主要滑脫層之一。

Hith 層是上侏羅統地層的蒸發岩地層，其成分為石膏與硬石膏並間夾白雲岩，地層越往內陸延伸則岩性越以白雲岩為主，若往東南延伸則地層逐漸尖滅。

Dashtak 層為法爾斯地區於二疊紀和三疊紀形成的蒸發岩序列，主要成分為淺海的碳酸鹽，間夾白雲鹽、頁鹽和粉砂岩，在法爾斯地區的地層後度變化極大，主要是因為侏羅紀早期的不整合導致的，一部分的上部 Dashtak 層受到侵蝕。越向內陸推進，Dashtak 層的組成成分逐漸變成等同於 Khaneh Kat 層的石灰岩與頁岩，間夾砂質白雲岩。

在札格羅斯褶皺逆衝帶中並沒有出露前寒武紀的地層，但沖出地表的霍爾木茲鹽中夾雜著前寒武紀的岩石碎屑，包括花崗岩、玄武岩以及一些變質後的沉積岩，被認為是來自基盤的一部分。霍爾木茲鹽的厚度難以測定，因鹽岩具有流動與延展性，因此原始厚度可能因此被破壞，根據不同研究的推估，霍爾木茲鹽的厚度大約

在 500 到 2000 公尺之間浮動，而霍爾木茲鹽的厚度也影響到上覆地層的形成與結構，例如霍爾木茲鹽厚度較薄的地區在區域地質上形成沉積盆地，影響後續沉積的地層厚度與幾何形狀。

除了霍爾木茲鹽系列之外，波斯灣東部存在另一組不同來源的蒸發岩層，即為從漸新世到中新世沉積的法爾斯鹽，法爾斯鹽沉積於前陸盆地中，並且受到既存的霍爾木茲鹽丘控制。Pabdeh 層和 Asmari 層上覆蓋著漸新世至中新世的 Gachsaran 層，其中又可以細分為三個不同的地層單元：底部由石膏和無水物組成（即 Chehel 層），中部由石灰岩和白雲岩交替的地層組成，中間夾有薄的蒸發物層（即 Champeh 層），上部由紅色頁岩夾雜薄層石灰岩層組成（即 Mol 單元）。這三個地層單元僅存在於法爾斯地區的東南部。其中 Chehel 層的厚度朝南方逐漸變薄，並且橫向過渡到 Champeh 層和法爾斯鹽。上覆的中新世地層快速轉變為 Mishan 層（漸新世至上新世）底部的 Guri 石灰岩，其組成以淺海相石灰岩夾雜著生物碎屑的泥灰岩為主（Pirouz et al., 2015）。

透過地層柱圖可知（圖 2-4），除了霍爾木茲鹽層與法爾斯鹽之外，在法爾斯的地層中存在四至五層軟弱的蒸發岩層或石灰岩層，這些弱面層容易與上覆地層之間形成滑脫面，而促使上覆地層受到水平擠壓的作用下容易產生褶皺。由於霍爾木茲層是一個基底的弱層，遍佈範圍極廣，它使破裂無法通過這層傳播，考慮到札格羅斯褶皺逆衝帶（Zagros fold-thrust belt, ZFTB）中規模大於 6.2 的地震很少，霍爾木茲層不只是重要的區域性屏障，也是法爾斯地區重要的基底滑脫面，在簡單褶皺帶中扮演著重要的角色。

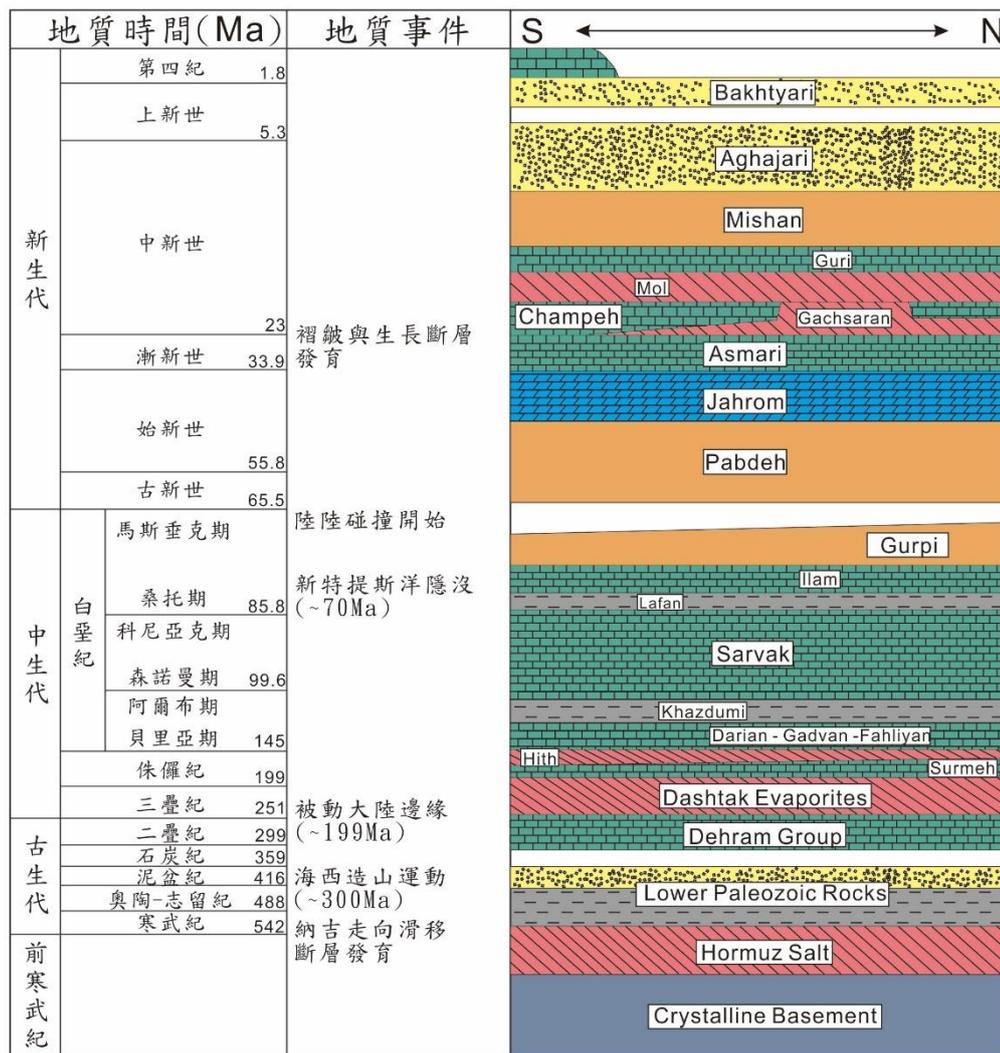


圖 2-4 東南法爾斯沿岸地層與年代對照表 (修改自 Motamedia and Gharabeigli, 2019)。

### 2.2.2 鹽貫入體的型態

霍爾木茲鹽的命名取於位於伊朗法爾斯省東部的霍爾木茲島(Hormuz island)，霍爾木茲鹽的組成包含鹽、無水石膏、白雲岩、頁岩、砂岩以及間或夾雜著已經變質的火成岩塊，這些火成岩塊為基盤的碎屑，隨著霍爾木茲鹽貫入上方岩層時被帶到地表。伊朗法爾斯省是世界上少有在地表具有大量鹽丘突起的地區，呈現圓拱狀

的結構，這些鹽丘分布在札格羅斯褶皺逆衝帶的東南段，Kent (1958; 1976; 1987) 提出這些鹽丘浮出地表的因素有兩種，一是受到上覆荷載下沉擠壓，二是經晚期構造運動擠壓。這些鹽運動開始的非常早，遠早於札格羅斯造山以前，而後受到造山運動的影響，部分鹽貫入體受到褶皺與斷層的影響而產生變形。

在研究區域的東法爾斯，鹽丘的型態和大小大不相同，從僅有數公里寬的殘餘噴發口到超過十五公里寬的鹽丘、鹽冰川，鹽受到各種因素影響。首先是發育的時間，絕大多數的鹽丘皆來自古生代即開始流動的霍爾木茲鹽，然而在南波斯灣地區同時也沉積了中新世的法爾斯鹽 (Fars salt)，法爾斯鹽發育的形態與分布就深受先發育的霍爾木茲鹽影響。第二是鹽溶解的速度，鹽是一種能溶於水的物質，因此當受到水溶液入侵時就有可能被溶蝕。第三是侵蝕速度，當鹽丘出露地表之後即受到風化侵蝕的影響，而鹽又受水的影響最為巨大，因鹽能溶於水。第四是鹽源的供給速度，鹽貫入體會持續緩慢由下往上供給鹽岩，但若是供給速度慢於鹽丘被侵蝕速度，鹽丘就會逐漸消退。最後為構造活動，後期構造造成的形變會牽動已經存在的鹽丘，順著構造的幾何形狀流動。

這些蒸發岩層擁有非常相似的地震相 (seismic facies)，一但鹽經過流動之後離開原沉積地，將不利於區分彼此的來源，因此分析多層鹽系統 (multi-layer salt system) 的機制相當重要。霍爾木茲鹽在晚白堊紀受到札格羅斯與阿曼造山的擠壓影響，其中一部分發生水平方向的流動，形成異地鹽 (allochthonous salt)，而漸新世至中新世沉積的法爾斯鹽則在新生代的擠壓事件中與霍爾木茲鹽同步流動。

Jahani et al. (2007) 按照霍爾木茲鹽噴發至地表的型態進行分類，主要為六種型態 (圖 2-5)：

1. A 型：霍爾木茲鹽向上頂起蓋層，形成拱狀圓丘，但並未出露於地表。A 型鹽丘仍深埋於地表之下，若是鹽源供給充足，或是覆蓋層受到侵蝕後使鹽丘暴露，此類型鹽丘可能會出露於地表。
2. B 型：鹽丘在地表高度凸起，並且鹽被擠出的作用大於鹽被溶解的作用，鹽丘仍然活躍。
3. C 型：鹽丘具有巨大的鹽冰川 (salt glaciers) 以及拱丘，拱丘的位置可能位於霍爾木茲鹽露頭的中心或鹽冰川的邊緣處。此類型的鹽丘高度由於橫向發展的緣故，通常低於 B 型鹽丘。



- 4. D 型：表面呈現不規則狀，具有類似於火山的噴發口，噴發口的邊緣陡峭並由經鹽體擠壓而倒轉的新生代地層組成。
- 5. E 型：鹽丘已經不再活躍，鹽體經過侵蝕作用之後大量流失，只剩下霍爾木茲鹽的殘餘物與被溶蝕後的空洞噴發口。
- 6. F 型：通常呈線性，分布於與霍爾木茲鹽相關的逆衝或走滑斷層之上，沿著斷層錯動的方向流動。

B 型與 C 型鹽丘主要分布於法爾斯中部與東北部，屬於目前非常活躍的鹽丘，差別僅在於鹽冰川的存在與否；大多數鹽丘屬於 D 型，分布於波斯灣附近，活動性略低於 B 型與 C 型，地勢較低矮。本研究的鹽貫入體位於圖 2-5 的紅框處，蓋維辛(Gaverzin)屬於 A 型盲鹽丘，Pol 屬於 B 型正在活躍的鹽丘，其餘加希(Gachin)、霍爾木茲(Hormuz)、拉拉克(Larak)、亨賈姆(Hengam)為活動性較低的 D 型鹽丘，然而加希位於背斜軸的端點上(圖 2-6)，霍爾木茲及拉拉克位於霍爾木茲斷層帶(Hormuz fault zone)上，因此這些鹽丘極有可能受到構造影響而再度活躍。

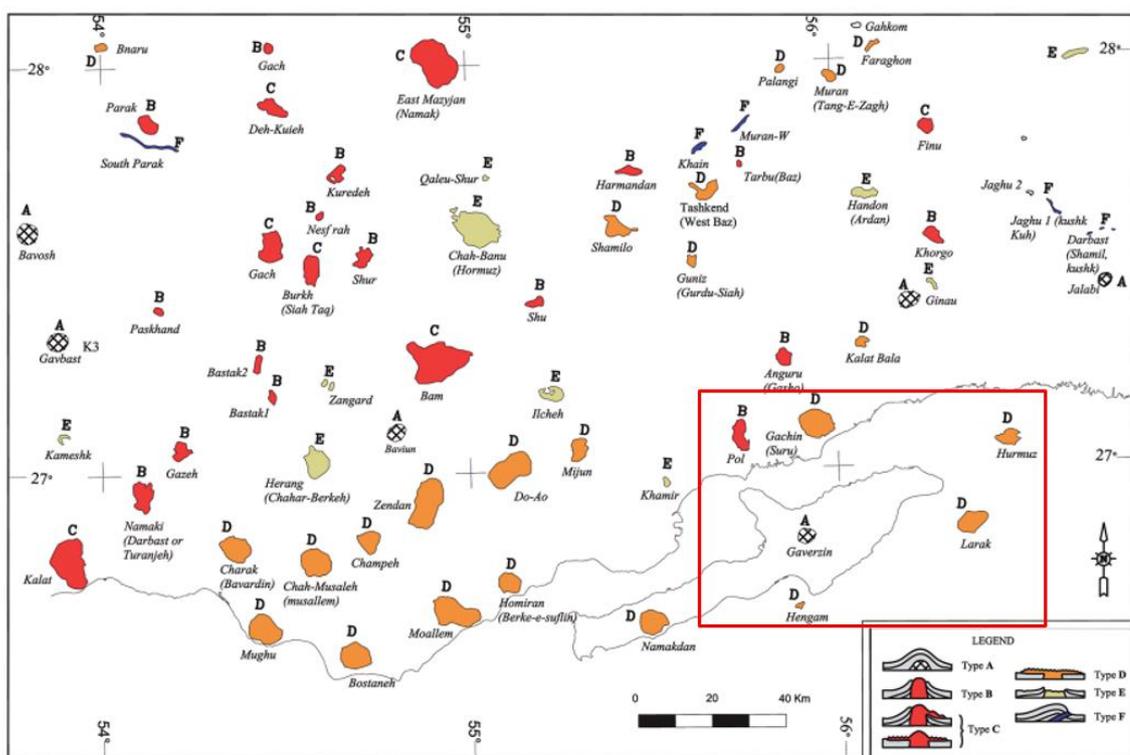
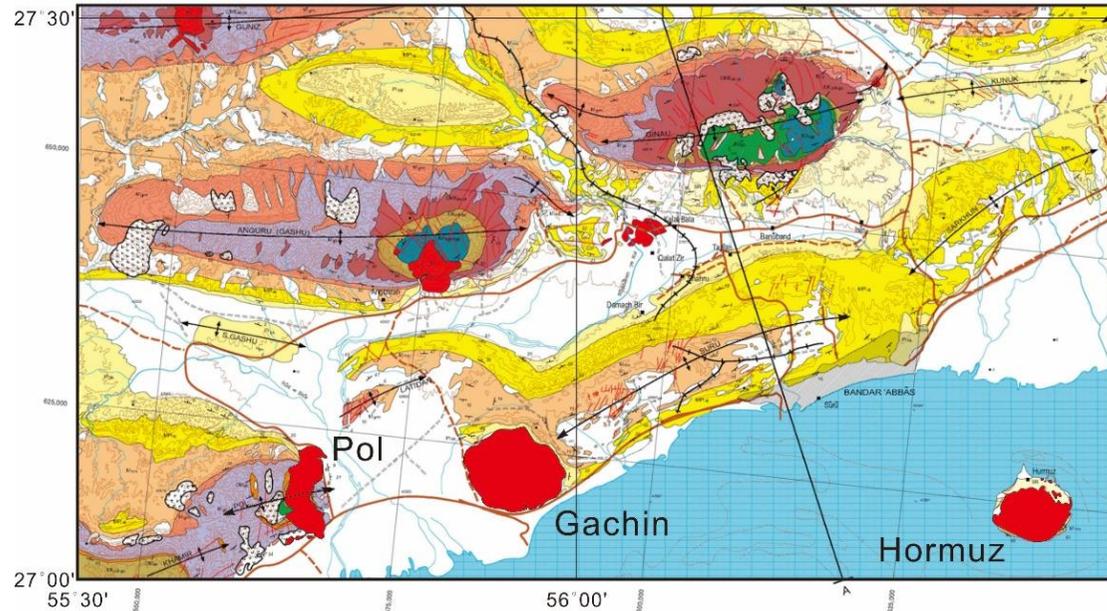


圖 2-5 東法爾斯鹽貫入體型態與分布圖(摘自 Jahani et al., 2007)。紅框處為本研究範圍的鹽貫入體。



- ↕ Anticlinical Axis with plunge
- Fault
- ▲ Thrust Fault
- Quaternary Fault
- 22 Normal Dip
- 72 Overturned Dip
- ☉ Landslip
- Town
- Village
- Asphalt road
- - - Secondary road
- - - 4 wheel drive road
- - - Food path
- Railway
- ~ River
- Land subject to inundation
- Contours
- Sand dunes
- Tidal flats

CENOZOIC	Quaternary	~	Alluvium and Recent deposit
		SR	Sub Recent
	U. Pliocene	Pt <sub>bk</sub>	Bakhtyari Formation
	Pliocene	MPI <sub>aj</sub>	Agha Jari Formation
	Miocene	M <sub>mi</sub>	Mishan Formation
		M <sub>gm</sub>	Guri Member
		M <sub>rz</sub>	Rzak Formation
		M <sub>gs</sub>	Gachsaran Formation
		M <sub>zd</sub>	Zendan Formation
	Oligocene	OM <sub>as</sub>	Asmari Formation
OME <sub>as-ja</sub>		Asmari-Jahrum Formation	
Eocene	E <sub>st</sub>	Setang Formation	
	E <sub>ja</sub>	Jahrum Formation	
	EK <sub>ps-ga</sub>	Pabdeh-Gurpi Formations	
MESOZOIC	Cretaceous	EK <sub>ps-stb</sub>	Pabdeh-Sachun-Tarbur Formations
		K <sub>tb-bgp</sub>	Tarbur Formation and Bangestan Group (Il-Sv-Kz) Formations
	Jurassic	K <sub>bgp</sub>	Bangestan Group (Iam-Sarvak, Kazhdumi Formations)
		K <sub>u-kgp</sub>	Upper Khami (Dariyan-Gadvan-Fahliyan Formations)
		K <sub>l-kgp-kgp</sub>	Bangestan Group and Khami group Formations shale and dolomite
	Triassic	K <sub>l-kgp</sub>	Khami Group (Dariyan-Gadvan-Fahliyan-Hith-Surmeh Formations)
		J <sub>sm</sub>	Surmeh Formation
	Paleozoic	J <sub>nr</sub>	Neyriz Formation
		J <sub>nr-ks</sub>	Neyriz-Khaneh kat Formations
		P <sub>ak</sub>	Khaneh kat Formation
Permian	P <sub>da</sub>	Dalan Formation, Limestone, Dolomitic limestone	
Devonian	PD <sub>tr</sub>	Faragun Formation	
Ordovician	OS <sub>sh-sch</sub>	Siahou and Sarchahan Formations	
Silurian	H <sub>s</sub>	Hormoz Series	
	C <sub>s</sub>	Coloured series	

圖 2-6 阿巴斯港附近地質圖 (修改自伊朗國家石油公司 250 萬分之一地質圖)。



### 2.2.3 研究區域構造特徵

霍爾木茲鹽存在於札格羅斯褶皺逆衝帶中，但只分布在法爾斯與迪茲富勒的東南部，向南擴及阿拉伯半島的東北部。但無論霍爾木茲鹽存在與否，札格羅斯山脈的變形趨勢卻沒有出現明顯的不同，例如中部法爾斯並沒有霍爾木茲鹽的分布，但整體變形行為仍與周遭其他地區一致 (Alavi, 2004)。

大多數鹽丘在札格羅斯造山運動之前被以枕狀結構或鹽拱丘觸發其活動性，並在新生代早期札格羅斯造山運動中影響褶皺位置與形狀 (Callot et al., 2007; Motamedi et al., 2011)。在褶皺逆衝帶中具有眾多不對稱且向南傾斜並互相平行的背斜，這些背斜皆是來自斷層擴展褶皺 (fault-propagation folds) 或是斷層彎曲褶皺 (fault-bend folds)，越靠近變形前緣背斜越平緩。這些褶皺被稱為強制褶皺 (forced fault)，受到下方構造活動的影響而彎曲隆起，在札格羅斯東南部，部分褶皺軸的核心被下方的鹽體填充，隨鹽上拱的同時也會強制造成上方褶皺。

法爾斯的簡單褶皺帶中發育了許多因碰撞而引起的鯨背形狀的箱型褶皺 (whale-back box fold)。在這個地區中的褶皺波長受中生代淺水水域沉積的碳酸鹽層厚度以及第三紀的碎屑沉積層控制。法爾斯的斷層主要是向北傾的逆衝斷層，傾角低並且年輕，越往東北方則斷層年代越古老且傾角也越高。通常逆衝斷層呈現脆性變形構造，斷層筆直且尖銳，並且多半夾雜被磨碎的圍岩碎屑，然而若是斷層剪切過蒸發岩，因蒸發岩機械性低，並且具有流體的性質，受剪切後呈現塑性變形，並使鹽岩順著破裂面移動。

法爾斯的主要滑脫層是霍爾木茲鹽，在分離背斜 (detachment anticline) 的核心厚度從數百米到超過 2.5 公里不等，在法爾斯地區，大部分沉積物通過這個基底分離層的加厚產生變形。霍爾木茲鹽控制著褶皺半波長，通常半波長規模在 6 到 12 公里之間，褶皺振幅則落在 3 到 8 公里不等，褶皺呈現不對稱的形狀，褶皺軸南翼較陡峭，在東南法爾斯的鹽貫入體則受到構造活動影響較小。

位於法爾斯地區南側的阿曼山脈的前緣擁有多個地形高區，這些高區被霍爾木茲鹽的貫入結構穿透，其中最突出的幾個高區包括：Hormuz-Barez 和 Sepid 高區 (HBS)、Hormuz-Dastan 和 Farshid 高區 (HD)、Hormuz-Aras 高區 (HA) 以及 Zirang-Hulur 褶皺。HBS 高區並無任何霍爾木茲鹽的結構，與之相反，其他高區則

被鹽貫入體結貫穿，其中最重要的是位於 HD 高地的拉拉克和霍爾木茲鹽貫入體，以及位於 Zirang-Hulur/Taftan 褶皺帶上的亨賈姆（Hengam）鹽貫入體（圖 2-7）。從震測剖面圖可知法爾斯鹽僅存在於波斯灣中的沉積盆地內，越向東北方厚度越薄，最終尖滅。

本研究區域位於阿巴斯港附近，圖 2-8 為附近的構造線圖，Sar Pohl 為波爾（Pol）鹽貫入體的別稱。波爾及加希分別被左移斷層切過，褶皺軸走向經剪切後由東西向轉向東北—西南走向。蓋維辛（Gavarzin）位於拉夫特背斜（Laft Anticline）的東南端，拉夫特背斜呈現與左移斷層垂直的西北—東南走向。

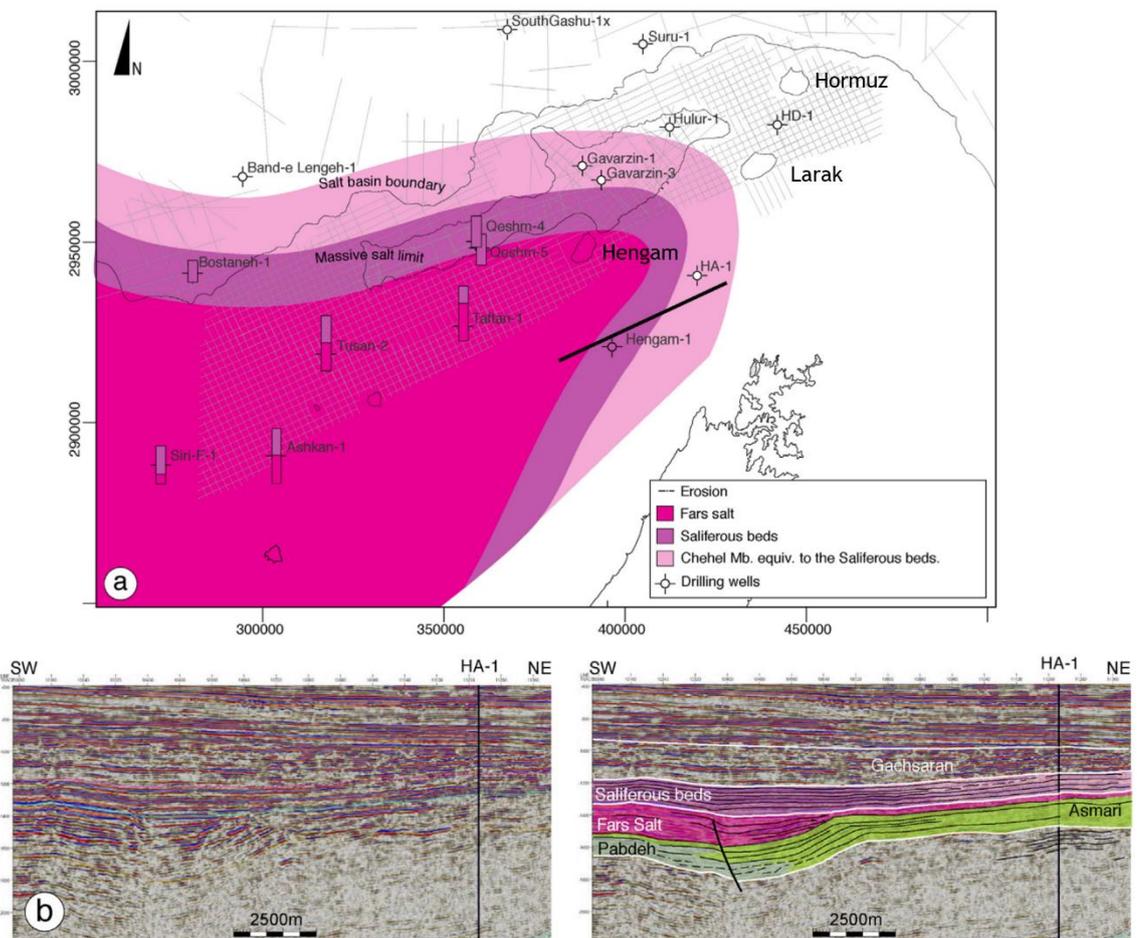


圖 2-7 法爾斯蒸發鹽岩相圖（摘自 M. Snidero et al., 2020）。(a) 柱狀圖為簡易的地層厚度標示，紫紅色區域代表法爾斯鹽的分布情形。(b) 東法爾斯鹽盆地邊緣的西南—東北向地震剖面，並著重強調法爾斯鹽層在 Asmari 層上的幾何結構，左為原始震測剖面，右為地層著色標示後。法爾斯鹽橫向朝東北方尖滅。

