



國立臺灣大學理學院海洋研究所

碩士論文

Institute of Oceanogrphy

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

蘭陽溪颱風事件懸浮顆粒輸出與組成之時序變化

與風化作用之交錯影響

Typhoon and weathering processes on particles export to
the ocean from an oceanic small river, the Lanyang of Taiwan

陳威榕

Wei-Rong Chen

指導教授：林曉武 博士

Advisor: Saulwood Lin, Ph.D.

中華民國 109 年 7 月

July, 2020

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

蘭陽溪颱風事件懸浮顆粒輸出與組成之時序變化
與風化作用之交錯影響

Typhoon and weathering processes on particles export to
the ocean from an oceanic small river, the Lanyang of
Taiwan

本論文係陳威榕 (R06241404) 在國立臺灣大學海洋研究所完成
碩士學位論文，於民國 109 年 7 月 22 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：

林俊元
(指導教授)

劉祖乾

楊良祐
何東垣

系主任、所長：詹森



致謝

這本研究論文能夠順利完成，首先非常感謝的是恩師林曉武博士的細心指導，每次與老師討論研究內容時，常覺得時間過得很快，因老師總是會很仔細地告訴我，研究的哪些部分可以更加完整，並且在學生遇到困難時，也會很適時的鼓勵學生，並給予建議跟幫助。研究期間，老師也給學生很多增廣見聞的機會，讓學生有難得的機會搭上不同國家的船出海，了解國外的學者是如何做研究，學習各國之間學術文化的不同之處，真的非常感謝老師在研究所期間的諄諄教誨，讓學生在研究所期間成長許多。

感謝中山大學劉祖乾教授、中央研究院何東垣教授以及本所溫良碩教授於百忙中抽空擔任學生的論文口試審查的委員，並且提供相當寶貴的建議，讓學生的論文得以更臻完美，學生銘記在心。感謝本所白書禎教授、魏慶琳教授、曾鈞懋教授及林卉婷教授，除在課堂上傳授許多知識給學生外，也時刻關心學生的狀況，給學生許多的幫助。

感謝研究室的每一個人，因為你們，我才能走到現在。感謝一之姊、凱莉，你們就像我的姊姊一樣很照顧我，時常幫我處理許多疑難雜症，幫助我分析遇到的困難，也常鼓勵我要我堅持下去，真的很感動。感謝意婷學姊，在我剛進入研究所徬徨無助時，手把手的帶著我做實驗，幫助我度過成為研究生的過渡期，在課業上還會抽空教我英文，閒暇之餘還會帶我去吃美食，謝謝你幫助我好多好多，這些我都會記在心上。感謝國銘、怡萱、介瑋、裕程、迎瑩、煒誠等許多學長姊，謝謝你們，因為有你們在颱風天下辛苦的採樣，才能讓我有完成這篇論文的機會，辛苦你們了。感謝嵐楓、韻茹陪我一起上山採樣、一起出海、一起做實驗做到半夜，儘管實驗非常枯燥，但跟你們就覺得很快樂。感謝助理芷均，在我剛到研究室時，很細心的教導我如何做實驗，也會帶我去攀岩，讓我不會整天都悶在研究室內。感謝助理冠樺、泓任，謝謝你們花時間載著我去採樣，還教我如何判斷岩層。感謝鈞毅協助我採樣以及完成研究室許多的實驗，讓我有時間可以去完成論文。

感謝其他研究室學長姊治平、志強、馥韻、吳仲、奕傑給我許多研究上的建議及幫助。感謝奕勝、朝源、珮芸三位好同學，跟你們一起修課、奮鬥、聊天真的很開心，讓我覺得我不是孤單的。感謝從大學開始就是同學的釋虹，一路上一直有你的幫忙，才能讓我在研究所修課期間能夠順遂。

最重要的是我要感恩我的家人爸爸、媽媽、姊姊、祐安，感謝你們在我最艱困的時候，陪著我一路走來，中間的過程我不知道自己懷疑自己了幾次，也好幾次想放棄過，但你們總是替我找想，深怕給我太多的壓力，所以不斷的鼓勵我「放輕鬆，自然就好」，我真的非常感謝您們，因有你們才有現在的我，這本論文摯我最愛的你們。



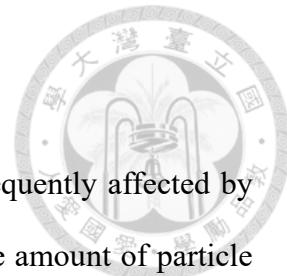
中文摘要

臺灣為島嶼型河川，山高水急，降雨之時間與空間分布不均，乾濕季明顯，加上臺灣地區受極端事件影響頻繁，平均每年有三至四個颱風侵襲，以及板塊運動影響產生地震、抬升等，加劇物理及化學風化機制，使得河川流域母岩性質脆弱易斷裂，造成臺灣河川每年攜帶大量之懸浮顆粒進入海洋後沉積，其單位面積的傳輸量甚至遠超過世界主要大河。

本研究係以台灣東北部蘭陽溪流域為研究對象，探討平時與颱風期間，河川輸出懸浮顆粒量的差異，分析顆粒物質主要元素組成，比較總懸浮顆粒 TSM (total suspended matter) 與總溶解性物質 TDS (total dissolved solids) 之元素組成差異，推測蘭陽溪流域上游岩層物理及化學風化機制，及其對懸浮顆粒之影響。

根據研究結果，蘭陽溪輸出之懸浮顆粒化性表現，與地層岩石化性表現相似，表示此流域輸出顆粒，多為物理風化的碎屑性(detrital)顆粒，在颱風時刻，不同岩層間，顯示碳酸岩類與鋁矽酸岩類的混合機制。

輸出總懸浮顆粒量部分，本研究期間(2007~2010)統計蘭陽溪流域平均懸浮顆粒輸出量為 21 Mt/yr ，每個颱風暴雨期(3~7 日內)的懸浮顆粒輸出量為 $0.7\sim12 \text{ Mt}$ 不等，最大可超過年輸出量 21 Mt/yr 的一半。若以總量來看，四年共輸出了 85 Mt ，其中 71 %為颱風所出輸出。顯示颱風暴雨期造成的懸浮顆粒輸出是臺灣小型河川顆粒態物質進入海洋的關鍵，若與世界河川相比，蘭陽溪每年單位面積向海洋之輸出量亦高於世界河川平均值。



Abstract

Taiwan is one of the high standing islands (HSIs) which is frequently affected by extreme events which caused uneven rainfall in time and space. The amount of particle per unit area is even far greater than that of the world major rivers. On average, three to four typhoons occur every year. In addition, plate movements causing earthquakes and uplifts are usual in Taiwan. Both frequent chemical and physical weathering mechanisms easily break parent rocks in the river basin, and that is a key reason causing Taiwan's rivers export a large amount of particulate matter to the ocean every year. Therefore, Taiwan is a very special and suitable place to study the small river weathering.

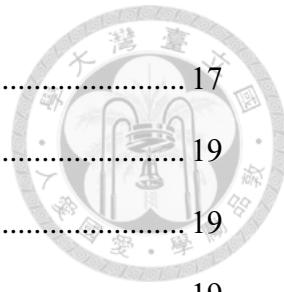
The aim of this study is to explore how much suspended particles are transported into the ocean in the small river, and of which elements in the particulate matter are mainly composed. We compared the amount of suspended particles and its chemical elements during typhoon and normal period in Lanyang River. The element composition of TSM (total suspended matter) and TDS (total dissolved solids) are used to evaluate physical and chemical weathering mechanisms in the small river.

Our results reflect that the output of suspended particulate matter in Lanyang River is higher during the typhoon period than that in the normal day. During the three days of typhoon period, the highest TSM is nearly 0.7~12 Mt and the average output is reaching about 21 Mt/yr, which is nearly half of annual output in the Lanyang River. This phenomenon indicates that the typhoon event is a key factor promoting the export of small river particulate matter into the ocean in Taiwan. Moreover, the annual output per unit area of the Lanyang River to the ocean is much higher than that of the world river. It shows the importance of chemical weathering of suspended particulate matter exported to the ocean in Taiwan's small rivers.



目錄

中文摘要	i
Abstract	ii
目錄	iii
圖目錄	vi
表目錄	viii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究區域	3
1.2.1 蘭陽溪流域地理位置及地質環境	3
1.2.2 蘭陽溪流域之氣象水文	4
1.2.3 研究目的	4
第二章 樣品採集及分析方法	6
2.1 樣品採集	6
2.1.1 採樣位置	6
2.1.2 採樣方法	6
2.2 樣品前處理	7
2.3 分析方法與實驗流程	7
2.3.1 金屬濃度(Al, Fe, K, Mn, Ca, Mg, Na)	7
2.3.2 矽(SiO ₂)	8
2.3.3 有機碳(TOC)及無機碳(TIC)含量	9
2.3.4 粒徑分析(grain size)	10
2.3.5 柯羅莎(Krosa)颱風流量估算	10
第三章 研究結果	17



3.1 颱風降雨及流量與總懸浮顆粒(TSM)	17
3.2 流域內地層面積及化性差異	19
3.2.1 廬山層(Lushan Formation)(圖 3.4)	19
3.2.2 乾溝層(Kangkou Formation)(圖 3.4)	19
3.2.3 四陵砂岩(Szeleng Sandstone)(圖 3.4).....	20
3.2.4 西村層(Hsitsun Formation)(圖 3.4).....	20
3.3 懸浮顆粒於颱風期間時序變化	21
3.3.1 總懸浮顆粒量(TSM)與流量(Discharge) (圖 3.5).....	21
3.3.2 懸浮顆粒鋁(圖 3.6)	22
3.3.3 懸浮顆粒鐵(圖 3.7)	24
3.3.4 懸浮顆粒鉀(圖 3.8)	25
3.3.5 懸浮顆粒錳(圖 3.9)	26
3.3.6 懸浮顆粒鈣(圖 3.10)	28
3.3.7 懸浮顆粒鎂(圖 3.11).....	29
3.3.8 懸浮顆粒鈉(圖 3.12)	30
3.3.9 懸浮顆粒矽(圖 3.13)	32
3.3.10 懸浮顆粒有機碳(TOC) (圖 3.14)	33
3.3.11 懸浮顆粒無機碳(TIC) (圖 3.15)	35
3.3.12 粒徑大小(grain size) (圖 3.16)	36
第四章 討論	54
4.1 降雨與河川流量與總懸浮顆粒(TSM)濃度之關係	54
4.2 非颱風與颱風期間顆粒組成之差異	59
4.3 懸浮顆粒與岩層化學組成之關係	73
4.4 物理風化與化學風化之物質輸出量	82
第五章 結論	87



圖目錄



圖 2.1 蘭陽溪流域採樣(懸浮顆粒、岩石)位置及流量、雨量測站位置與地層圖	12
圖 2.2 樣品分析處理流程圖	14
圖 2.3 噶瑪蘭橋水位高度與蘭陽溪大橋水位高度關係	16
圖 2.4 蘭陽溪大橋水位高度與流量關係	16
圖 3.1 累積雨量圖	38
圖 3.2 颱風期間雨量時序圖	39
圖 3.3 颱風與非颱風期間流量及 TSM 量	40
圖 3.4 岩層化性分析	41
圖 3.5 各颱風總懸浮顆粒(TSM)及流量(Discharge)時序變化	42
圖 3.6 各颱風期間懸浮顆粒鋁濃度隨時序變化	43
圖 3.7 各颱風期間懸浮顆粒鐵濃度隨時序變化	44
圖 3.8 各颱風期間懸浮顆粒鉀濃度隨時序變化	45
圖 3.9 各颱風期間懸浮顆粒錳濃度隨時序變化	46
圖 3.10 各颱風期間懸浮顆粒鈣濃度隨時序變化	47
圖 3.11 各颱風期間懸浮顆粒鎂濃度隨時序變化	48
圖 3.12 各颱風期間懸浮顆粒鈉濃度隨時序變化	49
圖 3.13 各颱風期間懸浮顆粒矽濃度隨時序變化	50
圖 3.14 各颱風期間懸浮顆粒有機碳(TOC)濃度隨時序變化	51
圖 3.15 各颱風期間懸浮顆粒無機碳(TIC)濃度隨時序變化	52
圖 3.16 各颱風期間懸浮顆粒粒徑大小(grain size)隨時序變化	53
圖 4.1 颱風期間雨量與流量	56
圖 4.2 颱風期間最大流量與最大懸浮顆粒濃度	56
圖 4.3 各颱風期間及地震時序圖	57



圖 4.4 流量與懸浮顆粒濃度(TSM)	58
圖 4.5 雨量與懸浮顆粒濃度(TSM)	58
圖 4.6 颱風與非颱風期間各懸浮顆粒金屬濃度之變化	62
圖 4.7 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鉀濃度	64
圖 4.8 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鋁濃度	65
圖 4.9 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鐵濃度	66
圖 4.10 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒錳濃度	67
圖 4.11 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鈣濃度	68
圖 4.12 總懸浮顆粒濃度(TSM)與無機碳(TIC)濃度	69
圖 4.13 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鎂濃度	70
圖 4.14 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鈉濃度	71
圖 4.15 無機碳(TIC)濃度與顆粒鈣濃度	72
圖 4.16 顆粒鋁及顆粒鉀與各層位岩石化性關係	76
圖 4.17 顆粒鋁及顆粒鈣與各層位岩石化性關係	77
圖 4.18 顆粒鋁及顆粒鎂與各層位岩石化性關係	78
圖 4.19 顆粒鋁及顆粒鐵與各層位岩石化性關係	79
圖 4.20 顆粒鋁及顆粒鈉與各層位岩石化性關係	80
圖 4.21 顆粒鋁及顆粒錳與各層位岩石化性關係	81



表目錄

表 2.1 各颱風強度、警報及採樣起訖時間	11
表 2.2 各地層岩石採樣經緯度	13
表 2.3 本研究分析之標準樣品（1646a、PACS-3）與標準品數值之比較	15
表 4.1 各金屬於颱風與非颱風期間最大或最小之異常值	63
表 4.2 2007~2010 年蘭陽溪颱風期間與非颱風時期總懸浮顆粒(TSM) 及總溶解物質(TDS)輸出量	84
表 4.3 2007~2010 各元素在溶解態及顆粒態上於颱風期間輸出量	85
表 4.4 2007~2010 蘭陽溪流域颱風與非颱風期間總懸浮顆粒(TSM)、總溶解物質(TDS)輸出量及單位面積輸出通量與世界大河比較	86



第一章 緒論

1.1 研究背景

河川為陸源性物質輸出至海洋的主要管道，根據 Milliman and Farnsworth (2011:24)統計指出，全球河川向海洋輸送之顆粒物質量約為 18000 Mt/yr，而溶解性物質約 3800 Mt/yr，比例約為 4:1，這些大量的物質由河川向鄰近外海輸出，將會對周圍海域有相當程度的影響。

河川顆粒及溶解性物質主要元素的來源，大多是經由岩石風化所產生，再經由集水區中地表及地下水傳送至河川中(Meybeck, 1987)，而風化作用藉由空氣、水、生物等影響，使岩石、礦物等，產生崩解或分解。風化作用主要分為，物理風化和化學風化，物理風化為岩石或礦物發生機械破碎作用，造成大塊岩石崩解成小顆粒碎屑，因此更易受水流搬運；而化學風化為岩石或礦物發生化學成分的變化(何春蓀,1982)，使可溶性元素溶解至水流中。兩者通常同時進行且交互影響，對於元素在顆粒與溶解性之動態組成變化中，皆扮演極其重要角色。

根據前人研究，岩性與氣候為影響化學風化的主要因子(Stallard et al., 1983; Berner, 1994)，而河川中的溶解態離子，主要受控於集水區內母岩的成分(Smolders et al., 2004)，所以地質條件及空間上的迥異，也控制著溪水化性的表現(Wu et al., 2007)。不同區域，表示母岩在化性及強度上有所差別，因此不僅是溶解態中會受到影響，顆粒態亦同，所以在化性上的表現 (Price et al., 2003; Li et al., 2012)及物理風化的程度都會有所差異。

高聳島嶼(High Standing Islands, HSIs)，係指河川上游高於海拔 1000m 以上 (J. D. Milliman et al., 1992)，而這類型島嶼被認為是物理風化的顆粒及化學風化的溶質進入海洋中的重要來源(Carey et al., 2002; Jacobson et al., 2003; Carey et al., 2005; Lyons et al., 2005; Hilton et al., 2012)。



台灣地形陡峭，正屬於高聳島嶼，山高水急，且極端事件頻繁，平均每年有三至四個颱風侵襲，導致降雨強度在時間與空間上分布不均，以及板塊運動影響產生地震、抬升等，加劇地表岩石物理及化學風化機制，使得河川流域裸露的母岩脆弱易斷裂，經過降雨及河川攜帶，每年向海洋傳輸大量顆粒物質。Dadson et al. (2003) 研究指出，1970~1999 年平均臺灣河川輸出 384Mt/yr 之懸浮顆粒量到海洋中，可能對臺灣周邊海域產生重大影響(Hsu et al., 2014)，若以單位面積傳輸量計算，甚至遠超過世界主要大河(Chen et al., 2004)。其中颱風所帶來之強降雨影響，令河水攜帶巨量懸浮顆粒，為懸浮顆粒輸出量之主要來源。由此可見颱風對於臺灣之懸浮顆粒輸出影響甚巨，故臺灣地區河川極具特殊性，為適合研究風化之地點。

颱風是台灣非常重重要之極端事件，可短時間內帶來大量雨水，沖蝕流域內裸露的母岩，使河水暴漲並夾帶大量化學物質進入河川(Cheng et al., 2010)。林冠璋(2005)的研究顯示，岩石強度是控制山崩發生的重要因素之一，而颱風期間的崩塌事件是顆粒的重要來源。綜合以上研究可知，地質條件決定顆粒及溶解組成，而藉由颱風對溶解及顆粒態的大量輸出，研究颱風的時序變化中，化性上差異，以及颱風與非颱風期間的差異，乃本研究著重之重點。

關於臺灣河川之研究，多偏重於探討河川溶解態主要離子濃度之變化及輸出量，例如：台灣小河川溶解性物質之區域性與季節性變化(連凱莉, 2009)，淡水河流域主要離子之濃度分布(林順斌, 2010)，台灣小河川溶解性物質之季節性變化與極端事件影響(賴怡萱, 2013)，林邊溪流域河川化學性質、輸砂量與山崩之關係(陳冠樺, 2014)等，有關颱風期間懸浮顆粒態物質之化性研究較為缺乏。為探討隨著地質條件及雨量等不同對溶解態影響之外，顆粒態是否也有不同變化，因此本文旨在探討蘭陽溪流域顆粒態及溶解態物質，隨颱風之時序變化；同時計算顆粒物質及溶解物質於颱風事件期間之總輸出量，提供物理及化學風化貢獻量的重要依據。



1.2 研究區域

1.2.1 蘭陽溪流域地理位置及地質環境

臺灣位處菲律賓海板塊與歐亞大陸板塊交會處，構造上屬於一個活動帶，為造山運動最活躍之區域，因此地震頻繁。本研究區域為台灣東北部的蘭陽溪流域，蘭陽溪位於宜蘭縣境內，為宜蘭縣主要河川之一，流域內無水庫，其河川源頭來自南湖北山，海拔約 3354 公尺，主流長度為 73 公里，流域面積 978 平方公里，平均坡度為 1/21，流經大同鄉、三星鄉、員山鄉、五結鄉、宜蘭市及壯圍鄉等地，農業活動頻繁。依面積大小，流域內主要地層依序為廬山層、乾溝層、四陵砂岩、西村層，若依主流之左右岸區分，右岸多屬廬山層為主，左岸多屬乾溝層以及少部分的四陵砂岩、西村層(何春蓀, 1982)，以下為各層位岩性、年代及分布區域。

廬山層(Lushan Formation)：年代為中新世(Early Miocene)早期至中期(Mid Miocene)，其主要由黑色到深灰色的硬頁岩、板岩及千枚岩和深灰色的硬砂岩互層組成，含有泥灰岩團塊，位置主要分布在脊梁山脈帶中。

乾溝層(Kangkou Formation)：年代為漸新世晚期(Late Oligocene)，為硬頁岩或板岩的黑色到深灰色頁岩質沉積為主，所含砂岩夾層不多，主要分布於雪山山脈帶北部。

四陵砂岩(Szeleng Sandstone)：年代約為漸新世(Oligocene)，以厚層淺灰色石英岩質砂岩或石英岩為主夾有暗灰色硬頁板岩，砂岩混有炭質頁岩時常呈現灰色色調，主要分布於雪山山脈帶北部。

西村層(Hsitsun Formation)：年代推測漸新世(Oligocene)至始新世(Eocene)，深灰色板岩與千枚岩質板岩所構成，夾有暗灰色、堅硬的石英砂岩互層，主要位於雪山山脈帶北部。



1.2.2 蘭陽溪流域之氣象水文

臺灣屬亞熱帶氣候，氣溫、雨量皆具季節性變化，7月之平均氣溫可達 28°C ，而1月平均氣溫介於 $15\text{~}21^{\circ}\text{C}$ 之間，根據經部水利署水文年報統計(2019)，雨量部分依過去近七十年來（民國38至107年）平均年雨量約為2508 mm，為世界平均降雨量之2.6倍，大量的降雨，造成年逕流量可達 64.9 km^3 （民國38至107年）。雨量多集中夏秋之際，溼季(5~10月)雨量佔全年降雨量之78%，主要因台灣位處北太平洋熱帶氣旋活躍地區，平均每年約3~4個颱風侵襲台灣，而颱風在短短數日之內，可帶來上千毫米雨量。時間上的降雨差異，造成河川於乾溼季變換之間流量有相當大的差異，其中溼季(5~10月)占77%，乾季(11至翌年4月)占23%。

李錫堤 et al. (2011)研究顯示，蘭陽溪流域年平均降雨量介於2300~5660 mm之間，而5~11月約佔全年雨量的70%，其主要雨量來自颱風及後續的西南氣流。逕流量方面，以蘭陽大橋觀測站資料為例，平均年逕流量約 1.99 km^3 ，其中5~11月約佔66%，表示逕流流量主要受颱風所帶來之雨量影響。懸浮顆粒輸出方面，(Dadson et al., 2003)統計1970年至1999年之相關資料，推估蘭陽溪年平均約輸出懸浮顆粒量約17 Mt。

1.2.3 研究目的

台灣小河川極具特殊，其物理風化及化學風化的物質輸出，可能對於海洋相當重要，目前大多數文章，多探討河川溶解態中主要離子之變化及輸出量，對於颱風期間顆粒態之化性研究較為缺乏，較難探討颱風事件對河川顆粒性物質之影響。

因此本研究擬藉由，探討台灣河川顆粒性物質於時間、空間及颱風期間之變化，了解台灣河川物理及化學風化特性、與流域環境變化之關係，及對海洋所帶來的影響程度。



為探討物理風化及化學風化，對台灣小河川物質傳輸之重要性，本研究以蘭陽溪為研究區域，自 2007 至 2010 年間，採樣分析十個颱風，包含 2007 年—聖帕 (Sepat)、韋帕 (Wipha)、柯羅莎 (Krosa)；2008 年—卡玫基 (Kalmaegi)、鳳凰 (Fung-Wong)、辛樂克 (Sinlaku)、薑蜜 (Jangmi)；2009 年—莫拉克 (Morakot)、芭瑪 (Parma)；2010 年—凡那比 (Fanapi)。颱風入侵期間，於蘭陽溪下游採集顆粒態及溶解態之樣品(連凱莉, 2009; 賴怡萱, 2013)，以及蘭陽溪上游之廬山層、乾溝層、西村層及四陵砂岩內採集岩石樣品。探討不同時間所採集的河川水，所含溶解態物質總量(TDS)(連凱莉, 2009; 賴怡萱, 2013)，及顆粒態中主要元素(Al, Fe, K, Mn, Ca, Mg, Na, Si)、有機碳 (TOC) 及無機碳 (TIC)，比較採集分析不同岩石中之化性差異，藉此判斷與岩層之來源關係。同時，計算物理及化學風化通量，比較颱風與非颱風時期之差異。



第二章 樣品採集及分析方法

2.1 樣品採集

2.1.1 採樣位置

本研究期間自 2007 年起，至 2010 年為止，針對臺灣東部蘭陽溪河川進行採樣。主要於颱風期間，在蘭陽大橋上進行定點式連續密集採集，尖峰時期每 4 小時採樣一次，持續至颱風影響減弱後，再逐漸降低採樣頻率，藉此以期能完整觀測颱風事件。另非颱風期間之月份，則逐月同一地點，進行一次採樣，研究期間總計研究分析 10 個颱風，各颱風採樣起訖時間列於表 2.1。

岩石樣品部分，於 2019 至 2020 期間，針對蘭陽溪流域上游，流經之四個層位：廬山層，乾溝層、西村層、四陵砂岩分別進行原岩採集，其採樣地點標註於圖 2.1

2.1.2 採樣方法

顆粒部分，研究人員於測站地點進行河川樣品採集，使用棉繩懸掛塑膠水桶投入河川中撈取河水，將 PE 瓶以河水潤洗數次後，再將河水裝入 5 公升 PE 瓶中，隨即把颱風樣品帶回位當地之臨時實驗室，而非颱風樣品則攜回實驗室後進行後續處理與實驗分析。

岩石部分，依地質圖(圖 2.1)判斷，本區域主要有四個地層：廬山層，乾溝層、西村層、四陵砂岩。按此四個層位的位置，尋找區域內未受植被覆蓋之露頭(outcrop)位置進行採樣。採樣時，先以地質錘將表面岩石敲掉，再取內部之新鮮岩石，以確保採集之岩石較未受風化影響，並記錄個樣品經緯度及層位，樣品位置列於表 2.2。



2.2 樣品前處理

顆粒部分，本研究使用加壓式過濾器進行河水樣品的過濾工作。將採集到之河水樣品，分成 3L 及 2L，分別倒入裝有 $0.4\mu\text{m}$ 孔徑 PC 濾紙(Polycarbonate·Nuclepore)及 GF/F(glass fiber，Whatman)二種不同濾紙之過濾裝置中，以氮氣加壓(PSI=10)方式過濾。經 PC 濾紙過濾後之水樣裝至 100ml PE 瓶中，而含有懸浮顆粒之濾紙置入小塑膠盒中，放置乾燥箱乾燥，之後稱重紀錄保存於恆濕度箱內至分析。過濾後之水樣則分析其化學組成。GF/F 濾紙過濾後之水樣不予保留，但含有顆粒之濾紙則置入小盒中，放置乾燥箱乾燥保存。

2.3 分析方法與實驗流程

本研究分析主要包含河川中懸浮顆粒物質及岩石中之金屬濃度(Al, Fe, K, Mn, Ca, Mg, Na)、Si (SiO₂)、有機碳(TOC)及無機碳(TIC)之含量，以及懸浮顆粒之粒徑大小，如流程圖 2.2。

2.3.1 金屬濃度(Al, Fe, K, Mn, Ca, Mg, Na)

本實驗方法(Lin et al., 2002; Huang et al., 2003; Soyol-Erdene et al., 2019)將已乾燥研磨之樣品，秤取 0.25g 至鐵氟龍管中，加入 5 ml 之混合酸(HNO₃ : HF = 5 : 2)後以定扭力器鎖緊，放入微波消化器 (CEM microwave, MDS-2000) 中，以 180°C、1200W 之功率，重複微波 20 min 兩次。微波完成待冷卻後，加入 10 ml 之 HBO₃(4%)後以機器鎖緊，再放入微波消化器，同樣以 180°C、1200W 之功率，微波 20 min 一次，微波完成待冷卻後，裝入 50 ml 之離心管，同時加入 5 ml 之去離子水，將其定量至 20 ml。

將含有消化液之離心管，放入離心機中，以 4000 rpm 離心 15 min，完成後將上層之澄清消化液取出，裝至廣口瓶內。



分析時，取 15 ml 之離心管，將消化液依各金屬(Al, Fe, K, Mn, Ca, Mg, Na)適合之感測濃度以 0.1N HNO₃ 進行稀釋，使用火焰式原子吸收光譜儀(Perkin Elmer Analyst 200)進行量測。其原理為將待測樣品經霧化器霧化後，再送進火焰中原子化後，吸收自中空陰極射線管放出之特定波長的光，量測其吸光度並換算為濃度。

本研究使用 Merck 之 Al³⁺、Fe²⁺、K⁺、Mn²⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺標準液配製檢量線，每次檢量線之直線迴歸 (r^2) 皆達 0.999 以上，且樣品重複分析之精密度小於 5% 以內。本研究每 10 個樣品加入一標準品(PACS3 及 NIST-1646A)進行檢測，以確保實驗分析之準確度，標準樣品之分析個數與分析誤差列於表 2.3。

2.3.2 砂(SiO₂)

本研究使用矽鉬分光光度呈色法(the silicomolybdic acid spectrophotometric method)，呈色法主要分為矽鉬黃法及矽鉬藍法，但樣品中的矽酸鹽濃度較高，因此採用呈色法中的矽鉬黃法進行測定，主要原理為，矽酸鹽於酸性環境下，與鉬酸銨反應形成矽鉬黃複合物。為使矽鉬黃反應靈敏且快速，參考王程筠 (2017)建議之方法，降低氫離子濃度至 50 mM~100 mM 間，並使氫鉬比為 2.5，反應後 pH 值在 1.4~1.6 間。

藥劑配置：

1. 鉬酸銨試劑：130 g 之鉬酸銨溶於 1 % 氨水，以去離子水(DIW)稀釋至 1 L。此溶液含鉬濃度為 736 mM，鹼濃度為 670 mM
2. 硫酸試劑：將濃硫酸(95~97%)70 mL，以去離子水(DIW)稀釋至 1 L。此溶液含氫濃度為 2520 mM



實驗步驟：

將稀釋後(10 mL)的樣品，加入 0.4 mL 鉑酸銨試劑，搖晃均勻後，再加入 0.4 mL 硫酸試劑，接著以分光光度計，波長($\lambda=400\text{ nm}$)及 1 cm 光槽進行測量，並每 10 個樣品之間，加入一個標準樣品計算其回收率，確保實驗精準度，標準樣品之分析個數與分析誤差列於表 2.3。

2.3.3 有機碳(TOC)及無機碳(TIC)含量

本實驗方法(Fan et al., 2018)，總碳(TC)及有機碳分析使用 LECO SC-444 碳硫分析儀及 EA 元素分析儀。總碳含量是將約 0.25 克已乾燥研磨之樣品放入陶製燃燒船後，置入碳硫分析儀，以純氧在 1400°C 高溫燃燒，產生之二氧化碳利用紅外線偵測器測定，並以 LECO 碳標準品(%C= $2.02 \pm 0.04\%$)校正。

有機碳含量之測定則是先將約 2 克已乾燥研磨之樣品置入 PE 塑膠離心管中，加入 50mL 2N HCl，以去除無機碳，浸泡 8 小時後放入離心機，以 4000 rpm 離心 15 min，用吸量管將酸液取出丟棄，再加入去離子水 50 mL，並使去離子水和沉積物充分混合，再以離心機將樣品與溶液分離，重複相同步驟四次，將酸液洗淨。洗淨後的樣品置入冷凍乾燥機中乾燥後，將乾燥的樣品稱重並儲於小塑膠瓶中備用。秤 0.5 毫克酸洗後乾燥之樣品至錫杯中，送入 EA 元素分析儀，錫之助燃下使樣品瞬間燃燒溫度高達 1800°C ，促使樣品完全燃燒，可利用熱傳導偵檢器(TCD) 分別測定其含量，再經資料處理機運算 CO₂ 含量，即可知有機碳含量。無機碳含量則將總碳值減去有機碳值換算即可得，亦即 TIC=TC-TOC。



