

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

河口帶潮汐效應對水庫排砂之懸浮泥砂運移及濃度時
空變化的影響

Tidal pumping effects on the accumulation of suspended
sediment in estuarine regions induced by upstream
reservoir effluent

李于萱

Yu-Hsuan Li

指導教授：施上粟 博士

Advisor: Shang-Shu Shih, Ph.D.

中華民國 111 年 7 月

July, 2022

國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

**National Taiwan University Master Thesis
Oral Examination Committee Approval**

河口帶潮汐效應對水庫排砂之懸浮泥砂運移及濃度時空變化的影響

Tidal pumping effects on the accumulation of suspended sediment in estuarine regions induced by upstream reservoir effluent

本論文係李于萱(R09521311)在國立臺灣大學土木工程學系水利工程組完成之碩士學位論文，於民國 111 年 7 月 26 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

Yu-Hsuan Li (R09521311) completed this master thesis at the Department of Civil Engineering Hydraulic Engineering on July 26, 2022 and passed the oral examination reviewed by the following examination committee members.

口試委員 Oral examination committee members :

施上粟

(指導教授 Advisor)



游景雲



俞維昇



系主任

謝尚賢



致謝



回憶起當時就讀碩班的初衷，僅是想讓自己少了一點遺憾，短短兩年呼嘯而過，卻走過充滿酸甜苦辣的研究道路，很高興在過程中我並沒有選擇放棄，才能達成這個人生里程碑，現在，我終於要脫離學生身分進入下一個人生階段，期許自己對生活永遠充滿熱忱，並努力地往下個目標前進。

首先，必須感謝我的指導教授施上栗老師，謝謝老師當初願意收我為施門的一分子，讓我在碩班期間經歷許多磨練且有所成長，老師對我總是充滿耐心的教導，並持續給予大大的支持與鼓勵，讓我能對自己更加有自信。在研究上，老師也指引我方向、給我相當多協助，並帶領我順利完成這篇論文的寫作，謹此致上最誠摯的感謝。接著，想感謝俞維昇校長以及游景雲教授，謝謝兩位老師百忙之中願意擔任口試委員，並對我論文詳細的批閱，也給予我許多寶貴的建議以及啟發，使本論文的內容能更加完整。

感謝施門的好夥伴宸羽以及敬驛，這兩年來無論是研究或是生活上遇到困難時我們都能互相扶持，還可以講一些無聊的垃圾話讓心情保持愉悅，很幸運研究生生活有你們的陪伴。謝謝耀文學長、曉鄆、丰聖、榮憲，一起出差的日子雖然常常快被太陽烤焦，但都在我心中留下美好回憶。謝謝大學同學兼室友孟傑跟文育，讓我在台北的生活不感到孤單，在我壓力大時給我安慰、還會幫我買飯，有你們真好。謝謝姿廷、庭芳、小哈、仁群，讓我的生活充滿樂趣。

謝謝男朋友峻瑋一直以來的陪伴，在忙碌之餘帶我出門散心、打球放鬆心情，你給我最暖心的鼓勵，是我能相信自己並堅持下去最重要的動力。最後，感謝我的家人對我的支持，從小讓我能無後顧之憂且不愁吃穿，追求自己想做的事，未來希望我也能有能力回饋你們，謝謝，我愛你們。

中文摘要



河口潮間帶是河川與海洋之間物質、能量交換的重要區域，具有高生產力的河口海岸生態系統，因同時受到河流流量及潮汐相互作用而形成複雜流場，並影響懸浮泥砂的傳輸行為。淡水河系是國內最大的河口生態系統之一，其上游包含三大支流及兩座水庫，為了緩解水庫淤積問題，颱洪期間水利單位透過空庫排砂、異重流排砂等排洪排砂操作方式，減緩水庫淤積速度以延長水庫使用壽命，但此舉勢必排放大量庫區泥砂進入下游河道，對水體濃濁度及生態系統有一定的影響，但相關研究仍相對較少。為了解水庫有排砂之颱風事件發生及過後，淡水河流域懸浮泥砂濃度變化以及潮汐對懸浮泥砂傳遞之作用，本研究使用 EFDC 模式的水動力和泥砂傳輸模式進行模擬，並收集 2015 年蘇迪勒及杜鵑颱風期間水理、泥砂數據，作為模式輸入邊界條件及模式率定和驗證之用。