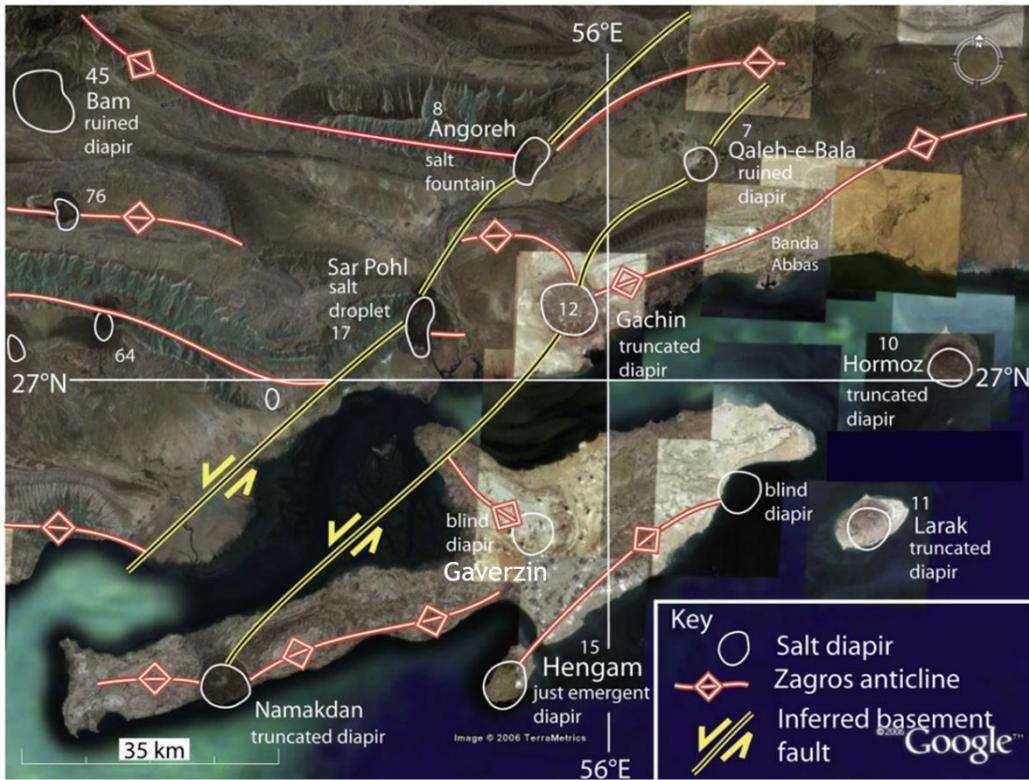


圖 2-8 阿巴斯港附近構造線與鹽貫入體分布圖 (修改自 Talbot et al., 2009)。白色圓圈為鹽貫入體所在位置，紅色線段為背斜軸所在位置，黃色線段為左移斷層所在位置。本研究將著重討論波爾 (圖中編號 17)、加希 (圖中編號 12)、霍爾木茲 (圖中標號 10)、拉拉克 (圖中編號 11)、亨賈姆 (圖中編號 15) 以及未出露地表的盲鹽丘蓋維辛。

## 第3章 研究方法與資料處理



### 3.1 衛星遙測技術

近年來合成孔徑雷達 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 被廣泛運用在獲取地表形變資訊上的探測並且得到卓越的成效。利用合成孔徑雷達重複拍攝所獲得的複數影像，經影像干涉後的相位變化解析三維數值資訊，再透過差分干涉技術 (Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, D-InSAR) 便可以分析地表的變動數值。傳統上在進行大範圍的測量時往往受限於人力、物力以及財力等因素，合成孔徑雷達由於涵蓋的影像範圍大，並且可以獲得不同時期的變動數據，對於需要高精度且大規模的測量來說十分適合，以及其對於地表長時間尺度下的微小變形量觀測表現優異，具有廣大的覆蓋範圍且資料取得穩定，適合用於各類地質調查，例如地震、火山、山崩、土石流及地層下陷、地下水等等。由於大區域的構造活動的年位移量僅達數公分，透過衛星遙測長時間定點並藉由大量影像相互進行干涉對比，可以獲得一地區的變形時間序列。

最初的雷達設計原理是朝目標物發射雷達波，並且透過計算發射與回波的時間來推估與目標物之間的距離。然而隨著距離增加，受限於天線長度而使解析度不甚理想，但若是增加天線長度，搭載雷達的平台又難以負荷如此巨大的天線，而合成孔徑雷達干涉技術 (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) 解決了這個問題，使用合成陣列來提高解析度。

#### 3.1.1 差分干涉法 (D-InSAR)

雷達干涉的原理是透過衛星朝一定方向發射雷達波訊號，利用同一顆衛星在不同時間接收同一地區的反射訊號或是兩組衛星同時接收同一區域訊號的方式記錄波發射與接受回波的時間差，經由波速與時間的計算得出與觀測目標的距離，獲得兩幅以上的複數資料 (Complex data)，再透過距離之間的相位差產生干涉環，經由相位之間的差異計算地表變形之間的高程 (圖 3-1)。

干涉雷達主要分成三種 (Gen & Genderen, 1996)：



1. 橫軌式干涉 (Across-Track Interferometry)

將兩根天線裝載於同一個平台上，並且方向與飛行方向垂直。

2. 沿軌式干涉 (Along-Track Interferometry)

將兩根天線裝載於同一個平台上，並且方向與飛行方向平行。

此方法應用於觀測移動物體的瞬間變動量，透過都卜勒原理可知目標物靠近或遠離的變化，但此方法卻難以觀測固定不動的物體。

3. 重複軌道干涉 (Repeat-Track Interferometry)

將一根天線裝載於平台上，透過重複觀測同一地區的影響可計算拍攝前後的變化量。

此方法由於前後飛行時的軌道不一定重合，因此需要精準的飛行軌道路徑，觀測前後時長也不可太長，以及地表變化變動也不可過大，否則影像之間相關性太低則有可能無法進行干涉。

本研究所使用的即為重複軌道干涉 (圖 3-2)。D-InSAR 利用重複軌道獲取同一地區不同時間的 SAR 影像，將兩幅以上的影像進行差分，得出兩張影像前後地形與衛星之間的相位變化，相同的相位差在干涉圖中呈現條帶狀，即為干涉條紋，透過給予數值地形模型的校正消除地形效應，解算後可得出地表地形變化量。

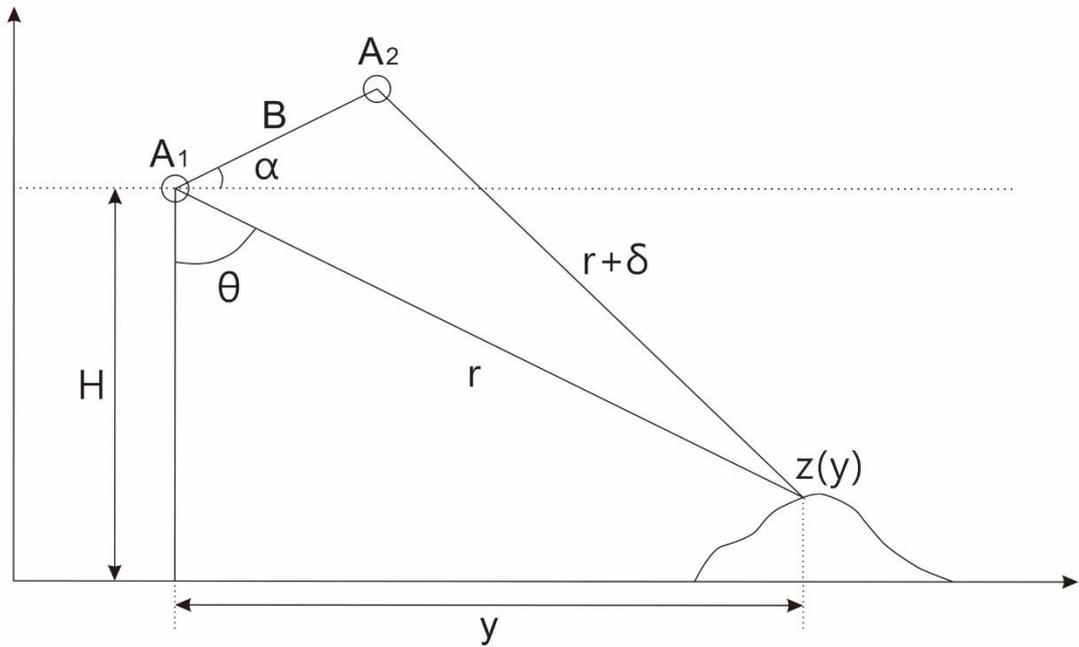


圖 3-1 差分干涉技術 (修改自 Hanssen, 2001)。A1、A2 為衛星拍攝前後的空間位置，B 為彼此間的基線長度，H 為衛星與地面的距離，y 為衛星與測量目標間的水平距離， $\theta$  為衛星視傾角， $r$  為第一次測量時衛星與測量目標的距離， $r+\delta$  為第二次測量時衛星與測量目標的距離， $\alpha$  為基線與水平面的夾角。

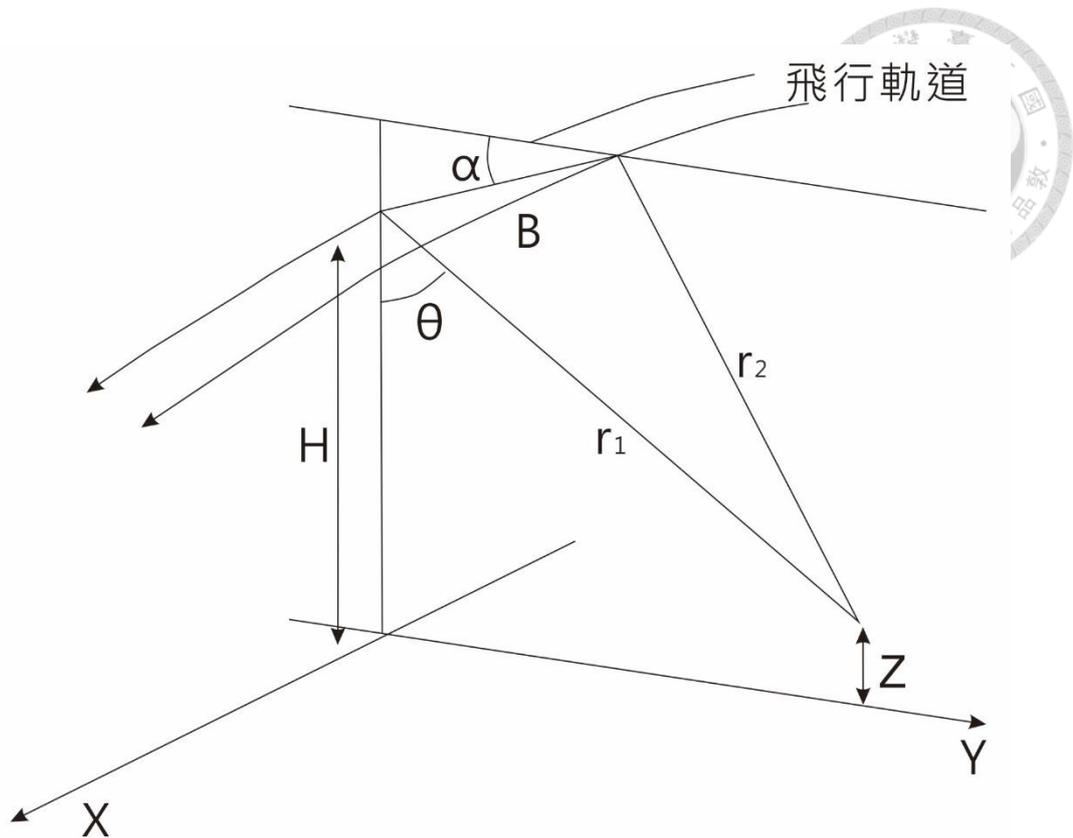


圖 3-2 重複軌道干涉示意圖 (修改自 Hanssen, 2001)。B 為基線，H 為衛星與地面的垂直距離，Z 為目標物的高程， $r_1$ 、 $r_2$  為先後觀測的測距， $\theta$  為衛星視傾角， $\alpha$  為基線與水平面夾角。

### 3.1.2 合成孔徑雷達

最早的雷達技術是應用在軍事活動，追蹤船隻的動向。1940 年代，麻省理工學院成立輻射實驗室並使雷達發展快速發展，並在 1950 年代將雷達架設於飛機上。1960 年代，美國太空總署 (NASA) 開始嘗試將雷達技術應用到太空，在 1978 年成功由 Pioneer-1 衛星拍攝回傳金星的衛星影像，當時的解析度大約是 50 公里。一直到 1990 年代，合成孔徑雷達的應用才逐漸以觀測地球表面資訊為主，任務內容包括監測陸地及海洋表面，以提供學術研究之目的，例如歐洲太空總署第一個以地球觀測衛星——歐洲遙感衛星 (European Remote Sensing satellite, ERS)，以及加拿大在 1995 年發射的 RADARSAT-1，任務目的是監測全球氣候變化，雖然目前這顆衛星已經停止運行，而後數年各國也發射了數顆不同波段的衛星。技術的進步也使合成孔徑雷達干涉技術越來越成熟，解析度也越來越精確。

常用的雷達波段有三種：X 波段、C 波段、L 波段。當波長越長，穿透植被達

到地表的能力越好，使用 L 波段的衛星例如日本的 ALOS、ALOS-2 衛星，最常使用的 C 波段衛星如歐洲太空總署的 Sentinel-1、ENVISAT 以及加拿大的 RADARSAT-2。詳細波段與其搭載的衛星平台見表 1。

將雷達裝載於飛機上，並且沿著飛行方向以固定角度連續發射雷達波並同時接收回波，此系統為航空側視雷達 (Side Looking Aperture Radar, SLAR)，透過回波訊號強度、距離與方位可以算出地形影像與高程資訊。然而當雷達架設於太空時，距離增加使解析度大幅度下降，若要獲取足夠解析度的影像，勢必得增加天線的長度，但在任何平台上都難以搭載數百公尺長的天線。而合成孔徑雷達利用陣列改進這項缺點，在衛星運行的同時，雷達不斷向地面發射電磁波，同時蒐集回波數據，將這些沿著衛星軌道方向連續發射雷達波的天線視為一個長度極長的天線，此為合成孔徑的原理 (圖 3-3)。

本研究使用的是繞極衛星哨兵一號 (Sentinel -1A) 系列 C 波段的影像，波長 5.54 公分，再訪週期為 12 天，每一幅影像含有三幅次像幅 (sub-swath)，透過升軌與降軌影像對地表變形進行觀測。Sentinel-1A 於 2014 年升空，是歐洲航天局哥白尼計劃 (GMES) 中的地球觀測衛星，隔年 2015 年 Sentinel-1B 升空，與 Sentinel-1A 共同執行任務，使再訪週期縮短為 6 天，然而 Sentinel-1B 在 2021 年 12 月發生電力系統故障，Sentinel 的再訪週期再度拉長為 12 天，雖然歐洲太空總署積極搶修了數月，最後仍宣布 Sentinel-1B 結束任務，並決定加快 Sentinel-1C 於 2023 年發射升空的計畫。由於 Sentinel-1B 故障退役的緣故，本研究僅能使用 Sentinel-1A 的數據資料。

表 1 雷達波段表 (修改自何世紀, 2006)。

波段名稱	波長(cm)	頻率(GHz)	衛星平台
Ka	0.75-1.11	26.5-40	
K	1.11-1.67	18-26.5	
Ku	1.67-2.5	12.5-18	
X	2.5-3.75	8-12.5	SRTM
C	3.75-7.5	4-8	RADARSAR, ERS-2, ENVISAT, Sentinel-1
S	7.5-15	2.4	Almaz
L	15-30	1-2	JERS, SERSAT, ALOS
P	30-100	0.3-1	

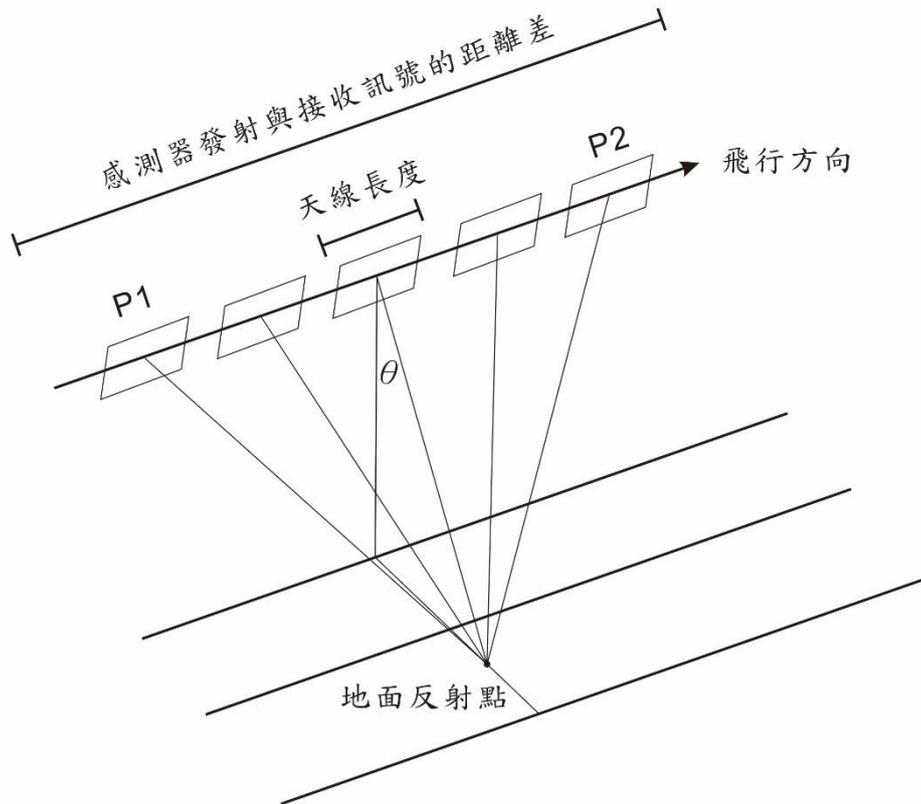


圖 3-3 合成天線陣列示意圖 (修改自黃孟涵, 2006)。衛星在飛行的同時不斷發射與回收雷達波, P1、P2 為雷達發射與接收訊號的位置,  $\theta$  為衛星的視傾角。

### 3.1.3 影響成像的因素

由於合成孔徑雷達發射的波並非垂直地表, 而是以側視的方式觀測, 因此地表地形的起伏將會影響雷達成像的結果, 使成像與實際地貌並不相同, 主要造成的幾何變化有三種 (圖 3-4)。

#### 1. 疊置 (layover)

由於目標物距離雷達越近回波越早抵達衛星的緣故, 當目標物較高時, 頂部比底部更接近雷達, 導致回波訊號重疊, 通常這種現象出現在山稜線, 並且面向衛星雷達的坡面坡度比雷達與地面的夾角還大時。

#### 2. 前波縮短 (foreshortening)

當面向雷達的坡度小於雷達波與地面的夾角時, 雷達波抵達山頂與山腳的時間非常接近, 導致面向波的成像比實際狀況要短。



### 3. 陰影 (shadow)

由於雷達波直線傳遞的特性，當波行經的路線被遮蔽的時候，因為被遮蔽區沒有回波訊號，因此出現陰影區。又或是波經歷全反射而沒有返回衛星的雷達波接收器，也會造成無訊號的形況。

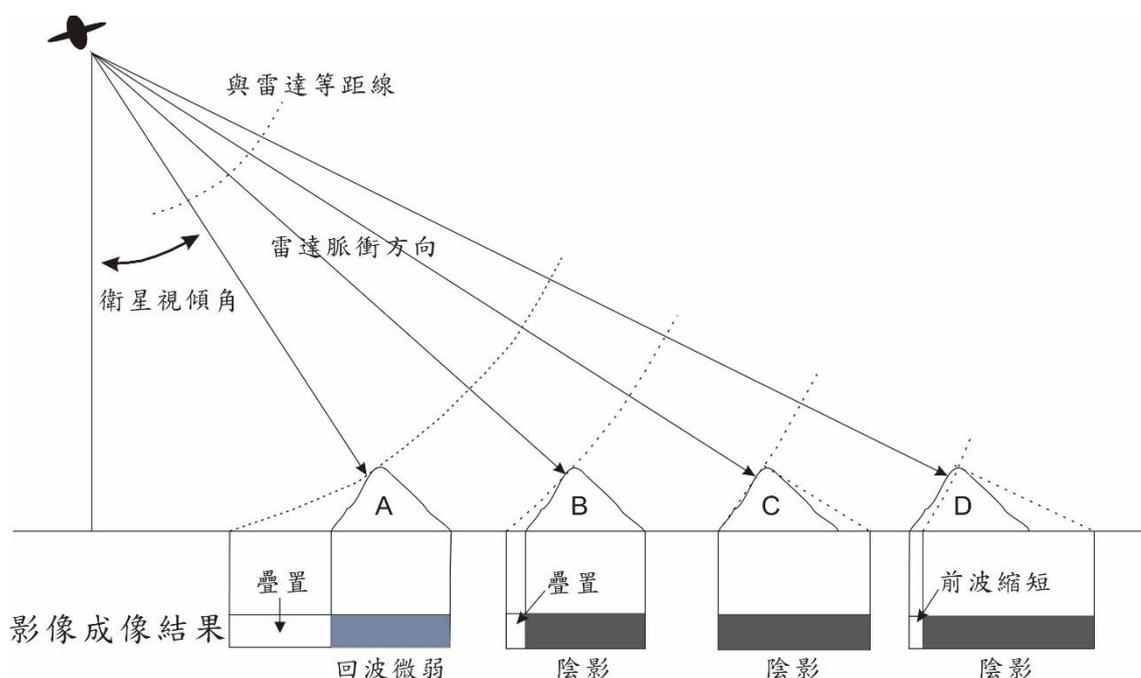


圖 3-4 雷達成像的幾何變化 (修改自 Lillesand et al., 2015)。

除了面向波的坡度會影響成像之外，還有水體的影響也非常重要，由於水體會產生全反射，雷達波無法沿著路徑回傳，收不到訊號的情況下，在雷達影像中水體會呈現黑色；截然不同的另一種情況，當雷達波接觸直角的目標物時，雷達波經歷兩次全反射後回傳，接收到的訊號最強，因此衛星遙測影像在都市地區的成像最好，因此若是在植被較旺盛的地區或是表面凹凸不平的區域，雷達波經過散射之後，會導致回波的訊號變差，成像結果就會不如都市地區。倘若接收器收到的回波訊號太弱，會導致影像之間的相關性降低，相關性太低時會產生失相關 (圖 3-5)。

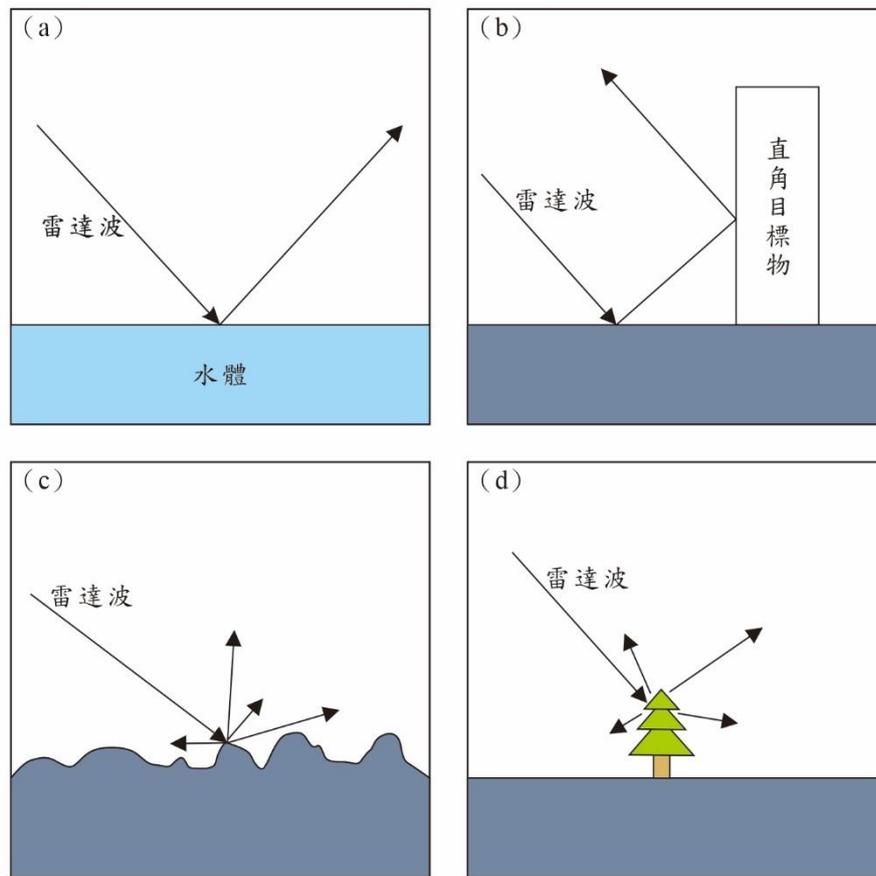


圖 3-5 雷達波接觸不同材質的回波模式示意圖。(a) 雷達波接觸水體產生全反射 (b) 雷達波接觸直角目標物產生兩次全反射 (c) 雷達波接觸凹凸不平的反射面產生漫射 (d) 雷達波接觸植被產生漫射。

### 3.2 資料處理軟體

本研究所使用的資料處理軟體為 GMTSAR，GMTSAR 是一個開源的 InSAR 處理系統 (GNU 通用共同授權)，使用 C 語言編寫，目前限制在 Linux 和 Mac 環境下使用，是專門設計給 GMT (Generic Mapping Tools) 使用者的系統。GMTSAR 利用三個主要的組件處理影像：