2.3.4 粒徑分析(grain size)

粒徑分析使用 COULTER LS230，雷射測徑儀使用波長為 $0.63\text{ }\mu\text{m}$ 之氦氖雷射。以繞射原理測量顆粒直徑，因光線前進過程中，碰到障礙物時，形成繞射現象 (diffraction)，並於投影面上產生繞射圖樣 (diffraction pattern)。平行雷射光經透鏡後，聚焦於環形感受器 (投影面) 上，當顆粒藉水流循環作用，經過透鏡與感受器之間時，感受器上形成繞射圖，由此環形感受器所量測到之光線強度，即可推導出粒徑分布百分比。

取乾燥尚未研磨之懸浮顆粒，放入樣品槽內，再以超音波震盪 300 秒，使其均勻懸浮於樣品槽內，接著進入儀器光槽測量。並重複三次，以確保分析結果之可信度。

2.3.5 柯羅莎(Krosa)颱風流量估算

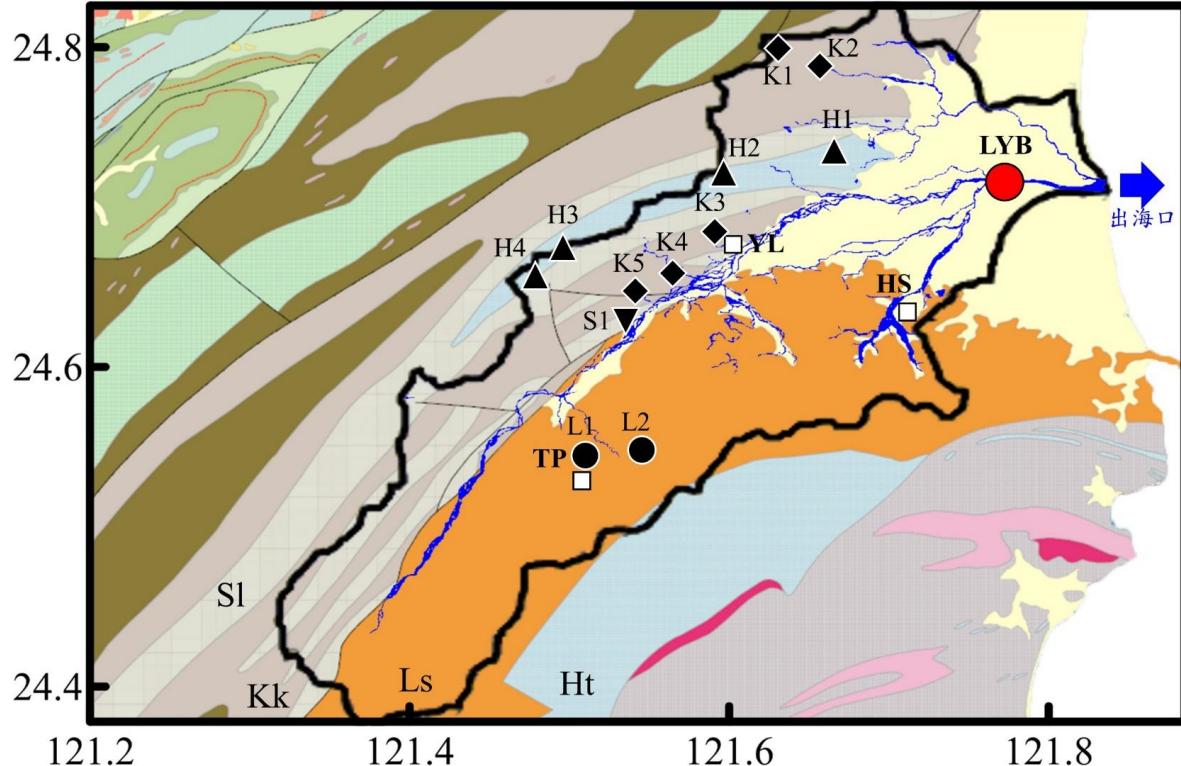
所有颱風造成之流量皆取自經濟部水利署，除柯羅莎(Krosa)颱風期間，因流量過大，導致流量計異常。因此，為重新推估當時柯羅莎(Krosa)造成的流量，須利用同條河川上之噶瑪蘭橋(相隔約 5 km)測站，作為推估的基準。首先，從 2007 年間挑選數個時段，並記錄同一個時間下，兩測站之水位高度，建立兩測站之水位關係(圖 2.3)。因此將柯羅莎(Krosa)期間，測得之噶瑪蘭橋水位高度帶入此關係中 $y=2.3757*x+2.0693$ ，即可反推理論上蘭陽溪大橋應測得之水位高度。接著，一樣將 2007 年間，蘭陽溪大橋測站之水位高度與其流量做對比，即可取得一指數關係 $y=0.7275*e^{1.4707*x}$ (圖 2.4)同樣的將上述原本推估之蘭陽溪大橋水位導入，即可推估柯羅莎颱風(Krosa)期間，蘭陽溪大橋應測得的流量。



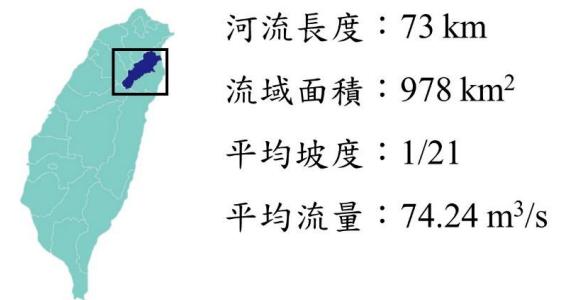
表 2.1 各颱風強度、警報及採樣起訖時間

年份	名稱(English name)	強度(風速) ^a	警報時間	採樣時間
2007	聖帕(Sepat)	強颱(53 m/s)	8/16~8/19	8/17~8/27
	韋帕(Wipha)	中颱(48 m/s)	9/17~9/19	9/17~9/28
	柯羅莎(Krosa)	強颱(51 m/s)	10/4~10/7	10/4~10/17
2008	卡玫基(Kalmaegi)	中颱(33 m/s)	7/16~7/18	7/17~7/25
	鳳凰(Fung-Wong)	中颱(43 m/s)	7/26~7/29	7/27~8/5
	辛樂克(Sinlaku)	強颱(51 m/s)	9/11~9/16	9/9~9/27
	薑蜜(Jangmi)	強颱(53 m/s)	9/26~9/29	9/27~10/15
2009	莫拉克(Morakot)	中颱(40 m/s)	08/05~08/10	8/5~8/24
	芭瑪(Parma)	中颱(43 m/s)	10/03~10/06	10/2~10/28
2010	凡那比(Fanapi)	中颱(45 m/s)	09/17~09/20	09/17~09/20

註：(a)強度依中央氣象局(CWB)分類標準，風速為中心最大風速(m/s)



(from CGS, 1974)



● 懸浮顆粒*採樣地點(LYB),同流量計位置
□ 雨量測站:寒溪(HS),玉蘭(YL),太平山(TP)

*颱風期間：尖峰時期每四小時採一次樣品
平常月份：一個月採一次

岩石採樣地點：

- L1、L2 ■ 嘉陵江層 Lushan Formation(46%)
- ◆ K1~K5 ■ 乾溝層 Kangkou Formation (20%)
- ▼ S1 ■ 四陵砂岩 Szeleng Sandstone(10%)
- ▲ H1~H4 ■ 西村層 Hsitsun Formation (5%)

圖 2.1 蘭陽溪流域採樣(懸浮顆粒、岩石)位置及流量、雨量測站位置與地層圖



表 2.2 各地層岩石採樣經緯度

層位	站名	緯度($^{\circ}$ N)	經度($^{\circ}$ E)
廬山層(Lushan Formation)	L1	24.53781	121.51760
	L2	24.53635	121.52505
乾溝層(Kangkou Formation)	K1	24.75772	121.61630
	K2	24.75380	121.66260
	K3	24.69080	121.61747
	K4	24.67476	121.57766
	K5	24.66177	121.56998
四陵砂岩(Szeleng Sandstone)	S1	24.62554	121.53984
西村層(Hsitsun Formation)	H1	24.74230	121.67735
	H2	24.71431	121.65148
	H3	24.64998	121.46750
	H4	24.63973	121.45310



Method

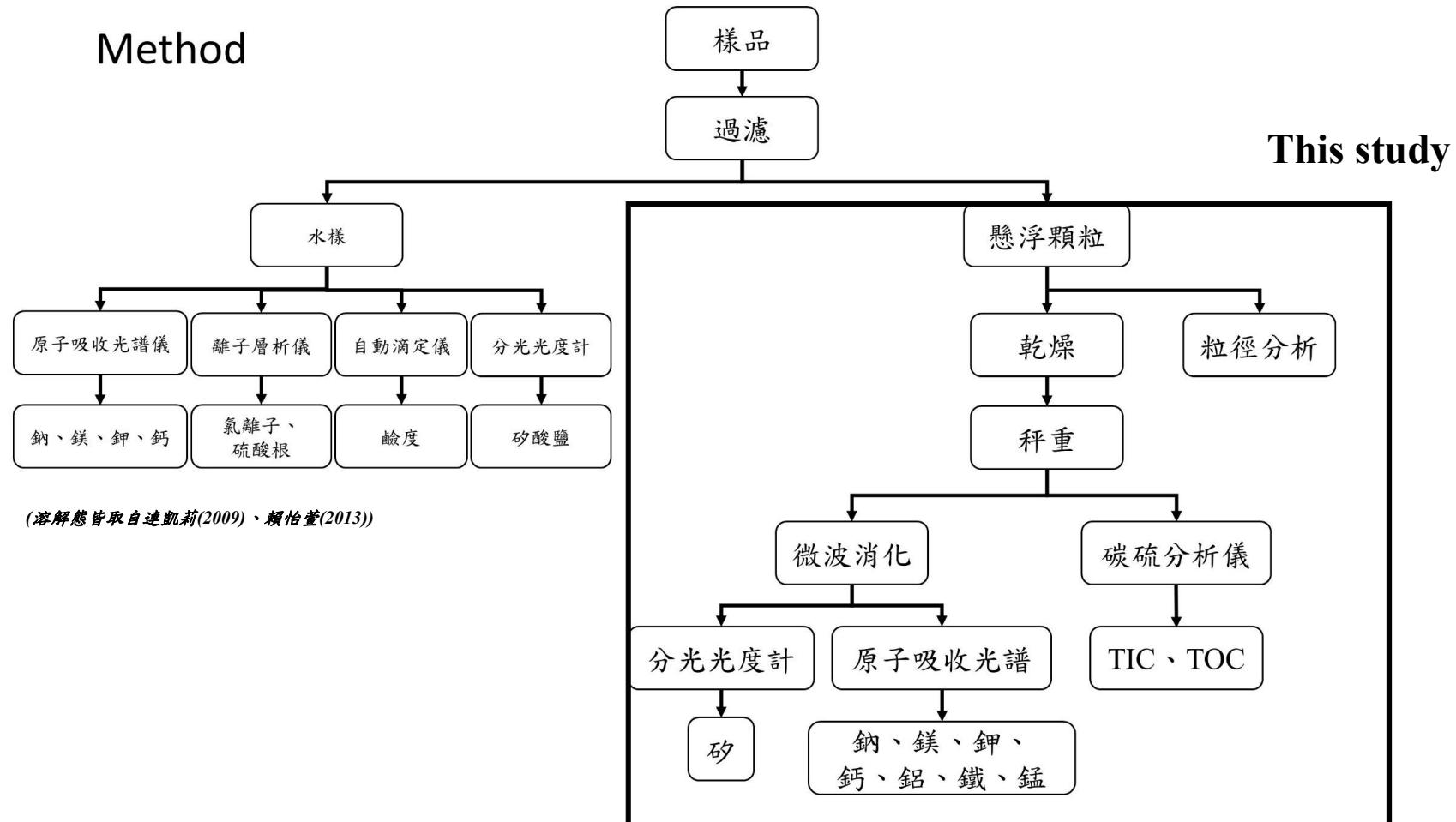


圖 2.2 樣品分析處理流程圖

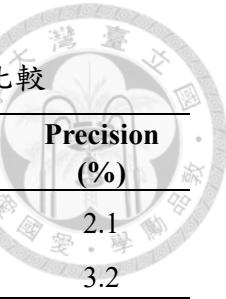


表 2.3 本研究分析之標準樣品 (1646a、PACS-3) 與標準品數值之比較

Element	Calibration sample	Certified Values (mean±σ)	This study (mean±σ)	Accuracy (%)	Precision (%)
K(%)	1646a	0.864±0.016	0.865±0.018	101±3	2.1
	PACS-3	1.24±0.07	1.24±0.04	99±2	3.2
Na(%)	1646a	0.741±0.017	0.737±0.017	100±2	2.3
	PACS-3	3.5	3.47±0.08	99±2	2.4
Ca(%)	1646a	0.519±0.020	0.512±0.012	99±2	2.3
	PACS-3	1.9±0.1	1.89±0.05	99±2	2.9
Mg(%)	1646a	0.388±0.009	0.390±0.006	100±2	1.7
	PACS-3	1.47±0.19	1.41±0.04	100±2	3.1
Al(%)	1646a	2.297±0.018	2.242±0.047	99±2	2.1
	PACS-3	6.58±0.17	6.54±0.14	99±2	2.2
Fe(%)	1646a	2.008±0.039	1.997±0.060	100±3	3.0
	PACS-3	4.11±0.11	4.11±0.10	99±2	2.5
Mn(mg/kg)	1646a	234.5±2.8	231.7±5.9	100±3	2.6
	PACS-3	425±34	428±15	98±2	3.5
Si(%)	1646a	40.00±0.16	38.69±0.43	97±1	1.1
	PACS-3	26.1	26.4±0.5	100±2	2.0

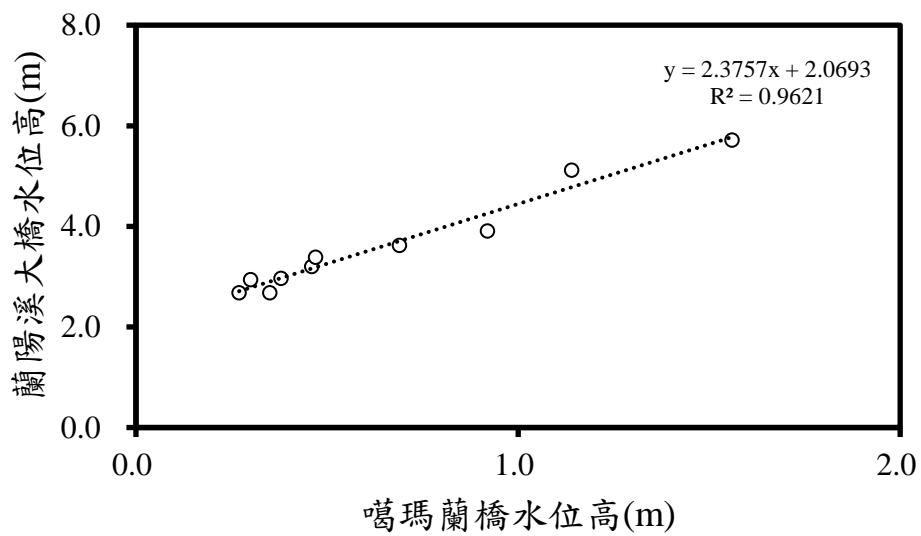
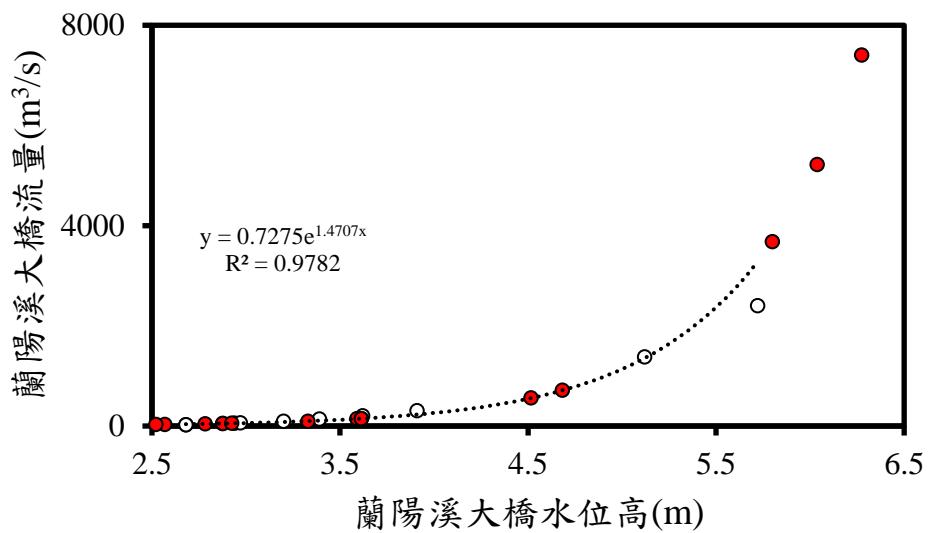


圖 2.3 噶瑪蘭橋水位高度與蘭陽溪大橋水位高度關係





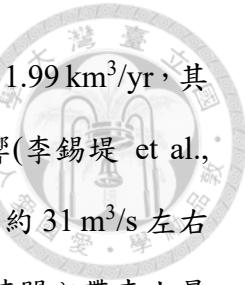
第三章 研究結果

本研究分析河川中顆粒態之化性變化，探討蘭陽溪流域顆粒性物質於時間及空間上差異。並參照連凱莉 (2009)及賴怡萱 (2013)研究之蘭陽溪流域溶解態資料，以比較蘭陽溪流域物理及化學特性，與流域變化之關係。並以水利署水文資料庫研究測站之水文資料，進行計算分析與詮釋蘭陽溪河川物質之輸出與控制其變化之主要機制。

3.1 颱風降雨及流量與總懸浮顆粒(TSM)

台灣平均每年約有 3.8 個颱風侵襲，颱風在數日之內可帶來數百至上千毫米的雨量，猛烈沖刷流域內母岩，造成大量的溶解態物質與懸浮顆粒進入河川，是台灣地區相當重要的極端事件。台灣地區年降雨量約為 2428 mm，為世界平均降雨量之 2.6 倍，而蘭陽溪流域年平降雨量介於 2300~5660 mm 之間(李錫堤 et al., 2011)，而 5~11 月約佔全年雨量的 70%，其中雨量多來自颱風及後續的西南氣流。

研究區域降雨雨量強度域與位置上的差異，會使河川中溶解態與顆粒態物質的化性及輸出量出現改變。從宜蘭地區颱風期間累積雨量(圖 3.1)可看出，本研究自 2007 年至 2010 年研究的十個颱風中，在空間上之變化顯示蘭陽溪流域內各區域降雨強度極度不均。此外從圖 3.2 中更可以明確得知，在時序的變化上，各測站之降雨量的多寡及強度，亦有明顯不同，例如：薑蜜(Jangmi)颱風中，降雨在太平山地區最高可達 91 mm，而同時間在玉蘭地區雨量只有 12.5 mm。整體來說，研究期間之颱風，開始時雨量大多以太平山降雨為主，隨時間變化，降雨雨量轉而以東邊玉蘭及寒溪測站為主，故雨量轉而呈東邊測站增加現象。但 Parma 為例外，一開始就以寒溪雨量為主，降雨強度部分，太平山降雨強度最大可達 43 mm/hr，玉蘭最大可達 74.5 mm hr，寒溪最大可達 89.5 mm hr，但相異之颱風，雨量增加的時間及強度仍稍有差異。



本研究流量取自水利局蘭陽大橋觀測站資料，平均年逕流量約 $1.99 \text{ km}^3/\text{yr}$ ，其中 5~11 月約佔 66%，顯示逕流流量主要受颱風所帶來之雨量影響(李錫堤 et al., 2011)。由圖 3.3 可得知，在本研究非颱風期間河川流量甚少，平均約 $31 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右(已扣除其他未研究颱風之影響)，但當颱風侵襲台灣時，颱風於短時間內帶來大量降雨，使河川流量暴增，其中產生流量最大值為 Krosa 的 $8000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相較颱風時最小為 Fanapi 的 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，整體而言颱風造成之平均流量可達 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，為 2007-2010 年非颱風期間(1-6 月)的 100 倍之多。在颱風巨大降雨的影響下，造成更多懸浮物質輸入至河川中，由圖 3.3 顯示，非颱風期間，懸浮顆粒之輸出量平均約 0.34 g/L ，而颱風期間大量降雨沖出更多懸浮顆粒物質，懸浮顆粒量最大為值 Krosa 的 82 g/L ，最小為 Wipha 的 14 g/L ，平均約 14.25 g/L ，為非颱風期間的 40 倍多。

當大量的懸浮顆粒物質在水流中，尤其當懸浮顆粒量約大於 45 g/L 時，將產生異重流，此時整體的密度會大於海水，因此進入海洋後會下沉以近海床深度繼續流動傳輸，對海洋懸浮顆粒傳輸與沈積產生巨大影響，本研究中 10 個颱風中就有 5 個超過 45 g/L ，另有 2 個接近產生異重流的標準，明顯顯示颱風對於亞洲島嶼小型河川懸浮顆粒傳輸與沈積之巨大影響。

綜合以上所述可知，不同颱風之間，因強度、路徑、滯留時間等差異，對蘭陽溪造成降雨區域、降雨強度、河水流量、懸浮顆粒輸出量，亦有所不同，對於海洋的影響也就有著不同程度的影響。



3.2 流域內地層面積及化性差異

蘭陽溪流域內依面積大小來分，主要地層依序為廬山層面積佔流域內約 46%，乾溝層面積佔流域內約 20%，四陵砂岩面積佔流域內約 15%、西村層面積佔流域內約 5%，若依主流之左右岸區分，右岸多屬廬山層為主，左岸多屬乾溝層以及少部分的四陵砂岩、西村層(圖 2.1)。其各岩層化性分析結果如圖 3.4

3.2.1 廬山層(Lushan Formation)(圖 3.4)

廬山層原岩樣品之化性，鋁濃度變化為 9.6~10.6 %之間，平均 $10.1 \pm 0.4\%$ ；鐵濃度變化為 4.67~4.90 %之間，平均為 $4.80 \pm 0.10\%$ ；鉀濃度變化為 2.65~3.02 %之間，平均 $2.83 \pm 0.14\%$ ；錳濃度為 0.033~0.046 %之間，平均為 $0.039 \pm 0.006\%$ ；鈣濃度變化為 0.84~1.54 %之間，平均為 $1.16 \pm 0.31\%$ ；鎂濃度為 1.28~1.34 %之間，平均為 $1.31 \pm 0.03\%$ ；鈉濃度變化為 0.80~0.92 %之間，平均為 $0.86 \pm 0.07\%$ ；TIC 濃度變化為 0.54~0.79 %，平均為 $0.67 \pm 0.12\%$ 。相較於研究區域內其他出露地層，本層面積較廣，且含有較多的碳酸岩類，故廬山層可能貢獻較多之碳酸岩風化產物。

3.2.2 乾溝層(Kangkou Formation)(圖 3.4)

乾溝層原岩樣品之化性，鋁濃度變化為 9.62~11.5 %之間，平均 $10.5 \pm 0.6\%$ ；鐵濃度變化為 3.74~6.48 %之間，平均為 $4.97 \pm 1.03\%$ ；鉀濃度變化為 2.57~3.97 %之間，平均 $2.98 \pm 0.42\%$ ；錳濃度為 0.024~0.049 %之間，平均為 $0.035 \pm 0.008\%$ ；鈣濃度變化為 0.06~0.77 %之間，平均為 $0.30 \pm 0.27\%$ ；鎂濃度為 0.97~1.04 %之間，平均為 $1.01 \pm 0.02\%$ ；鈉濃度變化為 0.75~0.98 %之間，平均為 $0.84 \pm 0.09\%$ ；TIC 濃度變化為 0.02~0.13 %，平均為 $0.06 \pm 0.05\%$ 。相較於研究區域內其他出露地層本層面積佔流域內第二高，且含有較多的矽酸岩類。



3.2.3 四陵砂岩(Szeleng Sandstone)(圖 3.4)

四陵砂岩層原岩樣品之化性，鋁濃度變化為 7.8~8.4 %之間，平均 $8.1 \pm 0.3\%$ ；鐵濃度變化為 0.63~0.64 %之間，平均為 $0.63 \pm 0.01\%$ ；鉀濃度變化為 3.41~3.77 %之間，平均 $3.59 \pm 0.18\%$ ；錳濃度為 0.001~0.001 %之間，平均為 $0.001 \pm 0.000\%$ ；鈣濃度變化為 0.00~0.01 %之間，平均為 $0.01 \pm 0.00\%$ ；鎂濃度為 0.14~0.15 %之間，平均為 $0.14 \pm 0.01\%$ ；鈉濃度變化為 0.10~0.11 %之間，平均為 $0.10 \pm 0.01\%$ ；TIC 濃度變化為 0.00~0.01 %，平均為 $0.00 \pm 0.01\%$ 。其中錳及 TIC 濃度過低，低於儀器之偵測極限，判斷其值為儀器誤差之訊號。四陵砂岩層以石英為主，為矽酸岩類，風化產物應以矽酸岩為主。

3.2.4 西村層(Hsitsun Formation)(圖 3.4)

西村層原岩樣品之化性，鋁濃度變化為 4.4~12.0 %之間，平均 $8.2 \pm 2.7\%$ ；鐵濃度變化為 1.97~4.39 %之間，平均為 $3.21 \pm 0.90\%$ ；鉀濃度變化為 1.64~3.79 %之間，平均 $2.73 \pm 0.74\%$ ；錳濃度為 0.015~0.267 %之間，平均為 $0.093 \pm 0.109\%$ ；鈣濃度變化為 0.07~0.26 %之間，平均為 $0.16 \pm 0.08\%$ ；鎂濃度為 0.37~1.60 %之間，平均為 $0.88 \pm 0.50\%$ ；鈉濃度變化為 0.48~1.10 %之間，平均為 $0.78 \pm 0.19\%$ ；TIC 濃度變化為 0.03~0.08 %，平均為 $0.05 \pm 0.01\%$ 。相較於其他層位，本層面積最小，整層各個元素變化差異甚大，但因 TIC 含量低，主要呈現為鋁矽酸岩類型，可能主要以鋁矽酸岩風化為主。

綜合上述所提之各層位化性，可簡略分類，屬右岸之廬山層，岩石組成含較多之碳酸岩；而屬左岸之乾溝層、四陵砂岩、西村層主要組成以鋁矽酸岩類型礦物為主要組成。



3.3 懸浮顆粒於颱風期間時序變化

3.3.1 總懸浮顆粒量(TSM)與流量(Discharge) (圖 3.5)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，TSM 初期濃度為 2.4 g/L，第 36 小時突增達尖峰，最大值為 48.4 g/L，而後緩降至 3.41 g/L，而最大水流量可達 $4091\text{ m}^3/\text{s}$ 。韋帕颱風期間，TSM 初期濃度為 0.3 g/L，而共有兩次 TSM 高值，第一次尖峰出現在第 20 小時，值為 21.9 g/L，間隔 100 小時後，產生第二次尖峰為 10.5 g/L，最後緩降至 3.4 g/L，水流最大流量達 $529\text{ m}^3/\text{s}$ 。柯羅莎颱風影響期間，TSM 初期濃度為 1.2 g/L，第 44 小時暴增為尖峰最大值 82.7 g/L，最後緩降至 2.7 g/L，最大水流量估計約達 $7000\text{ m}^3/\text{s}$ 左右。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薔蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，TSM 初期濃度為 0.3 g/L，第 22 小時突增至尖峰，最大值 26.6 g/L，而後緩降至 1.2 g/L，最大水流量達 $265\text{ m}^3/\text{s}$ 。鳳凰颱風期間，TSM 初期濃度為 2.0 g/L，尖峰出現在第 24 小時，值為 45.8 g/L，最後緩降至 1.7 g/L，水流最大流量可達 $3488\text{ m}^3/\text{s}$ 。辛樂克颱風影響期間，TSM 初期濃度為 0.7 g/L，第 90 小時增為尖峰最大值 41.4 g/L，最後緩降至 3.0 g/L，最大水流量可達 $3000\text{ m}^3/\text{s}$ 。薔蜜颱風影響期間，TSM 初期濃度為 6.5 g/L，第 16 小時突增為尖峰，最大值達 42.5 g/L，最後緩降至 2.8 g/L，最大水流量可達 $5033\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，TSM 初期濃度為 2.3 g/L，第 44 小時快速增加至最大值為 72.5 g/L，而後緩降至 4.7 g/L，最大水流量可達 $940\text{ m}^3/\text{s}$ 。芭瑪颱風期間，TSM 初期濃度為 0.8 g/L，而共有兩次 TSM 高值，第一次尖峰出現在第 96 小時，值為 17.5



g/L，第二次尖峰為，第 217 小時 10.3 g/L，最後降至 0.9 g/L，水流最大流量達 2519 m³/s。莫拉克颱風雖然最大流量只有 940 m³/s，但其懸浮顆粒濃度卻非常高，最高可達 72 g/L，僅次於凡那比與柯羅莎颱風。莫拉克與凡那比颱風是兩個非常異常具高懸浮顆粒但流量低之颱風(參見第四章)。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，TSM 初期濃度為 0.5 g/L，第 42 小時後突增達尖峰，最大值為 75.5 g/L，而後緩降至 1.4 g/L，而最大水流量可達 709 m³/s。凡那比颱風雖然最大流量只有 709 m³/s，但其懸浮顆粒濃度卻非常高，最高可達 75 g/L，僅次於柯羅莎颱風。凡那比與莫拉克颱風是兩個非常異常具高懸浮顆粒但流量低之颱風(參見第四章)。

3.3.2 懸浮顆粒鋁(圖 3.6)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，鋁開始濃度為 8.96 %，第 32 小時達尖峰最大值 10.66 %，尾端緩降至 8.68 %，平均 9.70 ± 0.52 %。韋帕颱風期間，鋁初期濃度為 7.51 %，第 20 小時達最大值達 10.7 %，隨後稍有下降趨勢，但在第 122 小時及第 170 小時有兩相對高值，10.24 % 及 10.12 %，結束為 9.13 %，平均 9.78 ± 0.79 %。柯羅莎颱風期間，鋁起始為 9.26 %，第 32 小時出現第一次相對高值 10.34 %，在第 44 小時降至 8.83 %，在第 72 小時，值又升為 10.68 %，結束時為 8.77 %，平均 9.58 ± 0.48 %。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薔蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，鋁開始濃度為 9.35 %，第 22 小時有一較高值 10.02 %，稍降後至第 38 小時，又一高值為 10.32 %，最後結束時為 9.63 %，平均 9.70 ± 0.52 %。