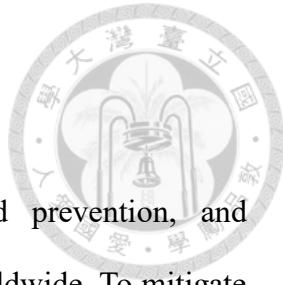
以「脈衝排放」方式計算蘇迪勒颱風的平均停留時間 (t_m)，結果發現因上游水庫泥砂排放時間不同導致 t_m 有明顯的差異，河口 TE02 斷面的 t_m 平均約 5.3-36 小時，此結果顯示停留時間與排放時的河川流量與潮汐流量綜合結果有關，在回復潮汐作用後，因新店溪流量、泥砂量影響使 t_m 仍短暫，因此推測颱風過後河口懸浮泥砂濃度居高不下應受到上游泥砂量持續輸入所致。另以「連續排放」方式，評估各河段受到颱風期間產生高濃度泥砂的影響，不同斷面估計現況影響河口濃度泥砂的綜合性平均停留時間 (t_{cm}) 約 3 天 7 小時至 3 天 15 小時、總停留時間 (T_b) 約 15 天至 18 天左右，顯示颱風後淡水河口濃度高於平時許久。比較現況和情境模擬結果發現 ($\Delta = \text{「現況」} - \text{「情境」}$)：(1)「TDL 情境」， $\Delta t_{cm} = 0 \sim 17.70$ 小時、 ΔT_b 除 TE02 外無明顯差異，顯示潮汐效應主要的影響為提高泥砂濃度而非延長總停留時間，然漲潮期間出海口泥砂如無法傳遞回河口，淡水河下游河道受高濃度泥砂影響的程度將會降低許多；(2)「Tri 情境」， $\Delta t_{cm} = 3.02 \sim 7.64$ 小時、 $\Delta T_b = 0.5$ 小時~1 天 3 小時 (HHB-GDB)，表示新店溪集水區崩塌產生大量泥砂，導致下游河道泥砂停留時間延長；(3)「BdE 情境」， $\Delta t_{cm} = 0.63 \sim 3.13$ 小時、 $\Delta T_b = 1$ 天 2 小時~2 天 6 小時



(HHB-GDB)，研究顯示支流量較大產生底泥沖刷，也易導致河口受影響時間變長；(4)「SLR 情境」， $\Delta t_{cm}=1.13\sim3.41$ 小時、 $\Delta T_b=-0.50\sim15.50$ 小時，此情境因海平面上升導致河口水體積增加而稀釋濃度，及因流速減緩而增加沉積，反而使整體受影響的時間縮短；(5)「FRI 情境」， $\Delta t_{cm}=-0.48\sim-3.84$ 小時、 $\Delta T_b=-4$ 天 11 小時~8 天 6 小時，此情境結果顯示上游支流量增加導致入流泥砂通量變大、沖刷及挾砂能力提升，整體受影響時間變長。