1. 衛星數據預處理器：用以將原始的影像與軌道檔案格式轉為通用格式。
2. InSAR 處理器：將圖像對焦和對齊，並且投影出相位差，產生干涉圖型。
3. 後處理器：過濾干涉圖並建構相位、相關性以及雷達和地理座標轉換。

相較於其他 InSAR 處理方法，GMTSAR 極為依賴軌道的精度，因此對於軌道



精度較低的衛星（精度 > 10 公尺）就無法使用該方法，例如 RADARSAT-1。在 GMTSAR 中的對焦依賴衛星的軌道軌跡的誤差率，如果天線和反射體之間的距離在合成孔徑的距離內存在大於約 1/4 波長的誤差，則影像就會失去對焦。而本研究所使用的衛星影像為 Sentinel-1，其精度小於一公尺，利於 GMTSAR 將地形的經緯度投影到雷達座標的距離與方位座標上。目前軌道足夠精確能使用 GMTSAR 進行處理的的衛星還包括 ERS-1、ERS-2、Envisat、ALOS-1 和 TerraSAR-X、COSMO-SkyMed、Radarsat-2 以及 ALOS-2。

### 3.2.1 小基線子集法時間序列處理

由於地表在長期觀測中可能發生時間與空間上失相關，導致利用 InSAR 技術對地表進行監測時會發生能採用的測量點不足的問題，而小基線子集法（Small Baseline Subset, SBAS）則解決了這個問題。此方法將所有衛星影像都視為主影像，在時間與空間基線中與其他合適基線長度的影像進行配對，縮短基線的長度有助於消弭長基線造成的失相關，增加觀測點的密度。適合用於影像幅數過少、時間與空間基線過長，或是該區域相關性過低導致可用數據點過少的情況。

GMTSAR 內建的小基線處理法是利用最小二乘法（Least square, LS）進行反演，給定進行差分干涉的 SAR 影像幅數（S）、產生的干涉環數量（N）、干涉圖尺寸（xdim & ydim）、雷達到干涉圖中心的距離（range）、雷達波波長（wavelength）以及雷達波入射角（incidence），即可計算出速度場與累積變形量。

最小二乘法透過矩陣運算，G 為 SAR 影像拍攝的時間分布，假設 InSAR 數據來自 S 張影像產出的 N 個干涉圖，以 0 與 1 表示。向量 L 為 1 × S 的向量，其內容為按照時間順序的 SAR 影像。H 是一個 2 × N 矩陣，按第一張影像的日期往後排序，其中包含每個干涉圖的開始和結束日期。G 矩陣中的元素  $G_{ij}$  可以表示為：

$$G_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{for } H_{i1} \leq L_j \leq H_{i2} \\ 0 & \text{for } H_{i1} > L_j \text{ or } L_j \geq H_{i2} \end{cases} \dots\dots\dots(3.1)$$

增量 m 為 SAR 影像的距離變化，d 為每個干涉對的像素位置，D 為像素的距離變化，C 為增量所組成的累積時間序列（圖 3-6）。將以上參數投入小基線模型中運算求得變形數據。

然而 GMTSAR 解算出的累積變形序列與速度場其座標並非經緯度，而是距離

與方向角的座標，還要經過座標轉換後才可以經緯度的格式匯出。透過 QGIS 可以將座標轉換成經緯度，並且計算升降軌影像疊加後的真實垂直與水平變形速度。

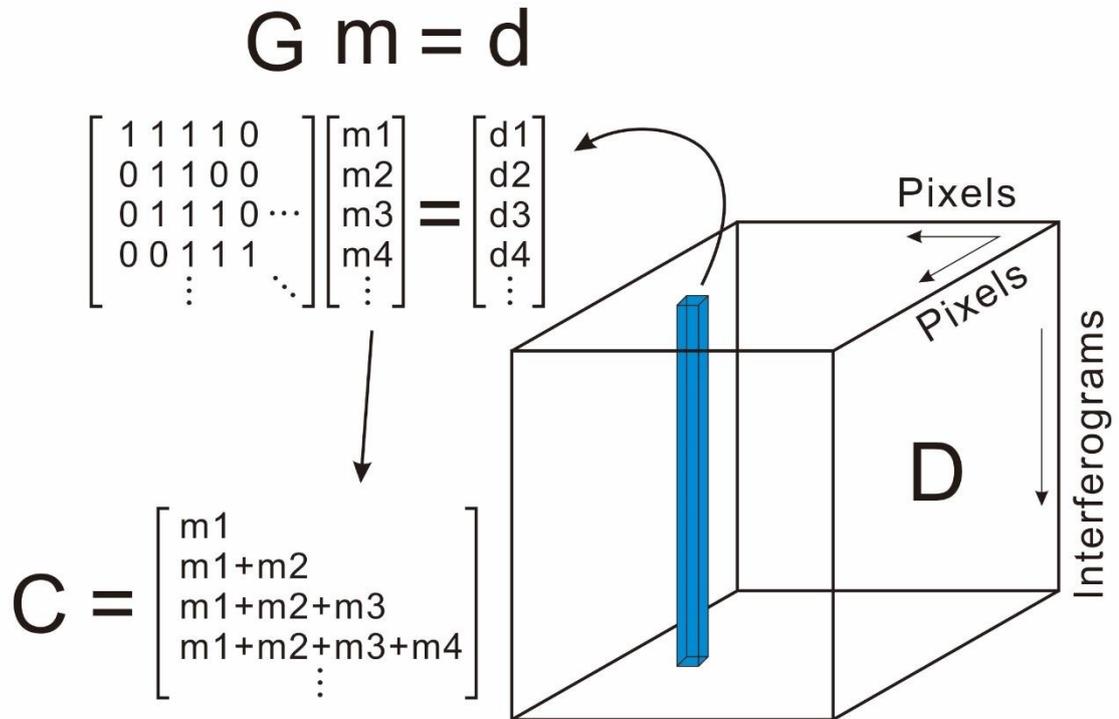


圖 3-6 小基線反演模型與矩陣（修改自 Schmidt and Burgmann, 2003）。

### 3.2.2 大氣校正

當雷達波穿透大氣的時候，大氣擾動以及水氣等干擾訊號會影響雷達成像的品質，使影像中的雜訊增加，因此必須進行大氣校正，去除雜訊影響。GMTSAR 所使用的大氣校正法是利用同影像疊加法(Common-scene stacking)(Tymofyeyeva and Fialko, 2015)，將各個干涉對中取出擁有相同日期的影像，把這些干涉對相減並取平均，得到大氣相位估計值，並且計算大氣的雜訊（圖 3-7）。

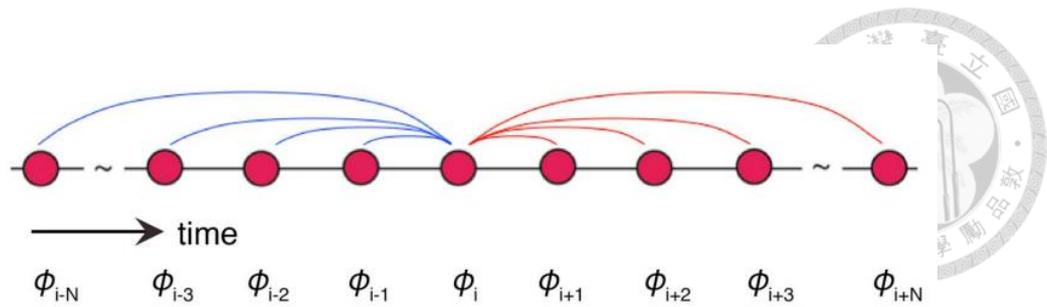


圖 3-7 估計平均大氣相位延遲的模型 (摘自 Tymofyeyeva and Fialko, 2015)。

### 3.3 處理流程

本研究使用 GMTSAR 軟體處理干涉與小基線，圖 3-8 為處理流程圖，詳細處理流程如下：

#### 1. 下載需要的影像、軌道檔、數值高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)

選定研究區域的軌道影像並下載，需要特別注意的是，若所需區域的影像橫跨不同軌道，必須將其分開處理；若是同一軌道但橫跨不同影像，需要合併影像後再進行影像處理。由於一張軌道影像中含有三個次像幅 (sub-swath)，如果研究區域比較小，沒有涵蓋所有次像幅，GMTSAR 也可以單獨處理單一次像幅。

本研究使用的 DEM 為 SRTM 1 之 30 米數值高程模型 (Farr et al., 2007)。

#### 2. 選擇主影像

主影像為所有影像基線中垂直基線差最短的影像，由於 SAR 影像需要產生大量的干涉對，需要將影像與 DEM 對齊，當垂直基線最小時干涉對的相關性最高，並且所有次像幅的主影像必須一致，因此選擇主影像時一般選取基線中位於中間的影像。

#### 3. 紀錄干涉對並產生干涉圖

利用 GMTSAR 紀錄干涉對，系統會基於給定的時間與空間的限制參數篩選出干涉對組合，初始設定是以 50 天及 100 公尺為基準，滿足其條件的干涉對就會被 GMTSAR 列出，依照列出的干涉對組合進行差分干涉，產出的結果即為個干涉對兩影像期間產生的地表相位差，以干涉條紋的形式呈現。

#### 4. 合併影像

獲得干涉影像之後進行影像合併，若是影像橫跨複數的次像幅就必須做影像拼接 (Merge)，並且拼接的次像幅必須擁有統一的主影像，以確保所有影像的座標皆一致。拼接後可以得到多個次像幅合併的干涉圖、相關性等干涉對資料。



### 5. 相位回復

由於前面步驟獲得的干涉圖中，地表變形資料以  $2\pi$  數值呈現，一但超過此數值則會循環往復，為了得到真實地表變形的相位數值必須將干涉圖的相位回復 (Unwrapping)，由此得到連續疊加的真實相位，以利後續的小基線解算。

若是影像中包含大範圍水體、植被等相關性極低的區域，系統仍會進行運算，會佔據太多不必要的運算時間，因此必須先進行遮罩 (Mask)，以提高軟體運行的效率。

### 6. 小基線處理

由前步驟得到連續疊加的相位之後才可以進行小基線處理，以計算長期地表變形的時間序列。此步驟可以使用 GMTSAR 內建的小基線程序做處理，同時進行大氣校正。

### 7. 視衛星方向變形分量

由於雷達波抵達地表的角度並非垂直 (圖 3-9)，因此觀測到的變形量是接近衛星或遠離衛星的變形量，也就是視衛星方向變形量而非真正水平與垂直的變形分量。透過升軌與降軌的變形量綜合計算之後，可以算出真實的抬升或沉降數據，以及東西向水平位移的變形量。

由於 Sentinel-1A 衛星是一顆繞極衛星，飛行的方向大致為南北向，對於南北分量的變化解析度很低，因此本研究將著重在東西分量與垂直分量上的探討，將南北向分量忽略不計，進行 2.5D 數值分析。若只把東西分量與垂直分量納入考慮，為了獲取真實的地表變形量，必須獲取升軌與降軌的視衛星方向的位移速度  $LOS_A$  與  $LOS_D$ ，以及衛星飛行方向與北方的夾角  $\alpha_A$ 、 $\alpha_D$  和衛星對地表攝影時雷達脈衝波的入射角  $\theta_A$ 、 $\theta_D$ ，並且經過以下計算：

$$\begin{bmatrix} LOS_A \\ LOS_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_A \cos \alpha_A & \cos \theta_A \\ -\sin \theta_D \cos \alpha_D & \cos \theta_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ U \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.2)$$

進行反矩陣計算後得下兩式：

$$E = \frac{LOS_D \cos \theta_A - LOS_A \cos \theta_D}{\cos \alpha_D \sin \theta_D \cos \theta_A - \cos \alpha_A \sin \theta_A \cos \theta_D} \dots\dots\dots (3.3)$$

$$U = \frac{LOS_A + E \cos \alpha_A \sin \theta_A}{\cos \theta_A} \dots\dots\dots (3.4)$$

利用 QGIS 軟體對升降軌影像進行計算，即可將視衛星方向的位移速度轉換成東西及垂直方向的位移速度。

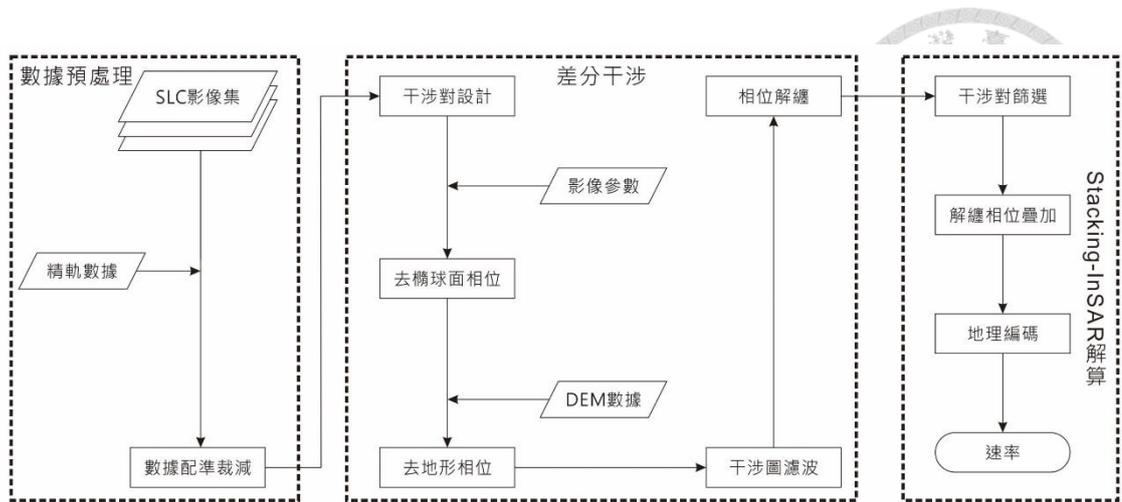


圖 3-8 差分干涉處理流程圖。先進行影像愈處理，而後採取差分干涉獲取變形資訊，再將所得的變形數據進行解纏與座標轉換。

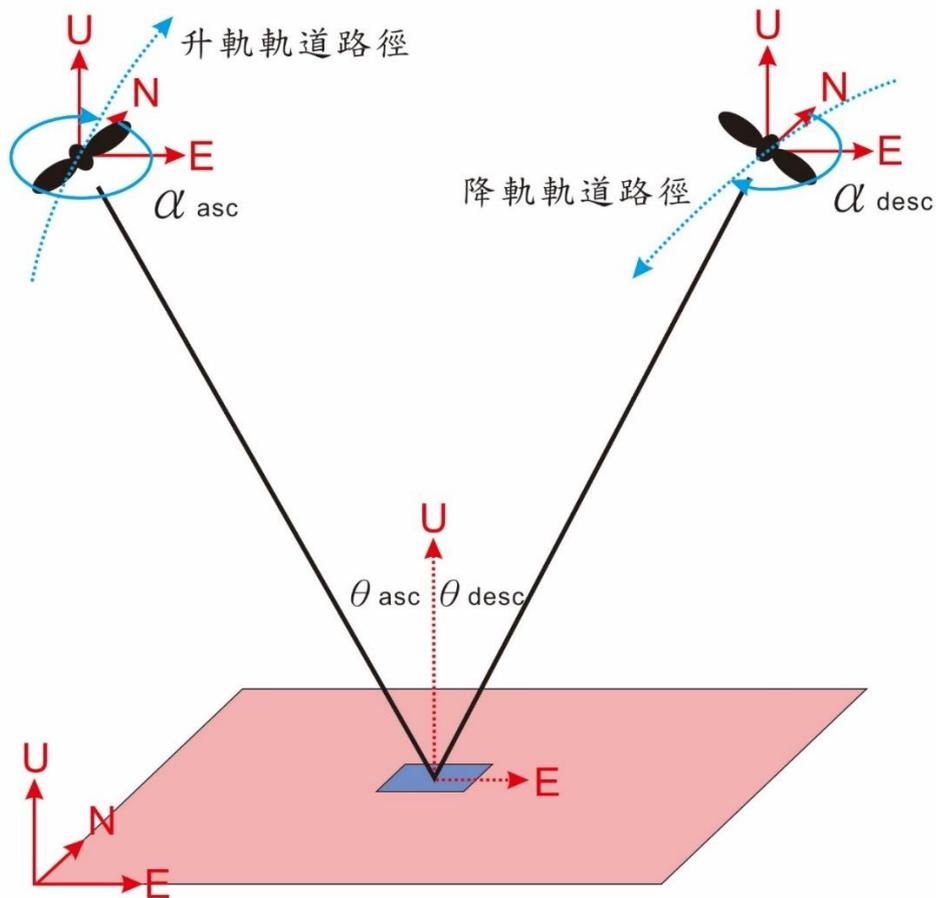


圖 3-9 視衛星方向地表變形之示意圖（修改自 Fuhrmann and Garthwaite, 2019）。



### 3.4 使用資料

本研究使用的資料是 Sentinel-1A 衛星從 2020 年 1 月至 2022 年 12 月的衛星影像資料，使用參數如表 2，詳細軌道影像編號與對應日期列在附錄。影像覆蓋範圍如圖 3-10。

圖 3-11 及圖 3-12 為升軌與降軌的干涉對配對基線圖，橫軸為時間基線，縱軸為空間基線，一個點為一幅影像，每條線意味著干涉對的配對結果，紅色標註點為設置之參考影像，升降軌參考影像分別為 2021 年 6 月 22 日與 2021 年 6 月 18 日之影像。

研究目標為該區域之鹽貫入體，在圖 3-10 中以紅色區域及灰色區域標示，分別為 Pol、Gachin、Hormuz、Larak、Gaverzin、Hengam 共五個鹽貫入體。Pol 與 Gachin 被左移斷層切過，Hormuz 與 Larak 被右移斷層切過，Gaverzin 與 Hengam 位於喀什姆島 (Qeshm island)，Gaverzin 未出露於地表，Hengam 鹽出露部分較少且具有多層鹽系統。將於第四、第五章分區進行討論。

表 2 本研究所使用 Sentinel-1A 的 SAR 影像參數

軌道方向	監測時段	影像幅數	Path	Frame	飛行方位角( $\alpha$ )	視傾角( $\theta$ )
升軌	2020.01.07-2023.01.03	89	57	83	344.797	42.035
降軌	2020.01.11-2022.12.14	88	166	504	196.753	41.983

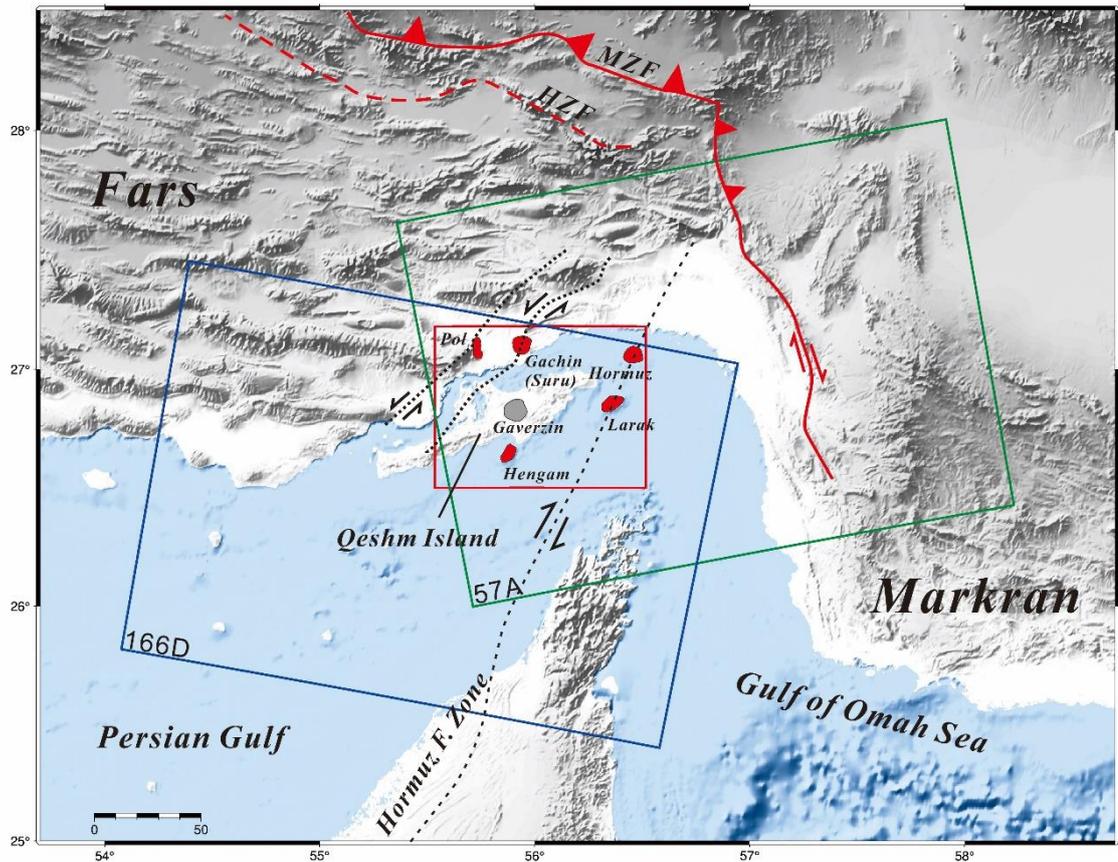


圖 3-10 使用的 Sentinel-1A 衛星影像覆蓋範圍示意圖。紅色框線為研究區域，綠色框線為升軌編號 57，藍色框線為降軌編號 166。紅色區域為研究區域內已出露地表之鹽貫入體，灰色區域為深埋於地底之鹽貫入體蓋維辛 (Gaverzin)。紅色實線為主要札格羅斯褶皺斷層，紅色虛線為高札格羅斯斷層，黑色虛線走向滑移斷層，分別穿過本研究區域的鹽貫入體波爾 (Pol)、加希 (Gachin)、霍爾木茲 (Hormuz) 及拉拉克 (Larak)。穿過波爾及加希的斷層為左滑斷層；穿過霍爾木茲及拉拉克的斷層為右滑斷層。

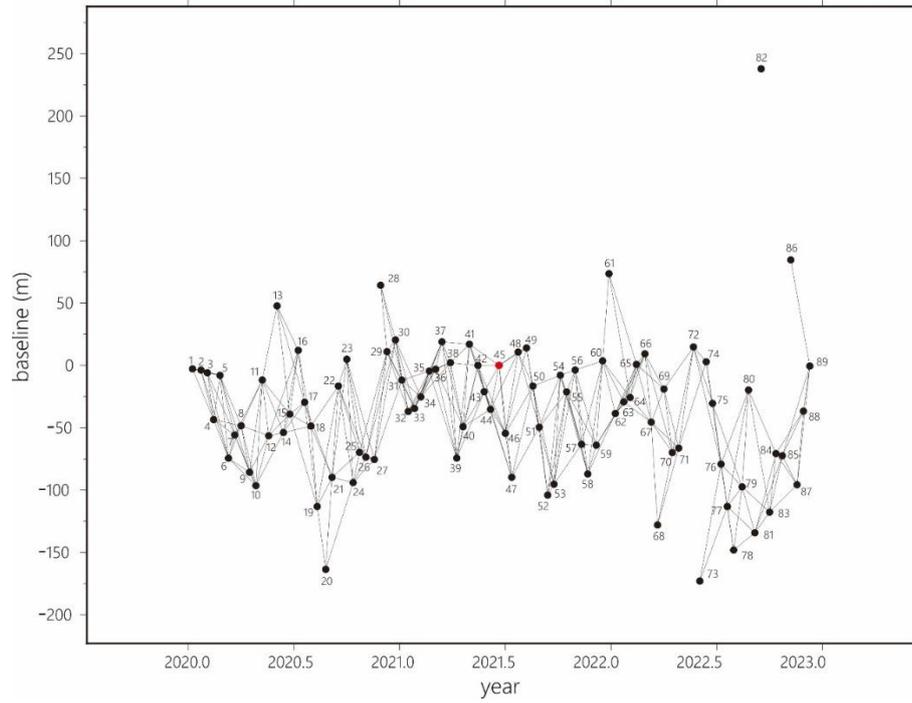
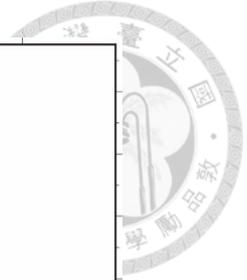


圖 3-11 升軌影像中干涉對之基線配對圖。紅色標註的點為 2021 年 6 月 22 日之影像，設為參考點。

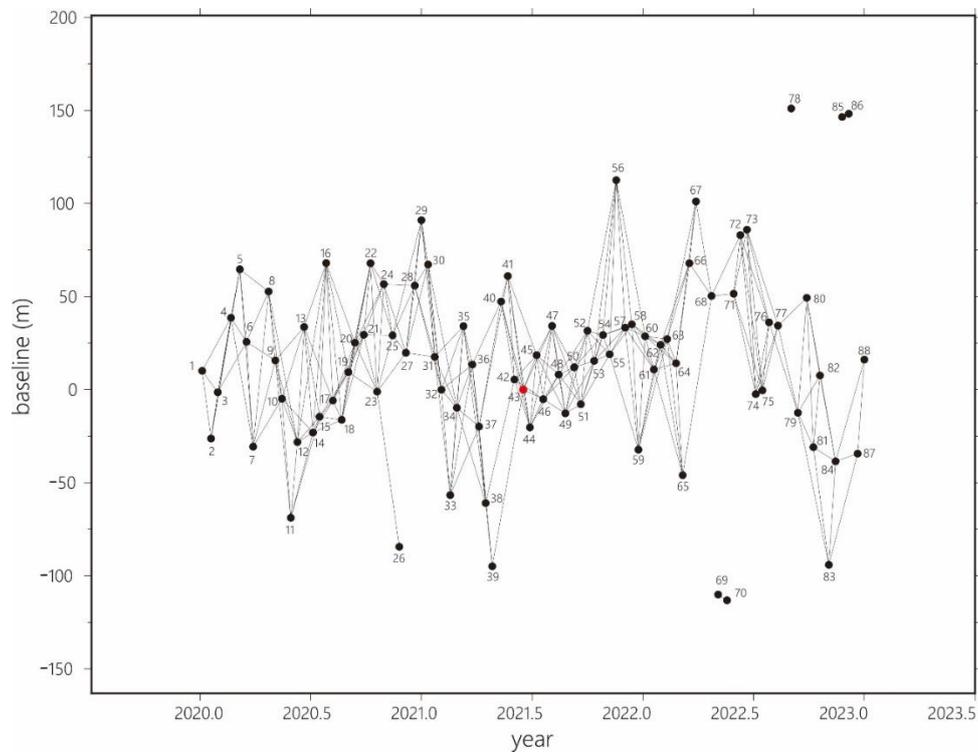


圖 3-12 降軌影像中干涉對之基線配對圖。紅色標註的點為 2021 年 6 月 18 日之影像，設為參考點。

## 第4章 研究成果



透過升降軌衛星所觀測到的變形數據，將視衛星方向的變形量分解成東西向與垂直方向，藉此去討論構造上的變形。由於伊朗地區的 GNSS (Global Navigation Satellite System) 缺乏垂直向的結果，難以利用 GNSS 對 InSAR 結果進行約束，因此本研究選取研究範圍內相對安定的點作為參考點，參考點選用測站點 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)，獲得向東速度場分量為 4.33 mm/yr，向北速度場為 23.67 mm/yr，將參考點真實速度場投影至視衛星方向，將所獲得的數據依據參考點進行校正。