鳳凰颱風期間，鋁初期濃度為 9.70 %，第 24 小時達最大值達 10.5 %，隨後呈緩慢下降趨勢，結束為 9.71 %，平均 10.04 ± 0.28 %。辛樂克颱風期間，鋁起始為 8.45 %，第 70 小至 98 小時內出現連續相對高值，約在 9.11 至 9.65 %之間，結束時為 8.56 %，平均 9.01 ± 0.37 %。在薔蜜颱風期間，鋁開始濃度為 9.71 %，第 20 小時出現最大值為 10.42 %，之後雖有小幅震盪但仍呈現遞減趨勢，最後降至 9.23 %，平均為 9.80 ± 0.37 %。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，鋁開始濃度為 10.14 %，第 28 小時與第 84 小時各有一較低值，分別為 9.07 %及 9.30 %，最後結束時為 10.01 %，平均 9.96 ± 0.30 %。芭瑪颱風期間，鋁初期濃度為 9.54 %，第 61 小時出現較低值 8.06 %，第 217 小時達最大值達 10.43 %，隨後下降趨勢，至第 335 小時又一較高值 10.16 %，之後第 516 小時及第 530 小時再次出現高值，分別為 9.84 %及 10.27 %，結束為 10.01 %，平均 9.58 ± 0.41 %。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，鋁開始濃度為較高的 10.6 %，第 54 小時出現一最低值 8.53 %，最後結束時為 9.55 %，平均 9.31 ± 0.42 %。



3.3.3 懸浮顆粒鐵(圖 3.7)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，鐵起始濃度為 4.33 %，第 28 小時出現最大值達 5.30 %，最後結束為 4.52 %，平均 4.70 ± 0.21 %。韋帕颱風期間，鐵濃度開始為 3.72 %，在第 20 小時開始出現相對高值，值為 4.66 %，至第 32 小時出現最大值 4.85 %，第兩次較高值出現在 122 小時值為 4.64 %，最後降至 3.88 %，平均 4.38 ± 0.29 %。柯羅莎颱風期間，鐵開始為 4.56 %，中間有上下震盪，相對高出現在，第 32 小時、第 52 小時及第 72 小時，各別為 4.77 %、4.80 %、4.70 %，最後結束為 4.25 %，平均 4.42 ± 0.19 %。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薑蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，鐵開始濃度為 4.44 %，第 22 小時有一最高值 5.09 %，第 50 小時才降至 4.60 %，之後趨於平穩，最後結束時為 4.65 %，平均 4.64 ± 0.25 %。鳳凰颱風期間，鐵初期濃度為 4.28 %，第 24 小時達最大值達 4.79 %，而第 72 及 138 小時也有相對高值，4.70 % 及 4.69 %，結束為 4.32 %，平均 4.50 ± 0.16 %。辛樂克颱風期間，鐵起始為 4.13 %，第 70 小至 98 小時稍有震盪出現多次相對高值，約在 4.30 至 4.70 % 之間變動，第 172 小時也出現相對高值 4.63 %，結束時為 4.16 %，平均 4.40 ± 0.14 %。薑蜜颱風期間，鐵開始濃度為 4.76 %，第 232 小時出現最大值為 4.69 %，最後結束為 4.30 %，平均為 4.45 ± 0.15 %。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，鐵開始濃度為 4.47 %，第 10 小時出現最小值 3.94 %，第 48 小時、第 72 小時及第 182 小時，各有相對高值，分別為 4.61 %、4.72 % 及 4.72 %，



最後結束時為 4.45 %，平均 4.42 ± 0.17 %。芭瑪颱風期間，鉀初期濃度為 4.41 %，第 217 小時達最大值達 5.03 %，結束為 4.34 %，平均 4.52 ± 0.21 %。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，鉀開始濃度為 4.20 %，第 54 小時、第 106 及第 117 小時，出現相對高值，各為 5.70 %、5.44 % 及 5.58 %，最後結束時為 4.36 %，平均 4.67 ± 0.53 %。

3.3.4 懸浮顆粒鉀(圖 3.8)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，鉀初期濃度為 2.64 %，第 6 小時有最大值達 3.09 %，最後降至 2.34 %，平均 2.72 ± 1.17 %。韋帕颱風期間，鉀初始濃度 2.03 %，第 20 小時有最大值 2.90 %，第 74 小時降至 2.50%，第二次尖峰最大值 2.81 %，最後緩降至 2.45 %，平均 2.62 ± 0.19 %。柯羅莎颱風期間，鉀於颱風初期時為 2.59 %，第 52 小時出現最大值達 2.86 %，第 128 小時降至最小值 2.34 %，結束時為 2.33%，平均 2.55 ± 0.13 %。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薑蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，鉀開始濃度為 2.35 %，第 18 小時後明顯上升，至第 38 小時有一最高值 2.67 %，隨後下降，最後結束時為 2.36 %，平均 2.48 ± 0.12 %。鳳凰颱風期間，鉀初期濃度為 2.60 %，第 8 小時後明顯上升，第 24 小時達最大值 3.10 %，隨後下降，結束為 2.64 %，平均 2.74 ± 0.14 %。辛樂克颱風期間，鉀起始為 2.54 %，第 78 小時後明顯上升，第 148 小時有最大值 2.97 %，結束時為 2.56 %，平均



$2.71 \pm 0.14\%$ 。薔蜜颱風期間，鉀開始濃度為 2.69% ，第 16 小時出現最大值為 2.79% ，最後結束為 2.42% ，平均為 $2.62 \pm 0.10\%$ 。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，鉀開始濃度為 2.82% ，第 28 小時明顯上升，至第 56 小時出現最大值 3.27% ，之後下降趨於平穩，至第 144 小時有一相對低值 2.76% ，最後結束時為 2.77% ，平均 $2.94 \pm 0.15\%$ 。芭瑪颱風期間，鉀初期濃度為 2.94% ，第 57 小時降至最低值 2.38% ，第 115 小時升至最高值 2.93% ，隨後下降，至第 217 又上升至 2.85% ，而第 516 小時也有稍微上升，值為 2.75% ，結束為 2.54% ，平均 $2.68 \pm 0.13\%$ 。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，鉀開始濃度為 2.89% ，第 30 小時下降至最低值 2.53% ，隨後上升趨於平穩，至第 98 小時出現最高值 3.21% ，最後結束時為 2.83% ，平均 $2.90 \pm 0.17\%$ 。

3.3.5 懸浮顆粒錳(圖 3.9)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，錳起始為 0.061% ，第 32 小時出現最大值 0.073% ，最後降至 0.051% ，平均 $0.062 \pm 0.007\%$ 。韋帕颱風期間，錳濃度起始為 0.044% ，第 24 小時及第 122 小時，出現峰值，依次各為 0.059% 及 0.055% ，最後降至 0.044% ，平均 $0.051 \pm 0.004\%$ 。柯羅莎颱風期間，錳起始為 0.051% ，最大值出現在第 52 小時，值為 0.077% ，最後結束為 0.060% ，平均 $0.060 \pm 0.006\%$ 。



2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薔蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，錳開始濃度為 0.058 %，第 18 小時後明顯上升，至第 22 小時有一最高值 0.076 %，隨後下降，最後結束時為 0.058 %，平均 0.063 ± 0.006 %。鳳凰颱風期間，錳初期濃度為 0.059 %，隨後上升至第 24 小時達最大值 0.072 %，隨後下降，結束為 0.057 %，平均 0.069 ± 0.004 %。辛樂克颱風期間，錳起始為 0.054 %，第 66 小時後明顯上升，第 110 小時有最大值 0.071 %，隨後下降，結束時為 0.053 %，平均 0.057 ± 0.005 %。薔蜜颱風期間，錳開始濃度為 0.067 %，第 20 小時出現最大值為 0.075 %，最後結束為 0.054 %，平均為 0.060 ± 0.005 %。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，錳開始濃度為 0.069 %，第 40 小時出現最大值 0.075 %，之後下降趨於平穩，最後結束時為 0.059 %，平均 0.061 ± 0.007 %。芭瑪颱風期間，錳初期濃度為 0.063 %，第 57 小時降至最低值 0.044 %，第 115 小時升至最高值 0.068 %，隨後下降，至第 217 又上升至 0.071 %，結束為 0.056 %，平均 0.060 ± 0.006 %。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，錳開始濃度為 0.080 %，第 50 小時下降至最低值 0.051 %，第 106 小時也出現相同低值 0.051 %，最後結束時為 0.061 %，平均 0.063 ± 0.011 %。



3.3.6 懸浮顆粒鈣(圖 3.10)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，鈣初始濃度為 0.99 %，第 28 小時達最低達 0.61 %，另一相對低值出現在第 52 小時，值為 0.63 %，最後升高至 0.83 %，平均 0.74 ± 0.09 %。韋帕颱風期間，鈣初始濃度為 0.79 %，第 24 小時出現低值 0.67 %，第 50 小時也出現低值 0.64 %，最後升高至 0.79 %，平均 0.71 ± 0.06 %。柯羅莎颱風期間，鈣初始濃度為 0.83 %，第 64 小時出現最低值 0.62 %，最後升高至 0.77 %，平均 0.73 ± 0.05 %。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薑蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，鈣開始濃度為 1.66 %，隨後開始下降，至第 42 小時有一最低值 0.99 %，隨後上升，最後結束時為 1.51 %，平均 1.22 ± 0.21 %。鳳凰颱風期間，鈣初期濃度為 1.07 %，隨後開始下降，第 24 小時達最低值 0.75 %，之後開始上升，結束為 1.02 %，平均 0.89 ± 0.07 %。辛樂克颱風期間，鈣起始為 1.40 %，第 78 小時後明顯下降，第 110 小時有最小值 0.70 %，結束時為 1.11 %，平均 1.09 ± 0.28 %。薑蜜颱風期間，鈣開始濃度為 0.93 %，之後下降至第 20 小時出現最低值為 0.72 %，最後結束為 0.92 %，平均為 0.82 ± 0.06 %。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，鈣開始濃度為 1.19 %，隨後下降，第 44 小時出現最低值 0.82 %，之後上升，最後結束時為 1.07 %，平均 0.97 ± 0.10 %。芭瑪颱風期間，鈣初期濃度為 0.84 %，第 75 小時降至低值 0.52 %，隨後升高，至第 217 小時又下降至最低值 0.50 %，而第 507 小時也有稍微下降，值為 0.63 %，結束為 0.90 %，平均 0.69 ± 0.09 %。



2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，鈣開始濃度為 1.27 %，第 42 小時下降至最低值 0.72 %，隨後上升，最後結束時為 1.33 %，平均 1.10 ± 0.21 %。

3.3.7 懸浮顆粒鎂(圖 3.11)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，鎂初始為 1.01 %，第 18 小時及第 52 小時，有相對低值 0.97 % 及 1.00 %，最後濃度升至 1.09 %，平均 1.05 ± 0.03 %。韋帕颱風期間，鎂初始值較低為 0.92 %，而第 20 小時至第 48 小時有相對連續高值，其中最大值出現在第 40 小時，值為 1.12%，平均 1.07 ± 0.05 %；柯羅莎颱風期間，鎂初始值為 1.12 %，最大值出現在第 32 小時，值為 1.17 %，最小值出現在第 56 小時，值為 1.03 %，最後為 1.12 %，平均 1.10 ± 0.04 %。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薑蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，鎂開始濃度為 1.09 %，隨後開始上升，至第 26 小時有一最高值 1.22 %，隨後平穩，至第 90 小時下降至 1.13 %，最後結束時為 1.18 %，平均 1.17 ± 0.04 %。鳳凰颱風期間，鎂初期濃度為 1.02 %，隨後上升，至第 16 小時為 1.16 %，第 28 小時下降至 1.05 %，隨後上升，至第 180 小時出現最高值 1.24 %，結束為 1.18 %，平均 1.14 ± 0.05 %。辛樂克颱風期間，鎂起始為 1.20 %，之後下降至第 30 小時值為 1.10%，隨後上升，第 70 個小時達最大值 1.21 %，隨後又下降至第 98 小時有最小值 1.04 %，之後開始上升，結束時為 1.17 %，平均 1.13 ± 0.04 %。薑蜜颱風期間，鎂開始濃度為 1.17 %，之後下降，第 64 小時出現最低值為 0.99 %，而



後上升，在第 106 與 196 小時之趨於平穩，第 232 小時有一高值 1.16 %，之後下降至 0.98，結束為 1.08 %，平均為 1.10 ± 0.04 %。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，鎂開始濃度為 0.98 %，隨後下降，第 10 小時出現最低值 0.92 %，而第 28、72、80 及 132 小時，各有相對高值，分別為 1.08 %、1.07 %、1.08 %、1.10 %，結束時為 1.06 %，平均 1.01 ± 0.04 %。芭瑪颱風期間，鎂初期濃度為 0.91 %，第 65 小時降至低值 0.85%，隨後升高，至第 179 小時有最大值 1.12 %，第 252 小時後明顯開始下降，最低值為第 300 小時的 0.90 %，第 324 小時後又開始上升，結束為 0.99 %，平均 0.98 ± 0.07 %。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，鎂開始濃度為 1.10 %，第 50 小時下降至最低值 0.84 %，隨後上升，第 76 及 98 小時有相對高值皆為 1.04 %，最後結束時也為 1.04 %，平均 0.96 ± 0.06 %。

3.3.8 懸浮顆粒鈉(圖 3.12)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，鈉初始值為 0.85 %，第 18 小時出現最小值 0.84 %，第 40 小時出現最大值 0.92 %，結束為 0.88 %，平均為 0.88 ± 0.02 %。韋帕颱風期間，鈉初始值為 0.93，第 32 小時出現最大值 1.01，結束為 0.93 %，鈉平均為 0.96 ± 0.02 %。柯羅莎颱風期間，鈉初始值 0.83 %，第 52 小時出現最低值 0.76 %，最後為 0.85%，平均 0.82 ± 0.03 %。



2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薔蜜(Jangmi)：

玫基颱風期間，鈉開始濃度為 0.83 %，隨後開始上升，第 126 小時有一最大值 1.22 %，最後結束時為 0.92 %，平均 0.89 ± 0.03 %。鳳凰颱風期間，鈉初期濃度為 0.91 %，隨後上升，至第 16 小時為最高值 0.96 %，第 20 小時下降至 0.89 %，隨後趨於平穩，至第 126 小時出現高值 0.96 %，結束為 0.94 %，平均 0.90 ± 0.03 %。辛樂克颱風期間，鈉起始為 0.91 %，之後第 8 小時至第 110 小時之間值來回震盪，第 64 小時出現最大值 1.10%，而第 46 小時及 102 小時有最小值 0.84 %，之後趨於平穩，至第 280 個小時有一相對低值 0.88 %，結束時為 0.94 %，平均 0.93 ± 0.04 %。薔蜜颱風期間，鈉開始為最大濃度 1.01 %，之後下降，第 16 小時出現最低值為 0.88 %，而後上升，在第 36 與 208 小時有些微震盪，約在 0.90~1.00 % 之間，結束為 0.94 %，平均為 0.94 ± 0.03 %。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，鈉開始濃度為 0.93 %，隨後上升，第 28 小時出現最高值 1.02 %，之後趨於平穩，第 230 小時出現最低值 0.91 %，結束時為 1.04 %，平均 0.98 ± 0.03 %。芭瑪颱風期間，鈉初期濃度為 0.89 %，第 57 小時升至 0.95 %，隨後下降，至第 80 小時有最小值 0.86 %，隨後開始上升，最高值為第 516 小時的 0.96%，結束為 0.91 %，平均 0.91 ± 0.02 %。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，鈉開始為最低濃度 0.78 %，隨後升高，第 46 小時有一至最高值 0.99 %，隨後稍微下降，第 54 及 98 小時有相對低值皆為 0.90 %，最後結束時為 0.96 %，平均 0.93 ± 0.05 %。



3.3.9 懸浮顆粒矽(圖 3.13)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

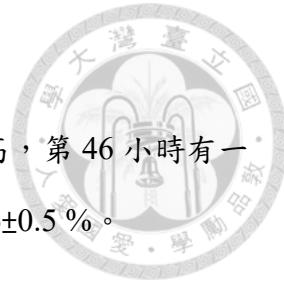
聖帕颱風期間，矽初始為 27.6 %，第 12 小時升高至 29.7 %，第 24 小時出現最低值為 25.8 %，最後結束值為 27.3 %，平均濃度 $27.4 \pm 1.0\%$ 。韋帕颱風期間，矽初始濃度為 29.8 %，結束時為 29.9 %，平均濃度為 $28.8 \pm 0.5\%$ ，其間變化不大。柯羅莎颱風期間，矽初始為 28.5 %，結束時濃度為 29 %，平均濃度 $28.1 \pm 0.5\%$ ，其間變化不大。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薑蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，矽開始濃度為 28.3%，最後結束時為 28.6%，平均 $27.7 \pm 0.6\%$ ，其間變化不大。鳳凰颱風期間，矽初期濃度為 26.9%，第 40 小時上升至 29.5%，隨後下降至第 84 小時為 26.6%，之後上升，結束為 27.9%，其間變化不大，平均 $28.1 \pm 0.8\%$ 。辛樂克颱風期間，矽初始值為 27.8%，最高值出現在第 120 小時為 30.3%，結束時為 28.3%，平均 $28.8 \pm 0.8\%$ 。薑蜜颱風期間，矽開始值為 28.9%，最高出現在第 172 小時出現值為 30.2%，另第 352 小時有一相對高值 29.3，結束為 25.5%，平均為 $28.3 \pm 0.9\%$ 。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，矽初始濃度為 28%，中間最高出現在第 94 小時值為 30%，結束時為 27%，平均 $28.3 \pm 0.7\%$ 。芭瑪颱風期間，矽初期濃度為 29%，最高出現在第 192 小時降及第 300 小時值為 31%，結束為 27%，平均 $29.5 \pm 0.7\%$ 。



2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，矽濃度第 22 小時為最低 26 %，隨後升高，第 46 小時有一至最高值 29 %，之後趨於平緩，最後結束時為 27 %，平均 27.6 ± 0.5 %。

3.3.10 懸浮顆粒有機碳(TOC)(圖 3.14)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，TOC 初始為 0.66 %，第 12 小時出現相對低值 0.57 %，第 18 小時出現最大值為 0.74 %，最後降至 0.49 %，平均濃度 0.62 ± 0.07 %。韋帕颱風期間，TOC 最大為初始之 0.74 %，第 12 小時出現最低值 0.53 %，兩次尖峰最後為 0.56 %，平均濃度為 0.58 ± 0.05 %。柯羅莎颱風期間，TOC 初始為 0.70 %，第 24 小時出現最低值 0.49 %，第 52 小時出現最大值為 0.80 %，最後降至 0.50 %，平均濃度 0.61 ± 0.07 %。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薑蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，TOC 開始濃度為 0.69 %，隨後開始上升，第 14 小時有一最大值 0.79 %，之後下降至第 26 小時後開始回升，回升第 38 小時值為 0.64 % 後開始下降，第 138 小時出現最低值 0.42 % 後上升，最後結束時為 0.55 %，平均 0.58 ± 0.09 %。鳳凰颱風期間，TOC 初期濃度為 0.61 %，隨後上升，第 4 小時為最高值 0.71 %，第 8 小時下降至 0.48 %，隨後上升，至第 24 小時出現相對高值 0.63 %，第 126 小時及第 180 小時也出現相對高值，0.48 % 及 0.51 %，結束為 0.42 %，平均 0.48 ± 0.07 %。辛樂克颱風期間，TOC 第 64 小時為 0.51 %，隨後升高，第 102 小時出現最大值 1.10%，而後下降至第 114 小時之值 0.53 %，在第 138 上升至 0.61 %，至第 280 個小時有一相對高值 0.59 %，結束時為 0.60 %，平均 0.57 ± 0.06 %。薑蜜颱風期間，TOC 開始值為 0.057 %，之後下降，第 4 小時出現低值為 0.50 %，



而後上升，在第 20 小時出現最大值 0.63 %，而後下降，在第 80 小時至 172 小之時間，約在 0.45~0.56 %之間，結束為 0.56 %，平均為 0.52 ± 0.04 %。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，TOC 第 10 小時濃度為 0.72 %，隨後下降，至第 68 小時出現最低值 0.45 %，之後第 144 小時出現最高值 0.76 %，結束時為 0.54 %，平均 0.54 ± 0.07 %。芭瑪颱風期間，TOC 初期濃度為 0.60 %，第 57 小時降至 0.48 %，隨後升高，至第 84 小時有最大值 0.73 %，之後開始下降至 157 小時後爬升，到第 217 小時有相對高值 0.59 %，隨後下降至第 300 小時後爬升，第 335 小時有一相對高值 0.57 %，之後又開始下降，直至 408 小時後開始爬升，結束為 0.57 %，平均 0.56 ± 0.04 %。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，TOC 第 22 小時 0.68 %，隨後升高，第 30 小時有一至最高值 0.80 %，隨後稍微下降，第 38 小時有相對低值為 0.56 %，之後在上升，第 54 小時後開始穩定下降，第 90 小時後趨於平緩，最後結束時為 0.51 %，平均 0.59 ± 0.09 %。



3.3.11 懸浮顆粒無機碳(TIC)(圖 3.15)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，TIC 初始濃度為 0.34 %，第 36 小時達最低值 0.15 %，最後升至 0.43 %為最大值，平均 0.27 ± 0.07 %。韋帕颱風期間，TIC 初始濃度為 0.37 %，第 20 小時出現最低值為 0.20 %，最後至 0.29 %，平均 0.25 ± 0.05 %。柯羅莎颱風期間，TIC 初始為 0.35 %，第 210 小時出現最低值 0.23 %，次低為第 48 小時出現之 0.26 %，最後結束為 0.35 %，平均濃度 0.61 ± 0.07 %。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薔蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，TIC 開始濃度為 0.61 %，隨後開始下降，至第 14 小時有一最低值 0.31 %，第 18 小時一跳出值 0.50 %，隨後大約呈穩定上升，第 138 小時出現最大值 0.68 %，最後結束時為 0.65 %，平均 0.48 ± 0.10 %。鳳凰颱風期間，TIC 初期濃度為 0.50 %，隨後開始下降，第 24 小時出現低值 0.33 %，之後開始上升至第 52 小時後開始下降，結束為 0.32 %，平均 0.37 ± 0.06 %。辛樂克颱風期間，TIC 第 64 小時為 0.67 %，一路下降，至第 110 小時有最小值 0.19 %，隨後開始上升至第 232 小時後又下降，而第 340 小時有一相對高值 0.56 %，結束時為 0.33 %，平均 0.35 ± 0.09 %。薔蜜颱風期間，TIC 開始濃度為 0.37 %，之後下降至第 20 小時出現最低值為 0.26 %，隨後略呈穩定上升，最後結束為 0.46 %，平均為 0.34 ± 0.04 %。

2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，TIC 第 10 小時濃度為 0.47 %，第 44 小時出現最低值 0.35 %，之後略呈穩定上升，最後結束時為 0.49%，平均 0.41 ± 0.05 %。芭瑪颱風期間，TIC 初期濃度為 0.37 %，第 96 小時降至低值 0.17 %，隨後升高，至第 217 小時有



一最低值 0.12 %，之後又升高，而第 507 小時也有下降，值為 0.25 %，結束為 0.58 %，平均 0.28 ± 0.10 %。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，TIC 第 22 小時濃度最大為 0.66 %，隨後下降，第 30 小時下降至 0.32 %，之後上升至第 38 小時後下降，第 42 小時出現最低值 0.13 %，隨後略呈穩定上升，最後結束時為 0.46 %，平均 0.33 ± 0.15 %。

3.3.12 粒徑大小(grain size)(圖 3.16)

2007 年颱風—聖帕(Sepat)、韋帕(Wipha)、柯羅莎(Krosa)：

聖帕颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 67.8 ± 2.1 %，而 clay 及 sand 各佔， 31.5 ± 2.5 %及 0.7 ± 0.8 %。韋帕颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 67.5 ± 4.6 %，而 clay 及 sand 各佔， 28.2 ± 5.4 %及 4.3 ± 8.4 %。柯羅莎颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 67.5 ± 2.1 %，而 clay 及 sand 各佔， 28.4 ± 2.8 %及 4.1 ± 3.8 %。

2008 年颱風—卡玫基(Kalmaegi)、鳳凰(Fung-Wong)、辛樂克(Sinlaku)、薑蜜(Jangmi)：

卡玫基颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 69.9 ± 2.5 %，而 clay 及 sand 各佔， 26.2 ± 3.4 %及 3.9 ± 3.1 %。鳳凰颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 68.5 ± 2.4 %，而 clay 及 sand 各佔， 27.5 ± 2.7 %及 4.0 ± 3.7 %。辛樂克颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 66.0 ± 10.7 %，而 clay 及 sand 各佔， 24.5 ± 4.8 %及 9.5 ± 14.6 %。薑蜜颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 64.8 ± 8.4 %，而 clay 及 sand 各佔， 23.2 ± 5.8 %及 12.0 ± 13.6 %。



2009 年颱風—莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)：

莫拉克颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 $67.5\pm2.2\%$ ，而 clay 及 sand 各佔， $27.8\pm3.2\%$ 及 $4.7\pm3.9\%$ 。芭瑪颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 $67.9\pm1.8\%$ ，而 clay 及 sand 各佔， $28.1\pm4.1\%$ 及 $4.0\pm5.0\%$ 。

2010 年颱風—凡那比(Fanapi)：

凡那比颱風期間，粒徑大小多以 slit 為主，平均約佔 $67.5\pm7.6\%$ ，而 clay 及 sand 各佔， $28.3\pm5.3\%$ 及 $4.2\pm8.4\%$ 。

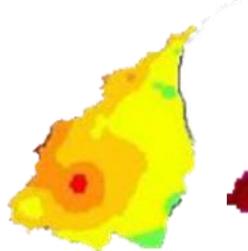


2007

Sepat



Wipha



Krosa



2008

Kalmaegi



Fung-Wong



Sinlaku

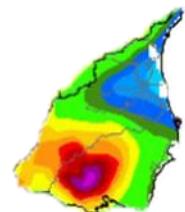


Jangmi



2009

Morakot



Parma



2010

Fanapi

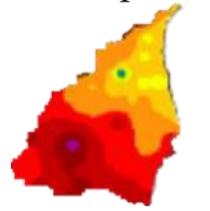


圖 3.1 宜蘭地區颱風期間累積雨量圖

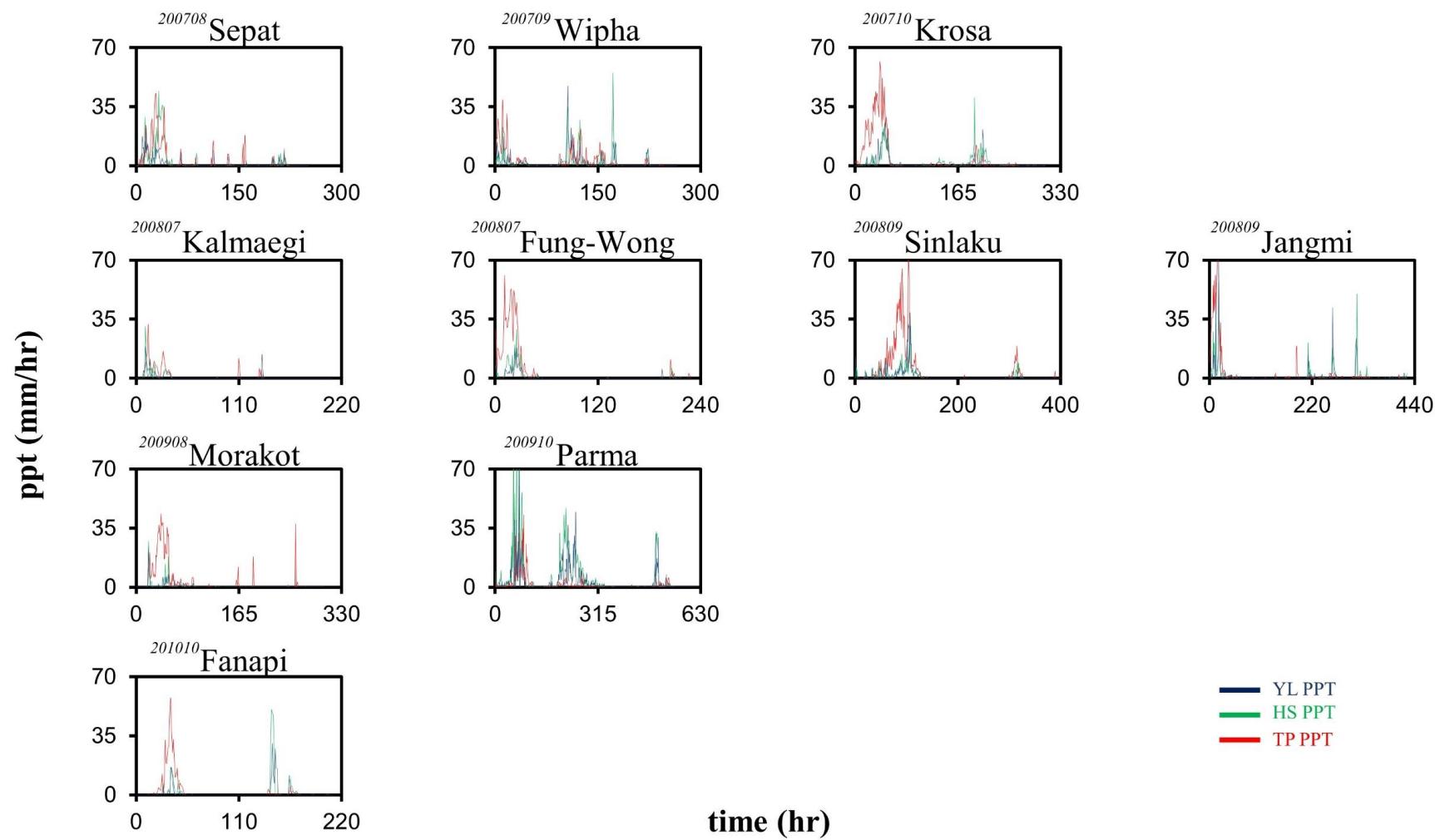
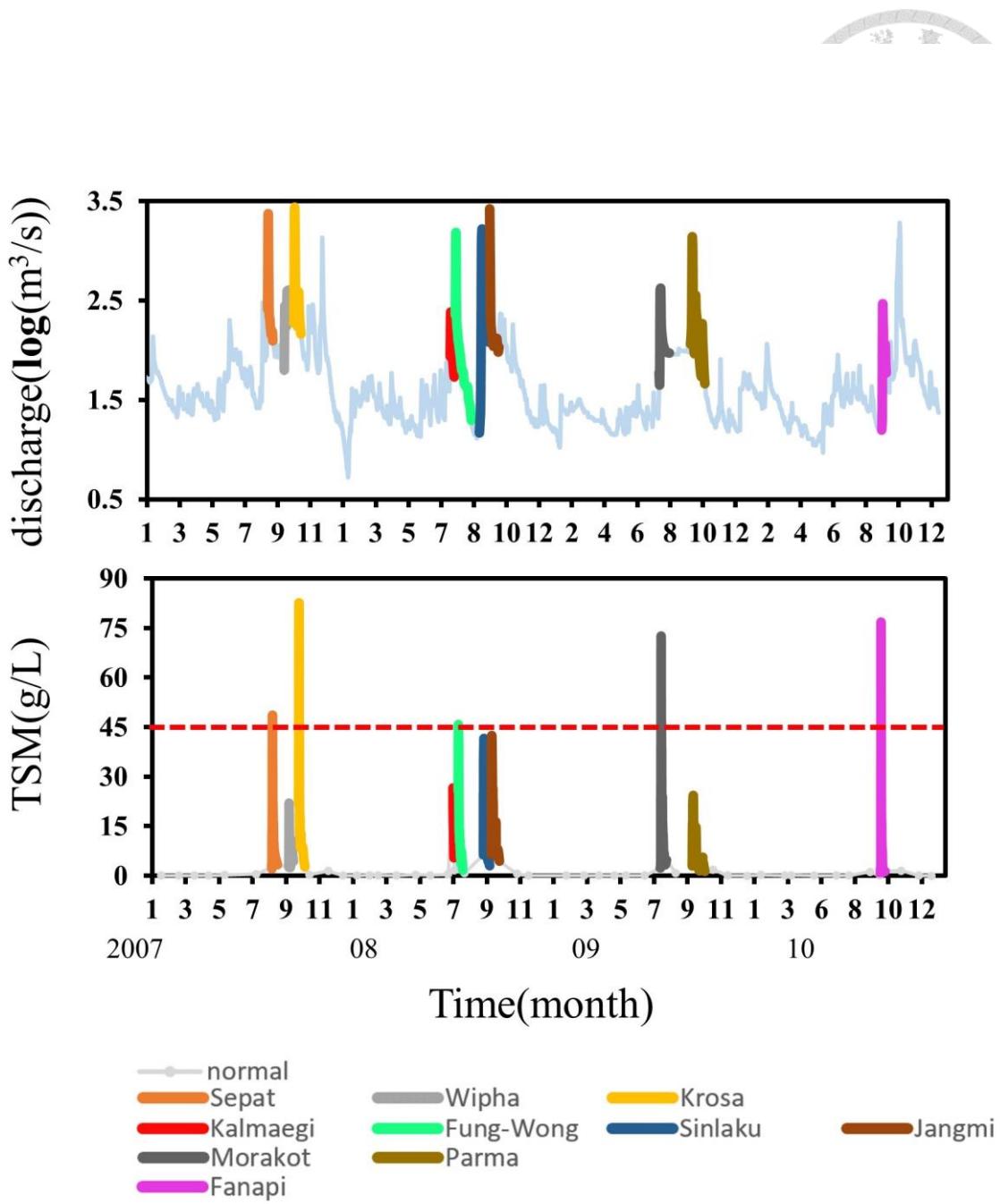