平均 InSAR 速度場僅為三年間速度的平均值，還需透過累積變形量去分析其觀測期間的變形行為，因此本研究分別於各鹽貫入體中選擇鹽貫入體中心、邊緣或平均速度高區取點並做時間序列分析。

本研究所使用的原始資料為 Sentinel-1A 的影像，並使用 GMTSAR 做為資料分析的處理工具，然而在進行數據分析時仍有一些需要注意的誤差：

一、2022 年下半年的降軌資料出現無法統計累積變形量的情形，經查證後確認為 Sentinel-1A 降軌衛星的軌道數據經過改動，因此累積變形量實際上只統計到 2022 年的 6 月。

二、GMTSAR 所使用之大氣校正法為平均每一張影像前後數張的大氣相位做為校正值，此方法的優點在於可以快速進行校正並降低大氣造訊，然而這並非精確的大氣誤差，僅僅是減少大氣的影響卻並未完全消除大氣噪訊。但由於伊朗地區氣候乾燥，受到雲雨的影響較低，因此仍然認為研究數據真實可靠。

三、根據速度場的向量資料顯示，東南法爾斯地區的水平變形趨勢主要為朝北偏東約 24.06 mm/yr，與 Sentinel-1 的飛行方向幾近平行，尤其是降軌衛星受到影響最甚，因此可以見到所有累積變形量圖中的降軌衛星趨勢相較於升軌衛星變化較小，因為衛星遙測對於近衛星飛行方向的變形量相對不敏感，但仍能看出其趨勢走向。

四、喀什姆島的相關性太低，導致在資料處理階段使用遮罩時可用的資料點過少，因而無法切取速度剖面進行分析。

#### 4.1 視衛星方向速度場與 2.5D 速度場

將升降軌視衛星方向速度場合併可以獲得東西向速度場與垂直向速度場。

圖 4-1、圖 4-2 為升軌與降軌衛星平均視衛星方向之速度場，紅色為接近衛星，藍色為遠離衛星，由於區域的變形速度場大致朝北偏東，對升軌衛星而言為遠離衛星，對降軌衛星而言為接近衛星，因此降軌所得的數值會略高於升軌數值。

圖 4-3、圖 4-4 則為將視衛星資料經計算轉換後的東西向與垂直向速度場。

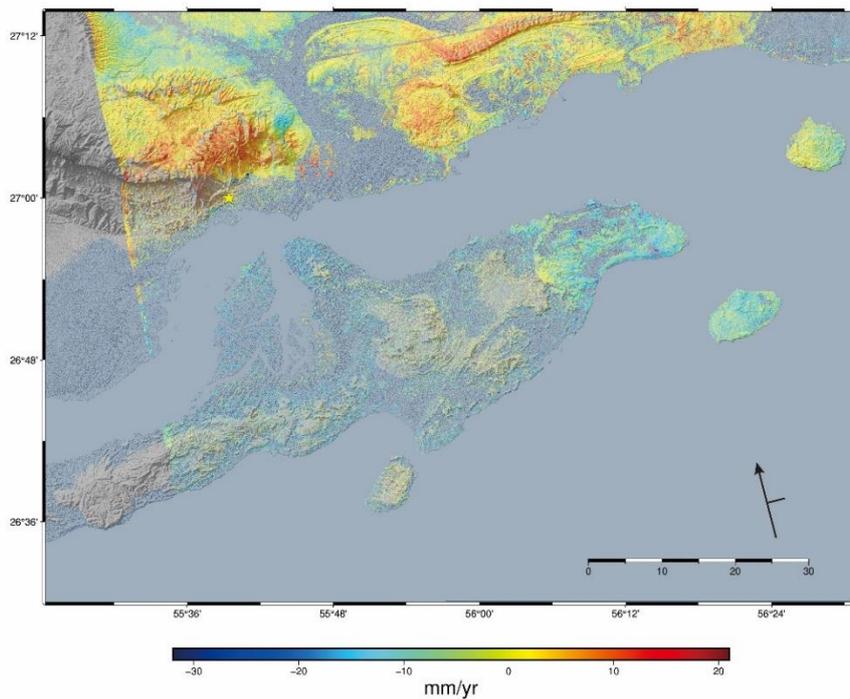


圖 4-1 升軌視衛星方向變形速度場圖。黃色星號為參考點測站 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)。正值為接近衛星，負值為遠離衛星。黑色箭頭標示衛星飛行與側視方向。

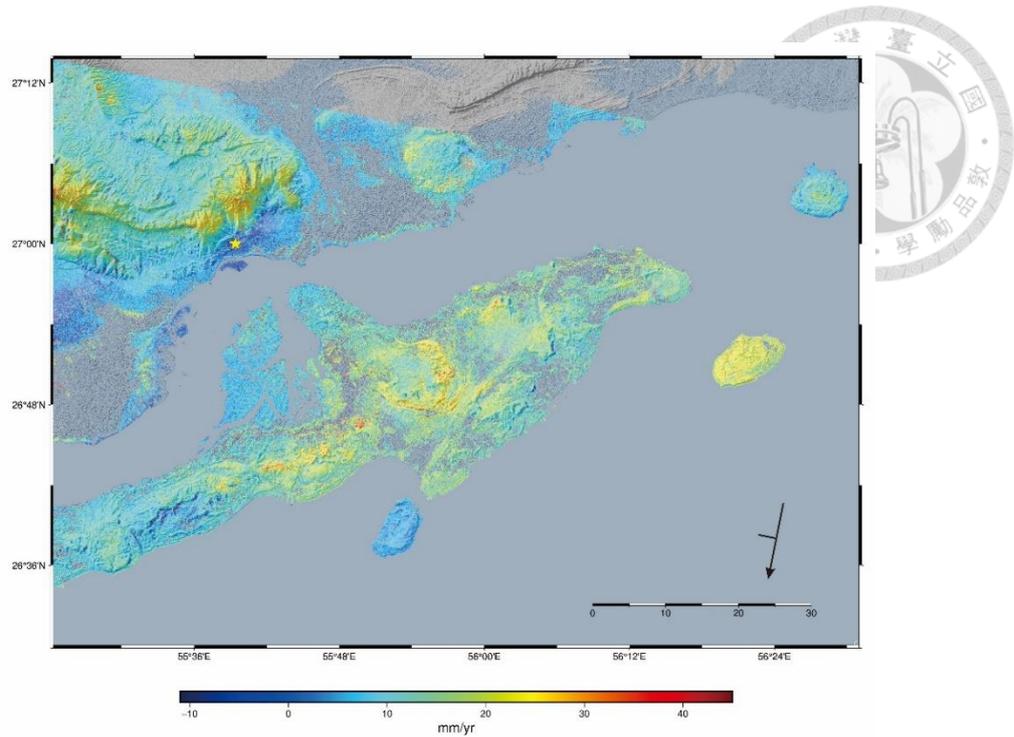


圖 4-2 降軌視衛星方向變形速度場圖。黃色星號為參考點測站 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)。正值為接近衛星，負值為遠離衛星。黑色箭頭標示衛星飛行與側視方向。

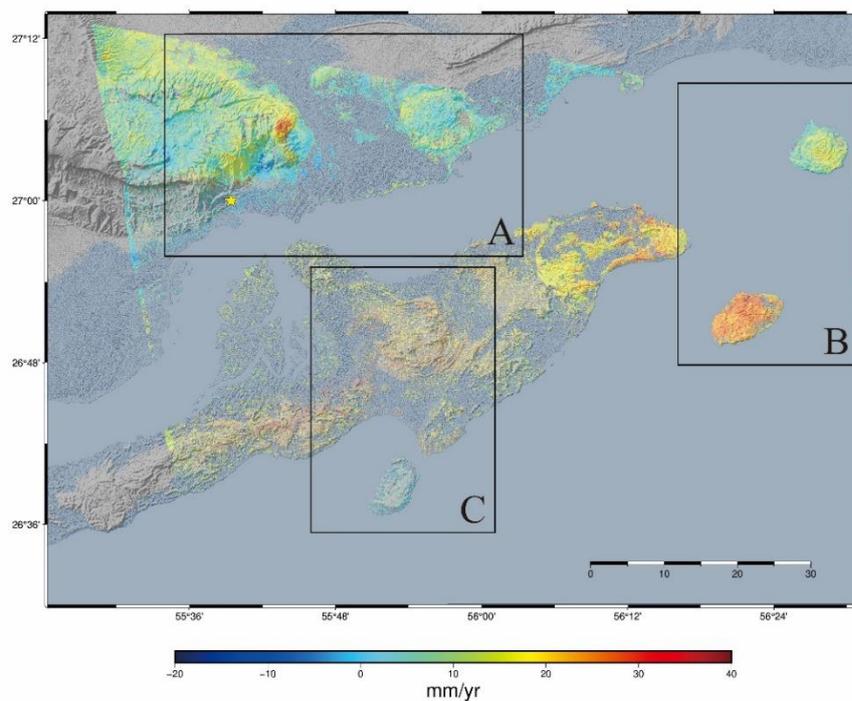


圖 4-3 東西向速度場。正值向東，負值向西。黃色星號為參考點測站 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)。

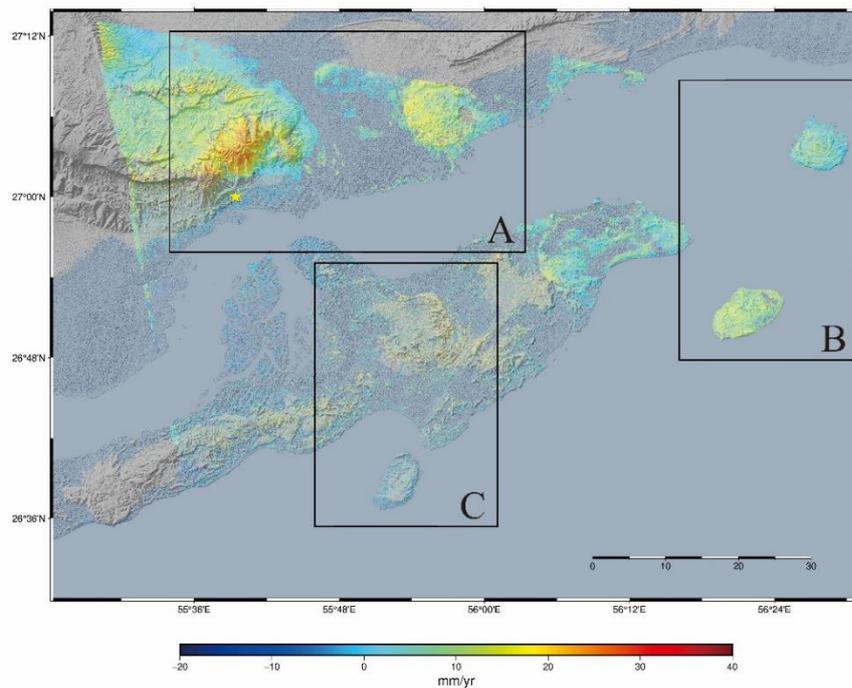


圖 4-4 垂直向速度場。正值向抬升，負值沉降。黃色星號為參考點測站 BAGH，經緯度座標為 (55.6570, 27.0000)。

## 4.2 速度場剖面與累積變形量

將研究區域細分為三個小區討論，分別為圖 4-3、圖 4-4 中的 A、B、C 區。

### 4.2.1 A 區：波爾 (Pol) 及加希 (Gachin)

A 區中包括波爾及加希兩個鹽貫入體 (圖 4-5、圖 4-6)。由於波爾的形狀扭曲變形且在東西向與垂直向速度場中南北段呈現不同的變形特徵，因此分別在沿著走向與垂直走向的方向切取速度剖面，以及鄰近的巴文背斜 (Bandar Anticline) 具有顯著的抬升速度，也垂直背斜軸切取速度場剖面。加希幾乎呈現正圓形，因此在東西向與南北向各切取一條剖面。

波爾位於巴文背斜 (Bandar Anticline) 的末端，形狀狹長，分為北段與南段，北段型狀呈現東北—西南向，南段呈現西北—東南向。圖 4-7、圖 4-8 為 Pol 的速度場圖，北段在東西向速度場中具有很高的向東速度，平均約 25.71 mm/yr，垂直速度場平均約 12.59 mm/yr，並且越往東北方向東速度場數值逐漸增加，平均每公里增加 6.38 mm/yr，垂直速度場卻逐漸減少，平均每公里減少 3.39 mm/yr。南段呈現西北—東南向，沿著走向的速度場並無顯著變化趨勢，小範圍內速度場變化

劇烈，平均向東速度為 16.11 mm/yr，最高為 26.38 mm/yr，東側速度場較西側高，垂直抬升速度平均為 16.68 mm/yr。波爾的時間序列取點位置，一號點位於鹽露頭出露中心，二號點取於南段，時間序列如圖 4-11、圖 4-12。

巴文背斜 (Bandar Anticline) 具有很高的抬升速度，南翼速度高於北翼，南翼平均約 26.01 mm/yr，北翼平均約 19.37 mm/yr，向東速度場較均勻，整體平均速度約 12.03 mm/yr。在軸面上取了兩個時間序列的點位，分別為三號及四號點，時間序列如圖 4-13、圖 4-14。

Gachin 呈現圓形盾狀，整體呈現抬升，地勢高低東高西低，但垂直速度場是西高東低，西側平均垂直速度約 15.43 mm/yr，東側約 10.58 mm/yr，東西向速度場較為均勻，平均約 4.82 mm/yr。從南北向剖面來看，鹽貫入體中心速度場在南北方向上均勻，相較四周圍岩數值較低，變化幅度也較小，垂直速度平均約 12.88 mm/yr，東西速度場平均約 4.67 mm/yr。加希的時間序列取點位置位於鹽貫入體的中心，分別在偏西與偏東側取點，標註為五號點及六號點。時間序列如圖 4-15、圖 4-16。

時間序列圖中升軌為藍色線段，降軌為紅色線段。

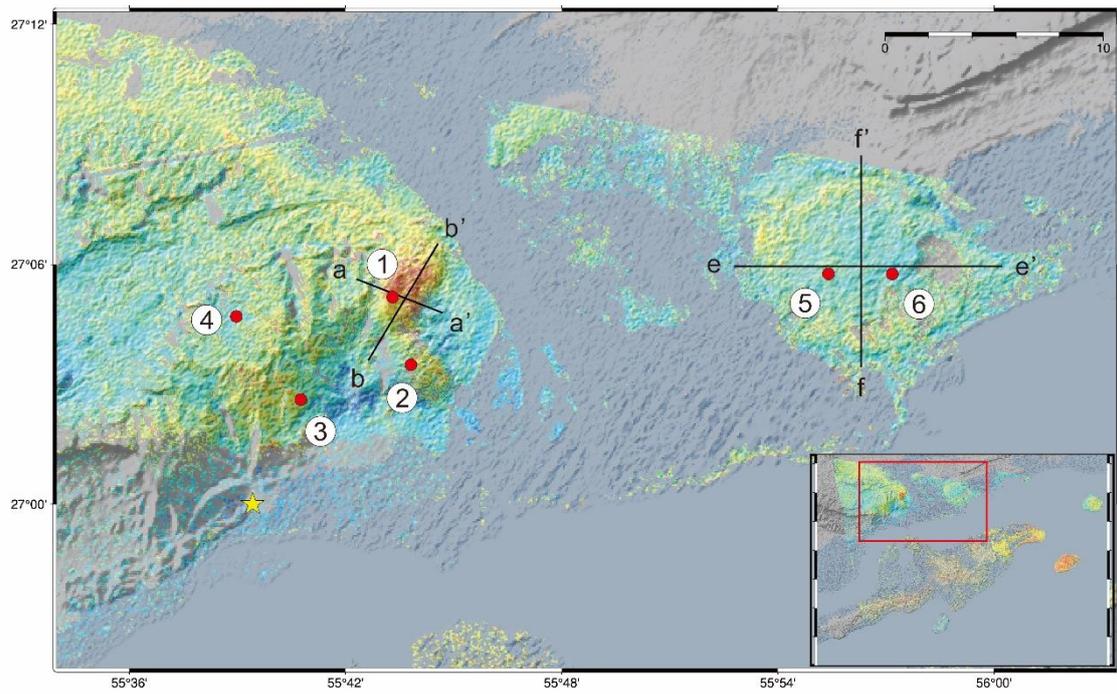


圖 4-5 A 區東西向速度場圖與剖面線。紅色圓點為時間序列的取點位置。紅色星號為測站位置。紅色圓圈標示時間序列取點位置與編號。

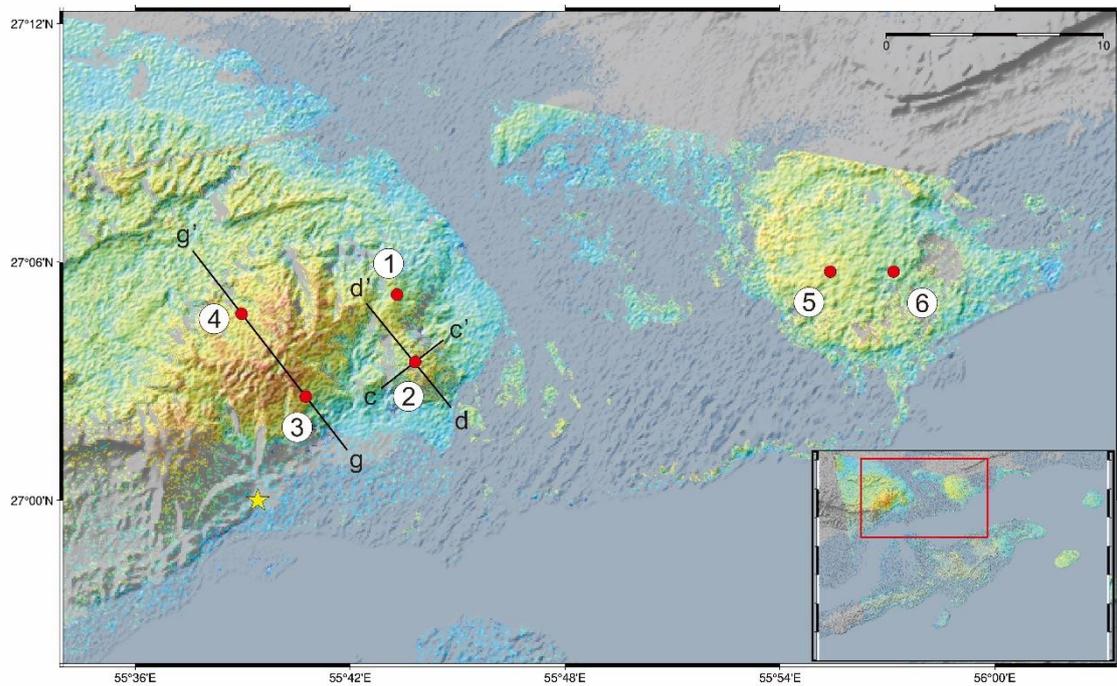


圖 4-6 A 區垂直向速度場圖與剖面線。紅色圓點為時間序列的取點位置。紅色星號為測站位置。紅色圓圈標示時間序列取點位置與編號。

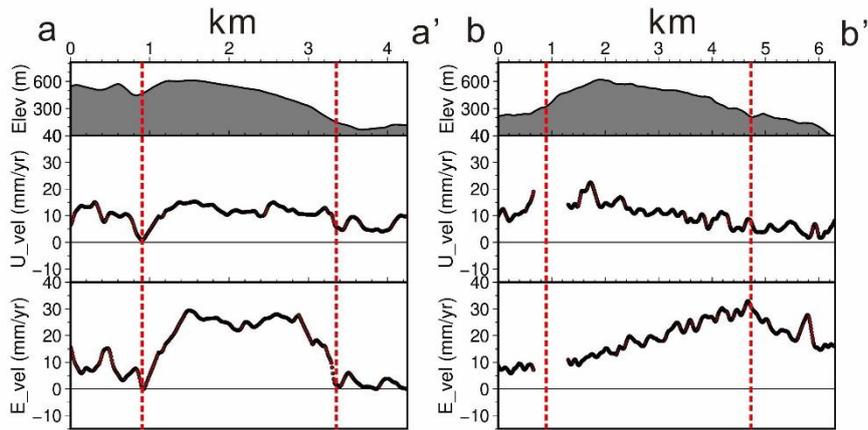


圖 4-7 波爾北段速度場剖面。左圖為垂直走向的 aa'剖面，右圖為西南—東北向的 bb'剖面。紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。

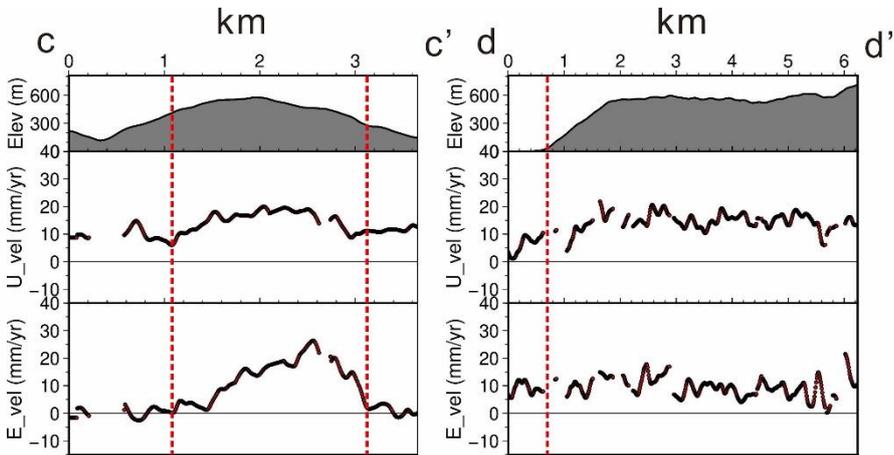


圖 4-8 波爾南段速度場剖面。左圖為垂直走向的 cc'剖面，右圖為東南—西北向的 dd'剖面。紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。

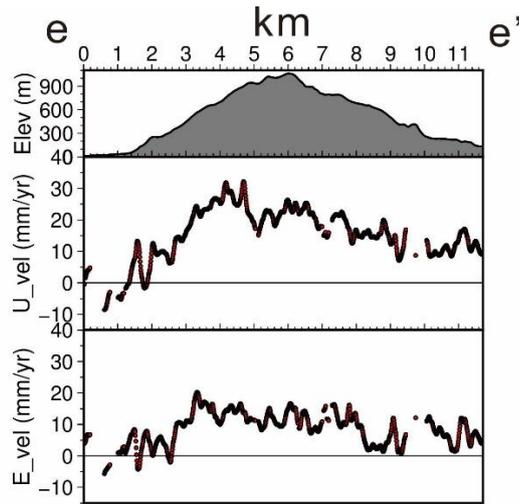


圖 4-9 巴文背斜 (Bandar Anticline) 垂直背斜軸的 ee'剖面。

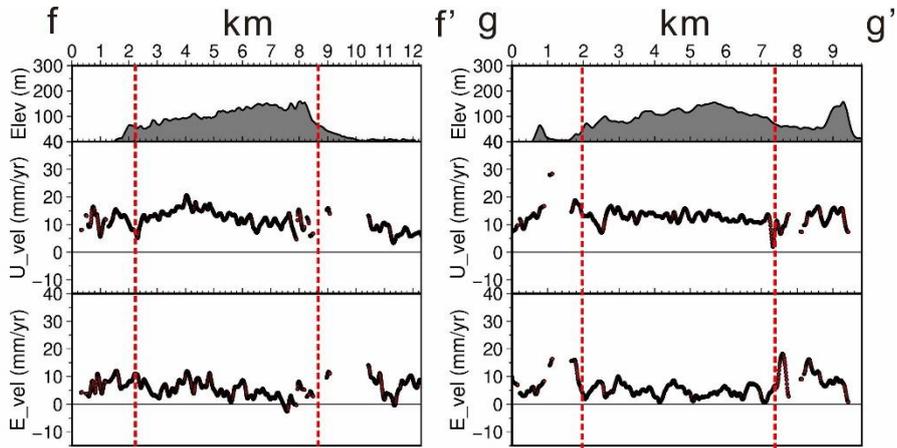


圖 4-10 加希速度剖面。左圖為東西向的 ff'剖面，右圖為南北向的 gg'剖面。紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。



圖 4-11 A 區 1 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.7218012609, 27.0863629691)。



圖 4-12 A 區 2 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.7302442146, 27.0581640938)。



2020-2022年間累積變形量(3號點)



圖 4-13 A 區 3 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.6793045924, 27.0436246242)。

2020-2022年間累積變形量(4號點)

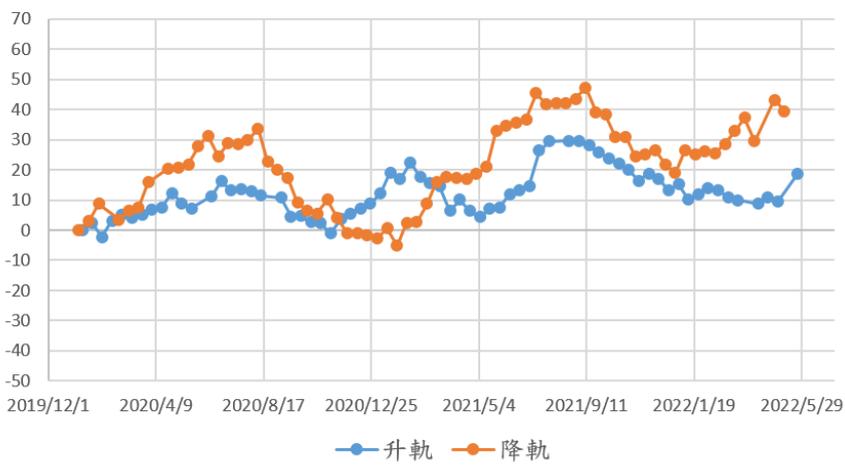


圖 4-14 A 區 4 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.6494823046, 27.0783377806)。