圖 3.2 颱風期間雨量時序圖



----- **Hyperpycnal flow**

圖 3.3 颱風與非颱風期間流量及 TSM 量

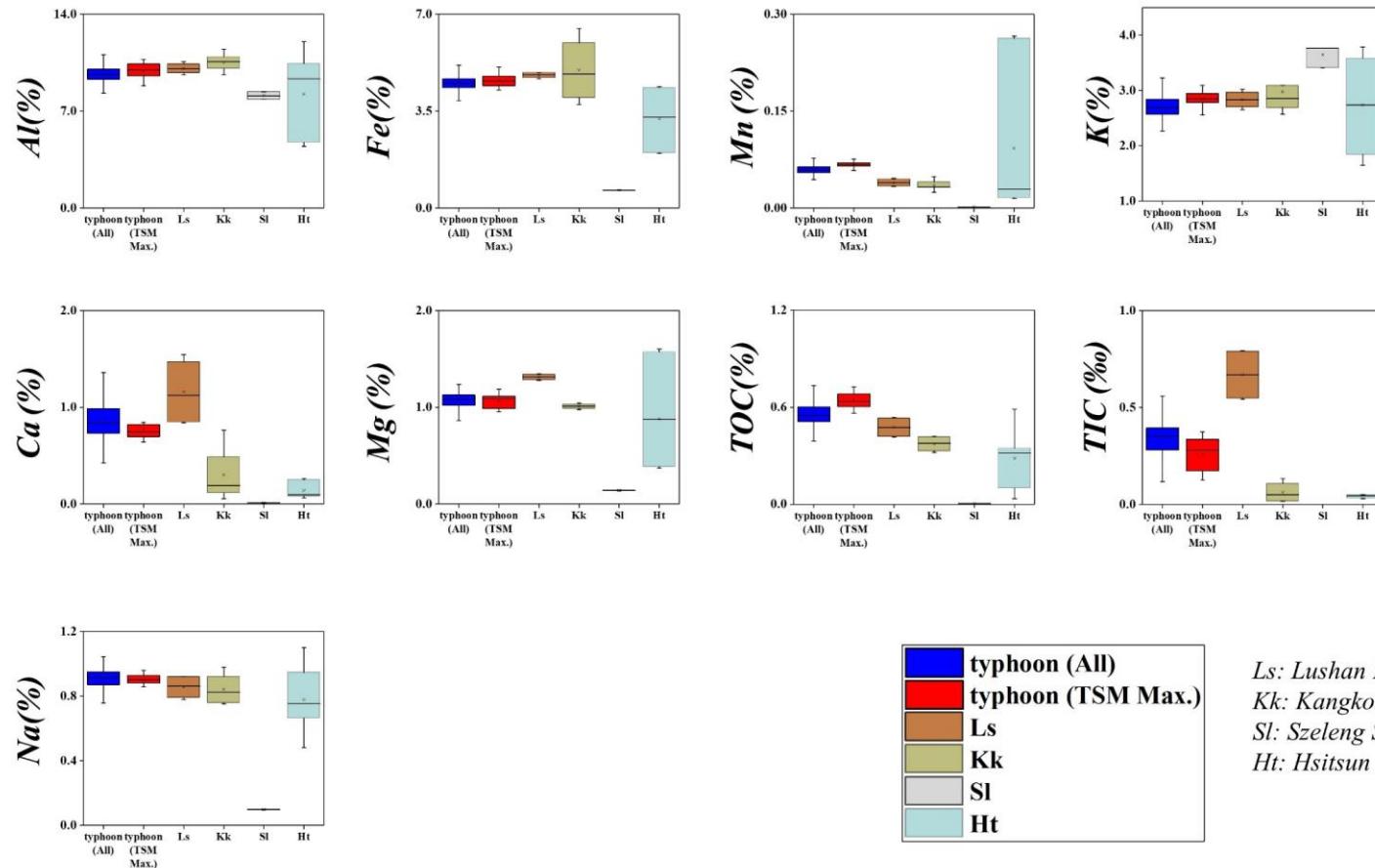


圖 3.4 岩層化性分析

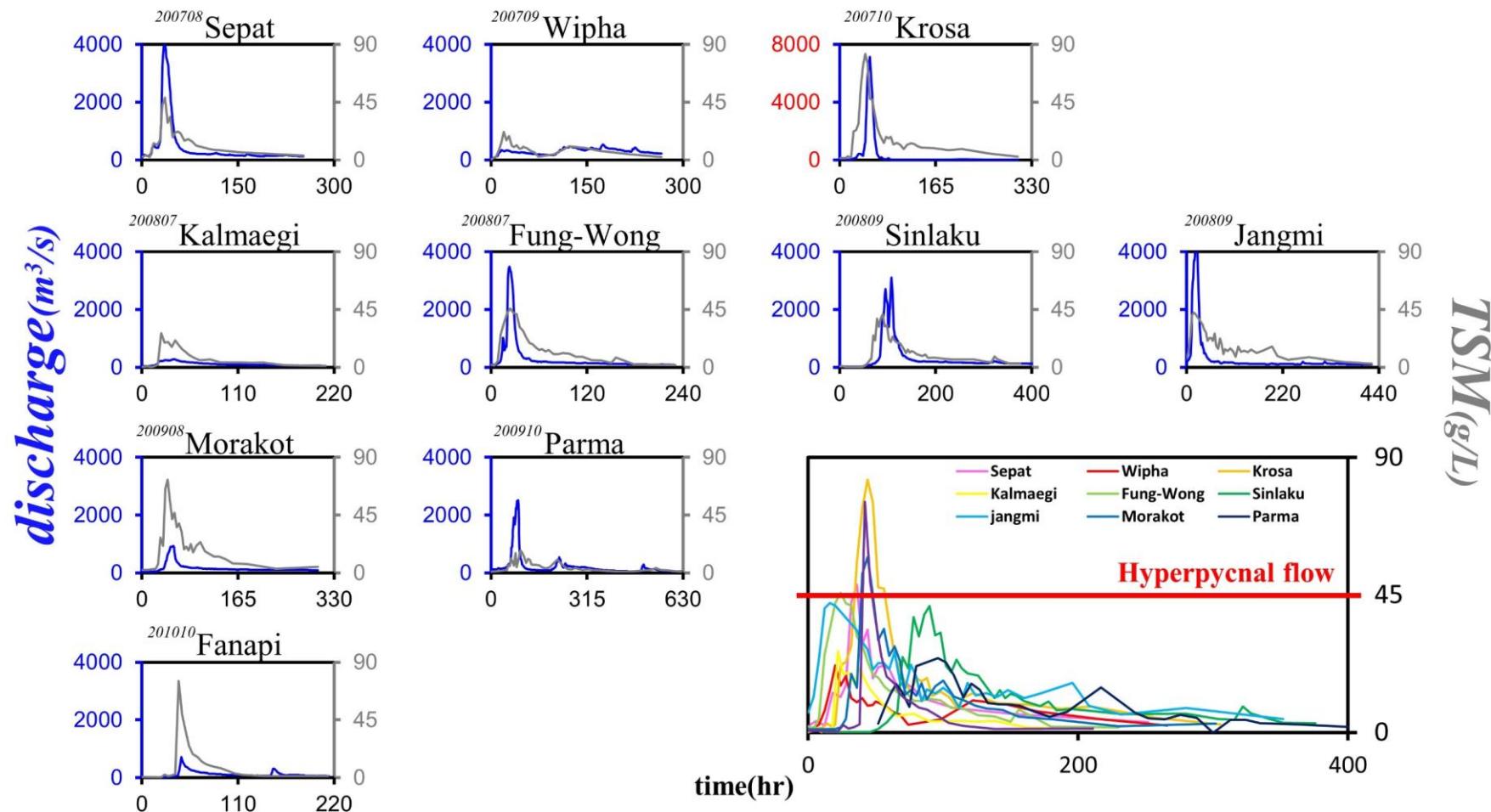


圖 3.5 各颱風總懸浮顆粒(TSM)及流量(Discharge)時序變化

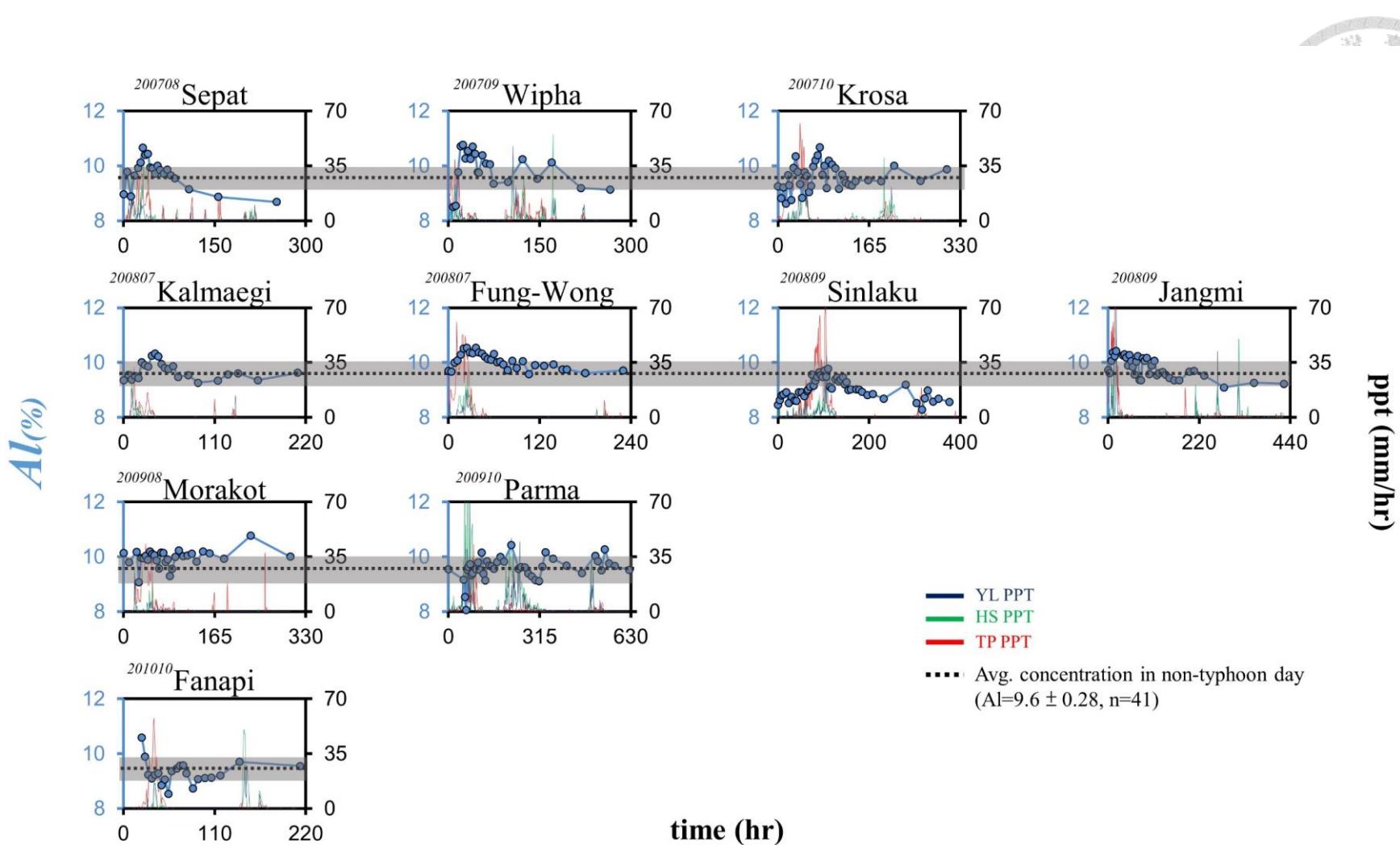


圖 3.6 各颱風期間懸浮顆粒鋁濃度隨時序變化

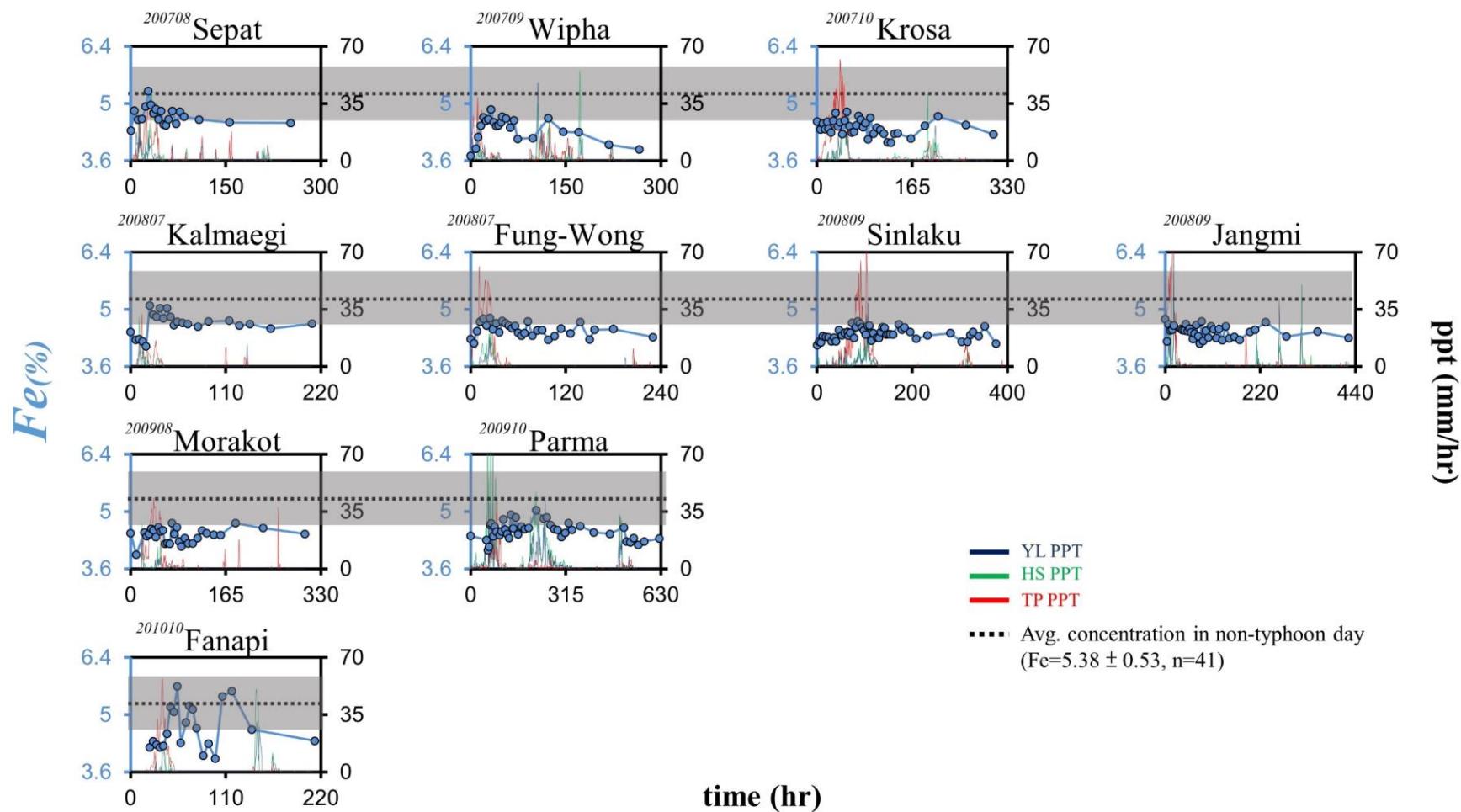


圖 3.7 各颱風期間懸浮顆粒鐵濃度隨時序變化

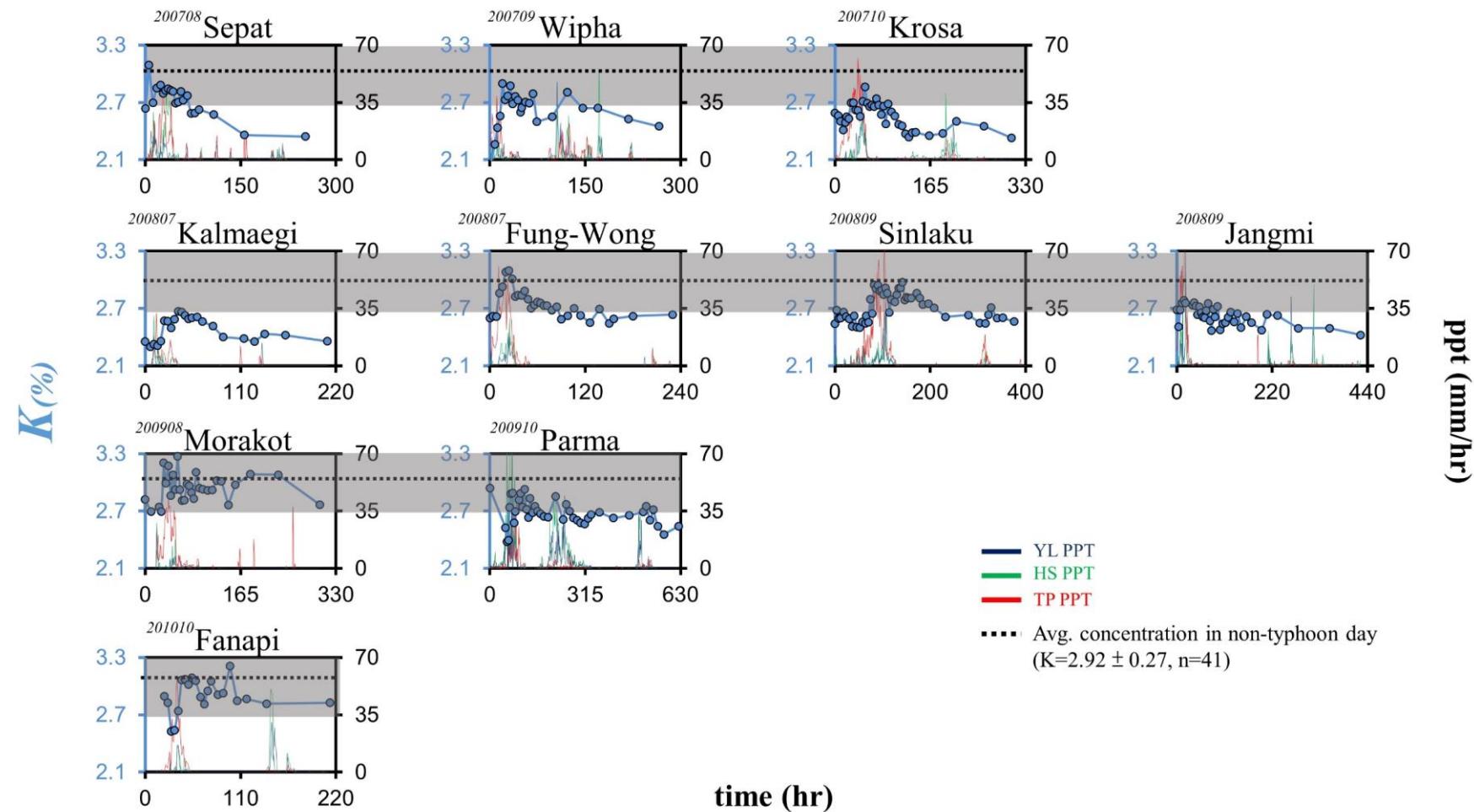


圖 3.8 各颱風期間懸浮顆粒鉀濃度隨時序變化



ppt (mm/hr)

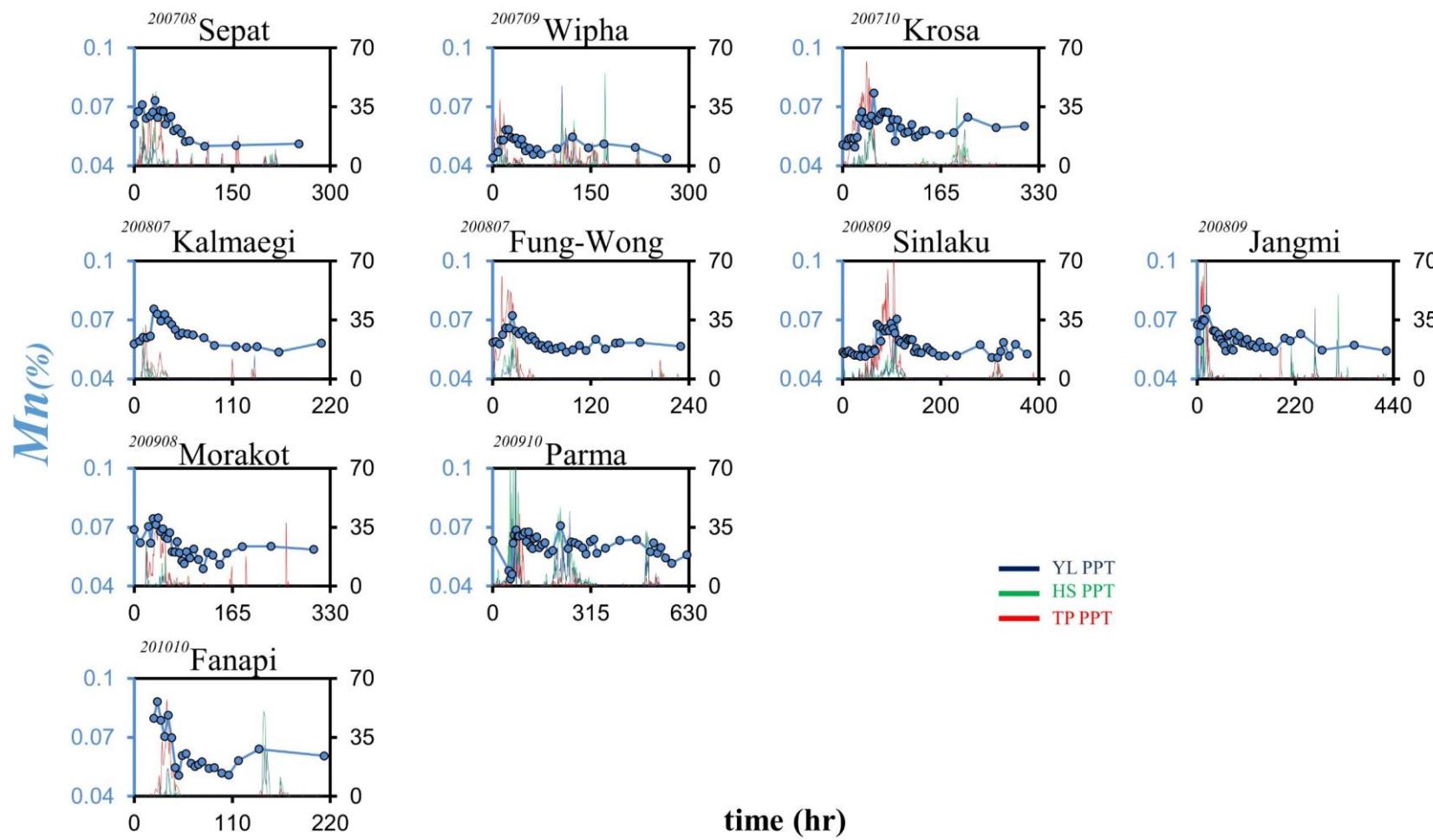


圖 3.9 各颱風期間懸浮顆粒錳濃度隨時序變化

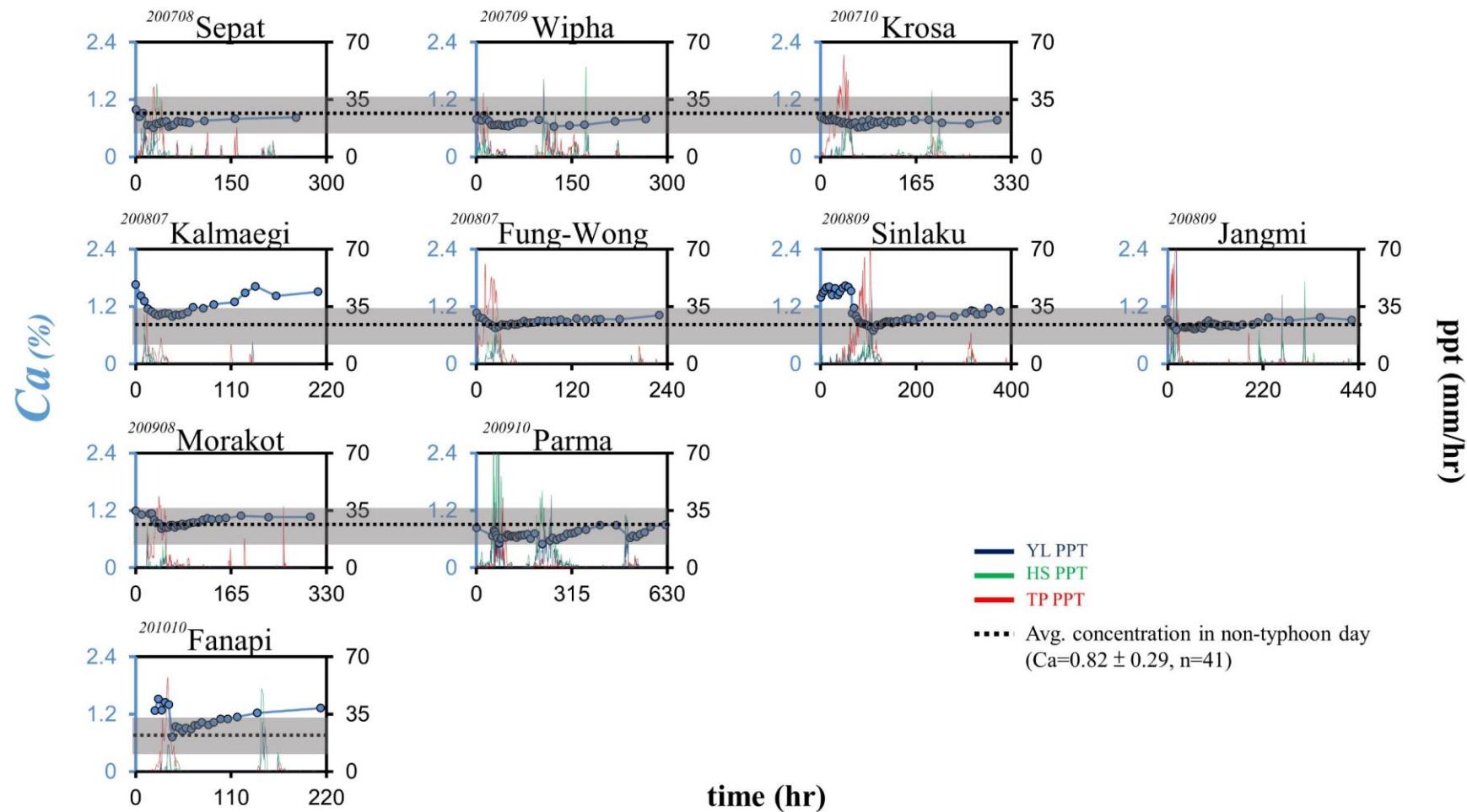


圖 3.10 各颱風期間懸浮顆粒鈣濃度隨時序變化

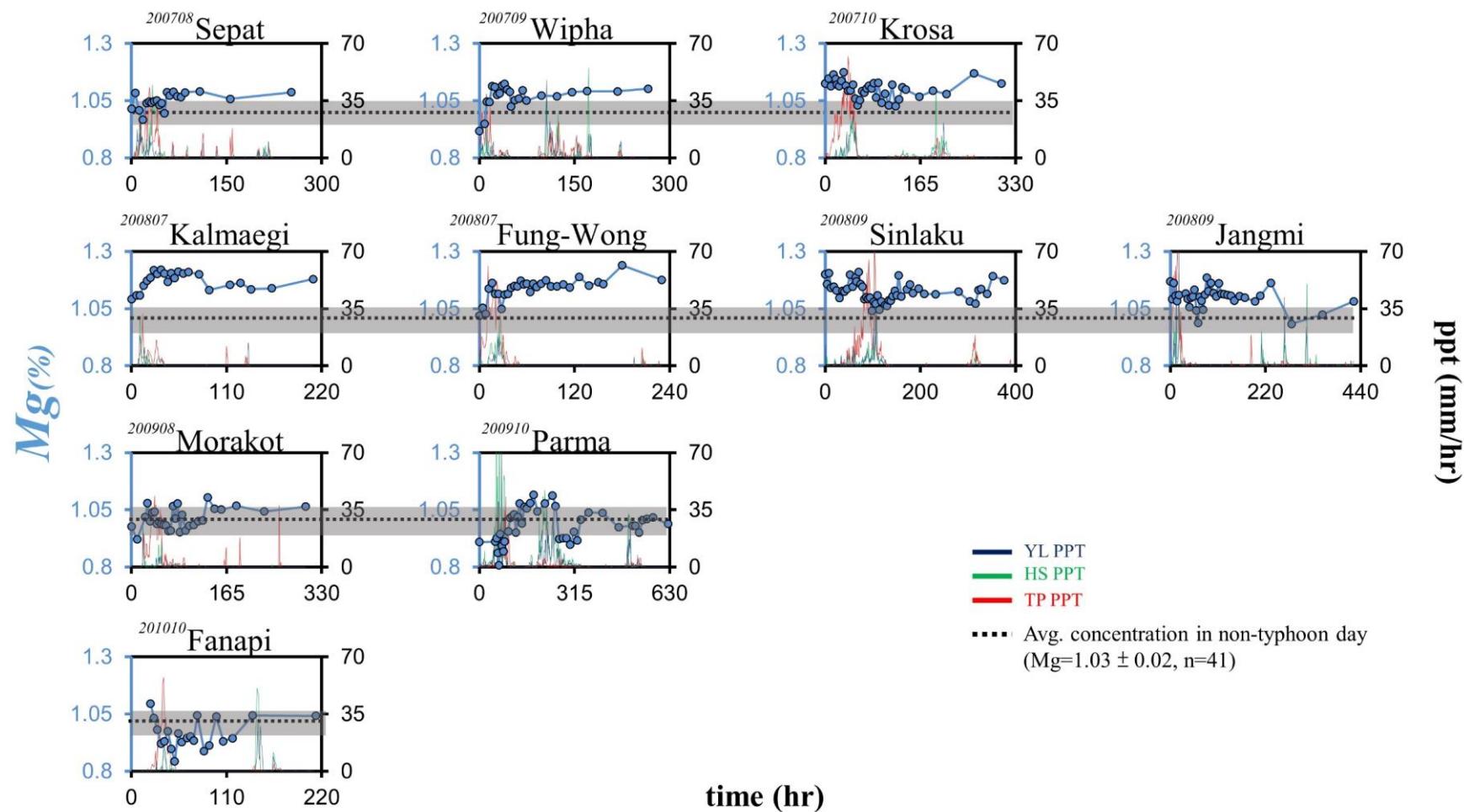


圖 3.11 各颱風期間懸浮顆粒鎂濃度隨時序變化

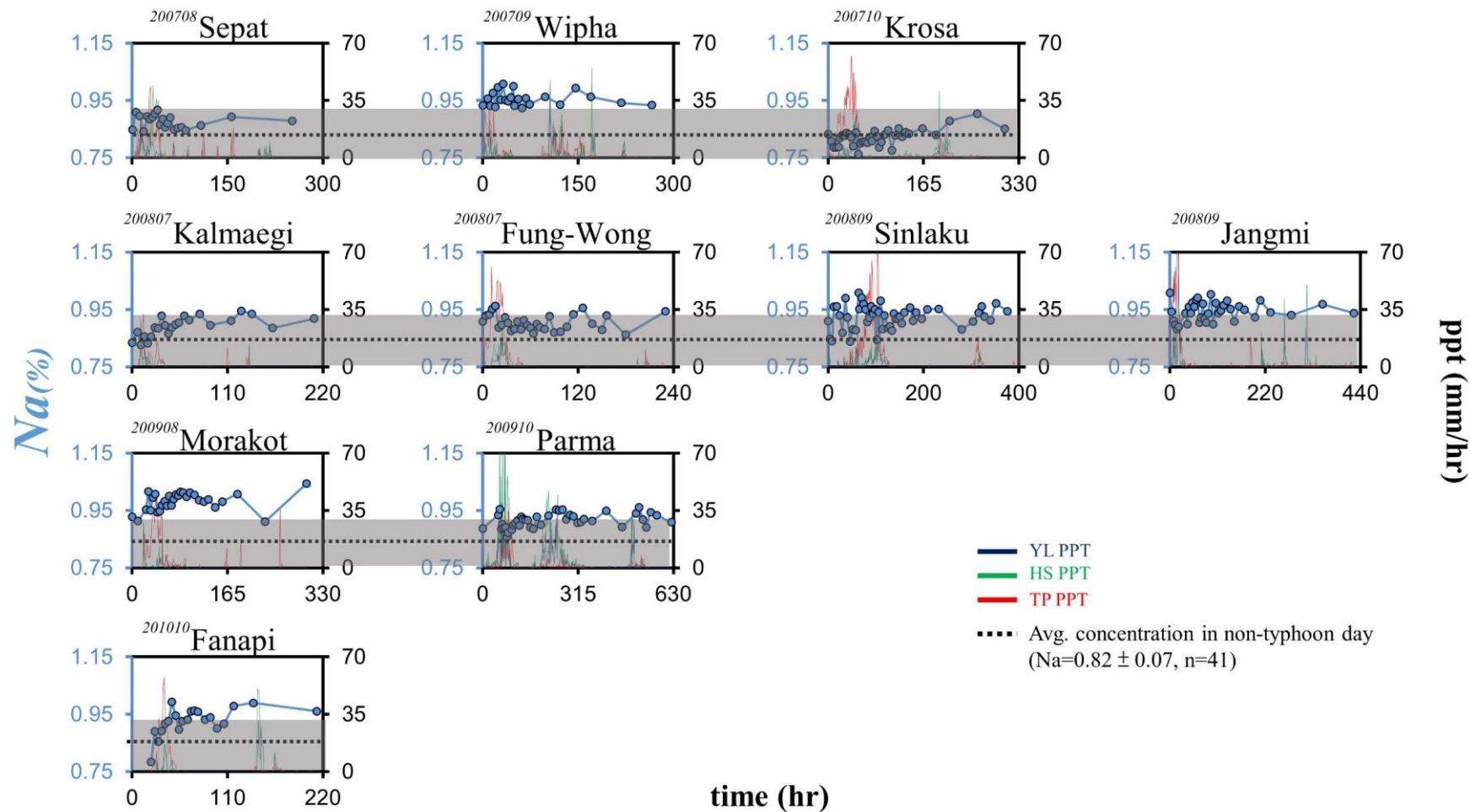


圖 3.12 各颱風期間懸浮顆粒鈉濃度隨時序變化

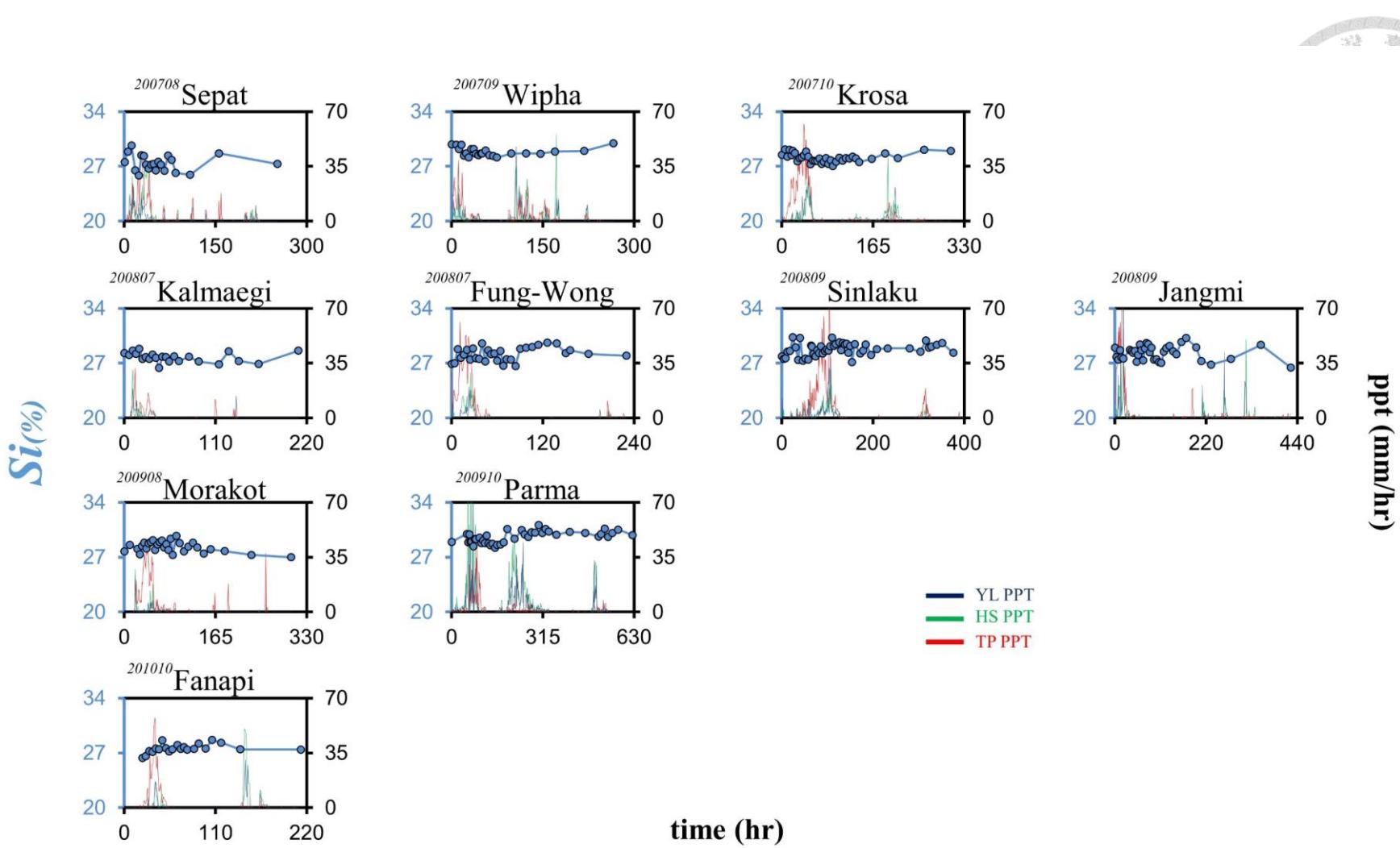


圖 3.13 各颱風期間懸浮顆粒矽濃度隨時序變化

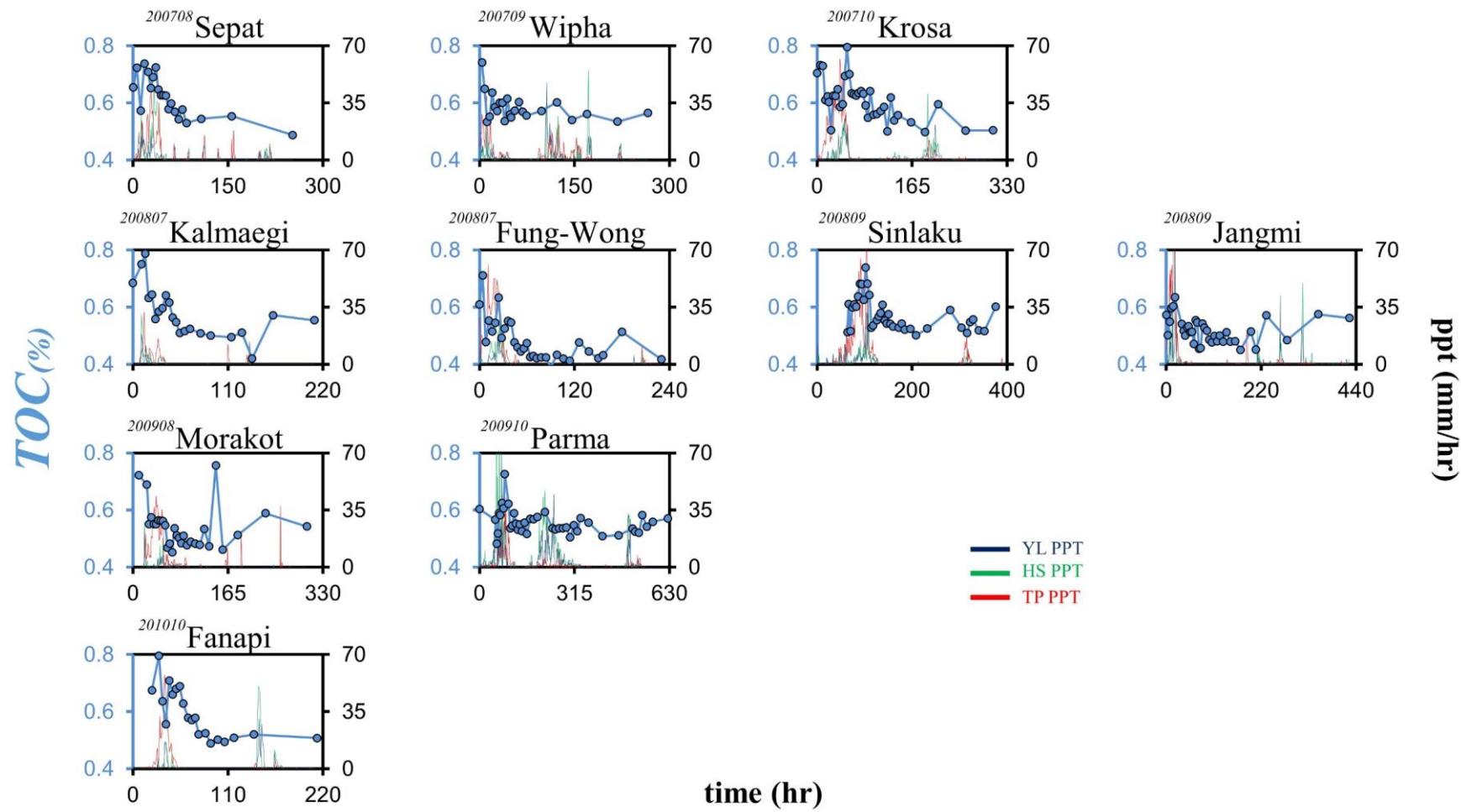


圖 3.14 各颱風期間懸浮顆粒有機碳(TOC)濃度隨時序變化

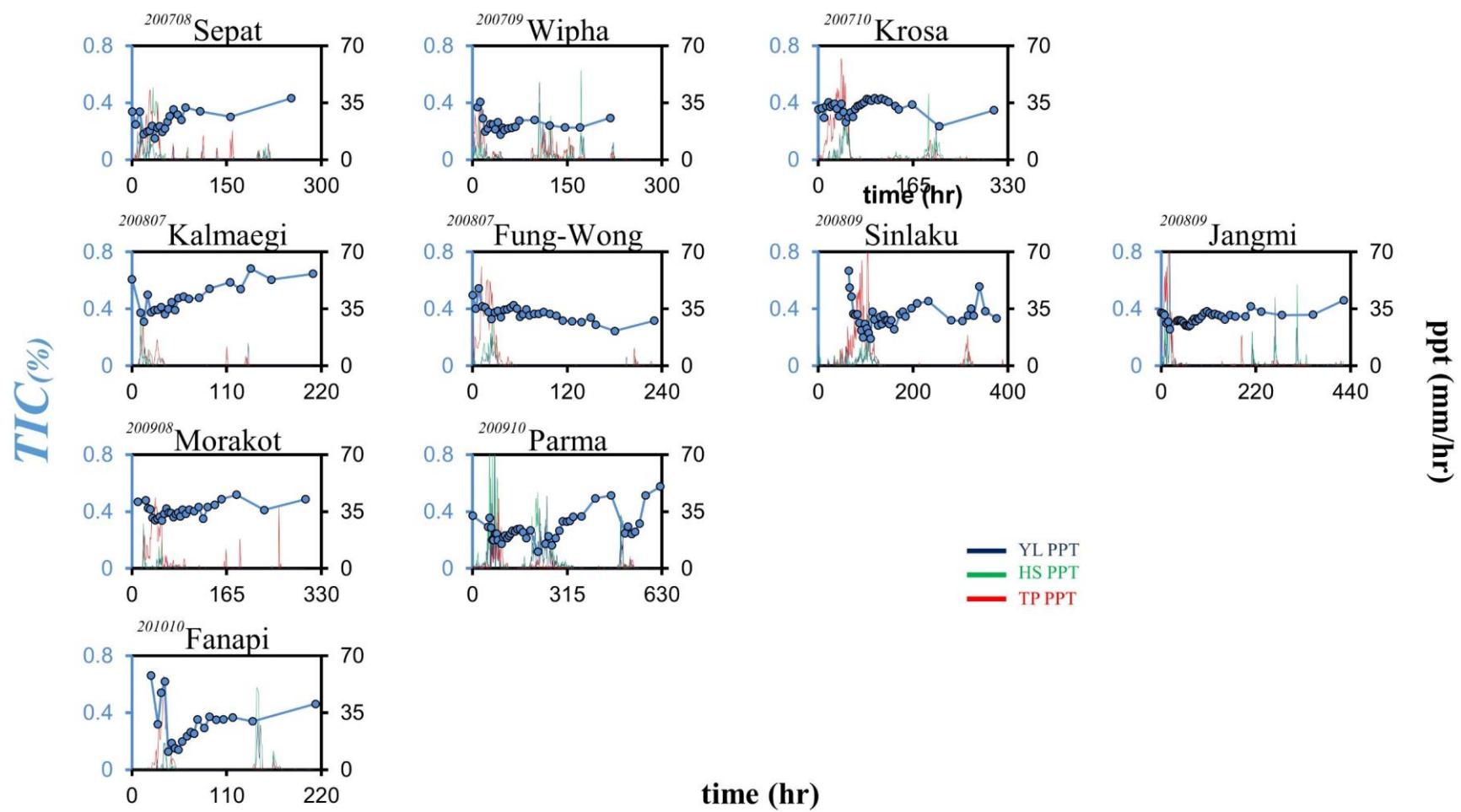


圖 3.15 各颱風期間懸浮顆粒無機碳(TIC)濃度隨時序變化

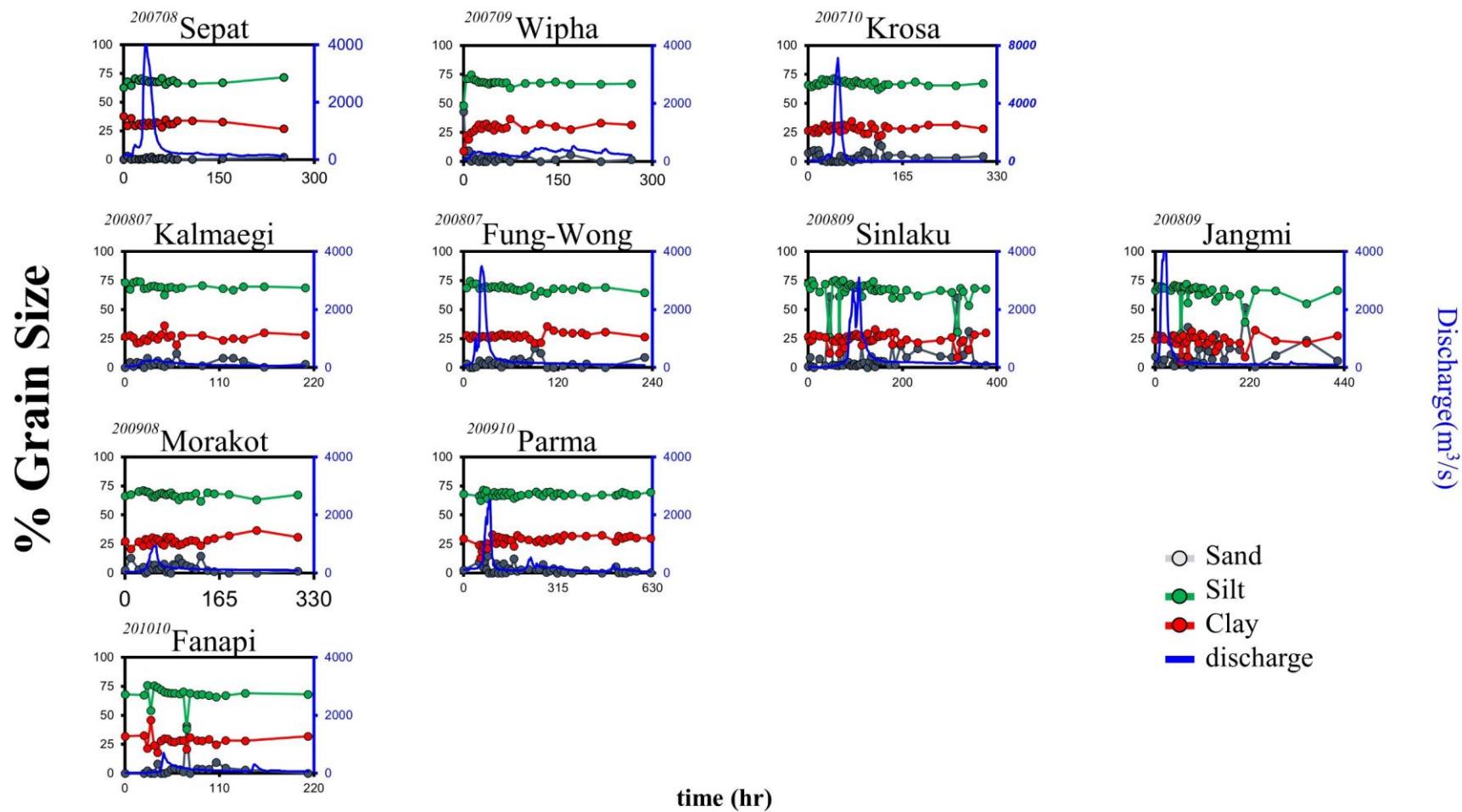


圖 3.16 各颱風期間懸浮顆粒粒徑大小(grain size)隨時序變化



第四章 討論

4.1 降雨與河川流量與總懸浮顆粒(TSM)濃度之關係

台灣一年平均受到 3~4 個颱風侵襲，颱風侵襲時，會在短時間內帶來強烈的降雨，單日累積雨量甚至超過 1000 公厘，如此大量且快速的降雨，使得河川流量急速巨增，同時也可能造成河川顆粒物質的輸出，在短時間內劇烈增加。

本研究為了解雨量與流量之關係，共選取三個雨量測站(玉蘭、太平山、寒溪)，計算期平均值以避免區域性降雨造成之偏差，於各颱風對此三站量測之降雨量，加總取其平均，與流量關係做對比，分析結果顯示(圖 4.1)除芭瑪(Parma)颱風外，颱風降雨(颱風期間三測站累積平均)與造成之流量呈良好線性關係。芭瑪(Parma)颱風之雨量，流量低於雨量趨勢預期值，則因雨量太大已超過橋面流量計位置無法量測其實際流量(與噶瑪蘭站做對比)。

流量與懸浮顆粒濃度關係，由颱風間所產生之流量及總懸浮顆粒濃度做比較(圖 4.2)，發現研究結果顯示期間內，除莫拉克(Morakot)及凡那比(Fanapi)颱風外，最大流量及最大總懸浮顆粒濃度呈現良好線性關係，故而颱風暴雨來時，大量降雨進入河川，流量暴增，同時也增強沖刷及攜帶大量懸浮顆粒的能力。

除了雨量所造成的流量改變外，對於河川懸浮顆粒的影響，地震也可能是一個影響的因子(林冠瑋, 2010)，地震造成山崩岩石破裂，加上颱風產生之暴雨影響，可使更多的顆粒物質崩落至河川中，而 (圖 4.3)顯示在莫拉克(Morakot)及凡那比(Fanapi)颱風來臨前 5-7 天前，剛好有地震發生，然此二颱風期間的流量不高，但依舊能有大量的懸浮顆粒輸出，故而莫拉克(Morakot)及凡那比(Fanapi)受到地震的影響，雖然流量不高卻具有高懸浮顆粒含量。

颱風可造成短時間內大量降雨快速沖刷土壤與碎屑顆粒進入河川，產生河川懸浮顆粒迅速增加。但台灣非颱風期亦可能有高降雨，非颱風期間雖降雨量及流量不如颱風期間多，但懸浮顆粒濃度，也可能同樣受雨量、流量影響。本研究分析平



時降雨流量對顆粒含量之影響，因為非颱風期間採樣為每月採一次，若只使用該日流量，可能會低估其流量影響，故本研究使用四天內流量平均值，與懸浮顆粒濃度做比較(圖 4.4)，分析結果顯示除 2009/11/12、2010/8/30 及 2010/10/27 三次採樣外，其他月份呈良好線性關係，故顯示研究區域內河川流量去控制懸浮顆粒濃度，即使在非颱風其流量遠低於颱風暴雨所造成極速流量，降雨造成流量增加即可影響河川懸浮顆粒濃度。本研究亦探討降雨與河川懸浮顆粒濃度相關性，同樣為避免使用採樣日降雨之偏頗，將四天內雨量加總取平均，與懸浮顆粒濃度做比較(圖 4.5)，發現同樣除 2009/11/12、2010/8/30 及 2010/10/27 三日採樣外，整體呈指數型關係，表示雨量強度較小時懸浮顆粒濃度變化不大，當雨量強度逐漸增強時，數值顯示降雨達 60mm/hr，懸浮顆粒的濃度會即呈指數性增加(圖 4.2, 圖 4.4)。而 2009/11/12、2010/8/30、2010/10/27 三次採樣則呈低降雨但高顆粒含量狀況，從(圖 4.3)上可看出前幾日有地震，因此懸浮顆粒的增加，可能受地震影響。

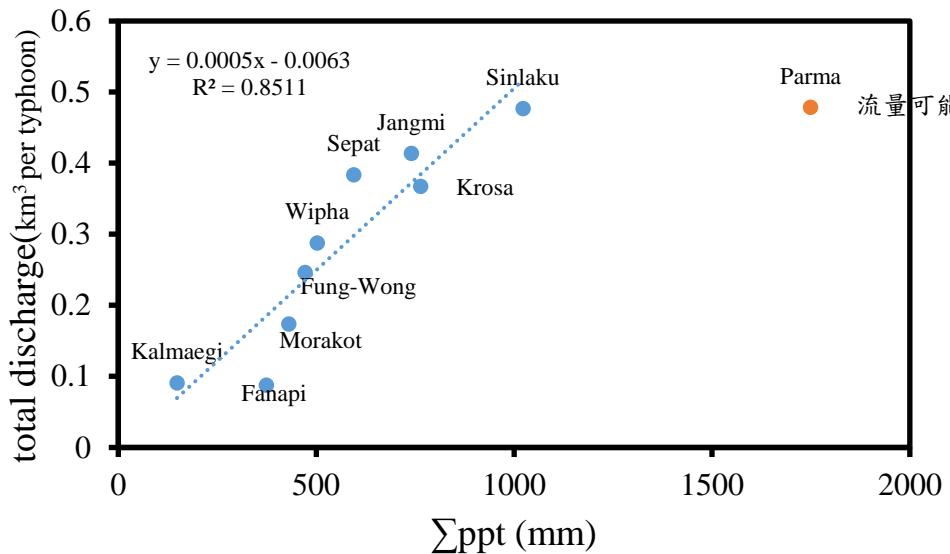


圖 4.1 颱風期間雨量與流量

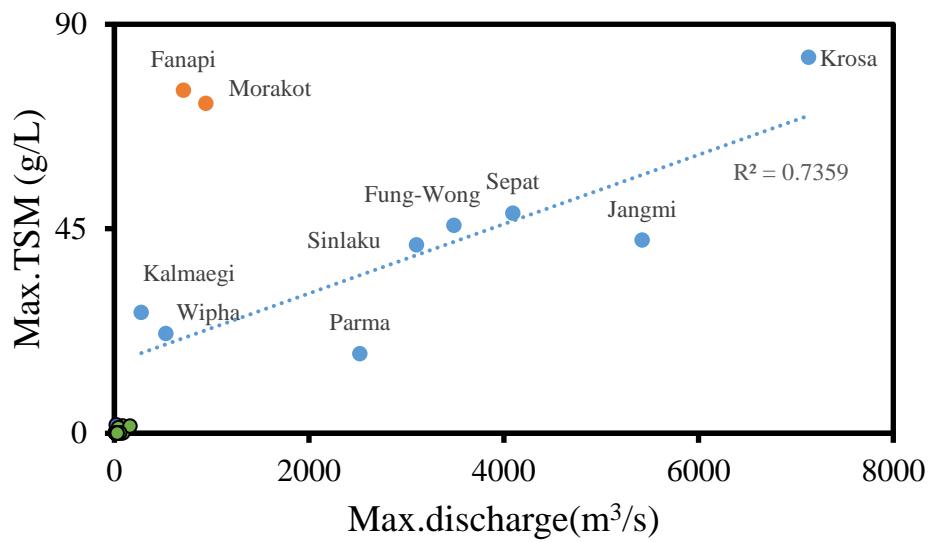


圖 4.2 颱風期間最大流量與最大懸浮顆粒濃度

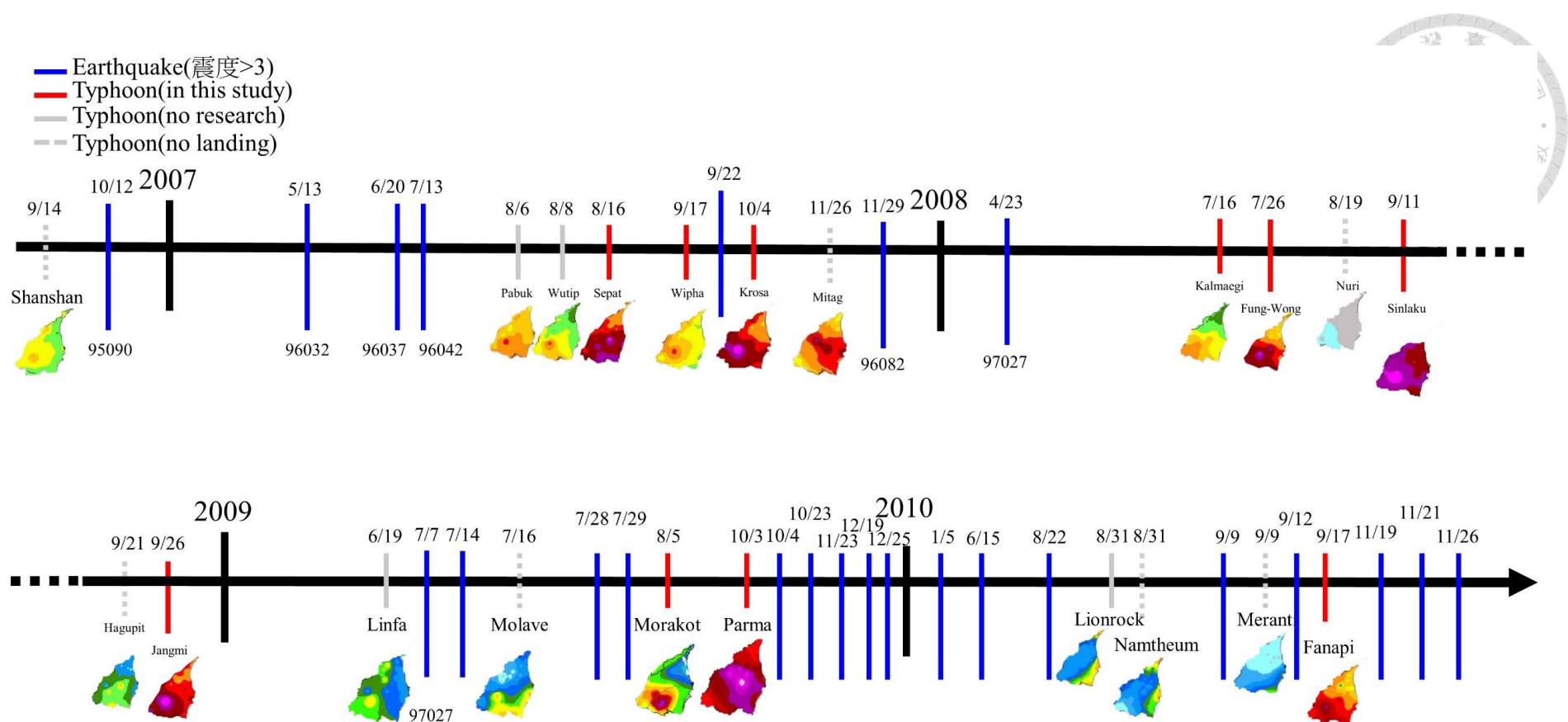


圖 4.3 各颱風期間及地震時序圖

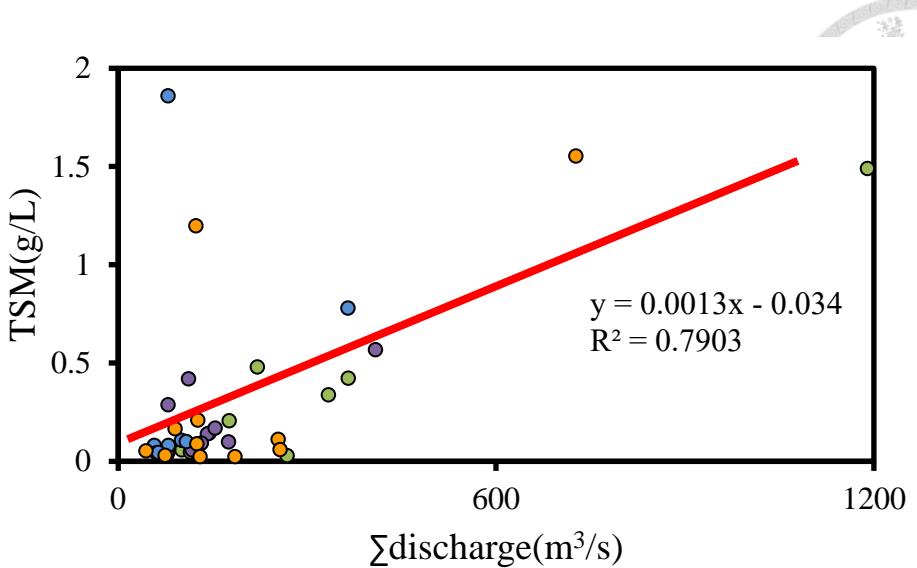


圖 4.4 流量與懸浮顆粒濃度(TSM)