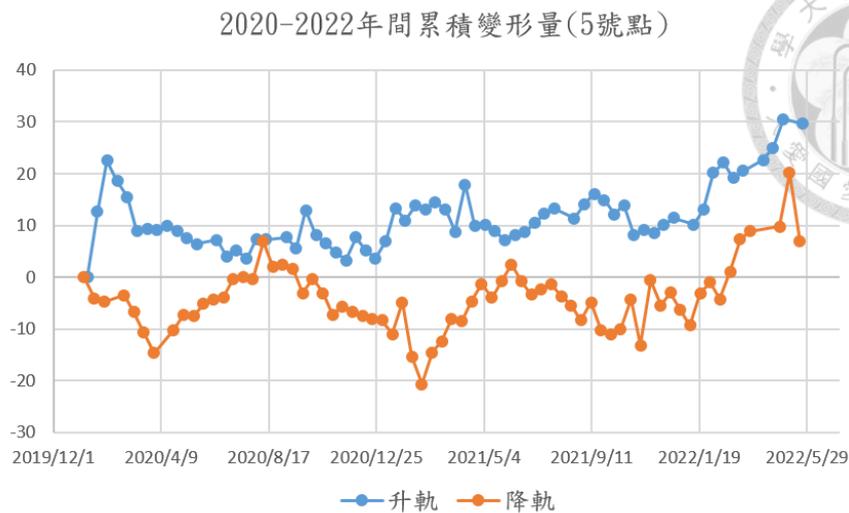
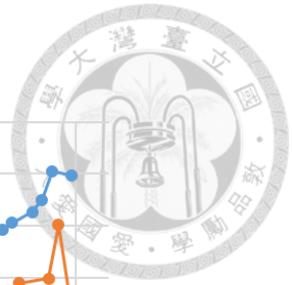


圖 4-15 A 區 5 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.9233846925, 27.0960512004)。

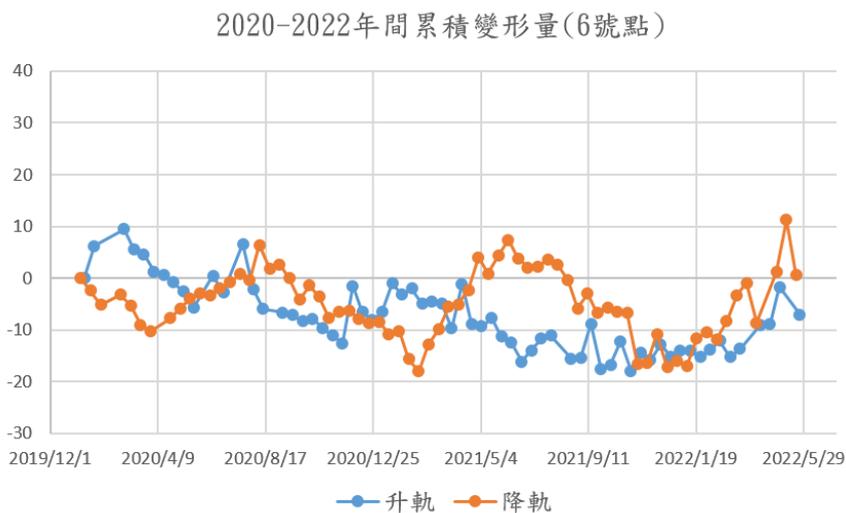


圖 4-16 A 區 6 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (55.936988, 27.1244686283)。

#### 4.2.2 B 區：霍爾木茲 (Hormuz) 及拉拉克 (Larak)

B 組為坐落於海中央的兩座小島，皆以霍爾木茲鹽為島的主體，並皆出露於地表，兩者皆位於霍爾木茲斷層帶 (Hormuz fault zone) 上 (圖 4-17、圖 4-18)，因此合併為同一區討論。

霍爾木茲整體抬升，從南北剖面上來看，鹽出露的中心至北側鹽接觸的垂直速度逐漸減少，平均每公里減少 3.94 mm/yr，中心抬升速度最高 15.96 mm/yr，東西向速度場變化不大，平均約 13.09 mm/yr。從島的東西剖面上看垂直速度場與地形呈現正相關，在鹽貫入體東側邊緣有一個突然陷落的構造，越往東又逐漸抬升，平均每公里垂直速度增加 4.37 mm/yr。圖 4-21、圖 4-22、圖 4-23 及圖 4-24 為霍爾木茲的時間序列點位，分別在中心、南北及東側邊緣取點。

拉拉克具有很強的向東速度場，在地勢較高區的向東速度更高，並且與地形呈現正相關，島的平均向東速度場約為 25.83 mm/yr，在垂直方向上鮮少有劇烈變動，平均抬升速度為 10.75 mm/yr。圖 4-25、圖 4-26 及圖 4-27 為拉拉克的時間序列點位，五號點位於鹽出露的中心，六號與七號分別位於鹽貫入體的東側與南側邊緣。

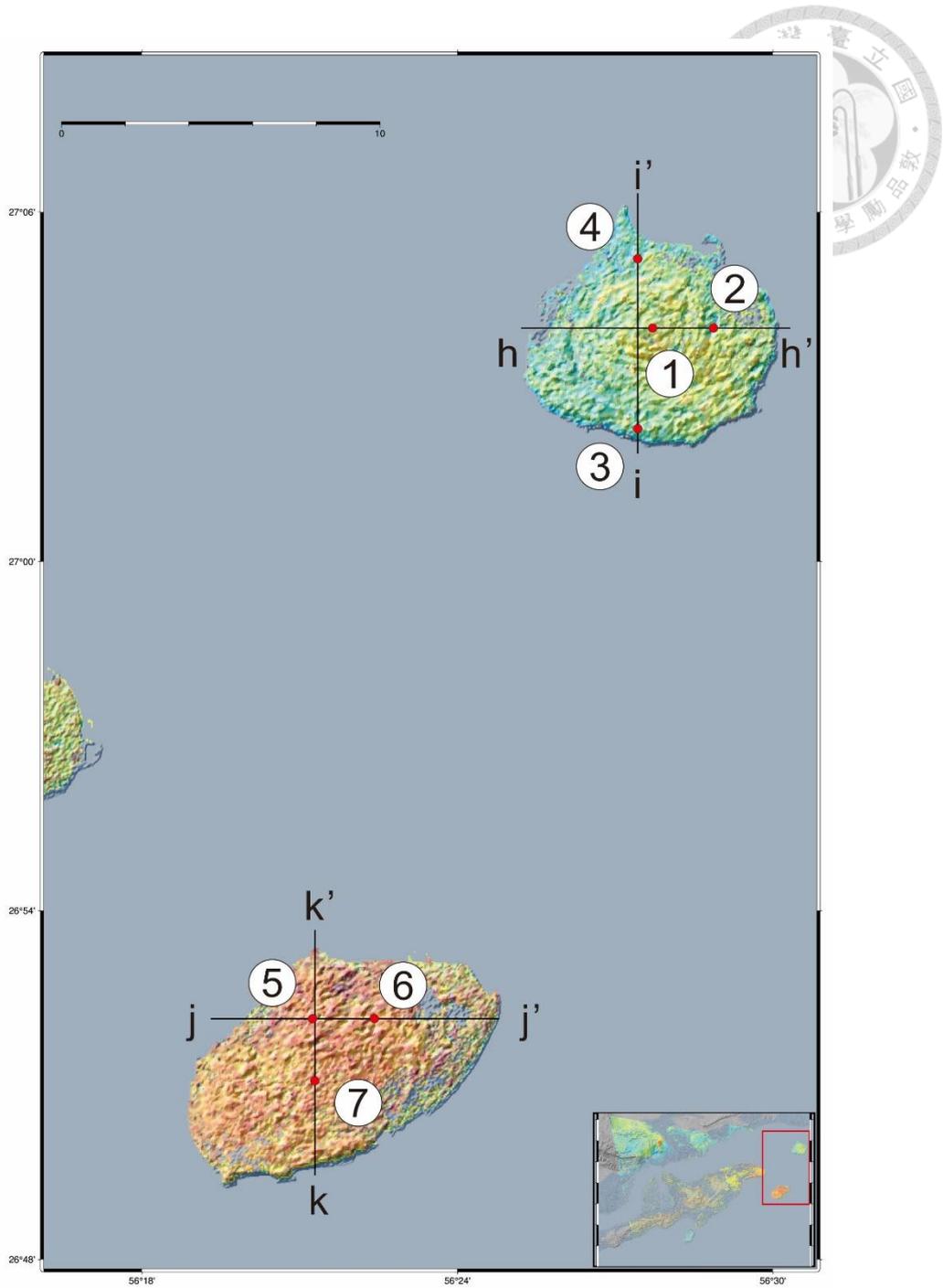


圖 4-17 B 區東西向速度場圖與剖面線。紅色圓點為時間序列的取點位置與編號。

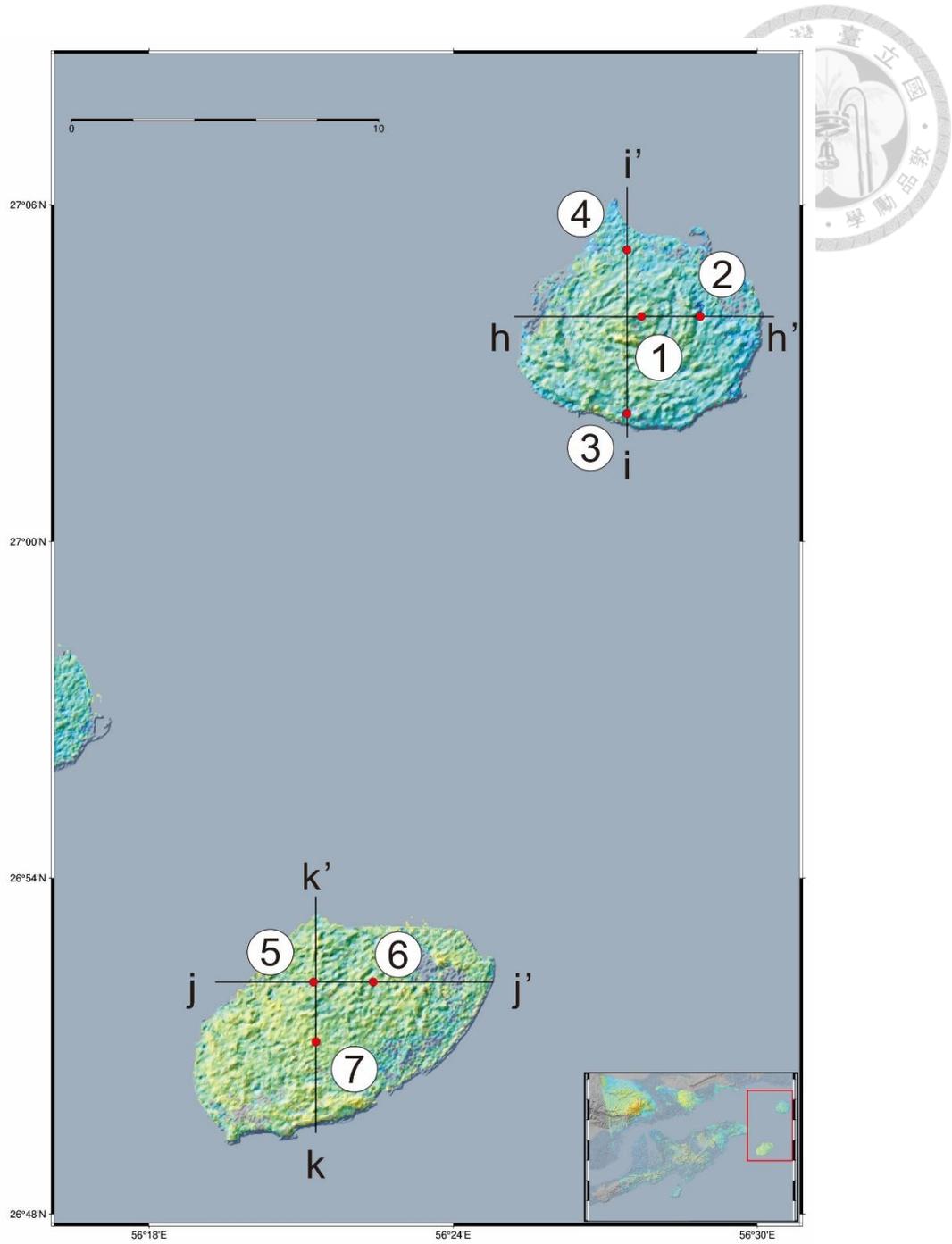


圖 4-18 B 區垂直向速度場圖與剖面線。紅色圓點為時間序列的取點位置與編號。

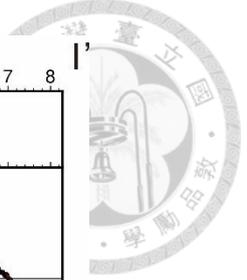
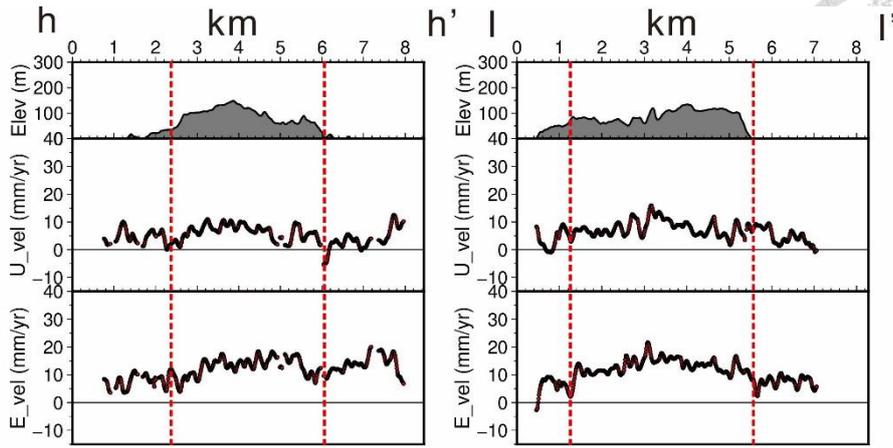


圖 4-19 霍爾木茲速度場剖面。左圖為東西的 hh'剖面，右圖為南北向的 ll'剖面。紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。

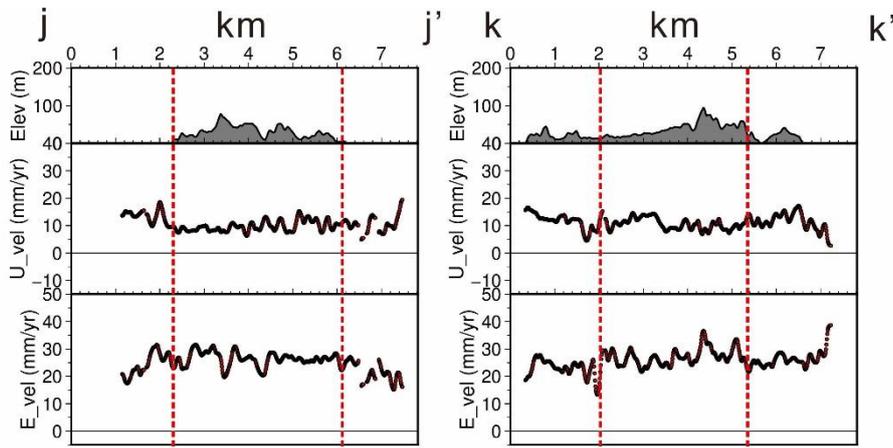


圖 4-20 拉拉克速度場剖面。左圖為東西的 jj'剖面，右圖為南北向的 kk'剖面。紅色虛線為鹽貫入體與圍岩的邊界。



圖 4-21 B 區 1 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.461891189, 27.0668274313)。

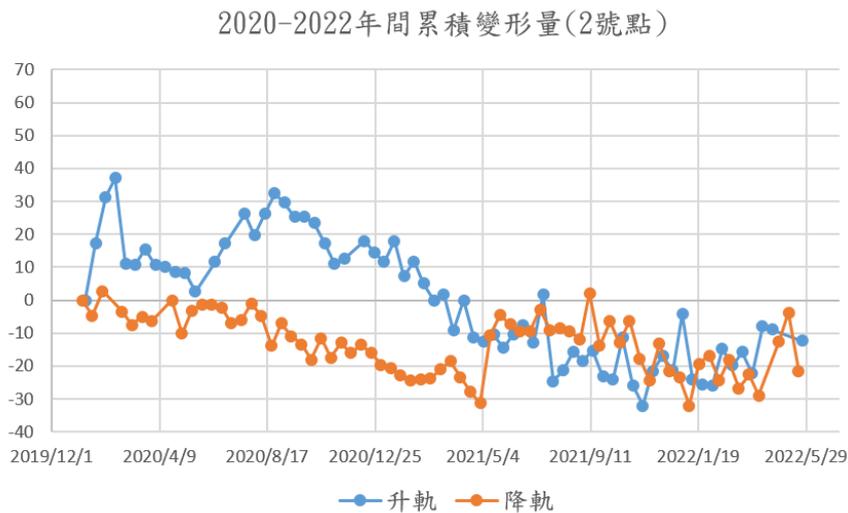


圖 4-22 B 區 2 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.4811808896, 27.0668262448)。

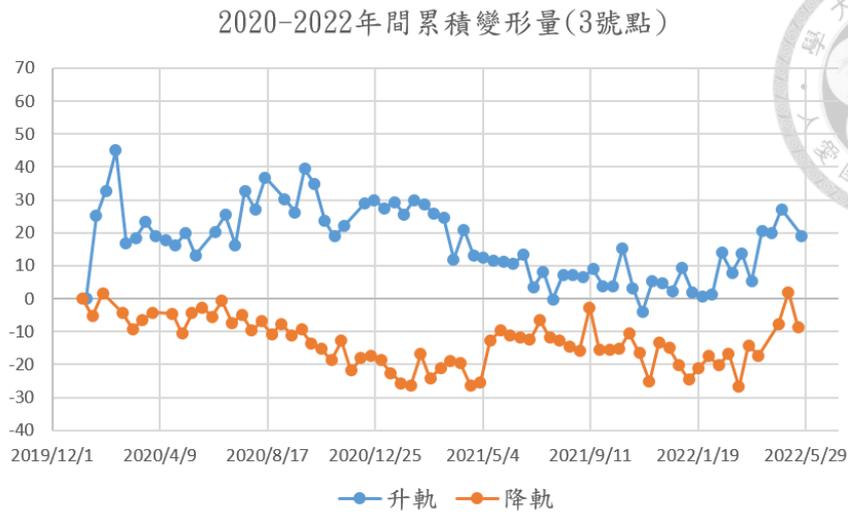


圖 4-23 B 區 3 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.457174, 27.0379976327)。



圖 4-24 B 區 4 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.457174, 27.0866508767)。

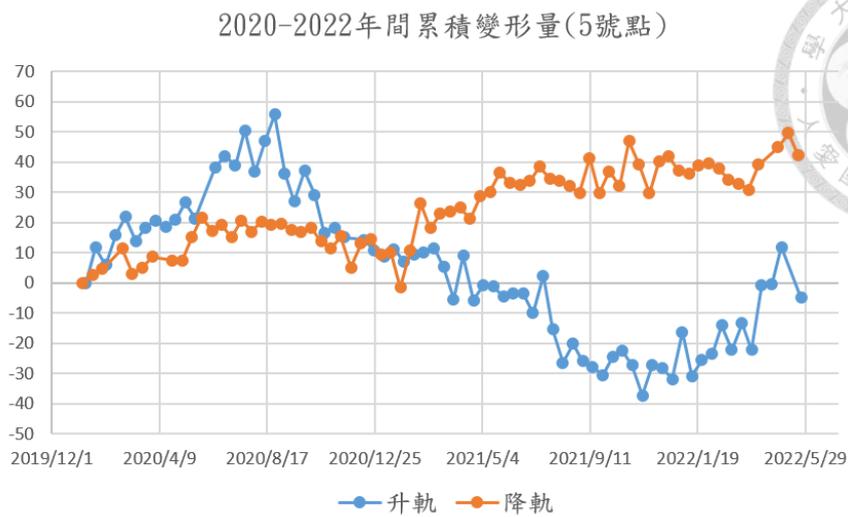


圖 4-25 B 區 5 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.3540671047, 26.8690357038)。



圖 4-26 B 區 6 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.3737262165, 26.8690361978)。

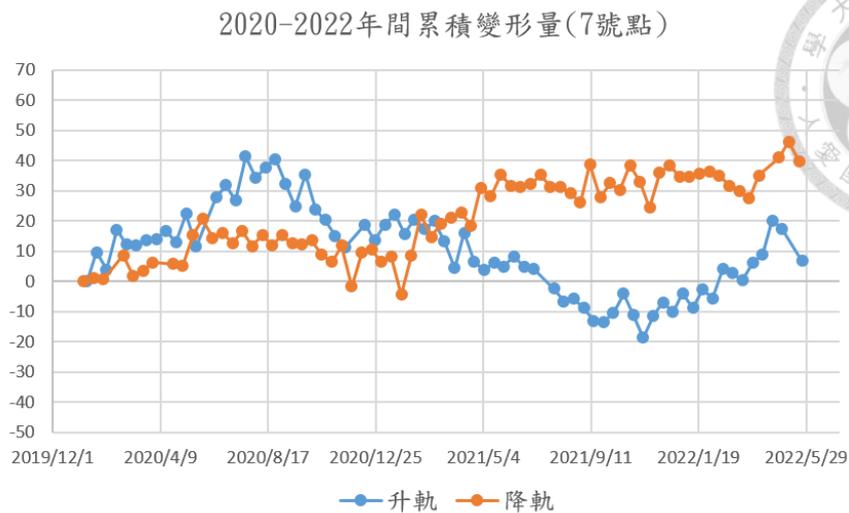


圖 4-27 B 區 7 號點累積變形量。橫軸為時間，縱軸為變形量 (mm)，藍線為升軌，紅線為降軌。座標為 (56.354851, 26.8512235498)。

#### 4.2.3 C 區：蓋維辛 (Gaverzin) 及亨賈姆 (Hengam)

蓋維辛深埋於地底並未出露地表，而亨賈姆僅在島的西北角局部出露，鹽體大多數仍深埋其下。由於 C 組在升軌影像中相關性太低，進行遮罩時篩去太多點位，取點困難，即使切取剖面仍難辨識其變形趨勢，並且這些數值很有可能是噪訊與誤差 (圖 4-28、圖 4-29)。實際利用 QGIS 取點時會發現鄰近的數據點數值跳動幅度大，因此判斷此區數據可信度較低。

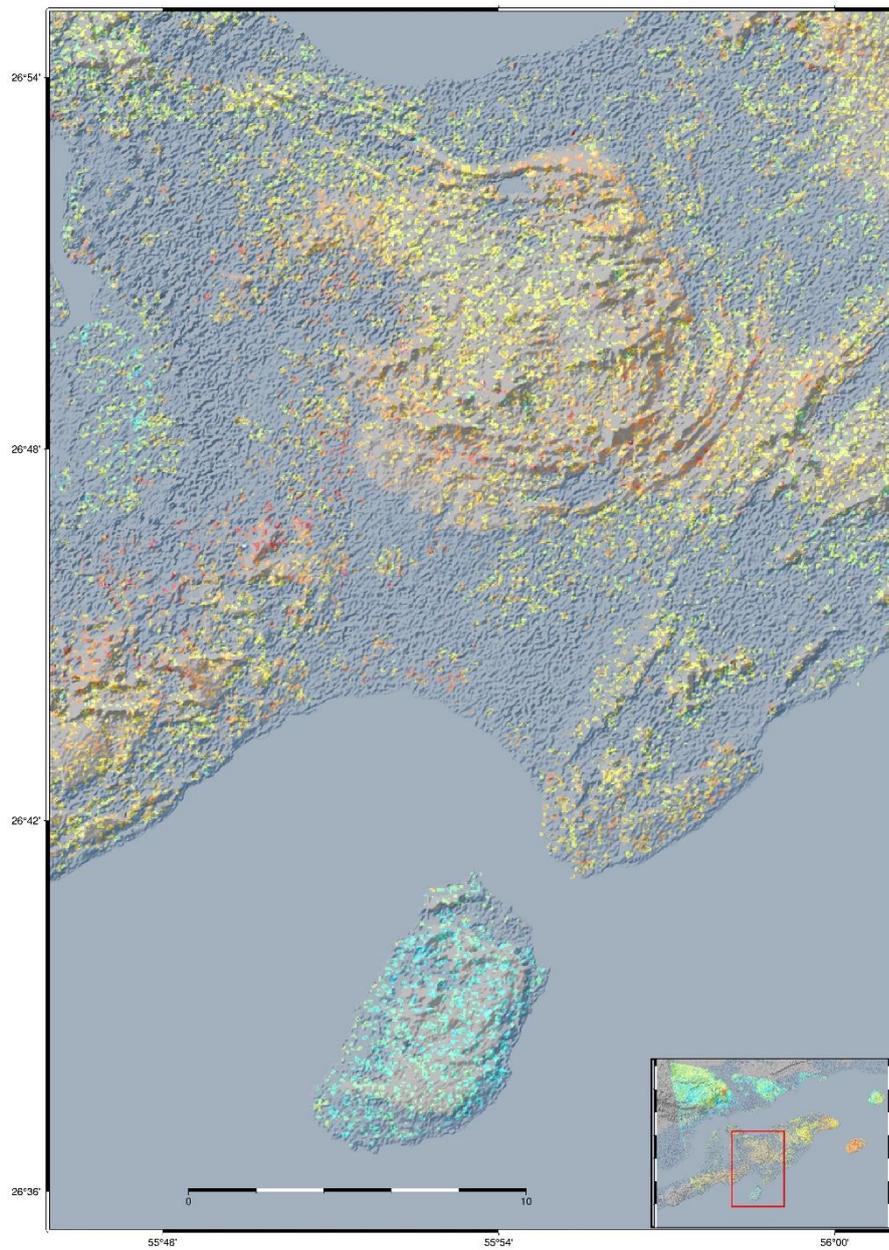
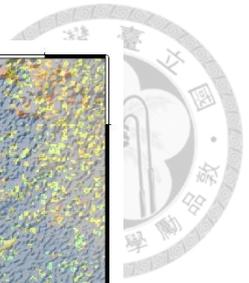


圖 4-28 C 區東西向速度場圖。

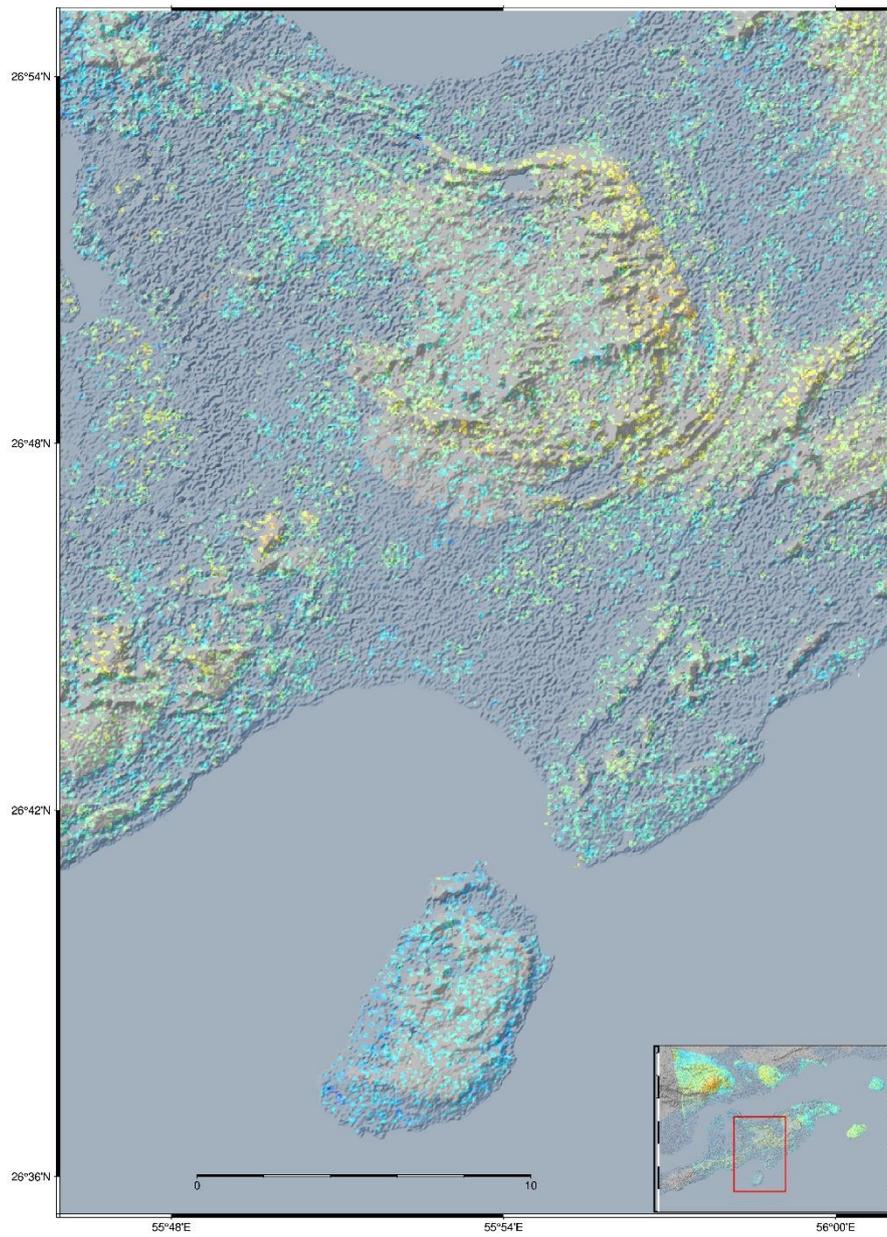
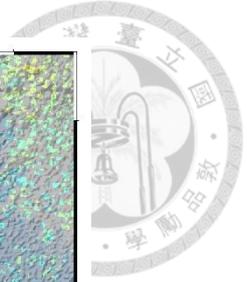


圖 4-29 C 區垂直向速度場圖。

## 第5章 討論



在中部法爾斯的鹽貫入體主要發育在斷層系統上，但東法爾斯不同，東法爾斯的鹽貫入體經常發育在褶皺軸的末端，並且這些褶皺軸呈現之字形的扭曲變形。根據 Jahani et al. (2007) 的形態學分類，蓋維辛為 A 型鹽丘，未出露於地表；波爾為 B 型鹽丘，鹽衝出地表並在地表上呈現顯著的凸起，鹽受侵蝕的速度慢於鹽供應速度，是目前仍在活躍的鹽丘之一；加希、霍爾木茲、拉拉克以及亨賈姆為 D 型鹽丘，活動性較低，然加希、霍爾木茲、拉拉克的下部地層經斷層切過，受到斷層帶的影響，亨賈姆具有多層鹽系統，它除了中心鹽庫的霍爾木茲鹽之外，其頂部及外圍還覆蓋著一層較薄的新生代法爾斯鹽。

下面將結合前人研究、地震數據及震測剖面逐一分析其變形特性，以及討論其變形行為的成因。

### 5.1 A 區：波爾 (Pol)、加希 (Gachin)

根據被霍爾木茲鹽帶至地表的圍鹽碎屑可以判斷出其受壓湧出地表的年代，波爾為始新世至漸新世，加希為早白堊紀到中中新世。

波爾為一個狹長且扭曲變形的鹽丘，在地表上呈現 < 字形，成為一個花生形狀，北段呈現東北—西南向，南段呈現西北—東南向。北段的部分具有很強的向東速度，並且沿著緩波越往東北澤抬升速度逐漸減少，相對的向東速度卻逐漸增加，從地形上來看，波爾位在一個地是相對較高的背斜上，平均海拔約 550 公尺，朝東北方向的山坡坡度約  $7^\circ$ ，鹽貫入體中央鹽庫位置地勢較高，結合以上觀察，由於鹽在地表也具有流動性，因此推測波爾可能在北段有鹽冰川 (salt glacier) 的運動行為，鹽順著緩坡向東北方流動 (圖 5-1)。

從速度剖面來看，南段抬升速度較北段快，南段 16.68 mm/yr，北段 12.59 mm/yr，並且同樣具有很高的向東速度，但沿著形狀走向的速度場變動量大，在短距離內速度插可以多達近 18 mm/yr，觀察其衛星影像，發現雖然南段的走向整體朝西北—東南向，但軸卻因流動、侵蝕等因素扭曲變形。南側可能也發育鹽冰川，但流動方向是朝軸的兩側流動 (圖 5-1)。

從時間序列可以看出鹽貫入體波爾具有週期性變化 (圖 5-2)，升降軌視衛星



方向變形同升同降，意味著其變形行為以垂直向變化為主，此鹽貫入體極為活躍，從年初開始緩慢逐漸抬升，9月之後卻會快速沉降，在時間序列中呈現上半年緩坡與後半年陡坡的變化趨勢。從速度場剖面來看，鹽露頭主要出露的地勢高區比起地勢較低但垂直速度場高的地區，週期性變化更明顯，推測可能與伊朗的雨季、鹽的特性與此地的地勢有關。伊朗的雨季集中在10月至來年的4月之間（圖 5-3），平均年降雨量大約 850 毫米，觀察鹽貫入體波爾及巴文背斜（Bandar Anticline）的累積變形量，對照伊朗阿巴斯港附近的氣候特徵，推測雨季與乾季的交替是造成該時間序列特徵的主因。再者，鹽容易溶解於水，雨水可能直接侵蝕出露於地表的鹽體或藉由地表的裂隙滲入進下部的鹽庫中，將鹽體溶解，因此在雨季來臨時才會快速消退。

而加希的周期性變化相比波爾就不太明顯，但仍能從降軌數據中看出端倪，從地形上來看，加希是一個盾狀鹽丘，鹽與圍岩呈現同心圓狀分布（圖 5-4），考慮到加希的地勢較低緩，並且中心速度場變化相對圍岩速度低，加希的變形就不像波爾那麼活躍，並且結合構造線圖來看，地下的左移斷層活動性並不高，在地表變形速度場上並無顯著貢獻。雖然和圍岩相比活動性不高，但其中心垂直抬升速度約 12.88 mm/yr，與 Pol 北段的 12.59 mm/yr 數值相近，因此推測其仍具有穩定的活動性，只是東西向速度場相對於波爾低很多，僅僅只有 4.67 mm/yr，波爾北側高達 25.71 mm/yr，南段較低卻也有 16.11 mm/yr，除了鹽冰川的存在，可能也與背斜軸有關。

鹽丘發育時若是沒有受到其他構造影響，其在地表上的型態應該像加希一樣呈現正圓形，並且鹽外圍與鹽接觸的新生代地層會破碎倒轉，但 Pol 顯然並不適用這種情況，波爾在轉折處東側形狀似沖積扇的地層與西側相同，皆為中新世的岩層，並不是近代的沉積物，也就是說波爾切穿了整個褶皺軸，並且存在早於褶皺軸，鹽先上拱，形成地勢高區並且這個過程持續進行，覆蓋的岩層逐漸隨著霍爾木茲鹽拱起。再回頭去看波爾和巴文背斜（Bandar Anticline）的關係，巴文背斜的活動性可能是由霍爾木茲鹽貢獻的，出露至地表的鹽貫入體為一個鹽流動的出口，因此靠近鹽貫入體的背斜軸核心可能會由鹽填充（圖 5-5）。

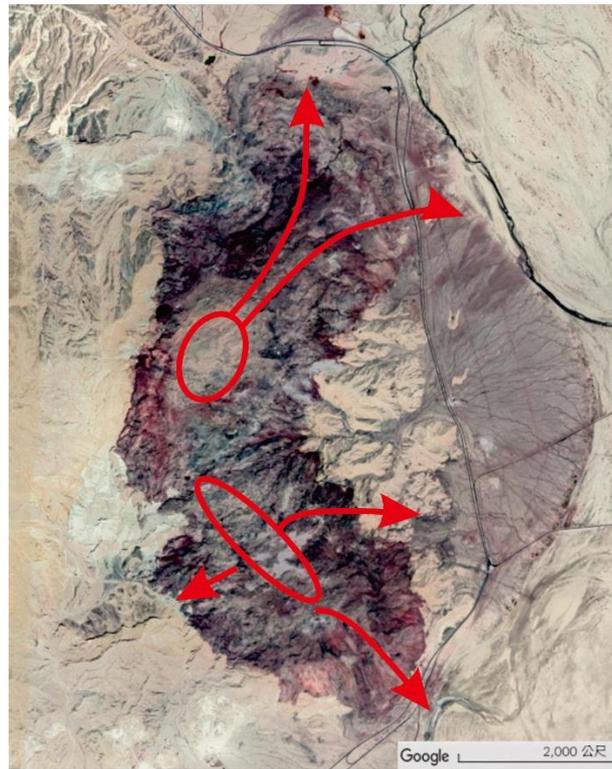


圖 5-1 鹽貫入體波爾的鹽冰川示意圖（影像來源：Google Earth）。



圖 5-2 波爾北段與南段於 2020 至 2022 年間升軌與降軌之累積變形量。藍色為升軌，紅色為降軌。

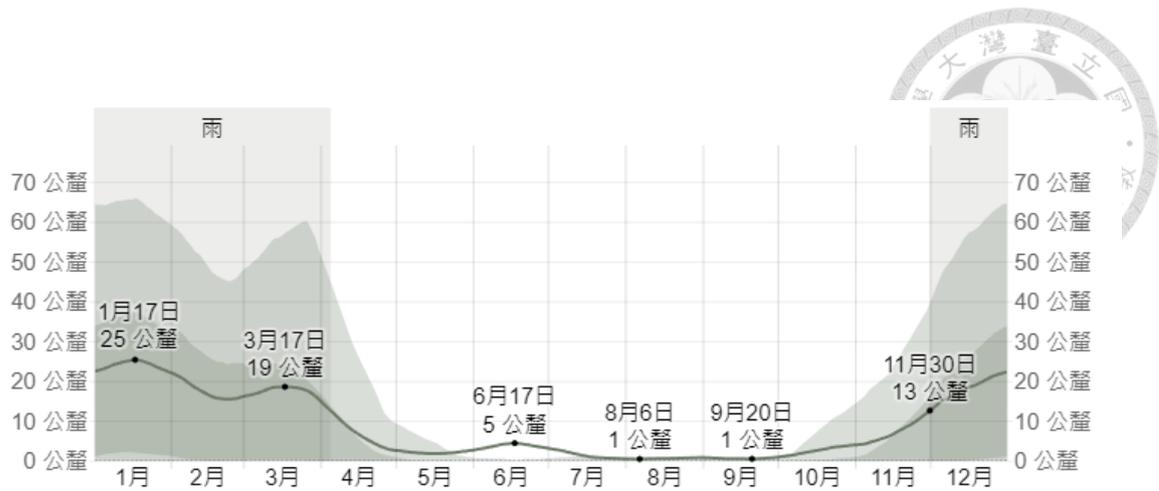


圖 5-3 阿巴斯港平均月累積降雨量(資料來源：© WeatherSpark.com)。使用美國太空總署 NASA 的 MERRA-2 現代時期回顧性分析之結果，以 50 公里的網格重建全球每小時的歷史天氣。



圖 5-4 加希衛星影像 (影像來源：Google Earth)。紅色線段為鹽與圍岩接觸帶。

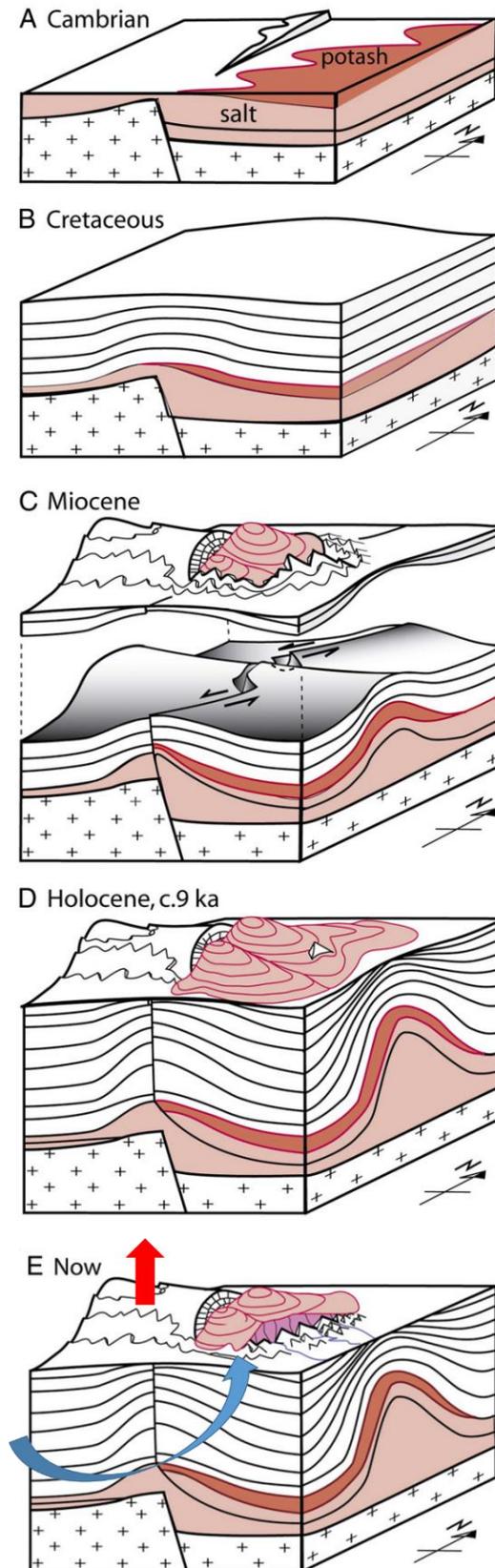


圖 5-5 波爾的演化過程與背斜被鹽拱起的示意圖 (修改自 Talbot et al., 2009)。藍色箭頭為底部鹽流動方向，紅色箭頭為背斜軸抬升。



## 5.2 B 區：霍爾木茲 (Hormuz)、拉拉克 (Larak)

根據 Jahani et al. (2009) 的剖面資料，霍爾木茲斷層帶 (Hormuz fault zone) 為一條具右移分量的斷層帶，切過霍爾木茲及拉拉克的下部地層並呈現花苞狀構造，破裂範圍約地下 5 至 20 公里處的地層，並未切穿到地表，此斷層在始新世至早中新世間活躍，並伴隨阿曼山脈的抬升而隆起，沿順著破裂面至地表並形成了鹽冰川，如圖 5-6 中的震測剖面所示。沿著此條斷層發育的鹽丘將處於兩種發育情況：一、擠壓事件結束後環境轉變為拉張環境，因斷層轉為高角度逆斷層而使鹽丘沉陷。二、斷層活動觸發鹽的再次活躍，鹽將沿著斷層破裂面上湧至地表。有了這條斷層的存在做為前提，我們分析霍爾木茲和拉拉克與霍爾木茲斷層帶之間的關係。

B 區的累積變形量中可以看出此區受到雨季影響較小，從時間序列來看，霍爾木茲及拉拉克都是 2020 年主要活動為抬升，2021 年卻轉為以東方向運動為主，並且拉拉克於 2021 年降軌衛星數據中顯示了快速接近衛星的變形量，可以看出來平均向東速度較高的原因可能是 2021 年開始構造活動較活躍的緣故。

霍爾木茲和拉拉克同屬於霍爾木茲斷層帶上的鹽丘，卻有著截然不同的變形行為，霍爾木茲整體抬升，並且垂直速度場與地形呈現正相關，代表鹽通道仍在供應鹽，但從南北剖面上來看，鹽出露的中心至北側鹽接觸的垂直速度逐漸減少，是個緩慢消退的過程，其中央鹽庫可能還在抬升，但越往北側越不活躍。相對的，霍爾木茲的東側存在一個具有垂直活動性的構造，推測可能是斷層，越往東側垂直速度與向東皆增加。Hassanpour et al. (2019) 的文獻中提供了震測剖面，為了證實下部存在的斷層是否為影響垂直速度的主因，我又切了一條平行震測剖面的速度剖面 (圖 5-7)。

從震測剖面來看，霍爾木茲具有受壓後向四周擴張的行為，因為古新世的 Pabdeh 地層中存在由中央鹽庫向外擴展的「異地鹽 (allochthonous salt)」，屬於鹽丘發展至晚期的構造，霍爾木茲鹽與 Pabdeh 地層呈現第三級接合帶 (tertiary salt weld)，是因為古新世時受到擠壓作用而溢出的鹽翼。由於未能獲得正切鹽中心之剖面，圖 5-7 所示之震測剖面為霍爾木茲東側之剖面，從本研究所得之速度場推測，霍爾木茲東側溢出的鹽翼下部存在兩條生長斷層，先是下沉之後再抬升，將鹽翼向上推擠，可能是促使東側抬升速度增加的因素。再者，從速度剖面來看，鹽

翼上方存在一個向西沉降的區域，推測很有可能是斷層向上推擠上方鹽翼，造成強制褶皺（forced fault），褶皺軸上方的地層處於張裂環境，導致局部地區陷落（圖 5-8）。

綜上觀察，霍爾木茲可能已經發展至晚期構造，後期鹽翼受到新生代的擠壓與斷層抬升影響，有向東發展的趨勢。

觀察同一區的拉拉克，其中央鹽庫在頂部具有大型向外張開的型態，鹽庫也存在向 Pabdeh 地層擴展的趨勢，並且透過震測剖面可知鹽體主要向東發展，鹽體側向延伸約 2 到 7 公里，並且除了 Pabdeh 地層之外，鹽體也側向延伸至中新世的 Aghajari 地層中，延伸範圍較小（圖 5-9）。根據 Hassanpour et al. (2019) 的解釋，當鹽體受到擠壓事件時就會驅動鹽側向擠出，兩處鹽翼應分別代表古新世與中新世兩個時期的擠壓事件（圖 5-10）。

根據上述的研究解釋，對本研究結果進行推測：

拉拉克具有很強的向東變形速度，平均向東速度場約為 25.83 mm/yr，相對於測站參考點的 4.33 mm/yr 高出許多，並且整座島速度場相當均勻，垂直向速度場與東西向速度場皆與地形呈現正相關，因此推測拉拉克的變形由鹽貫入體中央鹽庫的流動行為主控。鹽岩機械強度低很難被剪切破裂，而拉拉克如開花般的中央鹽庫幾乎佔據整個出露部分的地下部地層，厚度約 2 公里、寬約 10 公里，因此推斷拉拉克出露於地表被觀測到的部分受到斷層構造的影響程度較低，由震測剖面也可以佐證。當鹽受到擠壓溢出之後被包裹在圍岩中，若是中央鹽庫持續穩定供應鹽，鹽體可能會沿著先前溢出的鹽翼向外擴散。因此推測拉拉克雖然在 Jahani et al. (2007) 的形態學分類中屬於活動性較低的 D 型鹽丘，並且在震測剖面中也顯示其發育出異地鹽翼的後期構造，但拉拉克的鹽源供應通道應仍然持續供應鹽。

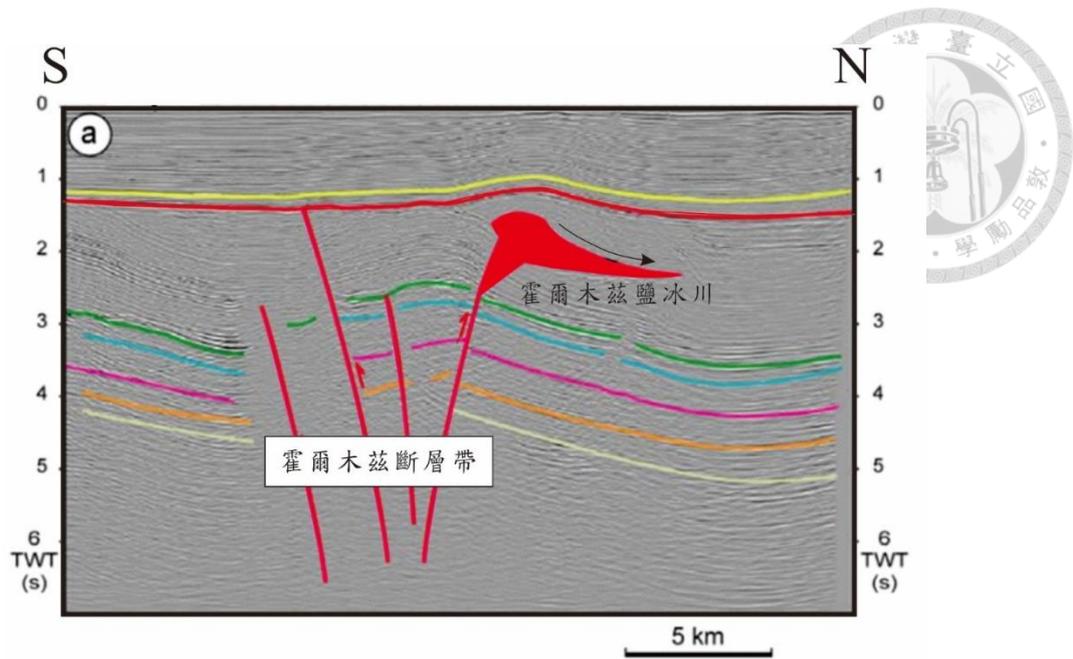


圖 5-6 霍爾木茲斷層帶震測剖面與鹽冰川示意圖。(修改自 Jahani et al., 2009)。

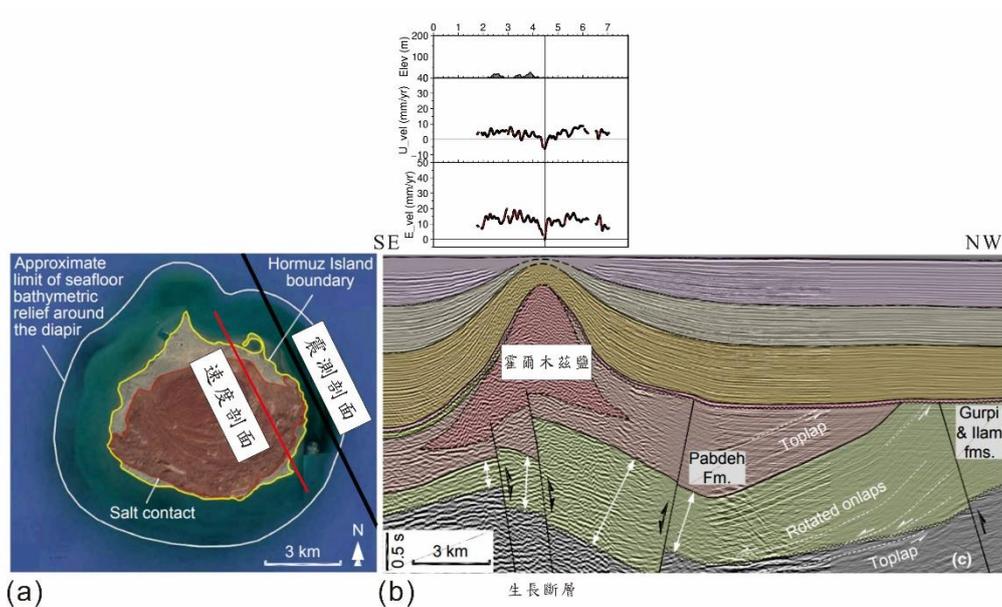


圖 5-7 (a) 霍爾木茲於 google Earth 中的影像，紅線為本研究速度場剖面，黑線為前人之震測剖面 (b) 鹽丘東側的震測剖面與速度場剖面對照圖 (修改自 Hassanpour et al, 2019)。