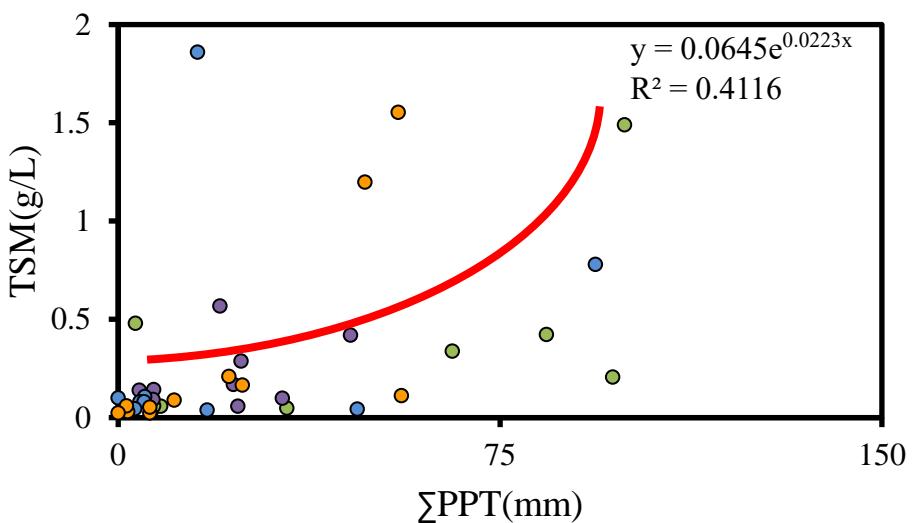


圖 4.5 雨量與懸浮顆粒濃度(TSM)



4.2 非颱風與颱風期間顆粒組成之差異

非颱風期間與颱風期間，降雨量及流量差異將近可達數百倍之多，河川低流量及高流量的條件下，輸出懸浮顆粒性物質濃度與元素組成也可能有所差異，因此將各金屬濃度做相互比較，探討其差異原因。

從(圖 4.6)時序變化及(表 4.1)中可看出，懸浮顆粒鉀與鐵在颱風期間濃度明顯較低，鉀平均濃度於颱風期間為 $2.69 \pm 0.19\%$ ，在非颱風期間為 $2.92 \pm 0.27\%$ ；鐵平均濃度在颱風期間為 $4.49 \pm 0.25\%$ ，非颱風期間為 $5.38 \pm 0.55\%$ 。懸浮顆粒鋁與鈉的濃度剛好相反，在颱風期間有相對明顯較高的濃度，鋁平均濃度在颱風期間為 $9.66 \pm 0.61\%$ ，非颱風期間為 $9.60 \pm 0.28\%$ ；鈉平均濃度在颱風期間則為 $0.91 \pm 0.05\%$ ，非颱風期間為 $0.82 \pm 0.07\%$ 。鈣跟鎂平均濃度在颱風期間也高於非颱風期間，鈣平均濃度在颱風期間則為 $0.89 \pm 0.23\%$ ，非颱風期間為 $0.78 \pm 0.27\%$ ，鎂平均濃度在颱風期間則為 $1.07 \pm 0.08\%$ ，非颱風期間為 $0.98 \pm 0.09\%$ 濃度。非颱風期間，鈣、鎂在 2008 年該年度之濃度整體明顯高於其它年三年。

蘭陽溪輸出的物理風化黏土礦物為伊萊石(illite) (Li et al., 2012)，這也能部分說明，颱風期間與非颱風期間金屬濃度的差異。雖輸出的物質皆主要為物理風化的碎屑性(detrital)物質，但因非颱風期間降雨強度不高，水流量較小，帶入較多的伊萊石(illite)，伊萊石(illite)為高鐵、鉀的礦物，所以非颱風期間可以看到高鐵、鉀的訊號，因 Li et al. (2012)的研究中，主要探討鋁矽酸岩類的變化，碳酸岩類的部分並無考慮；而颱風期間則轉變為強降雨，高流量，此時除了將伊萊石(illite)輸入至河川內，將造成輸入更多其他鋁矽酸岩顆粒或碳酸岩類，因此可以看到，相較於非颱風期間有稍高的鋁、鈉值及鎂、鈣值。

為探討颱風期間內顆粒濃度，是否與化性有關，因此將懸浮顆粒濃度(TSM)與各金屬濃度及 TIC 做比較，發現除柯羅莎、莫拉克、芭瑪、凡那比颱風以外，各主要元素與顆粒濃度大致上可區分為四種趨勢：(1)隨懸浮顆粒濃度(TSM)增加而增加，



如：鉀(圖 4.7)、鋁(圖 4.8)、鐵(圖 4.9)、錳(圖 4.10)。(2)隨懸浮顆粒濃度(TSM)增加而減少，如鈣(圖 4.11)、無機碳(TIC)(圖 4.12)。(3)與懸浮顆粒濃度(TSM)無關或不明顯，如：鎂(圖 4.13)、鈉(圖 4.14)。(4)沒有明顯關係：柯羅莎、莫拉克、芭瑪、凡那比。

本研究區域內礦物的類型，主要可分為兩種，碳酸岩類與鋁矽酸岩類，在上述的所提的金屬中，可以將鉀及鋁及鐵視為鋁矽酸岩類的訊號，而鈣及無機碳(TIC)則視為碳酸岩類的訊號。也就是說，隨懸浮顆粒濃度增加時，碳酸岩類的濃度逐漸變小，轉而被鋁矽酸岩類所稀釋，代表所帶來的懸浮顆粒多為鋁矽酸岩類為主。

鎂、鈉與懸浮顆粒濃度(TSM)無關或不明顯的原因，主要為鎂在碳酸岩類及鋁矽酸岩類中皆常見，因此在碳酸岩與鋁矽酸岩混合的過程中，鎂的變化較不明顯；鈉因在此區域的四個層位中(4.3 中加以詳述)，不管是屬於碳酸岩類還是鋁矽酸岩，鈉的濃度皆相近，因此即便混合，濃度變化也不明顯。

然而在隨懸浮顆粒濃度(TSM)增加而增加的例子中，並非所有颱風皆呈一致性，仍然有四個例外之颱風，柯羅莎(Krosa)、莫拉克(Morakot)、芭瑪(Parma)、凡那比(Fanapi)，這個四個颱風皆呈現較散亂或相關性較不明顯。其原因推測為地震所致，因為地震對岩層的影響，不盡相同，導致輸出的顆粒可能有所改變，從(圖 4.3)可發現，在柯羅莎(Krosa)、莫拉克(Morakot)、凡那比(Fanapi)前剛好有地震發生，雖芭瑪(Parma)是接續在莫拉克(Morakot)之後，但因莫拉克的流量相對大部分颱風來說較低，所以無法將地震產生的懸浮顆粒全數沖出，且在兩颱風之間也無大量降雨沖刷，剩餘地震所造成的顆粒，很有可能在芭瑪(Parma)期間輸出。

一般來說，鈣的來源主要是來自碳酸岩類，但也有可能有鋁矽酸岩類提供鈣，為判斷鈣與碳酸岩類的關係，因此將鈣與無機碳(TIC)做比較，因無機碳(TIC)的主要來源是由碳酸岩類所提供之鈣，其主要目的在於顆粒的鈣，是否皆來自於碳酸岩類。從(圖 4.15)可發現，鈣與無機碳(TIC)呈一良好線性關係，並且大約呈一固定比例

的關係，不僅說明了鈣的來源，同時也暗示著，此處的碳酸岩類主要的提供者可能為白雲石。



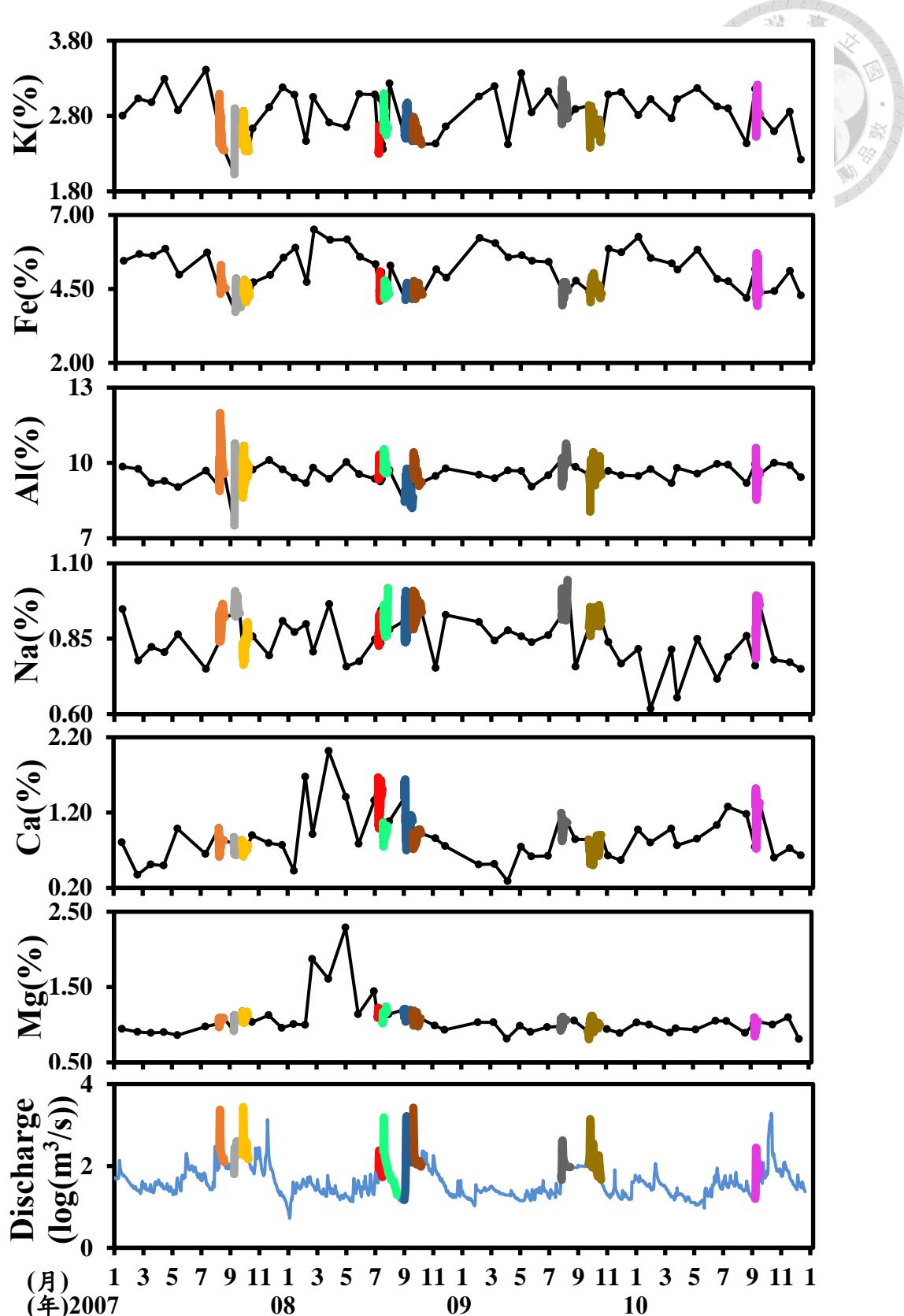


圖 4.6 颱風與非颱風期間各懸浮顆粒金屬濃度之變化

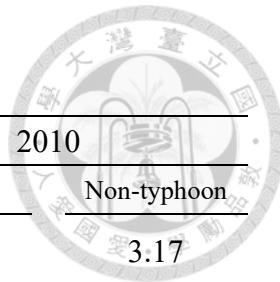


表 4.1 各金屬於颱風與非颱風期間最大或最小之異常值

金屬	2007		2008		2009		2010	
	Typhoon	Non-typhoon	Typhoon	Non-typhoon	Typhoon	Non-typhoon	Typhoon	Non-typhoon
K(%) ^a	3.09	3.41	3.10	3.23	3.27	3.37	3.21	3.17
Fe(%) ^a	5.3	5.86	5.09	6.50	5.03	6.22	5.70	6.26
Al(%) ^a	11.98	10.11	10.54	10.03	10.77	9.84	10.59	10.00
Na(%) ^a	0.88	0.95	1.02	0.96	1.04	0.91	0.99	0.86
Ca(%) ^b	0.61	0.37	0.70	0.43	0.50	0.29	0.72	0.60
Mg(%) ^b	0.92	0.86	0.98	0.93	0.81	0.81	0.84	0.81

註： a:為取最大值； b:為取最小值

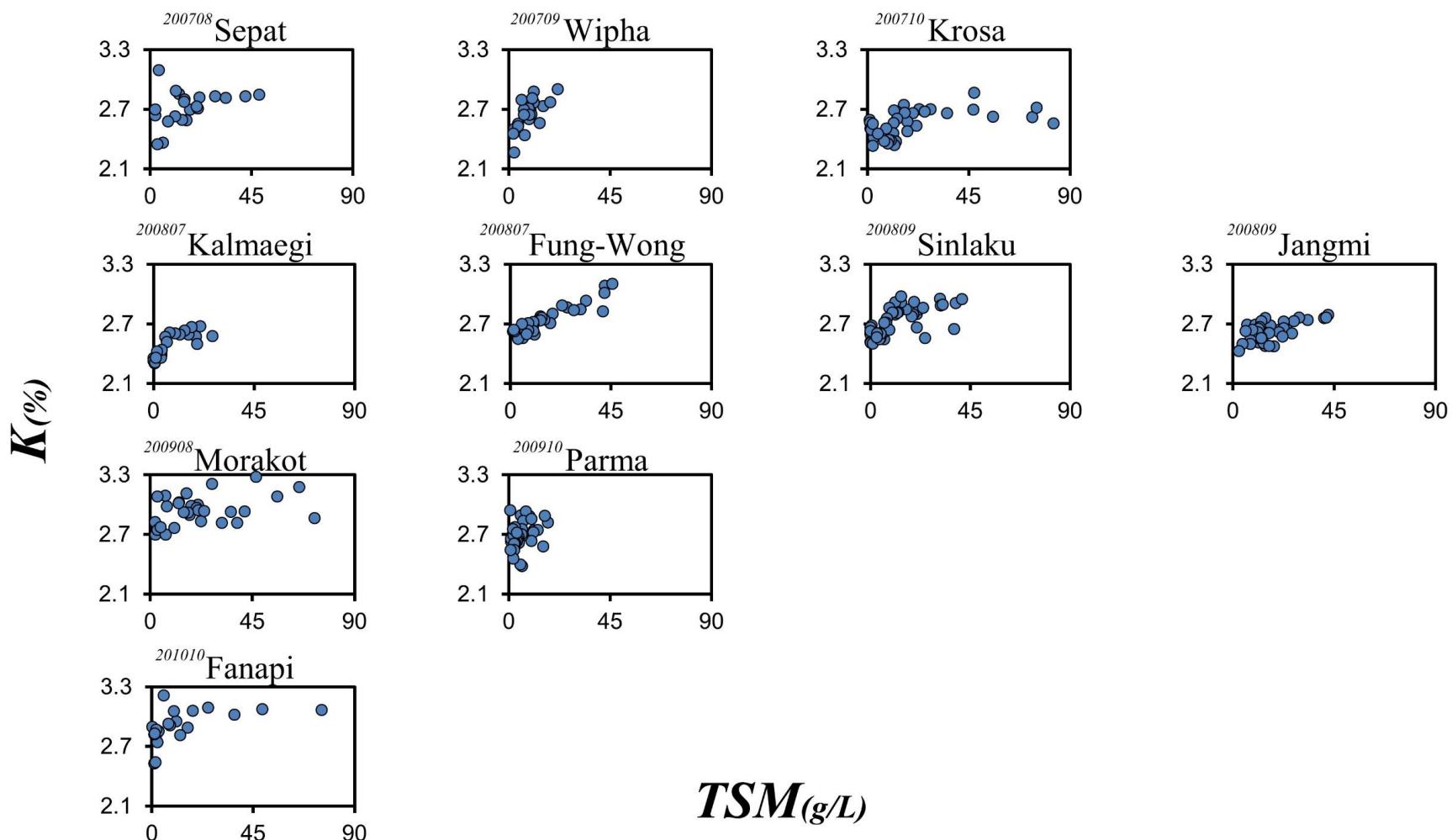


圖 4.7 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鉀濃度

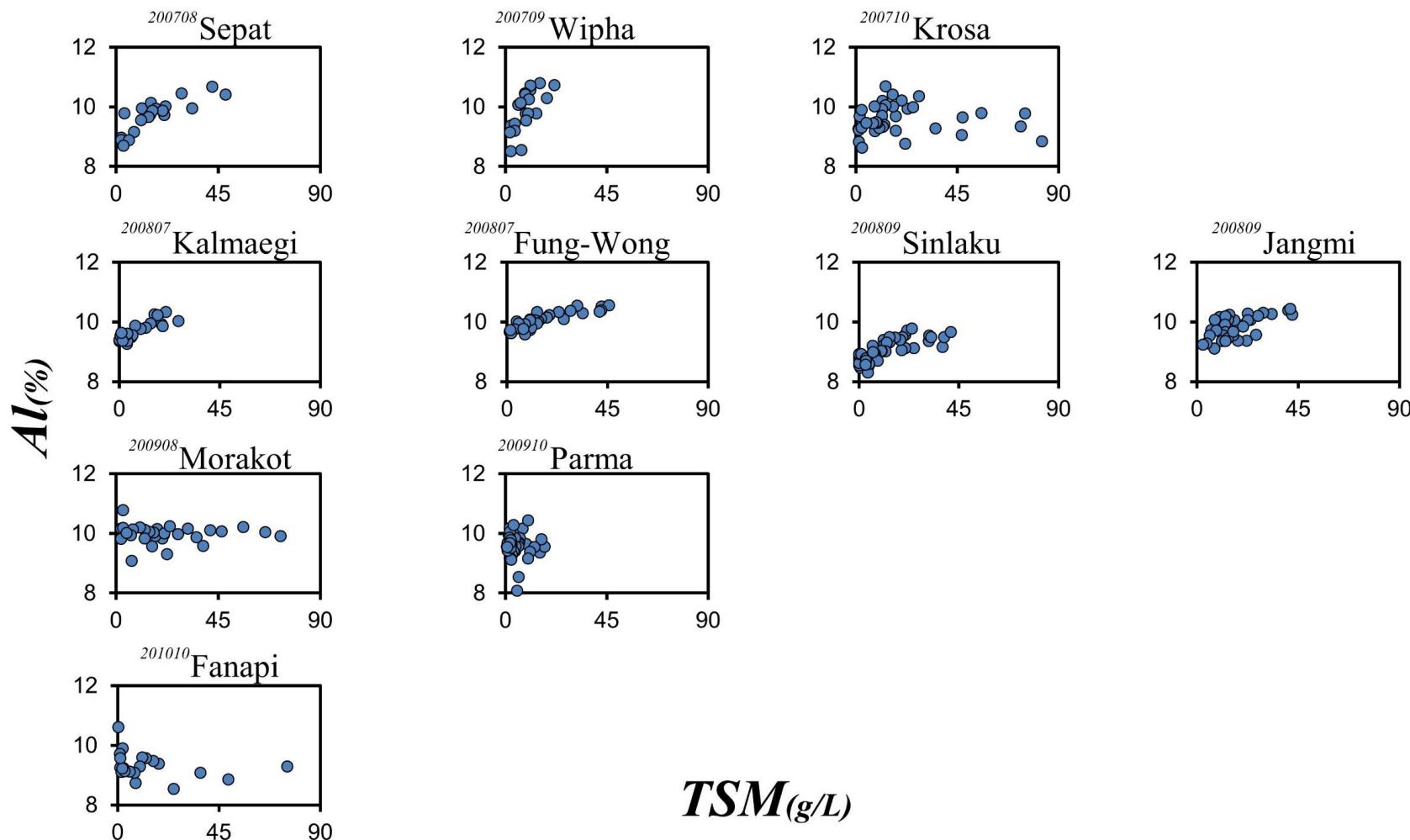
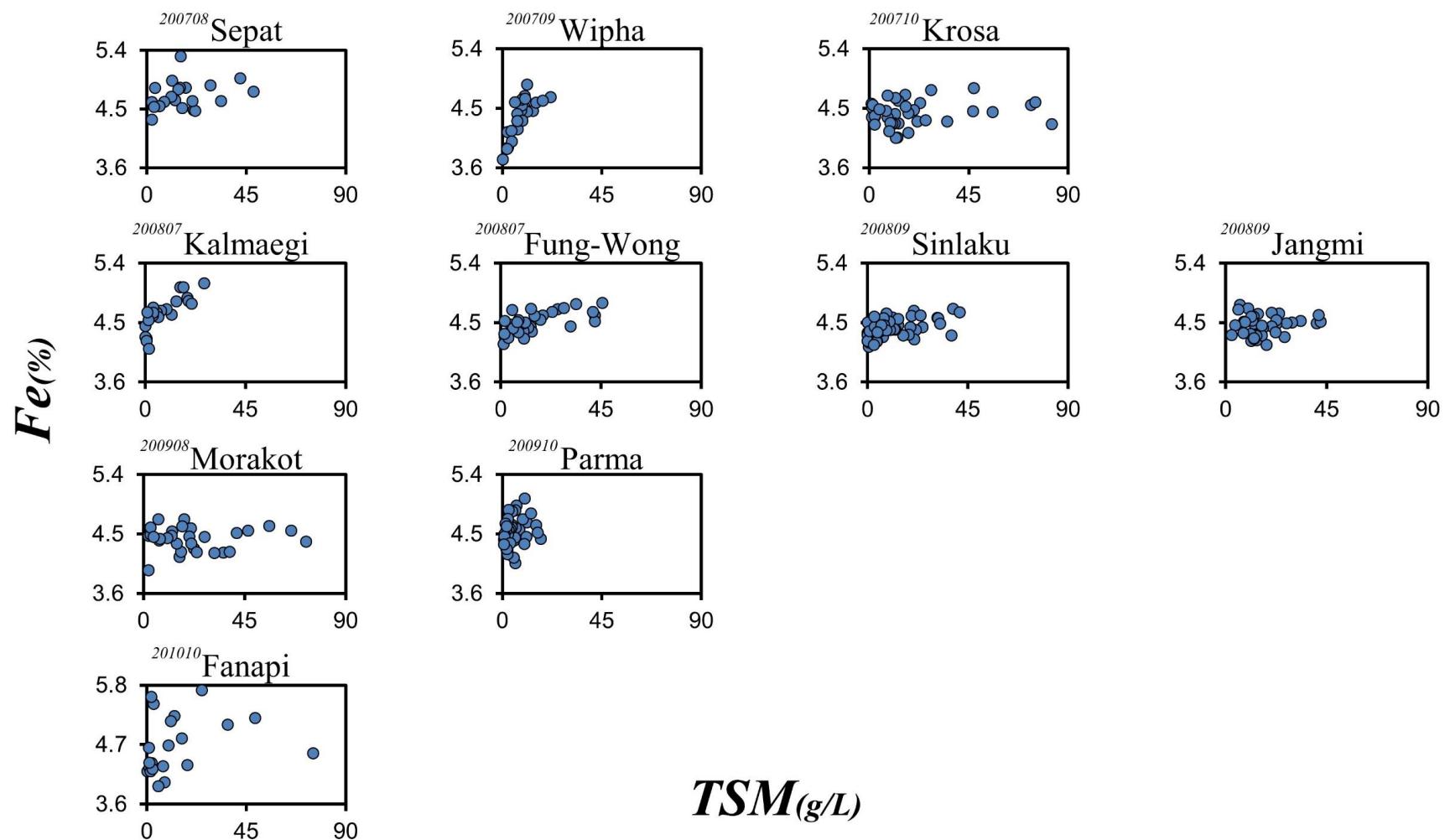