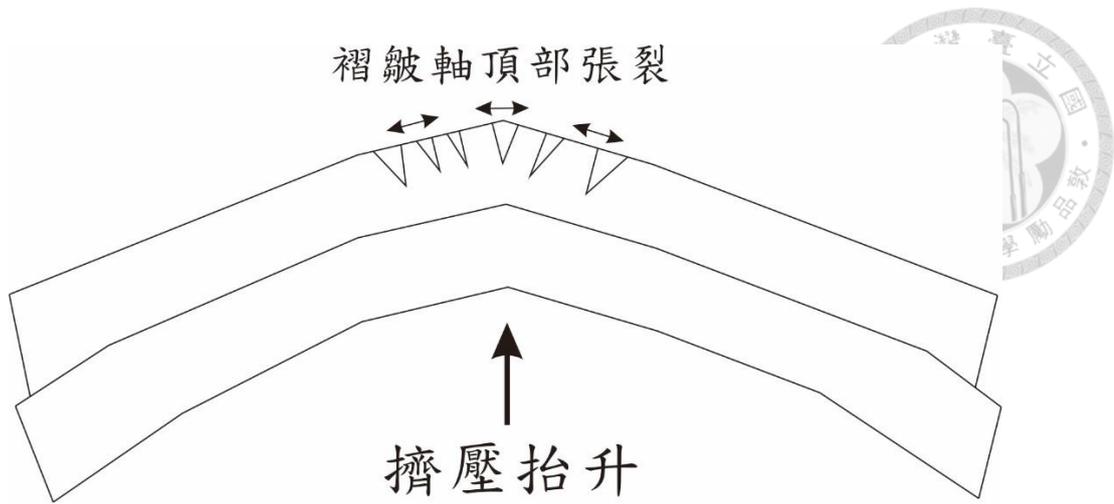


圖 5-8 褶皺軸頂部張裂示意圖。

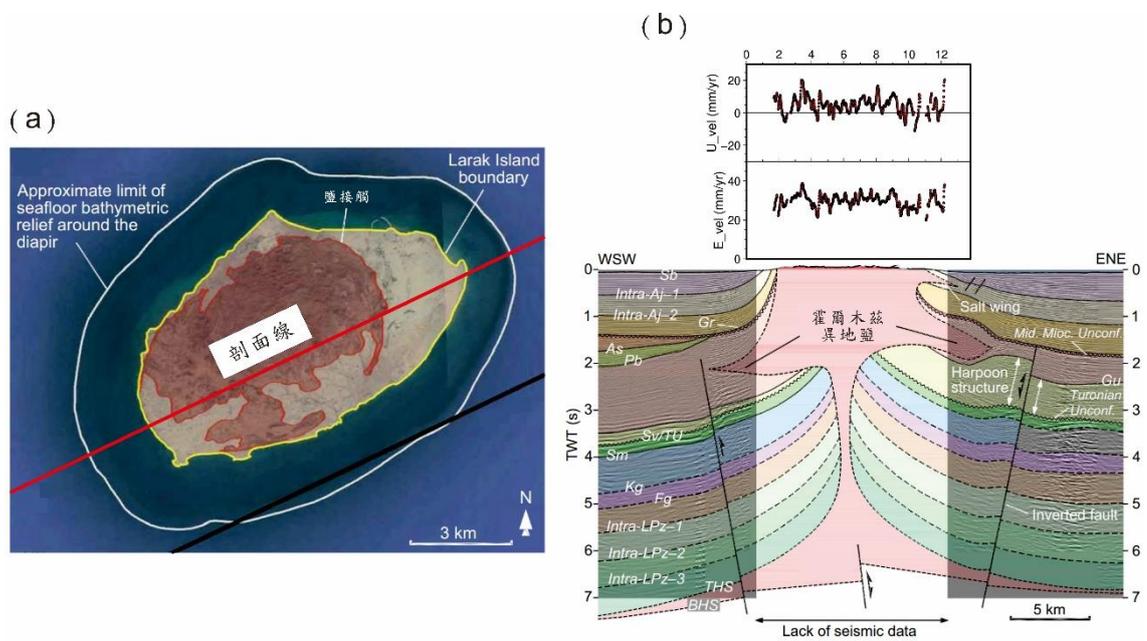
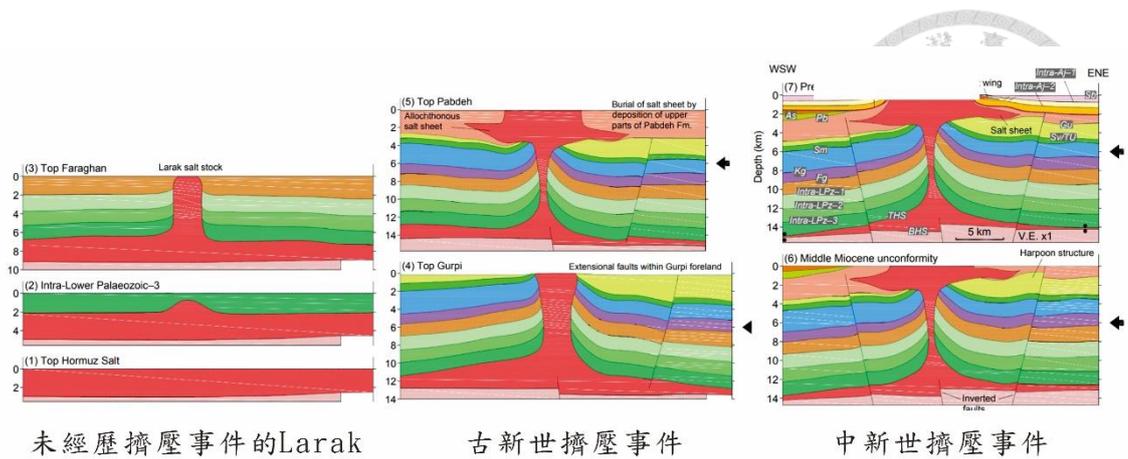


圖 5-9 (a) 拉拉克於 google Earth 中的影像；(b) 正切拉拉克的震測剖面圖與速度剖面對照圖 (修改自 Hassanpour et al, 2019)。



未經歷擠壓事件的Larak

古新世擠壓事件

中新世擠壓事件

圖 5-10 拉拉克的演化過程示意圖（修改自 Hassanpour et al, 2019）。

### 5.3 C 區：蓋維辛（Gaverzin）、亨賈姆（Hengam）

蓋維辛為一個位於喀什姆島上的鹽貫入體，其並未出露於地表，它位於拉夫特背斜的末端，並且根據 Nissen et al. (2010) 的研究所示，自 2005 至 2009 年間該鹽貫入體下部仍頻繁地有地震發生，透過地震深度分布與斷層走向可知拉夫特背斜為分離褶皺，滑脫層位置應位於古爾珠（Gurpi）石灰岩中。按照前人研究的內容預期蓋維辛因有地震活躍而具有活動性，因此針對此處進行了衛星遙測，然而在本研究中因為在降軌影像中相關性過低，在遮罩時失去大多數數據點位，並且透過 QGIS 進行數據採樣時發現其數值跳動幅度巨大，因此判斷此區數據點可能存在誤差而可信度較低。

日後若要針對此區進行研究，有幾種可以改進的方式：

- 一、使用頻率更高、波長更長的衛星，例如 L 波段的 ALOS 衛星，減少雷達波無法穿透植被的問題。
- 二、進一步將遮罩數值下修，使數據點位不會因遮罩而大量被刪去，但極有可能會使所得的數值包含不可信的離群值。

## 第6章 結論



本研究利用合成孔徑雷達干涉技術結合小基線子集法分析並討論伊朗法爾斯東南部喀什姆島附近之鹽貫入體的地表變形行為。所獲得的結論如下：

1. 本研究所觀測的鹽貫入體中以波爾 (Pol) 最為活躍，並且其具有週期性變化，從年初到夏季緩慢抬升，進入雨季後快速被侵蝕，並且具有鹽冰川的活動特性，北段朝東北方流動。南側可能也發育鹽冰川，但流動方向是朝軸的兩側流動。根據 InSAR 結果顯示，北段平均向東速度約 25.71 mm/yr，垂直速度平均約 12.59 mm/yr；南段平均向東速度為 16.11 mm/yr，垂直抬升速度平均為 16.68 mm/yr。
2. 波爾切穿了整個褶皺軸，並且存在早於褶皺軸，巴文背斜的活動性可能是由霍爾木茲鹽貢獻的，出露至地表的鹽貫入體為一個鹽流動的出口，因此靠近鹽貫入體的背斜軸核心可能會由鹽填充而向上抬升。
3. 加希為圓形盾狀鹽丘，西側平均垂直速度約 15.43 mm/yr，東側約 10.58 mm/yr，圍岩活動性比中央鹽庫高。地下的左移斷層活動性並不高，在地表變形速度場上並無顯著貢獻。垂直抬升速度約 12.88 mm/yr，推測其仍具有穩定的活動性。
4. 霍爾木茲在鹽出露的中心至北側鹽接觸的垂直速度逐漸減少，中心抬升速度最高 15.96 mm/yr，垂直速度場與地形呈現正相關，鹽通道仍在供應鹽。在鹽貫入體東側邊緣有一個突然陷落的構造，越往東又逐漸抬升。霍爾木茲具有受壓後向四周擴張的行為，並向東形成異地鹽，溢出的鹽翼下部存在兩條生長斷層，先是下沉之後再抬升，將鹽翼向上推擠，應是使東側抬升速度增加的主因。異地鹽受斷層抬升形成強制褶皺，褶皺軸頂部處於張裂環境，可能導致局部地區陷落。
5. 拉拉克具有很強的向東速度場，島的平均向東速度場約為 25.83 mm/yr，在垂直方向上鮮少有劇烈變動，平均抬升速度為 10.75 mm/yr。拉拉克的變形由鹽貫入體中央鹽庫的流動行為主控，出露於地表被觀測到的部分受到斷層構造的影嚮程度較低。當鹽受到擠壓溢出之後被包裹在圍岩中，若是中央鹽庫持續穩定供應鹽，鹽體可能會沿著先前溢出的鹽翼向外擴散。

- 
6. 喀什姆島在升軌影像中失相關，若要針對此處進行研究，應改換長波長的ALOS 衛星進行觀測，或是下修遮罩參數，避免點位流失，但將會出現所得數值可信度降低的風險。
  7. 綜合以上觀察，本研究區域的鹽貫入體因新生代的擠壓事件以及斷層系統影響，已經發展出異地鹽翼的後期構造，造成本區的鹽貫入體在水平方向上存在變形差異，過去研究著重討論鹽貫入體的垂直變形行為，本研究認為應該考慮到後期構造造成鹽貫入體的側向流動行為。

## 參考文獻

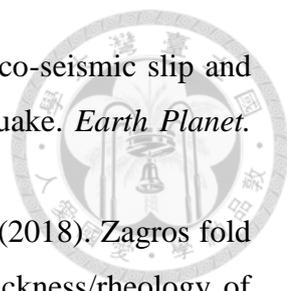


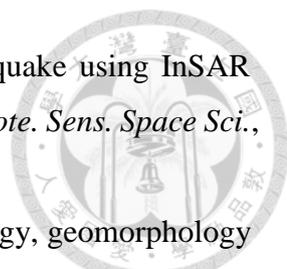
### 中文文獻

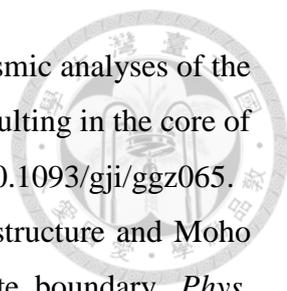
- 何世紀，2006，應用太空大地測量法探討台南地區之地表變形。國立中央大學地球物理研究所碩士論文，共 129 頁。
- 李庭昀，2021，札格羅斯造山帶基爾庫克弧凹之構造演化及活動性。國立臺灣大學理學院地質科學系碩士論文，共 139 頁。
- 胡植慶、彭俊維、周佩薇、李庭昀、戴郁庭、李秀芳、邱俊穎，2020，中東札格羅斯褶皺帶地質架構分析。中東札格羅斯褶皺帶與台灣西部麓山帶探勘標的比較計畫 109 年度合作研究計畫期末報告，共 162 頁。
- 戴郁庭，2021，應用平衡剖面及 InSAR 探討伊朗迪茲富勒構造演化及構造活動。國立臺灣大學理學院地質科學系碩士論文，共 135 頁。
- 謝嘉聲，2006，以雷達干涉技術偵測地表變形之研究。國立交通大學土木工程學系博士論文，共 80 頁。

### 英文文獻

- Abdolizadeh, S., Maleki, Z., & Arian, M. (2016). Earthquake hazard zonation and seismotectonics of the bandar abbas area, zagros, iran. *Open J. Geol.*, *06(03)*, 210-224., doi: 10.4236/ojg.2016.63019.
- Alavi, M. (2007). Structures of the zagros fold-thrust belt in iran. *Am. J. Sci.*, *307(9)*, 1064-1095., doi: 10.2475/09.2007.02.
- Alavi, M. (2004). Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *Am. J. Sci.*, *304(1)*, 1-20., doi: 10.2475/ajs.304.1.1.
- Amighpey, M., Voosoghi, B., & Motagh, M. (2014). Deformation and fault parameters of the 2005 Qeshm earthquake in Iran revisited: A Bayesian simulated annealing approach applied to the inversion of space geodetic data. *Int J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, *26*, 184-192., doi: 10.1016/j.jag.2013.06.006.
- Asl, M. E., Faghih, A., Mukherjee, S., & Soleimany, B. (2019). Style and timing of salt movement in the Persian Gulf basin, offshore Iran: Insights from halokinetic sequences adjacent to the Tonb-e-Bozorg salt diapir. *J. Struct. Geol.*, *122*, 116-132., doi: 10.1016/j.jsg.2019.02.002.
- Barnhart, W. D., Brengman, C. M. J., Li, S., & Peterson, K. E. (2018). Ramp-flat

- 
- basement structures of the Zagros Mountains inferred from co-seismic slip and afterslip of the 2017 Mw7.3 Darbandikhan, Iran/Iraq earthquake. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 496, 96-107., doi: 10.1016/j.epsl.2018.05.036.
- Bigi, S., Carminati, E., Aldega, L., Trippetta, F., & Kavooosi, M. A. (2018). Zagros fold and thrust belt in the Fars province (Iran) I: Control of thickness/rheology of sediments and pre-thrusting tectonics on structural style and shortening. *Mar. Pet. Geol.*, 91, 211-224., doi: 10.1016/j.marpetgeo.2018.01.005.
- Bruthans, J., Filippi, M., Zare, M., Churácková, Z., Asadi, N., Fuchs, M., & Adamovič, J. (2010). Evolution of salt diapir and karst morphology during the last glacial cycle: Effects of sea-level oscillation, diapir and regional uplift, and erosion (Persian Gulf, Iran). *Geomorphology*, 121(3-4), 291-304., doi: 10.1016/j.geomorph.2010.04.026.
- Cheab, A., Lacroix, P., Zerathe, S., Jongmans, D., Ajorlou, N., Doin, M.-P., Hollingsworth, J., & Abdallah, C. (2022). Landslides induced by the 2017 Mw7.3 Sarpol Zahab earthquake (Iran). *Landslides*, 19(3), 603-619., doi: 10.1007/s10346-021-01832-0.
- Edey, A., Allen, M. B., & Nilfouroushan, F. (2020). Kinematic variation within the Fars Arc, Eastern Zagros, and the development of fold-and-thrust belt curvature. *Tectonics*, 39(8), e2019TC005941., doi: 10.1029/2019tc005941.
- Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., et al. (2007). The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.*, 45(2), RG2004., doi: 10.1029/2005RG000183.
- Faghih, A., Ezati-Asl, M., Mukherjee, S., & Soleimany, B. (2019). Characterizing halokinesis and timing of salt movement in the Abu Musa salt diapir, Persian Gulf, offshore Iran. *Mar. Pet. Geol.*, 105, 338-352., doi: 10.1016/j.marpetgeo.2019.04.002.
- Fathian, A., Atzori, S., Nazari, H., Reicherter, K., Salvi, S., Svingkas, N., Tatar, M., Tolomei, C., & Yaminifard, F. (2021). Complex co- and postseismic faulting of the 2017–2018 seismic sequence in western Iran revealed by InSAR and seismic data. *Remote Sens. Environ.*, 253, 112224, doi: 10.1016/j.rse.2020.112224.
- Fuhrmann, T., & Garthwaite, M.C. (2019). Resolving three-dimensional surface motion with InSAR: Constraints from multi-geometry data fusion. *Remote Sens.*, 11(3), 241, doi: 10.3390/rs11030241.

- 
- Goorabi, A. (2020). Detection of landslide induced by large earthquake using InSAR coherence techniques – northwest Zagros, Iran. *Egypt. J. Remote. Sens. Space Sci.*, 23(2), 195-205., doi: 10.1016/j.ejrs.2019.04.002.
- Gutiérrez, F., Deirnik, H., Zarei, M., & Medialdea, A. (2023). Geology, geomorphology and geochronology of the coseismic Emad Deh rock avalanche associated with a growing anticline and a rising salt diapir, Zagros Mountains, Iran. *Geomorphology*, 421, 108527, doi: 10.1016/j.geomorph.2022.108527.
- Hassanpour, J., Yassaghi, A., Muñoz, J. A., & Jahani, S. (2020). Salt tectonics in a double salt-source layer setting (Eastern Persian Gulf, Iran): Insights from interpretation of seismic profiles and sequential cross-section restoration. *Basin Res.* 33(1), 159-185., doi: 10.1111/bre.12459.
- Hassanpour, J., Muñoz, J. A., Yassaghi, A., Ferrer, O., Jahani, S., Santolaria, P., & SeyedAli, S. M. (2021). Impact of salt layers interaction on the salt flow kinematics and diapirism in the Eastern Persian Gulf, Iran: Constraints from seismic interpretation, sequential restoration, and physical modelling. *Tectonophysics*, 811, 228887, doi: 10.1016/j.tecto.2021.228887.
- Hinsch, R., Vögele, M., Gharabeigli, G., Bretis, B., & Tari, G. (2022). Uncertainties of balanced sections and the role of basement in the southern Fars area, Iran. *J. Struct. Geol.* 163, 104686, doi: 10.1016/j.jsg.2022.104686.
- Jahani, S., Callot, JP., de Lamotte, D.F., Letouzey, J., Leturmy, P. (2007). The salt diapirs of the eastern Fars Province (Zagros, Iran): A brief outline of their past and present. In: Lacombe, O., Roure, F., Lavé, J., Vergés, J. (eds), *Thrust Belts and Foreland Basins*. Frontiers in Earth Sciences. Springer, Berlin, Heidelberg., doi: 10.1007/978-3-540-69426-7\_15.
- Jahani, S., Callot, J.-P., Letouzey, J., & Frizon de Lamotte, D. (2009). The eastern termination of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran: Structures, evolution, and relationships between salt plugs, folding, and faulting. *Tectonics*, 28(6), TC6004, doi: 10.1029/2008tc002418.
- Khorrami, F., Vernant, P., Masson, F., Nilfouroushan, F., Mousavi, Z., Nankali, H., Saadat, S. A., Walpersdorf, A., Hosseini, S., Tavakoli, P., Aghamohammadi, A., & Alijanzade, M. (2019). An up-to-date crustal deformation map of Iran using integrated campaign-mode and permanent GPS velocities. *Geophys. J. Int.*, 217(2), 832-843., doi: 10.1093/gji/ggz045.

- 
- Kintner, J. A., Wauthier, C., & Ammon, C. J. (2019). InSAR and seismic analyses of the 2014–15 earthquake sequence near Bushkan, Iran: shallow faulting in the core of an anticline fold. *Geophys. J. Int.*, *217*(2), 1011-1023., doi: 10.1093/gji/ggz065.
- Manaman, N. S., & Shomali, H. (2010). Upper mantle S-velocity structure and Moho depth variations across Zagros belt, Arabian–Eurasian plate boundary. *Phys. Earth Planet. Inter.*, *180*(1-2), 92-103., doi: 10.1016/j.pepi.2010.01.011.
- Mohammadi, E., Sodoudi, F., Kind, R., & Rezapour, M. (2013). Presence of a layered lithosphere beneath the Zagros collision zone. *Tectonophysics*, *608*, 366-375., doi: 10.1016/j.tecto.2013.09.017.
- Mohammadi, N., Rahimi, H., Gholami, A., Pachhai, S., & Aoudia, A. (2022). Shear-wave velocity structure of upper mantle along the Zagros collision zone. *Tectonophysics*, *837*, 229444, doi: 10.1016/j.tecto.2022.229444.
- Molinaro, M., Guezou, J. C., Leturmy, P., Eshraghi, S. A., & de Lamotte, D. F. (2004). The origin of changes in structural style across the Bandar Abbas syntaxis, SE Zagros (Iran). *Mar. Pet. Geol.*, *21*(6), 735-752., doi: 10.1016/j.marpetgeo.2004.04.001.
- Motaghi, K., Shabanian, E., Tatar, M., Cuffaro, M., & Doglioni, C. (2017). The south Zagros suture zone in teleseismic images. *Tectonophysics*, *694*, 292-301., doi: 10.1016/j.tecto.2016.11.012.
- Motamedi, H., & Gharabeigli, G. (2019). Structural Style in the Fars Geological Province. In H. Motamedia & G. G. (Eds), *Tectonic and Structural Framework of the Zagros Fold-Thrust Belt* (pp. 145-160)., doi: 10.1016/b978-0-12-815048-1.00009-3.
- Najafi, M., Yassaghi, A., Bahroudi, A., Vergés, J., & Sherhati, S. (2014). Impact of the late Triassic Dashtak intermediate detachment horizon on anticline geometry in the central frontal Fars, SE Zagros fold belt, Iran. *Mar. Pet. Geol.*, *54*, 23-36., doi: 10.1016/j.marpetgeo.2014.02.010.
- Nissen, E., Yamini-Fard, F., Tatar, M., Gholamzadeh, A., Bergman, E., Elliott, J. R., Jackson, J. A., & Parsons, B. (2010). The vertical separation of mainshock rupture and microseismicity at Qeshm island in the Zagros fold-and-thrust belt, Iran. *Earth Planet. Sci. Lett.*, *296*(3-4), 181-194., doi: 10.1016/j.epsl.2010.04.049.
- Nissen, E., Tatar, M., Jackson, J. A., & Allen, M. B. (2011). New views on earthquake faulting in the Zagros fold-and-thrust belt of Iran. *Geophys. J. Int.*, *186*(3), 928-

- 
- 944., doi: 10.1111/j.1365-246X.2011.05119.x.
- Orang, K., Motamedi, H., Azadikhah, A., & Royatvand, M. (2018). Structural framework and tectono-stratigraphic evolution of the eastern Persian Gulf, offshore Iran. *Mar. Pet. Geol.*, *91*, 89-107., doi: 10.1016/j.marpetgeo.2017.12.014.
- Perotti, C., Chiariotti, L., Bresciani, I., Cattaneo, L., & Toscani, G. (2016). Evolution and timing of salt diapirism in the Iranian sector of the Persian Gulf. *Tectonophysics*, *679*, 180-198., doi: 10.1016/j.tecto.2016.04.040.
- Purser, F. B. a. B. H. (1990). Modern alluvial fan and deltaic sedimentation in a foreland tectonic setting: the lower Mesopotamian Plain and the Arabian Gulf. *Sediment. Geol.*, *175-197.*, doi: 10.1016/0037-0738(90)90034-Q.
- Razaghian, G., & Arian, M. (2015). The emergent salt diapirs in the East Zagros, Iran. *Open J. Geol.*, *05(10)*, 718-726., doi: 10.4236/ojg.2015.510063.
- Regard, V., Hatzfeld, D., Molinaro, M., Aubourg, C., Bayer, R., Bellier, O., Yamini-Fard, F., Peyret, M., & Abbassi, M. (2022). The transition between Makran subduction and the Zagros collision: recent advances in its structure and active deformation. *Geological Society, London, Special Publications*, *330(1)*, 43-64., doi: 10.1144/sp330.4.
- Roustaei, M., Nissen, E., Abbassi, M., Gholamzadeh, A., Ghorashi, M., Tatar, M., Yamini-Fard, F., Bergman, E., Jackson, J., & Parsons, B. (2010). The 2006 March 25 Fin earthquakes (Iran)-insights into the vertical extents of faulting in the Zagros Simply Folded Belt. *Geophys. J. Int.*, *181*, 1275-1291, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04601.x.
- Sarkarinejad, K., Sarshar, M. A., & Adineh, S. (2018). Structural, micro-structural and kinematic analyses of channel flow in the Karmostaj salt diapir in the Zagros foreland folded belt, Fars province, Iran. *J. Struct. Geol.*, *107*, 109-131., doi: 10.1016/j.jsg.2017.12.005.
- Snidero, M., Carrera, N., Mencos, J., Butillé, M., Granado, P., Tavani, S., Lopez-Mir, B., Sàbat, F., & Muñoz, J. A. (2020). Diapir kinematics in a multi-layer salt system from the eastern Persian Gulf. *Mar. Pet. Geol.*, *117*, 104402, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2020.104402.
- Snidero, M., Muñoz, J. A., Carrera, N., Butillé, M., Mencos, J., Motamedi, H., Piryaeei, A., & Sàbat, F. (2019). Temporal evolution of the Darmadan salt diapir, eastern Fars region, Iran. *Tectonophysics*, *766*, 115-130., doi:

- 10.1016/j.tecto.2019.06.006.
- Talbot, C. J., Farhadi, R., & Aftabi, P. (2009). Potash in salt extruded at Sar Pohl diapir, Southern Iran. *Ore Geology Reviews*, 35(3-4), 352-366., doi: 10.1016/j.oregeorev.2008.11.002.
- Talbot, C., Aftabi, P., & Chemia, Z. (2009). Potash in a salt mushroom at Hormoz Island, Hormoz Strait, Iran. *Ore Geol. Rev.*, 35(3-4), 317-332., doi: 10.1016/j.oregeorev.2008.11.005.
- Torabi, M., Fattahi, M., Amini, H., Ghassemi, M. R., & Karimi, N. (2020). OSL dating of landslide-dammed-lake deposits in the north of Tehran, Iran: 958 Ray-Taleghan/Ruyan earthquake. *Quat. Int.*, 562, 46-57., doi: 10.1016/j.quaint.2020.07.006.
- Valero, L., Soleimany, B., Bulnes, M., & Poblet, J. (2015). Evolution of the Nourooz anticline (NW Persian Gulf) deciphered using growth strata: Structural inferences to constrain hydrocarbon exploration in Persian offshore anticlines. *Mar. Pet. Geol.*, 66, 873-889., doi: 10.1016/j.marpetgeo.2015.07.029.
- Yaminifard, F., Tatar, M., Hessami, K., Gholamzadeh, A., & Bergman, E. A. (2012). Aftershock analysis of the 2005 November 27 (Mw 5.8) Qeshm Island earthquake (Zagros-Iran): Triggering of strike-slip faults at the basement. *J. Geodyn.*, 61, 138-147., doi: 10.1016/j.jog.2012.04.005.
- Yang, Y. H., Li, X., Hu, J. C., Song, J., Zhao, J., Yassaghi, A., Pathier, E., Xu, Q., & Chen, Q. (2023). The 2022 Hormozgan Doublet Earthquake: Two blind thrusts-related folding in Zagros Fold-And-Thrust Belt, southeast Iran. *Geophys. Res. Lett.*, 50(4), e2022GL101902, doi: 10.1029/2022gl101902.
- Závada, P., Bruthans, J., Adineh, S., Warsitzka, M., & Zare, M. (2021). Composition and deformation patterns of the caprock on salt extrusions in southern Iran – field study on the Karmostaj and Siah Taq diapirs. *J. Struct. Geol.*, 151, 104422, doi: 10.1016/j.jsg.2021.104422.