圖 4.8 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鋁濃度



$TSM(g/L)$

圖 4.9 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鐵濃度

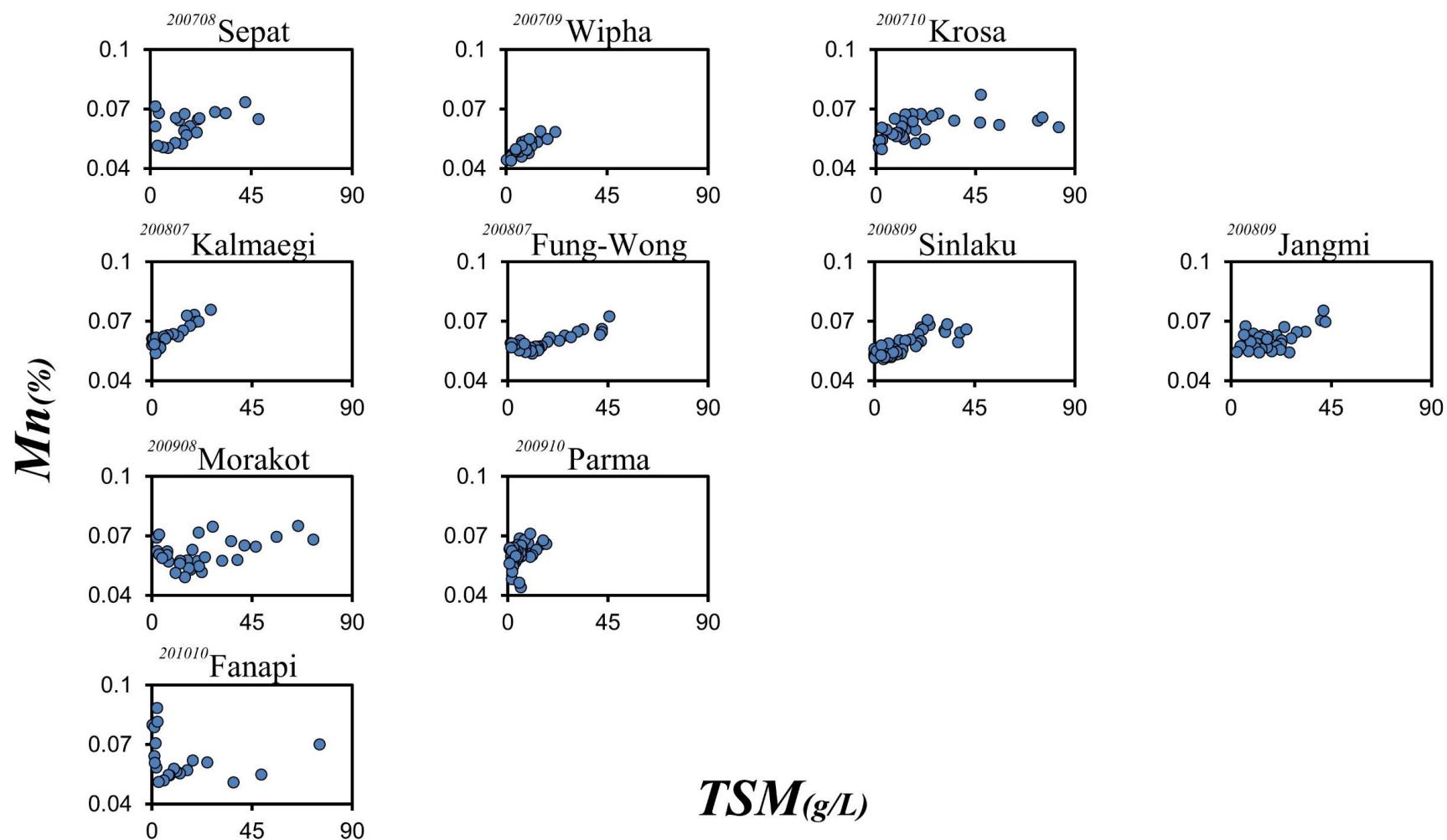


圖 4.10 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒錳濃度

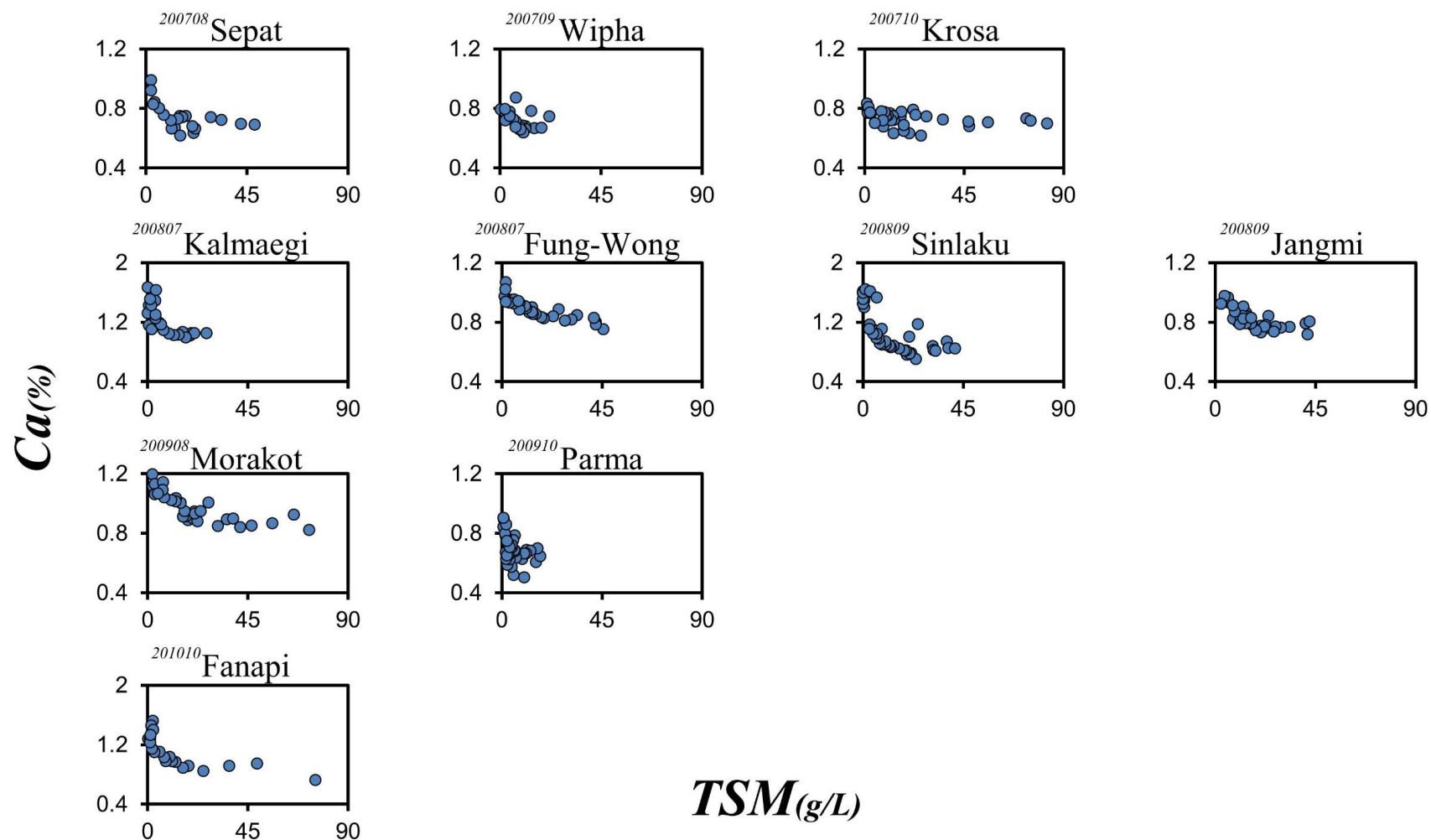


圖 4.11 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鈣濃度

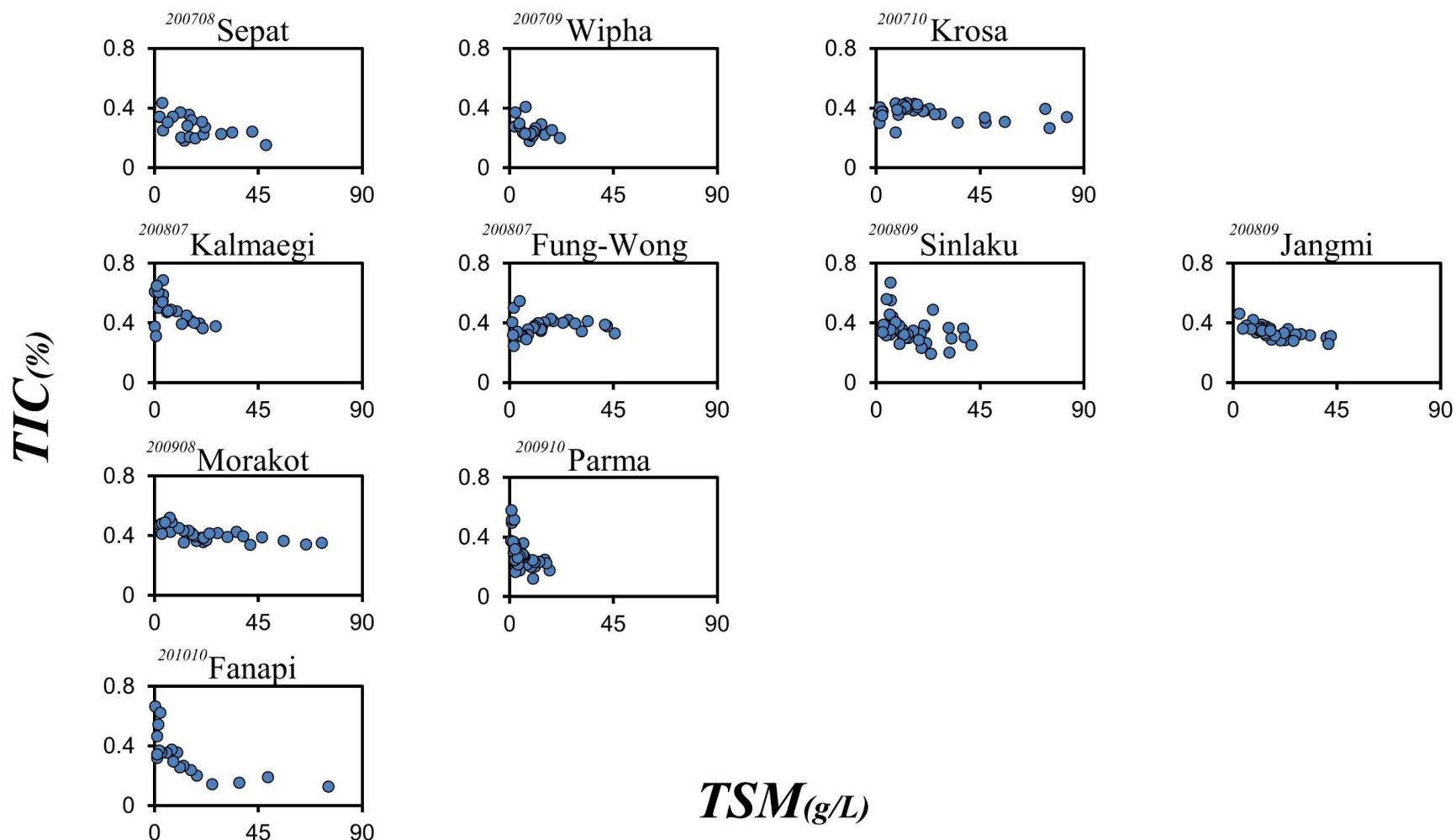


圖 4.12 總懸浮顆粒濃度(TSM)與無機碳(TIC)濃度

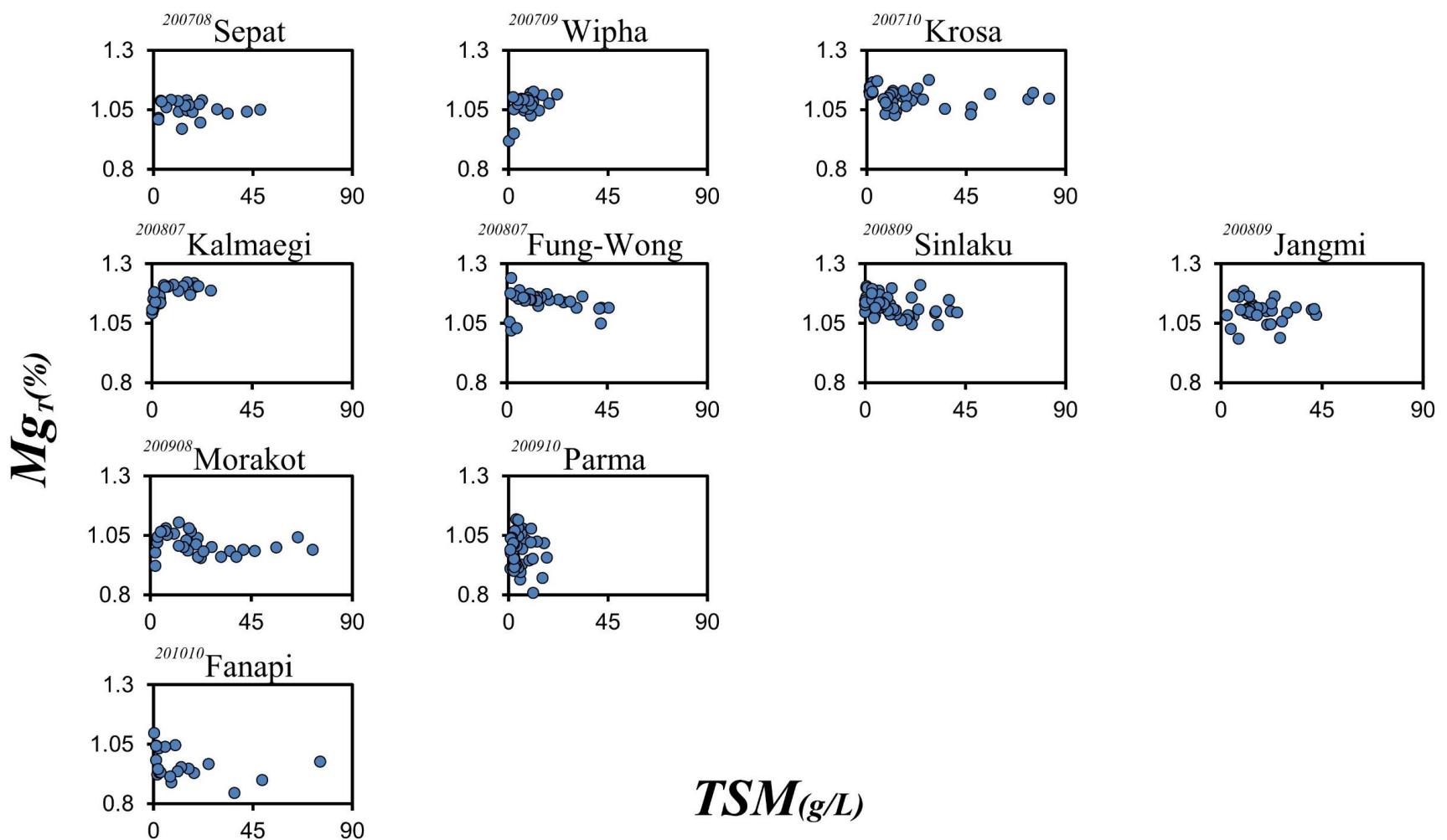
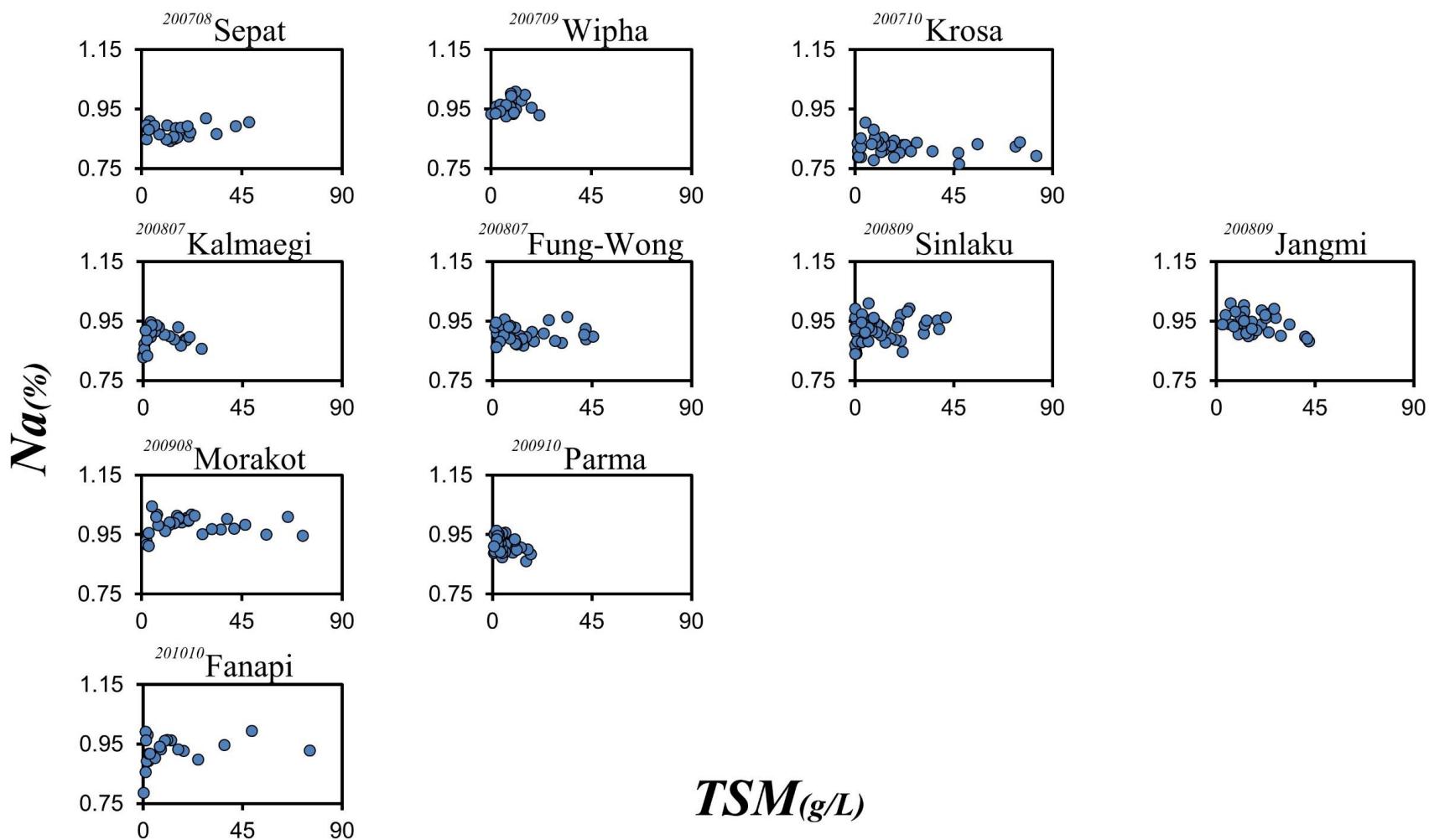


圖 4.13 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鎂濃度



$TSM(g/L)$

圖 4.14 總懸浮顆粒濃度(TSM)與顆粒鈉濃度

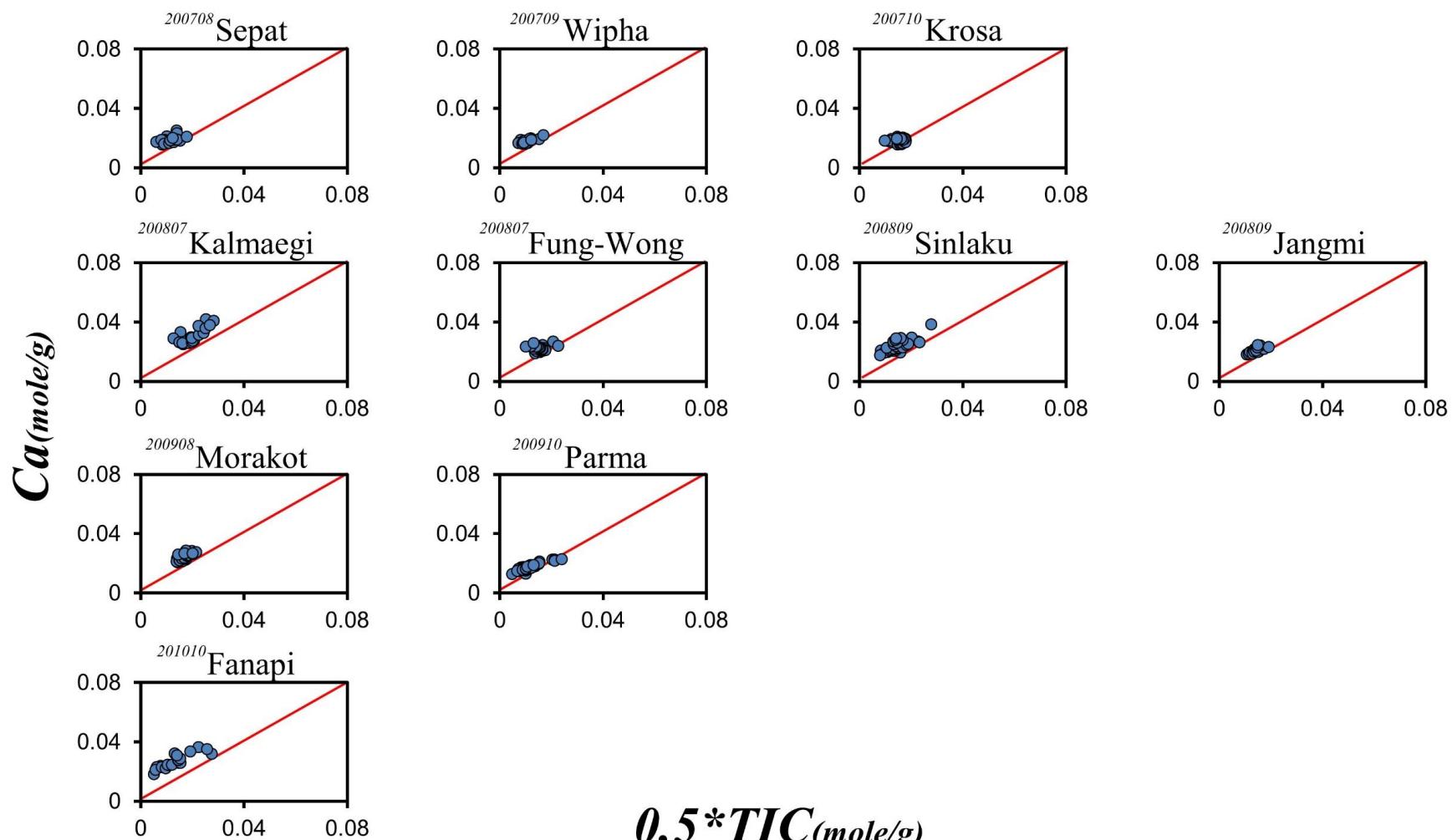


圖 4.15 無機碳(TIC)濃度與顆粒鈣濃度



4.3 懸浮顆粒與岩層化學組成之關係

河川懸浮顆粒主要來源有四：1.流域岩層碎屑 2.土壤 3.人為排放 4.大氣落塵。

臺灣河川按(John D. Milliman et al., 2011)屬亞洲島嶼小河具巨量懸浮顆粒特性，故大氣落塵量應遠小於河川之自然來源，而蘭陽溪上游並無任何工業，故人為污染排放本研究將不予以考慮。

蘭陽溪流域左岸(乾溝層、西村層、四陵砂岩)與右岸(廬山層)地質條件迥異(圖 2.1)，且颱風帶來之降雨區域的不同，可能會將不同區域的顆粒物沖出，而這些物理風化的顆粒，帶著原地層的訊號，進入河川中，因此在顆粒的混合過程，可以看到化性上改變，多為不同地層碎屑混合之結果。本研究分析颱風期間之顆粒金屬元素與鋁關係，並比較顆粒物質之化性與蘭陽溪流域主要的四種地層：廬山層、乾溝層、西村層、四陵砂岩的岩石化學組成差異以及探討河川懸浮物可能的混合來源。

圖 3.4 指出各岩層岩石化性，以廬山層含有較多的碳酸岩類礦物，而乾溝層、西村層、四陵砂岩則含有較多鋁矽酸岩類，故當懸浮顆粒其化學組成以碳酸岩類含量較高時可能由廬山層為主要來源，反之則以乾溝層-西村層-四陵砂岩層為主。

圖 4.16~圖 4.21 比較研究期間十個颱風懸浮顆粒樣品、非颱風期間四年 48 個月份與蘭陽溪流域四個岩層(12 個)樣品之主要元素組成差異，發現颱風與非颱風期間之顆粒，其金屬濃度大多落在四個層位混合範圍之間，代表颱風與非颱風期間輸出之顆粒，主要是碎屑性(detrital)物質，這些顆粒可能多是只經過物理風化或小幅度化學風化之碎屑產物。

從圖 4.16 中可看出，鉀與鋁因同為鋁矽酸岩類之主要成分，因此呈現正相關，然而大多數的顆粒濃度落在廬山層(碳酸岩類)，與乾溝層及西村層(鋁矽酸岩類)的混合範圍內，顯示廬山層與乾溝層及西村層為其主要來源，而蘭陽溪河川懸浮顆粒為其原始岩石碎屑混合所組成。比較特別的為莫拉克(Morakot)、凡那比(Fanapi)，此二颱風顆粒化學組成並不呈線性相關反而落於外圍區域，可能受地震導致較多



的西村層與乾溝層岩石崩裂產生碎屑受颱風沖刷進入河川，造成新混合現象不落入原來之線性相關關係，尤其凡那比(Fanapi)出現低鋁高鉀現象，可能因有四陵砂岩碎屑顆粒的輸入所造成。

鈣、鋁比較(圖 4.17)中，可以發現鈣與鋁呈負相關性，除了莫拉克(Morakot)與凡那比(Fanapi)二颱風之外，此種現象為各颱風顆粒進入河川之混合作用中碳酸岩類與鋁矽酸岩的混合過程，當鋁矽酸岩類顆粒含量增加時其碳酸岩類顆粒含量即降低，配合此種變化岩主要是廬山層與乾溝層的混合。從莫拉克(Morakot)與凡那比(Fanapi)二颱風鈣鋁負相關關係中，亦可看到另一類似鋁鉀關係例外之現象，亦同樣受地震導致不同的地區岩石崩裂，產生碎屑造成混合現象不呈鈣鋁負線性相關，其中凡那比甚至呈正相關關係，主要是因四陵砂岩層為低鈣低鋁性質，而亦同樣的因地震碎屑顆粒隨颱風沖刷輸入所造成此現象。另一特殊颱風現象可發現部分之鈣及鋁的濃度，超出了相關地層的濃度範圍，可能是因部分區域的碳酸岩類為不均勻分散式的形式分布於廬山層中，而本研究岩石採集的樣點密度可能並未採集到此種不均勻分布之高碳酸岩類的岩石樣品，故而此類樣品出現於懸浮顆粒中。

在鎂與鋁(圖 4.18)中可以發現，在各颱風中可發現懸浮顆粒的特徵，主要皆在西村層內，層位之間的混合不是很明顯，可能是因為鎂的來源，不一定單純來自碳酸岩類或只來自鋁矽酸岩類，反之，因鎂並未如鈣是以主要成分分佈於岩石或懸浮顆粒中但卻是同時以少量出現於鋁矽酸岩與碳酸岩中，故其分佈並未隨鋁含量改變而改變。

在鐵與鋁(圖 4.19)中可以發現，多數颱風中鐵與鋁呈線性正相關，且主要混合趨勢為，廬山與乾溝層的混合，其原因为輸入的鋁矽酸岩類的礦物包括伊萊石(illite)，而伊萊石是蘭陽溪流域物理風化，主要輸出的黏土礦物，其中富含大量的鐵，因此可以看到當鋁濃度增加時，鐵的濃度也同時上升。其中莫拉克(Morakot)、凡那比(Fanapi)，可能為受地震導致不同的地區岩石崩裂產生碎屑，造成混合現象不呈線性相關。



在鈉與鋁(圖 4.20)中可以發現，四個層位中，除四陵砂岩外，其餘層位的鈉含量幾乎大同小異，而顆粒上的鈉差異也不大。

在錳與鋁(圖 4.21)中，可以發現在顆中錳鋁的濃度，在所有颱風中幾乎皆落在在西村層與廬山層及四陵砂岩之間，且呈正相關。

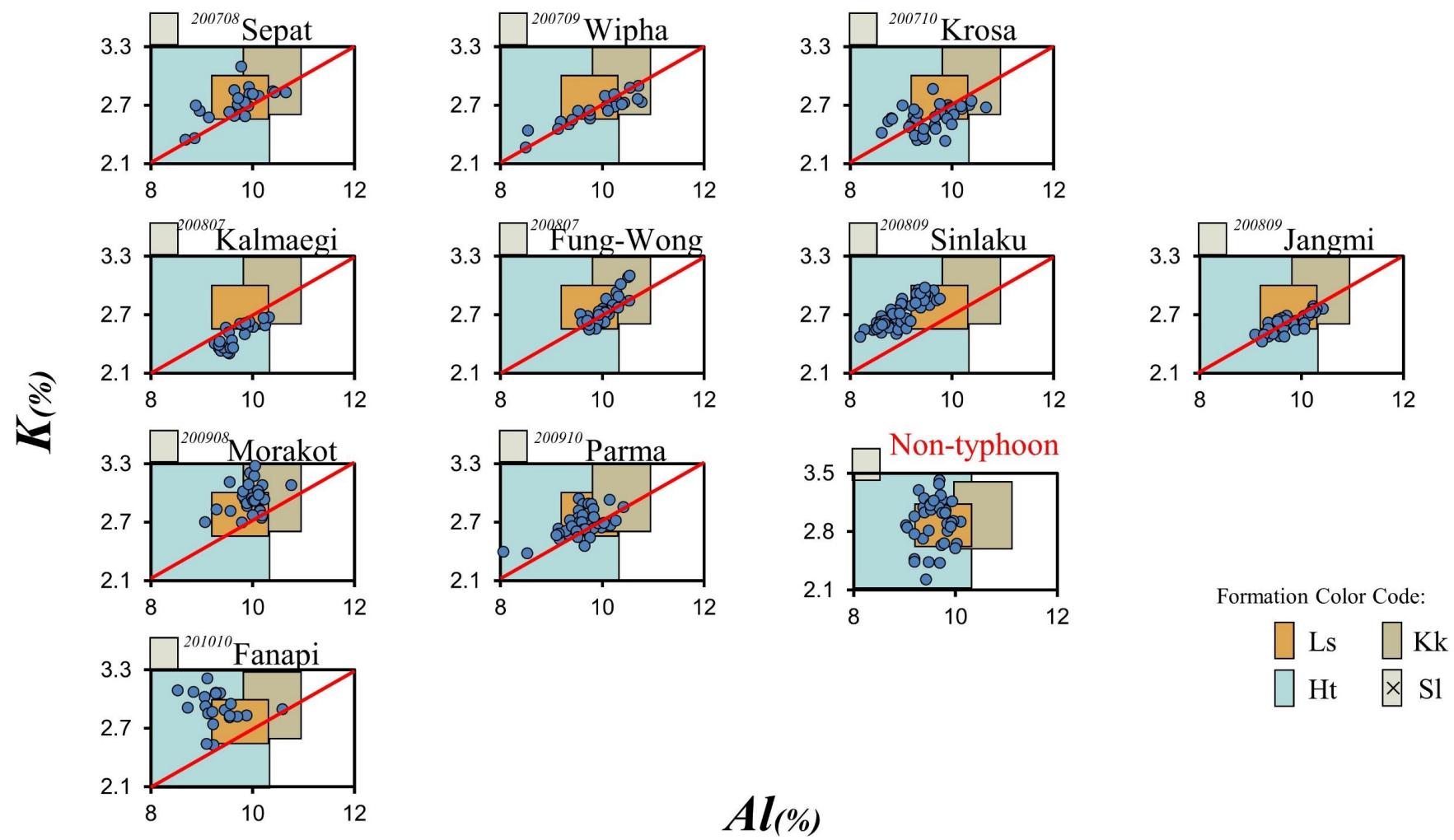


圖 4.16 顆粒鋁及顆粒鉀與各層位岩石化性關係

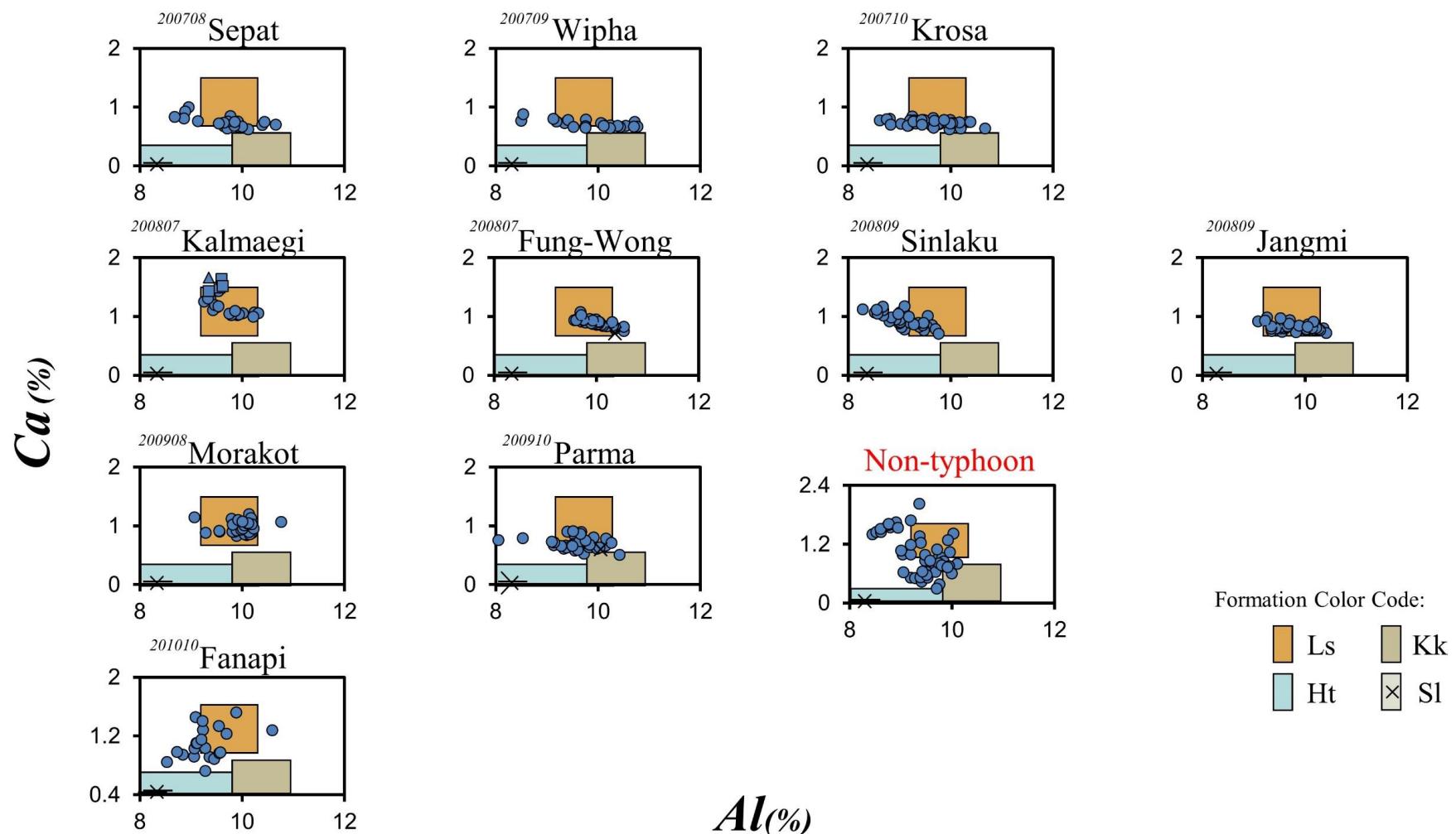


圖 4.17 顆粒鋁及顆粒鈣與各層位岩石化性關係

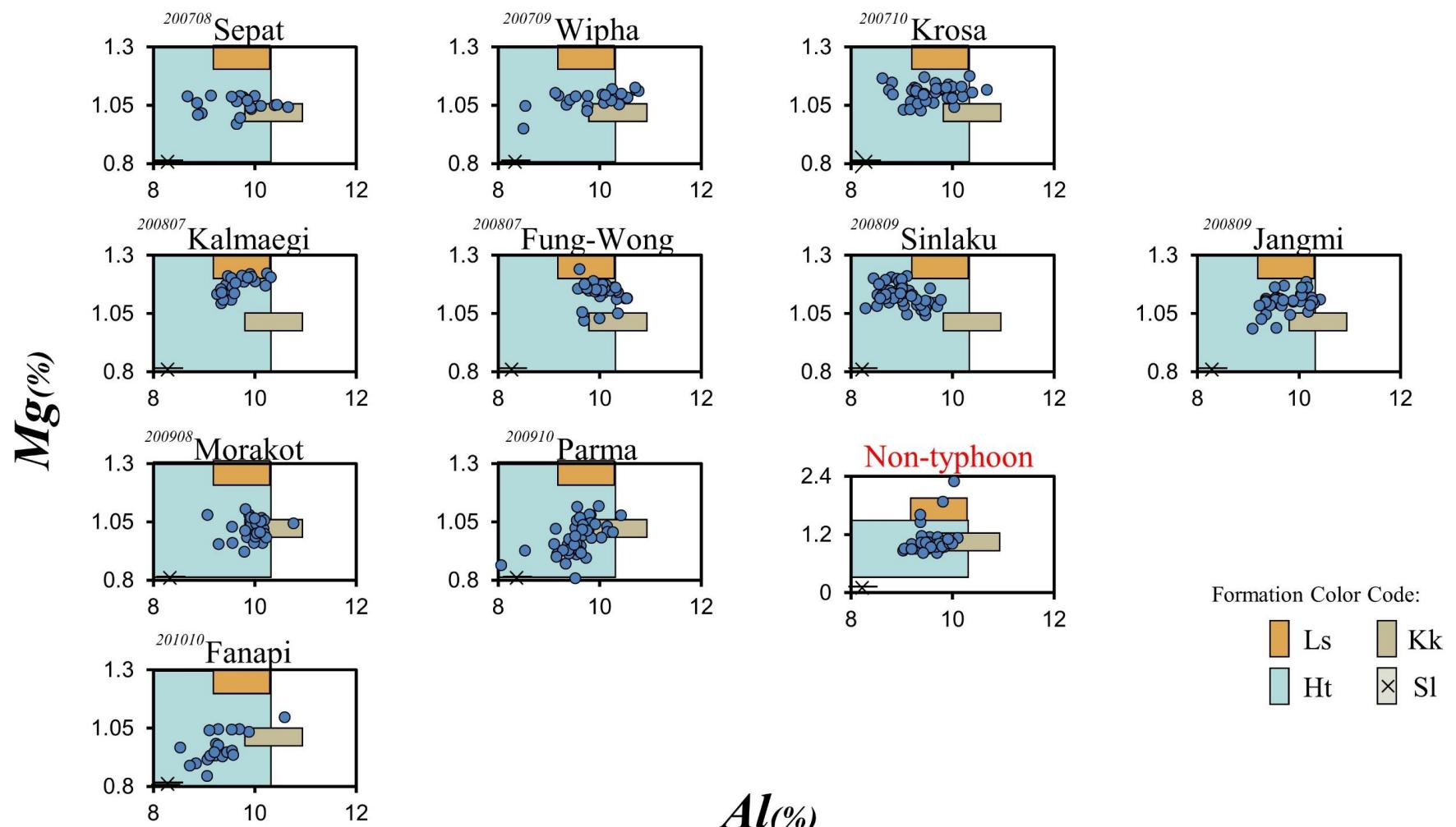


圖 4.18 顆粒鋁及顆粒鎂與各層位岩石化性關係

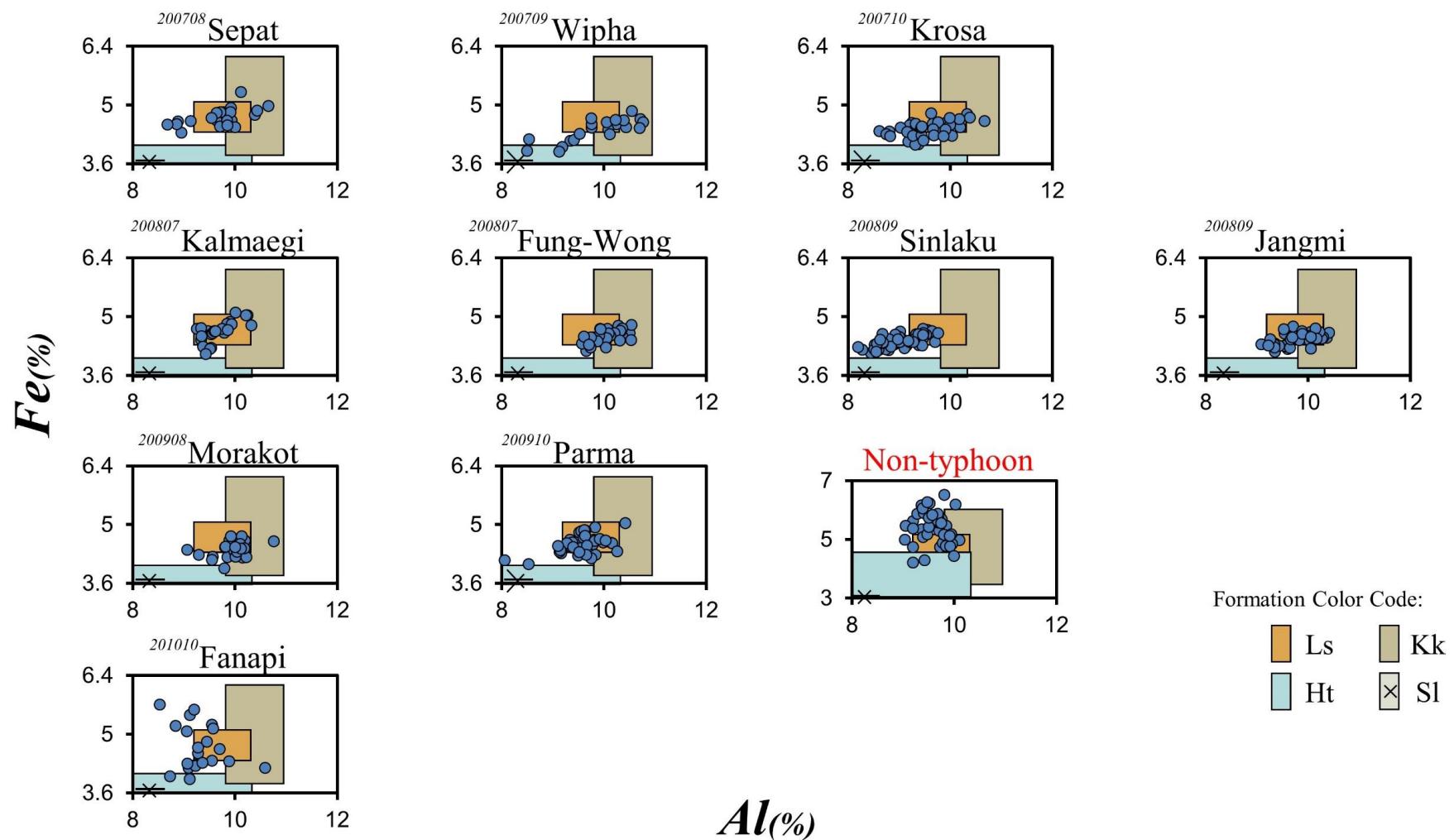


圖 4.19 顆粒鋁及顆粒鐵與各層位岩石化性關係

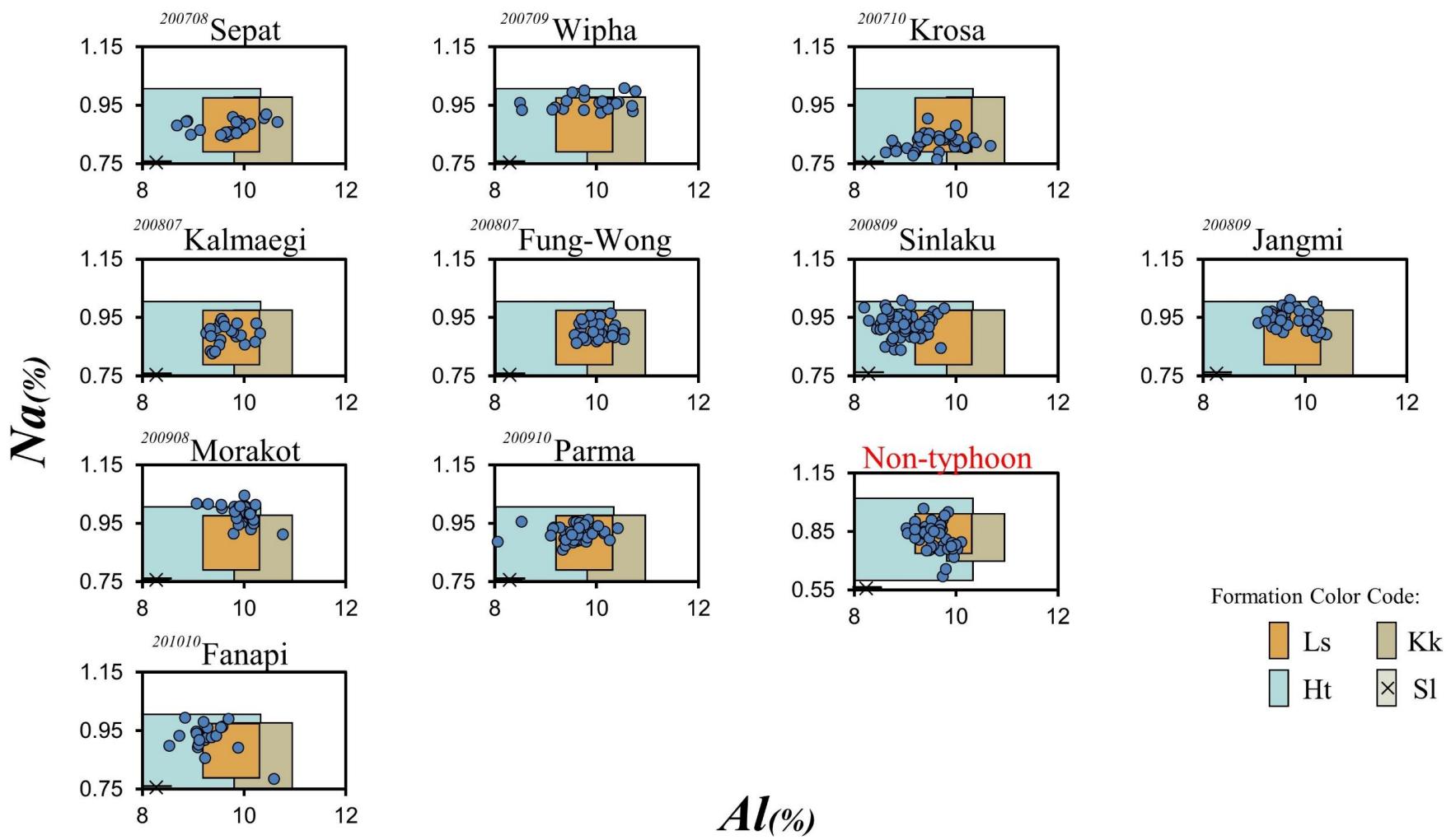


圖 4.20 顆粒鋁及顆粒鈉與各層位岩石化性關係

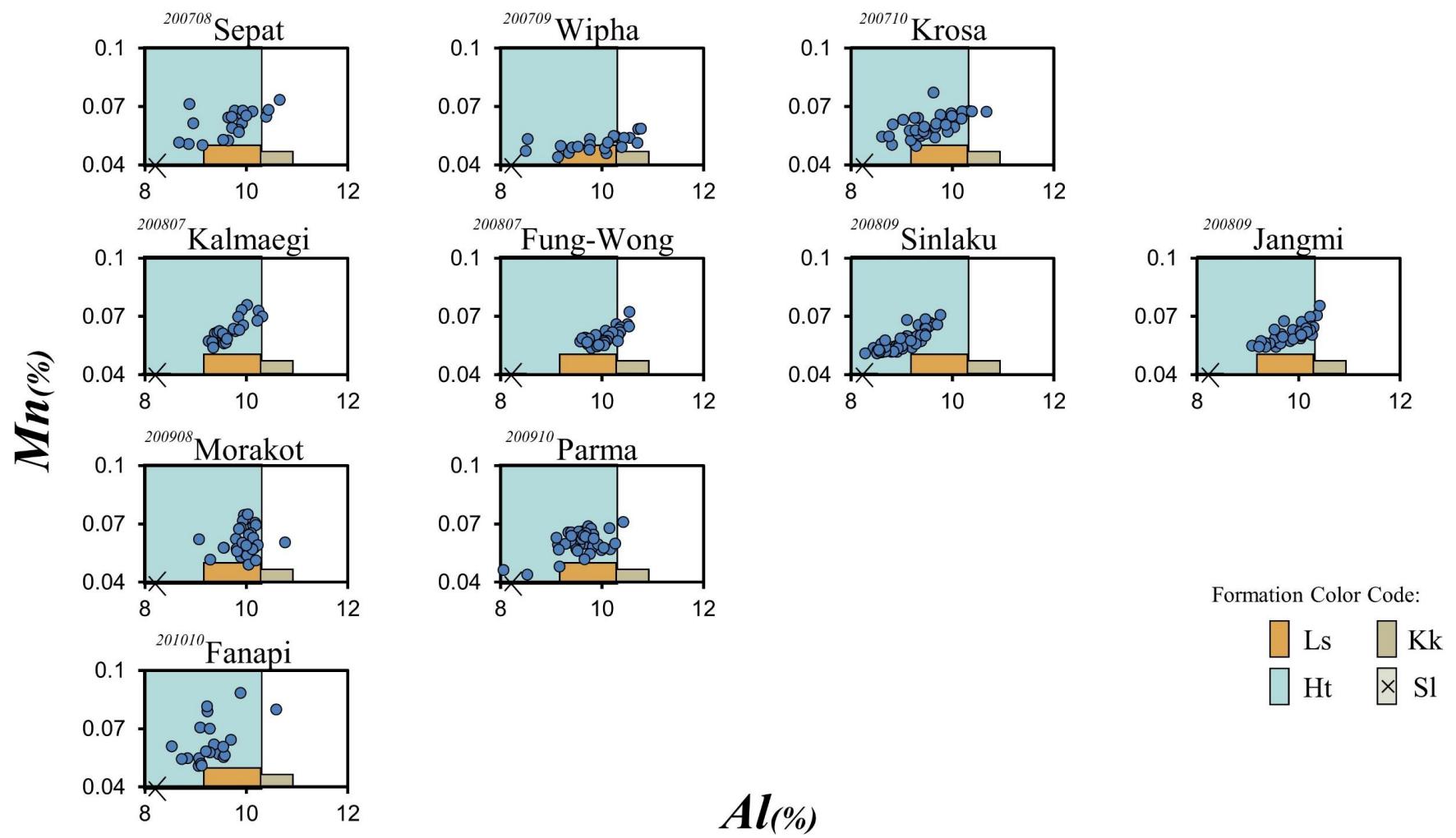


圖 4.21 顆粒鋁及顆粒錳與各層位岩石化性關係



4.4 物理風化與化學風化之物質輸出量

總溶解物質(TDS)代表化學風化進入溶解態的產物，傳統上懸浮顆粒多為物理與化學風化的產物，但本研究分析結果顯示蘭陽溪懸浮顆粒多為物理風化的碎屑產物。本研究統計自 2007 年至 2010 年間，蘭陽溪流域的總懸浮顆粒(TSM)、總溶解物質(TDS)(連凱莉, 2009; 賴怡萱, 2013)輸出量(表 4.2)，以及各金屬元素在顆粒態及溶解態中的濃度輸出總量(表 4.3)。與世界河川相比(表 4.4)，蘭陽溪在每年平均化學風化產率，以及平均物理風化產率，皆高出數十倍之多，而在總顆粒物質及總溶解物質的單位面積輸量，也遠高世界其他區域，顯示出蘭陽溪小河川的物理風化及化學風化強盛。

蘭陽溪流域 2007 至 2010 年顆粒輸出總量為 85 Mt，颱風期間輸出約 61 Mt，佔 71%，溶解性物質總輸出量為 2.86 Mt，颱風期間輸出約 0.67 Mt，佔 23%。代表颱風期間的降雨，對化學風化及物理風化的輸出量有極大的影響。非颱風期間，化學風化的比例提高。2007 至 2010 年各顆粒態輸出量部分，顆粒態鋁輸出量為 5.79 Mt，顆粒態鐵輸出量為 2.64 Mt，顆粒態鉀輸出量為 1.61 Mt，顆粒態鈉輸出量為 0.51 Mt，顆粒態鈣輸出量為 0.44 Mt，顆粒態鎂輸出量為 0.62 Mt；溶解態部分，溶解態鉀輸出量為 0.01 Mt，溶解態鈉輸出量為 0.02，溶解態鈣輸出量為 0.11 Mt，溶解態鎂輸出量為 0.05 Mt，可發現河川中主要離子在顆粒態的傳輸總量，高於溶解態數十至百倍。

綜合上述，蘭陽溪對世界河川來說，物理及化學風化發展皆相當強盛，而若單看流域內之風化機制，可發現物理風化又更是影響盛大，其原因為，台灣為高聳島嶼(High Standing Islands, HSIs，指河川上游高於海拔 1000m 以上)，山高水急，且平均每年 3.8 個颱風侵襲台灣，加上位於板塊邊界，地震事件頻繁，造成流域母岩性質脆弱碎裂，猛烈降雨衝擊母岩碎屑，在尚未受到化學風化作用下，即被水流

帶往下游，進入海洋中，因此蘭陽溪流域顆粒的輸出，顯示了台灣地區物理風化作用的特性及物理風化對海洋的重要性。



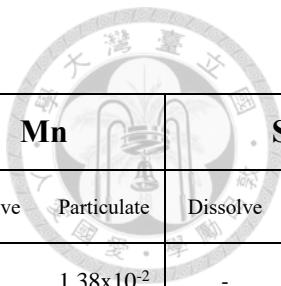


表 4.2 2007~2010 年蘭陽溪颱風期間與非颱風時期總懸浮顆粒(TSM) 及總溶解物質(TDS)輸出量

	Duration time(hr)	Discharge(km ³)	TDS(Mt)	TSM(Mt)	TSM/(TDS+TSM)
2007(total)		2.94	0.9	25.35	0.97
2007(typhoon event)	207	0.9(30.7%)^a	0.21(23.4%)^a	21.41(85%)^a	0.99
Sepat	78	0.38(13%) ^b	0.08(8.9%) ^b	8.97(35%) ^b	0.99
Wipha	51	0.29(9.9%) ^b	0.08(8.9%) ^b	1.98(7.8%)	0.96
Krosa	78	0.23(7.8%) ^b	0.05(5.6%) ^b	10.46(41.2%)	0.99
2008(total)		2.30	0.75	36.09	0.98
2008(typhoon event)	327	1.26(54.5%)^a	0.26(34.4%)^a	27.91(77%)^a	0.99
Kalmaegi	57	0.08(3.5%) ^b	0.02(2.7%) ^b	0.69(1.9%)	0.97
FungWong	72	0.25(11%) ^b	0.05(6.7%) ^b	6.86(19%)	0.99
Sislaku	126	0.47(20%) ^b	0.1(13%) ^b	8.31(23%)	0.99
Jangmi	72	0.46(20%) ^b	0.09(12%) ^b	12.05(33.1%)	0.99
2009(total)		1.57	0.56	12.65	0.96
2009(typhoon event)	189	0.7(45%)^a	0.17(31%)^a	9.88(78%)^a	0.98
Morakot	105	0.22(14%) ^b	0.07(13%) ^b	4.19(33%)	0.98
Parma	84	0.48(31%) ^b	0.10(18%) ^b	5.65(45%)	0.98
2010(total)		2.04	0.65	10.98	0.94
2010(typhoon event)	63	0.09(4.4%)^a	0.03(4.6%)^a	1.45(13%)^a	0.98
Fanapi	63	0.09(4.4%) ^b	0.03(4.6%) ^b	1.45(13%)	0.98

*註：a:表示颱風貢獻該年度之百分比 b:表示佔該年颱風總量之百分比

表 4.3 2007~2010 各元素在溶解態及顆粒態上於颱風期間輸出量



	K		Na		Ca		Mg		Al		Fe		Mn		Si	
phase year \ year	Dissolve	Particulate	Dissolve	Particulate	Dissolve	Particulate	Dissolve	Particulate	Dissolve	Particulate	Dissolve	Particulate	Dissolve	Particulate	Dissolve	Particulate
2007 (typhoons)	0.29x10 ⁻²	0.584	0.45x10 ⁻²	0.182	2.5x10 ⁻²	1.51	1.22x10 ⁻²	0.228	-	2.2	-	0.98	-	1.38x10 ⁻²	-	5.92
2008 (typhoons)	0.64x10 ⁻²	0.766	1.05x10 ⁻²	0.248	5.9x10 ⁻²	0.22	2.71x10 ⁻²	0.298	-	2.71	-	1.24	-	1.78x10 ⁻²	-	7.69
2009 (typhoons)	0.18x10 ⁻²	0.22	0.39x10 ⁻²	0.07	2x10 ⁻²	0.06	0.93x10 ⁻²	0.07	-	0.74	-	0.34	-	0.48x10 ⁻²	-	2.21
2010 (typhoons)	0.13x10 ⁻²	0.04	0.02x10 ⁻²	0.01	0.36x10 ⁻²	0.01	0.21x10 ⁻²	0.01	-	0.13	-	0.07	-	0.09x10 ⁻²	-	0.4
total	0.01	1.61	0.02	0.51	0.11	0.44	0.05	0.62	-	5.79	-	2.64	-	3.73x10 ⁻²	-	16.2

Unit: Mt



表 4.4 2007~2010 蘭陽溪流域颱風與非颱風期間總懸浮顆粒(TSM)、總溶解物質(TDS)輸出量及單位面積輸出通量與世界大河比較

river	area(km ²)	Discharge(km ³)	TDS(Mt)	TSM(Mt)	TDS yield(tons/km ² *yr)	TSM load(tons/km ² *yr)
Amazon^b	6300000	6300(per year)	270(per year)	1200(per year)	43	190
Congo^b	3800000	1300(per year)	56(per year)	43(per year)	15	11
Orinoco^b	1100000	1100(per year)	28(per year)	210(per year)	25	191
Changjiang^b	1800000	900(per year)	180(per year)	470(per year)	100	261
Mississippi^b	3300000	490(per year)	140(per year)	400(per year)	42	121
Lanyung river(this study)						
2007(total)	978	2.94	0.9	25.35	1096	25920
2007(typhoon event)	978	0.9(30.7%)^a	0.21(23.4%)^a	21.41(85%)^a	256	21891
2008(total)	978	2.30	0.75	36.09	914	36902
2008(typhoon event)	978	1.26(54.5%)^a	0.26(34.4%)^a	27.91(77%)^a	317	28538
2009(total)	978	1.57	0.56	12.65	682	12935
2009(typhoon event)	978	0.7(45%)^a	0.17(31%)^a	9.88(78%)^a	207	10102
2010(total)	978	2.04	0.65	10.98	792	11227
2010(typhoon event)	978	0.09(4.4%)^a	0.03(4.6%)^a	1.45(13%)^a	32.9	1483

*註：a:表示颱風貢獻該年度之百分比 b:from Milliman and Farnsworth (2011)



第五章 結論

本研究自 2007 年至 2010 年間，針對台灣地區蘭陽溪流域，蘭陽溪大橋測站，進行(1)非颱風期間逐月的定點式懸浮顆粒採樣，以及(2)颱風期間，每四小時一次的定點式連續密集懸浮顆粒採樣，分析非颱風以及颱風期間，懸浮顆粒化性隨時序的變化。另外，也於蘭陽溪流域之主要岩層：廬山層、乾溝層、西村層、四陵砂岩，進行原岩採集及化學性質分析，經過分析結果的相互比較。本研究結果之結論如下：

1. 非颱風期間輸出之懸浮顆粒，與颱風期間所輸出之懸浮顆粒有明顯差異，非颱風期間因降雨量較小，河川流量較低，因此可能輸送之物理風化顆粒為黏土礦物伊萊石(illite)，而颱風期間因降雨強度大，河川流量高，除了原本的伊萊石(illite)外，又攜帶了更多由碳酸岩類及鋁矽酸岩類等物理風化的顆粒。
2. 颱風期間內因降雨與區域的改變，具有化性差異的顆粒，在不同時間進入河川中，整體而言，可以視為是碳酸岩類與鋁矽酸岩類的混合。研究根據懸浮顆粒鈣及鋁的濃度在颱風期間的消長，推斷在颱風的初期主要是以碳酸岩類為主的廬山層顆粒進入河川中，隨著颱風降雨強度增強，降雨區域的轉變，有更多以鋁矽酸岩為主的乾溝層、西村層亦或是四陵砂岩的顆粒進入河川中，至颱風末端時又漸轉變以碳酸岩類為主的廬山層顆粒輸出為主。
3. 本研究推估蘭陽溪流域自 2007 至 2010 年間，總懸浮顆粒(TSM)部分輸出了 85 Mt，其中 71 %為颱風所輸出；在總溶解物質(TDS)部分共輸出了 2.9 Mt，其中 23%為颱風所輸出。相較之下，對於蘭陽溪流域來說，物理風化佔了整體風化機制約 97 %，因此物理風化會是主要的風化機制。另與世界河川或海島型河川相比，懸浮顆粒(TSM)及總溶解物質(TDS)之單位面積向海洋輸出量，遠高於世界河川，顯示出蘭陽溪河川的物理及化學風化對海洋的重要。



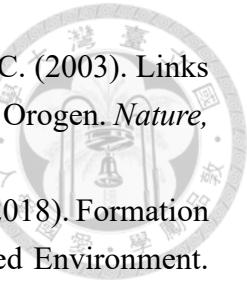
參考文獻

中文文獻

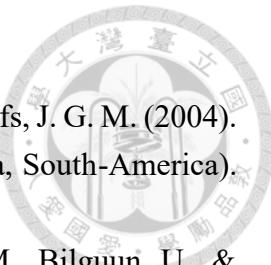
- 王程筠(2017) 海水中矽鉬複合物呈色反應機制研究。國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共 69 頁
- 何春蓀(1982) 臺灣地體構造的演變：臺灣地體構造圖說明書 台北市：經濟部。
- 李錫堤, & 費立沅. (2011). 蘭陽溪流域之山崩土石流潛在危害預測前瞻科技與管理，第 67-83 頁
- 林冠璋(2005) 陳有蘭溪流域的山崩作用在颱風及地震事件中與河流輸砂量之相對關係。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 130 頁
- 林冠璋(2010) 台灣地區之河流輸砂量與岩性、逕流量及地震之相關性。國立臺灣大學地質科學研究所博士論文，共 232 頁
- 林順斌(2010) 淡水河流域主要離子之濃度分布。國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共 91 頁
- 連凱莉(2009) 台灣小河川溶解性物質之區域性與季節性變化。國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共 92 頁
- 陳冠樟(2014) 林邊溪流域河川化學性質、輸砂量與山崩之關係。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 106 頁
- 賴怡萱(2013) 台灣小河川溶解性物質之季節性變化與極端事件影響。國立臺灣大學海洋研究所碩士論文，共 63 頁

英文文獻

- Berner, R. A. (1994). 3geocarb-II - a Revised Model of Atmospheric CO₂ over Phanerozoic Time. *American Journal of Science*, 294, 56-91.
- Carey, A. E., Lyons, W. B., & Owen, J. S. (2005). Significance of Landscape Age, Uplift, and Weathering Rates to Ecosystem Development. *Aquatic Geochemistry*, 11, 215-239.
- Carey, A. E., Nezat, C. A., Lyons, W. B., Kao, S. J., Hicks, D. M., & Owen, J. S. (2002). Trace Metal Fluxes to the Ocean: The Importance of High-Standing Oceanic Islands. *Geophysical Research Letters*, 29.
- Chen, C. T. A., Liu, J. T., & Tsuang, B. J. (2004). Island-Based Catchment-the Taiwan Example. *Regional Environmental Change*, 4, 39-48.
- Cheng, M. C., & You, C. F. (2010). Sources of Major Ions and Heavy Metals in Rainwater Associated with Typhoon Events in Southwestern Taiwan. *Journal of Geochemical Exploration*, 105, 106-116.
- Dadson, S. J., Hovius, N., Chen, H. G., Dade, W. B., Hsieh, M. L., Willett, S. D., Hu, J.



- C., Horng, M. J., Chen, M. C., Stark, C. P., Lague, D., & Lin, J. C. (2003). Links between Erosion, Runoff Variability and Seismicity in the Taiwan Orogen. *Nature*, 426, 648-651.
- Fan, L. F., Lin, S., Hsu, C. W., Tseng, Y. T., Yang, T. F., & Huang, K. M. (2018). Formation and Preservation of Authigenic Pyrite in the Methane Dominated Environment. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 138, 60-71.
- Hilton, R. G., Galy, A., Hovius, N., Kao, S.-J., Horng, M.-J., & Chen, H. (2012). Climatic and Geomorphic Controls on the Erosion of Terrestrial Biomass from Subtropical Mountain Forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 26.
- Hsu, F. H., Su, C. C., Wang, C. H., Lin, S., Liu, J., & Huh, C. A. (2014). Accumulation of Terrestrial Organic Carbon on an Active Continental Margin Offshore Southwestern Taiwan: Source-to-Sink Pathways of River-Borne Organic Particles. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91, 163-173.
- Huang, K. M., & Lin, S. (2003). Consequences and Implication of Heavy Metal Spatial Variations in Sediments of the Keelung River Drainage Basin, Taiwan. *Chemosphere*, 53, 1113-1121.
- Jacobson, A. D., & Blum, J. D. (2003). Relationship between Mechanical Erosion and Atmospheric CO₂ Consumption in the New Zealand Southern Alps. *Geology*, 31, 865-868.
- Li, C. S., Shi, X. F., Kao, S. J., Chen, M. T., Liu, Y. G., Fang, X. S., Lu, H. H., Zou, J. J., Liu, S. F., & Qiao, S. Q. (2012). Clay Mineral Composition and Their Sources for the Fluvial Sediments of Taiwanese Rivers. *Chinese Science Bulletin*, 57, 673-681.
- Lin, S., Huang, K. M., & Chen, S. K. (2002). Sulfate Reduction and Iron Sulfide Mineral Formation in the Southern East China Sea Continental Slope Sediment. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*, 49, 1837-1852.
- Lyons, W. B., Carey, A. E., Hicks, D. M., & Nezat, C. A. (2005). Chemical Weathering in High-Sediment-Yielding Watersheds, New Zealand. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 110.
- Meybeck, M. (1987). Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River Dissolved Loads. *American Journal of Science*, 287, 401-428.
- Milliman, J. D., & Farnsworth, K. L. (2011) River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis. Cambridge: Cambridge University Press.
- Milliman, J. D., & Syvitski, J. P. M. (1992). Geomorphic Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean - the Importance of Small Mountainous Rivers. *Journal of Geology*, 100, 525-544.
- Price, J. R., & Velbel, M. A. (2003). Chemical Weathering Indices Applied to Weathering Profiles Developed on Heterogeneous Felsic Metamorphic Parent Rocks.



- Chemical Geology*, 202, 397-416.
- Smolders, A. J. P., Hudson-Edwards, K. A., Van der Velde, G., & Roelofs, J. G. M. (2004). Controls on Water Chemistry of the Pilcomayo River (Bolivia, South-America). *Applied Geochemistry*, 19, 1745-1758.
- Soyol-Erdene, T. O., Lin, S., Tuuguu, E., Daichaa, D., Huang, K. M., Bilguun, U., & Tseveendorj, E. A. (2019). Spatial and Temporal Variations of Sediment Metals in the Tuul River, Mongolia. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 32420-32431.
- Stallard, R. F., & Edmond, J. M. (1983). Geochemistry of the Amazon .2. The Influence of Geology and Weathering Environment on the Dissolved-Load. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 88, 9671-9688.
- Wu, Y., Zhang, J., Liu, S. M., Zhang, Z. F., Yao, Q. Z., Hong, G. H., & Cooper, L. (2007). Sources and Distribution of Carbon within the Yangtze River System. *EstuarineCoastal and Shelf Science*, 71, 13-25.