## 附錄



附表 1 升軌影像之對應日期。

編號	影像日期	編號	影像日期	編號	影像日期
1	20200111	31	20210105	61	20211231
2	20200123	32	20210117	62	20220112
3	20200204	33	20210129	63	20220124
4	20200216	34	20210210	64	20220205
5	20200228	35	20210222	65	20220217
6	20200311	36	20210306	66	20220301
7	20200323	37	20210318	67	20220313
8	20200404	38	20210330	68	20220325
9	20200416	39	20210411	69	20220406
10	20200428	40	20210423	70	20220418
11	20200510	41	20210505	71	20220430
12	20200522	42	20210517	72	20220524
13	20200603	43	20210529	73	20220605
14	20200615	44	20210610	74	20220617
15	20200627	45	20210622	75	20220629
16	20200709	46	20210704	76	20220711
17	20200721	47	20210716	77	20220723
18	20200802	48	20210728	78	20220804
19	20200814	49	20210809	79	20220816
20	20200826	50	20210821	80	20220828
21	20200907	51	20210902	81	20220909
22	20200919	52	20210914	82	20220921
23	20201001	53	20210926	83	20221003
24	20201013	54	20211008	84	20221015
25	20201025	55	20211020	85	20221027
26	20201106	56	20211101	86	20221108
27	20201118	57	20211113	87	20221120
28	20201130	58	20211125	88	20221202
29	20201212	59	20211207	89	20221214
30	20201224	60	20211219		

附表 2 降軌影像之對應日期。

編號	影像日期	編號	影像日期	編號	影像日期
1	20200107	31	20210125	61	20220120
2	20200119	32	20210206	62	20220201
3	20200131	33	20210218	63	20220213
4	20200224	34	20210302	64	20220225
5	20200307	35	20210314	65	20220309
6	20200319	36	20210326	66	20220321
7	20200331	37	20210407	67	20220402
8	20200424	38	20210419	68	20220426
9	20200506	39	20210501	69	20220508
10	20200518	40	20210513	70	20220520
11	20200530	41	20210525	71	20220601
12	20200611	42	20210606	72	20220613
13	20200623	43	20210618	73	20220625
14	20200705	44	20210630	74	20220707
15	20200717	45	20210712	75	20220719
16	20200729	46	20210724	76	20220731
17	20200810	47	20210805	77	20220812
18	20200822	48	20210817	78	20220905
19	20200903	49	20210829	79	20220917
20	20200915	50	20210910	80	20220929
21	20200927	51	20210922	81	20221011
22	20201009	52	20211004	82	20221023
23	20201021	53	20211016	83	20221104
24	20201102	54	20211028	84	20221116
25	20201114	55	20211109	85	20221128
26	20201126	56	20211121	86	20221210
27	20201208	57	20211203	87	20221222
28	20201220	58	20211215	88	20230103
29	20210101	59	20211227		
30	20210113	60	20220108		

附表 3 升軌干涉對與垂直基線差。

編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)	編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)
1	2020010	2020022	-0.973716013	36	2020118	2020130	84.71686354
2	2020010	2020034	-3.158846001	37	2020118	2020142	39.96601886
3	2020010	2020046	-40.69167098	38	2020118	2020166	42.61335792
4	2020010	2020058	-5.19699103	39	2020130	2020142	-44.75084468
5	2020022	2020034	-2.185129988	40	2020130	2020154	59.48206449
6	2020022	2020046	-39.71795497	41	2020130	2020166	-42.10350562
7	2020022	2020058	-4.223275018	42	2020130	2020178	-27.38462476
8	2020022	2020070	-70.65049462	43	2020142	2020166	2.647339059
9	2020034	2020046	-37.53282498	44	2020142	2020178	17.36621992
10	2020034	2020058	-2.03814503	45	2020142	2020190	68.6110484
11	2020034	2020070	-68.46536463	46	2020154	2020178	-86.86668925
12	2020034	2020082	-49.82122303	47	2020154	2020190	-35.62186077
13	2020046	2020058	35.49467995	48	2020154	2020202	-77.33089821
14	2020046	2020070	-30.93253965	49	2020166	2020178	14.71888086
15	2020046	2020082	-12.28839805	50	2020166	2020190	65.96370934
16	2020046	2020094	-4.90796497	51	2020166	2020202	24.2546719
17	2020058	2020070	-66.4272196	52	2020166	2020214	5.138906541
18	2020058	2020082	-47.783078	53	2020178	2020190	51.24482847
19	2020058	2020094	-40.40264492	54	2020178	2020202	9.535791037
20	2020058	2020106	-77.67244116	55	2020178	2020214	-9.579974321
21	2020070	2020082	18.6441416	56	2020178	2020226	-74.04551963
22	2020070	2020094	26.02457468	57	2020190	2020202	-41.70903744
23	2020070	2020106	-11.24522156	58	2020190	2020214	-60.82480279
24	2020070	2020118	-22.02582833	59	2020202	2020214	-19.11576536
25	2020082	2020094	7.380433078	60	2020202	2020226	-83.58131067
26	2020082	2020106	-29.88936315	61	2020202	2020250	-60.200091
27	2020082	2020118	-40.66996993	62	2020214	2020226	-64.46554531
28	2020082	2020130	44.04689361	63	2020214	2020250	-41.08432564
29	2020094	2020106	-37.26979623	64	2020214	2020262	32.11683964
30	2020094	2020118	-48.05040301	65	2020226	2020238	-50.45063003
31	2020094	2020130	36.66646053	66	2020226	2020250	23.38121967
32	2020094	2020142	-8.084384149	67	2020226	2020262	96.58238495
33	2020106	2020118	-10.78060678	68	2020238	2020250	73.8318497
34	2020106	2020130	73.93625677	69	2020238	2020286	69.56028627
35	2020106	2020142	29.18541208	70	2020250	2020262	73.20116528



編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)	編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)
71	2020250	2020274	94.65005801	106	2021004	2021028	-22.78962063
72	2020250	2020286	-4.271563426	107	2021004	2021040	-13.47314449
73	2020250	2020298	20.03274168	108	2021004	2021052	7.293058448
74	2020262	2020274	21.44889273	109	2021016	2021028	2.396276191
75	2020262	2020286	-77.47272871	110	2021016	2021040	11.71275192
76	2020262	2020298	-53.1684236	111	2021016	2021052	32.47895527
77	2020262	2020310	-57.02617372	112	2021016	2021064	33.90002692
78	2020274	2020286	-98.92162144	113	2021028	2021040	9.316475724
79	2020274	2020298	-74.61731633	114	2021028	2021052	30.08267908
80	2020274	2020310	-78.47506645	115	2021028	2021064	31.50375073
81	2020274	2020322	-80.2927068	116	2021028	2021076	53.49942532
82	2020286	2020298	24.30430511	117	2021040	2021052	20.76620335
83	2020286	2020310	20.44655499	118	2021040	2021064	22.18727501
84	2020286	2020322	18.62891464	119	2021040	2021076	44.18294959
85	2020298	2020310	-3.85775012	120	2021040	2021088	27.43932401
86	2020298	2020322	-5.675390471	121	2021052	2021064	1.421071653
87	2020298	2020346	80.70774618	122	2021052	2021076	23.41674624
88	2020310	2020322	-1.817640351	123	2021052	2021088	6.673120654
89	2020310	2020346	84.5654963	124	2021052	2021100	-69.85466281
90	2020310	2020358	94.04445733	125	2021064	2021076	21.99567459
91	2020322	2020346	86.38313665	126	2021064	2021088	5.252049
92	2020322	2020358	95.86209768	127	2021064	2021100	-71.27573446
93	2020322	2021004	63.6104286	128	2021064	2021112	-46.09037466
94	2020334	2020346	-53.27371734	129	2021076	2021088	-16.74362559
95	2020334	2020358	-43.7947563	130	2021076	2021100	-93.27140905
96	2020334	2021004	-76.04642538	131	2021076	2021112	-68.08604925
97	2020346	2020358	9.478961036	132	2021076	2021124	-1.913337912
98	2020346	2021004	-22.77270804	133	2021088	2021100	-76.52778346
99	2020346	2021016	-47.95860486	134	2021088	2021112	-51.34242366
100	2020346	2021028	-45.56232867	135	2021088	2021124	14.83028767
101	2020358	2021004	-32.25166908	136	2021088	2021136	-2.184978206
102	2020358	2021016	-57.4375659	137	2021100	2021112	25.1853598
103	2020358	2021028	-55.04128971	138	2021100	2021124	91.35807114
104	2020358	2021040	-45.72481398	139	2021100	2021136	74.34280526
105	2021004	2021016	-25.18589682	140	2021100	2021148	53.31096538



編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)	編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)
141	2021112	2021124	66.17271134	176	2021232	2021244	-33.0201319
142	2021112	2021136	49.15744546	177	2021232	2021256	-87.48106937
143	2021112	2021148	28.12560558	178	2021232	2021268	-78.70644519
144	2021112	2021160	13.96740165	179	2021232	2021280	8.709066192
145	2021124	2021136	-17.01526588	180	2021244	2021256	-54.46093746
146	2021124	2021148	-38.04710575	181	2021244	2021268	-45.68631329
147	2021124	2021160	-52.20530968	182	2021244	2021280	41.72919809
148	2021124	2021172	-16.96778096	183	2021244	2021292	28.35240765
149	2021136	2021148	-21.03183987	184	2021256	2021268	8.774624173
150	2021136	2021160	-35.1900438	185	2021256	2021280	96.19013556
151	2021136	2021172	0.047484919	186	2021256	2021292	82.81334511
152	2021136	2021184	-54.46219907	187	2021268	2021280	87.41551138
153	2021148	2021160	-14.15820393	188	2021268	2021292	74.03872094
154	2021148	2021172	21.07932479	189	2021268	2021304	91.57672386
155	2021148	2021184	-33.4303592	190	2021268	2021316	31.9740883
156	2021148	2021196	-68.63839711	191	2021280	2021292	-13.37679044
157	2021160	2021172	35.23752872	192	2021280	2021304	4.161212476
158	2021160	2021184	-19.27215527	193	2021280	2021316	-55.44142309
159	2021160	2021196	-54.48019318	194	2021280	2021328	-79.25598853
160	2021160	2021208	45.89030731	195	2021292	2021304	17.53800292
161	2021172	2021184	-54.50968399	196	2021292	2021316	-42.06463264
162	2021172	2021196	-89.7177219	197	2021292	2021328	-65.87919809
163	2021172	2021208	10.65277859	198	2021292	2021340	-42.74985915
164	2021172	2021220	13.94053913	199	2021304	2021316	-59.60263556
165	2021184	2021196	-35.20803791	200	2021304	2021328	-83.41720101
166	2021184	2021208	65.16246258	201	2021304	2021340	-60.28786207
167	2021184	2021220	68.45022312	202	2021304	2021352	7.319301817
168	2021184	2021232	37.93701134	203	2021316	2021328	-23.81456544
169	2021196	2021232	73.14504925	204	2021316	2021352	66.92193738
170	2021196	2021244	40.12491735	205	2021328	2021340	23.12933893
171	2021208	2021220	3.287760542	206	2021328	2021352	90.73650282
172	2021208	2021232	-27.22545124	207	2021328	2022011	48.5577837
173	2021208	2021244	-60.24558314	208	2021340	2021352	67.60716389
174	2021220	2021232	-30.51321178	209	2021340	2022011	25.42844477
175	2021220	2021244	-63.53334368	210	2021340	2022023	34.6615244



編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)	編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)
211	2021352	2021364	69.88296476	247	2022143	2022167	-11.90119731
212	2021352	2022011	-42.17871912	248	2022143	2022179	-45.27442605
213	2021352	2022023	-32.94563949	249	2022143	2022191	-93.97008011
214	2021352	2022035	-29.43101401	250	2022155	2022191	93.83311169
215	2021364	2022035	-99.31397877	251	2022155	2022203	59.82790555
216	2021364	2022047	-72.69395527	252	2022167	2022179	-33.37322874
217	2022011	2022023	9.233079627	253	2022167	2022191	-82.06888281
218	2022011	2022035	12.74770511	254	2022179	2022191	-48.69565406
219	2022011	2022047	39.36772861	255	2022179	2022203	-82.7008602
220	2022011	2022059	47.82644843	256	2022179	2022227	-66.90644932
221	2022023	2022035	3.514625484	257	2022191	2022203	-34.00520614
222	2022023	2022047	30.13464898	258	2022191	2022215	-68.95999371
223	2022023	2022059	38.5933688	259	2022191	2022227	-18.21079526
224	2022023	2022071	-16.28065648	260	2022191	2022239	59.40209541
225	2022035	2022047	26.6200235	261	2022203	2022215	-34.95478757
226	2022035	2022059	35.07874332	262	2022203	2022227	15.79441088
227	2022035	2022071	-19.79528196	263	2022203	2022239	93.40730155
228	2022047	2022059	8.458719818	264	2022203	2022251	-21.02429056
229	2022047	2022071	-46.41530546	265	2022215	2022227	50.74919845
230	2022047	2022095	-19.70531099	266	2022215	2022251	13.93049701
231	2022059	2022071	-54.87402528	267	2022227	2022239	77.61289067
232	2022059	2022095	-28.16403081	268	2022227	2022251	-36.81870144
233	2022059	2022107	-79.185292	269	2022227	2022275	-20.314306
234	2022071	2022083	-82.42668133	270	2022239	2022275	-97.92719667
235	2022071	2022095	26.70999447	271	2022251	2022275	16.50439543
236	2022071	2022107	-24.31126672	272	2022251	2022299	61.76131549
237	2022071	2022119	-20.75284325	273	2022275	2022299	45.25692006
238	2022083	2022107	58.1154146	274	2022275	2022323	21.97620104
239	2022083	2022119	61.67383808	275	2022299	2022323	-23.28071901
240	2022095	2022107	-51.02126119	276	2022299	2022335	35.7799128
241	2022095	2022119	-47.46283772	277	2022299	2022347	71.86255291
242	2022095	2022143	33.69006552	278	2022311	2022347	-85.15004011
243	2022107	2022119	3.558423471	279	2022323	2022335	59.06063181
244	2022107	2022143	84.71132671	280	2022323	2022347	95.14327192
245	2022119	2022143	81.15290323	281	2022335	2022347	36.08264011
246	2022119	2022167	69.25170593				

附表 4 降軌干涉對與垂直基線差。

編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)	編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)
1	2020006	2020018	-36.3923061	36	2020162	2020174	61.88031421
2	2020006	2020030	-11.51143218	37	2020162	2020186	5.162220957
3	2020006	2020054	28.48289966	38	2020162	2020198	13.64760982
4	2020018	2020030	24.88087392	39	2020162	2020210	96.2072526
5	2020018	2020054	64.87520576	40	2020174	2020186	-56.71809325
6	2020018	2020066	90.98436417	41	2020174	2020198	-48.23270439
7	2020030	2020054	39.99433184	42	2020174	2020210	34.32693839
8	2020030	2020066	66.10349026	43	2020174	2020222	-39.55980571
9	2020030	2020078	27.12057854	44	2020186	2020198	8.485388867
10	2020054	2020066	26.10915842	45	2020186	2020210	91.04503164
11	2020054	2020078	-12.8737533	46	2020186	2020222	17.15828755
12	2020054	2020090	-69.22028254	47	2020186	2020234	6.801743866
13	2020066	2020078	-38.98291172	48	2020198	2020210	82.55964277
14	2020066	2020090	-95.32944095	49	2020198	2020222	8.672898679
15	2020066	2020114	-11.96555488	50	2020198	2020234	-1.683645002
16	2020078	2020090	-56.34652924	51	2020198	2020246	23.95250011
17	2020078	2020114	27.01735683	52	2020210	2020222	-73.88674409
18	2020078	2020126	-10.00590963	53	2020210	2020234	-84.24328777
19	2020090	2020114	83.36388607	54	2020210	2020246	-58.60714266
20	2020090	2020126	46.34061961	55	2020210	2020258	-42.81302144
21	2020090	2020138	25.74307688	56	2020222	2020234	-10.35654368
22	2020114	2020126	-37.02326646	57	2020222	2020246	15.27960143
23	2020114	2020138	-57.62080919	58	2020222	2020258	31.07372265
24	2020114	2020162	-80.92991517	59	2020222	2020270	35.36697895
25	2020126	2020138	-20.59754273	60	2020234	2020246	25.63614511
26	2020126	2020150	-84.57589434	61	2020234	2020258	41.43026633
27	2020126	2020162	-43.90664871	62	2020234	2020270	45.72352263
28	2020126	2020174	17.9736655	63	2020234	2020282	84.16848558
29	2020138	2020150	-63.97835162	64	2020246	2020258	15.79412121
30	2020138	2020162	-23.30910598	65	2020246	2020270	20.08737752
31	2020138	2020174	38.57120823	66	2020246	2020282	58.53234046
32	2020138	2020186	-18.14688502	67	2020246	2020294	-10.47525159
33	2020150	2020162	40.66924564	68	2020258	2020270	4.293256302
34	2020150	2020186	45.83146659	69	2020258	2020282	42.73821925
35	2020150	2020198	54.31685546	70	2020258	2020294	-26.26937281

編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)	編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)
71	2020258	2020306	31.46907772	106	2021024	2021072	16.50187613
72	2020270	2020282	38.44496295	107	2021036	2021048	-56.59379649
73	2020270	2020294	-30.56262911	108	2021036	2021060	-9.672608937
74	2020270	2020306	27.17582142	109	2021036	2021072	34.19662598
75	2020270	2020318	-0.28983622	110	2021036	2021084	13.60459426
76	2020282	2020294	-69.00759206	111	2021048	2021060	46.92118755
77	2020282	2020306	-11.26914153	112	2021048	2021072	90.79042247
78	2020282	2020318	-38.73479917	113	2021048	2021084	70.19839075
79	2020294	2020306	57.73845053	114	2021048	2021096	36.82729728
80	2020294	2020318	30.27279289	115	2021060	2021072	43.86923492
81	2020294	2020330	-83.38098096	116	2021060	2021084	23.2772032
82	2020294	2020342	20.89316009	117	2021060	2021096	-10.09389027
83	2020306	2020318	-27.46565764	118	2021060	2021108	-51.22479223
84	2020306	2020342	-36.84529044	119	2021072	2021084	-20.59203172
85	2020306	2020354	-0.748434648	120	2021072	2021096	-53.96312519
86	2020318	2020342	-9.379632804	121	2021072	2021108	-95.09402715
87	2020318	2020354	26.71722299	122	2021084	2021096	-33.37109347
88	2020318	2021000	61.84633088	123	2021084	2021108	-74.50199543
89	2020342	2020354	36.09685579	124	2021084	2021132	33.81397911
90	2020342	2021000	71.22596369	125	2021096	2021108	-41.13090196
91	2020342	2021012	47.43895211	126	2021096	2021120	-75.11341761
92	2020342	2021024	-2.193109535	127	2021096	2021132	67.18507258
93	2020354	2021000	35.12910789	128	2021096	2021144	80.90994519
94	2020354	2021012	11.34209631	129	2021108	2021120	-33.98251565
95	2020354	2021024	-38.28996533	130	2021108	2021156	66.3962178
96	2020354	2021036	-55.98471518	131	2021120	2021168	94.94506341
97	2021000	2021012	-23.78701158	132	2021132	2021144	13.72487261
98	2021000	2021024	-73.41907322	133	2021132	2021156	-41.91975674
99	2021000	2021036	-91.11382308	134	2021132	2021168	-47.35342678
100	2021012	2021024	-49.63206164	135	2021132	2021180	-67.6312987
101	2021012	2021036	-67.3268115	136	2021144	2021156	-55.64462935
102	2021012	2021060	-76.99942043	137	2021144	2021168	-61.07829939
103	2021024	2021036	-17.69474985	138	2021144	2021180	-81.35617131
104	2021024	2021048	-74.28854634	139	2021144	2021192	-42.52829428
105	2021024	2021060	-27.36735879	140	2021156	2021168	-5.433670038

編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)	編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)
141	2021156	2021180	-25.71154196	176	2021264	2021276	39.47720516
142	2021156	2021192	13.11633507	177	2021264	2021288	23.30766282
143	2021156	2021204	-10.52428639	178	2021264	2021300	37.18054635
144	2021168	2021180	-20.27787192	179	2021264	2021312	26.84333383
145	2021168	2021192	18.55000511	180	2021276	2021288	-16.16954234
146	2021168	2021204	-5.090616349	181	2021276	2021300	-2.296658817
147	2021168	2021216	34.2936555	182	2021276	2021312	-12.63387133
148	2021180	2021192	38.82787703	183	2021276	2021324	80.94124751
149	2021180	2021204	15.18725557	184	2021288	2021300	13.87288352
150	2021180	2021216	54.57152742	185	2021288	2021312	3.535671007
151	2021180	2021228	28.40375386	186	2021288	2021324	97.11078985
152	2021192	2021204	-23.64062146	187	2021288	2021336	17.86254021
153	2021192	2021216	15.74365039	188	2021300	2021312	-10.33721252
154	2021192	2021228	-10.42412318	189	2021300	2021324	83.23790633
155	2021192	2021240	-31.3069304	190	2021300	2021336	3.989656683
156	2021204	2021216	39.38427185	191	2021300	2021348	5.782006685
157	2021204	2021228	13.21649828	192	2021312	2021324	93.57511885
158	2021204	2021240	-7.666308943	193	2021312	2021336	14.3268692
159	2021204	2021252	17.15139423	194	2021312	2021348	16.1192192
160	2021216	2021228	-26.16777357	195	2021312	2021360	-51.27864123
161	2021216	2021240	-47.05058079	196	2021324	2021336	-79.24824965
162	2021216	2021252	-22.23287761	197	2021324	2021348	-77.45589964
163	2021216	2021264	-42.12310725	198	2021324	2022007	-83.91416261
164	2021228	2021240	-20.88280723	199	2021336	2021348	1.792350003
165	2021228	2021252	3.934895952	200	2021336	2021360	-65.60551043
166	2021228	2021264	-15.95533369	201	2021336	2022007	-4.665912963
167	2021228	2021276	23.52187148	202	2021336	2022019	-22.51874416
168	2021240	2021252	24.81770318	203	2021348	2021360	-67.39786043
169	2021240	2021264	4.927473537	204	2021348	2022007	-6.458262966
170	2021240	2021276	44.4046787	205	2021348	2022019	-24.31109416
171	2021240	2021288	28.23513636	206	2021348	2022031	-11.05924246
172	2021252	2021264	-19.89022964	207	2021360	2022007	60.93959746
173	2021252	2021276	19.58697552	208	2021360	2022019	43.08676627
174	2021252	2021288	3.417433184	209	2021360	2022031	56.33861797
175	2021252	2021300	17.29031671	210	2021360	2022043	59.45474358

編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)	編號	主影像	副影像	垂直基線差(m)
211	2022007	2022019	-17.8528312	246	2022175	2022199	-86.35470287
212	2022007	2022031	-4.600979491	247	2022175	2022211	-49.84316273
213	2022007	2022043	-1.484853885	248	2022175	2022223	-51.58843599
214	2022007	2022055	-14.51098138	249	2022187	2022199	2.032685248
215	2022019	2022031	13.25185171	250	2022187	2022211	38.54422538
216	2022019	2022043	16.36797731	251	2022187	2022223	36.79895212
217	2022019	2022055	3.341849816	252	2022199	2022211	36.51154014
218	2022019	2022067	-56.79070677	253	2022199	2022223	34.76626688
219	2022031	2022043	3.116125605	254	2022211	2022223	-1.745273259
220	2022031	2022055	-9.910001892	255	2022211	2022259	-48.58810035
221	2022031	2022067	-70.04255848	256	2022223	2022259	-46.84282709
222	2022031	2022079	43.86695965	257	2022223	2022271	14.98356814
223	2022043	2022055	-13.0261275	258	2022259	2022271	61.82639522
224	2022043	2022067	-73.15868409	259	2022259	2022283	-18.4827014
225	2022043	2022079	40.75083404	260	2022259	2022295	20.08630883
226	2022043	2022091	73.9530234	261	2022259	2022307	-81.70483616
227	2022055	2022067	-60.13255659	262	2022271	2022283	-80.30909662
228	2022055	2022079	53.77696154	263	2022271	2022295	-41.74008639
229	2022055	2022091	86.9791509	264	2022271	2022319	-87.92177959
230	2022067	2022115	96.29685924	265	2022283	2022295	38.56901023
231	2022079	2022091	33.20218935	266	2022283	2022307	-63.22213477
232	2022079	2022115	-17.61265889	267	2022283	2022319	-7.612682969
233	2022091	2022115	-50.81484824	268	2022295	2022319	-46.18169319
234	2022115	2022151	1.22200369	269	2022307	2022319	55.6094518
235	2022115	2022163	32.75869041	270	2022307	2022355	59.76154729
236	2022127	2022139	-3.099475528	271	2022319	2022355	4.152095495
237	2022151	2022163	31.53668672	272	2022319	2023002	54.67024014
238	2022151	2022175	34.43398319	273	2022331	2022343	1.718646251
239	2022151	2022187	-53.95340493	274	2022355	2023002	50.51814465
240	2022151	2022199	-51.92071968				
241	2022163	2022175	2.897296463				
242	2022163	2022187	-85.49009165				
243	2022163	2022199	-83.45740641				
244	2022163	2022211	-46.94586627				
245	2022175	2022187	-88.38738812				