關鍵詞：河口、颱風事件、水庫排砂、潮汐作用、懸浮泥砂、平均停留時間

ABSTRACT



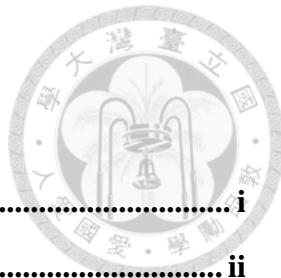
Reservoir sedimentation effects on water resources, flood prevention, and environmental management problems are recognized to be vital worldwide. To mitigate the sediment accumulation in reservoirs, the Water Resources Agency in Taiwan attempts to enhance sediment scours by hydraulic flushing and density current venting during typhoon events. The effluent sediment from reservoirs usually results in higher suspended sediment concentrations (SSC) downstream and impacts the aquatic environment. Unfortunately, there are few pieces of research discussing this issue. The estuary is a high-productivity ecosystem and a critical zone that exchanges sediment and nutrients between rivers and the ocean. The complicated flow field of the interaction among tidal and river currents dominates suspended sediment transport behavior. In order to understand suspended sediment transport after a typhoon event with sediment flushing from the Shihmen reservoir in northern Taiwan, the EFDC model simulations were conducted in the Tanshuei river estuary. The model was calibrated and verified by comparing the modeling results with the field investigation of hydraulic and sediment data during typhoon Soudelor and typhoon Dujuan in 2015.

The mean residence time (t_m) was calculated using the pulsed input method during the Soudelor typhoon period. We found apparent differences in the t_m due to the different discharge times of the reservoir sediments. The t_m of the estuary TE02 section was about 5.3-36 hours, indicating that the mean residence time is related to the comprehensive results of river flow and tidal currents at the sediment effluent time. In addition, the t_m was short because the river flow and sediment of the Hsindian Creek continued to influence after the typhoon. We concluded that the estuary remained at a high SSC because of the continuous tributary sediment inputs. Then, we evaluated the effect of high SSC at different sections during the typhoon in terms of continuous sediment discharge

conditions. The findings showed that the comprehensive mean residence times (t_{cm}) and the total residence times (T_b) were from 3d 7hr to 3d 15hr and from 15d to 18d, respectively. The differences in the current situation and each scenario revealed (Δ =current – scenario): (i) In the TDL scenario, $\Delta t_{cm}=0\sim17.70$ hr, and there was no significant difference in ΔT_b excepting for TE02. We found that the tidal effect mainly increased SSC rather than prolonging the total residence time. If no sediment was capable of moving upstream with the flood tide, the impact of sediments could be much lower. (ii) In the Tri scenario, $\Delta t_{cm}=3.02\sim7.64$ hr and $\Delta T_b=0.5h\sim1d\ 3h$ (HHB-GDB). The result indicated that the residence times were longer owing to the collapse of the Hsintien Creek Watershed. (iii) In the BdE scenario, $\Delta t_{cm}=0.63\sim3.13$ hr and $\Delta T_b=1d\ 2h\sim2d\ 6h$ (HHB-GDB). The result showed that sediments from bed erosion could have much influence on the estuary region. (iv) In the SLR scenario, $\Delta t_{cm}=1.13\sim3.41$ hr and $\Delta T_b=-0.50\sim15.50$ hr. The residence times were shorter along with dilution and sediment deposition due to the rising sea-level effect. (v) In the FRI scenario, $\Delta t_{cm}=-0.48\sim-3.84$ hr and $\Delta T_b=-4d\ 11hr\sim8d\ 6hr$. Since upstream sediment fluxes were larger and the capability of flushing and entraining enhanced, the residence times were found to be longer in the increasing upstream flow condition.

Keywords: estuary, typhoon event, reservoir sediment flushing, tidal action, suspended sediment, mean residence time

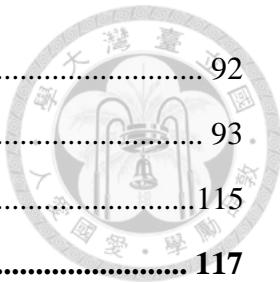
目錄



口試委員審定書	i
致謝	ii
中文摘要	iii
ABSTRACT	v
目錄	vii
圖目錄	x
表目錄	xiii
第一章 緒論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	1
1.3 研究內容	2
1.3.1 論文架構	2
1.3.2 研究流程	3
第二章 文獻回顧	5
2.1 河口懸浮泥砂	5
2.2 懸浮泥砂對水質之影響	6
2.3 懸浮泥砂對水中生物之影響	8
2.4 淡水河系模式評估懸浮泥砂案例	9
2.5 停留時間計算方法	11
第三章 研究方法	14
3.1 環境流體動力學模型（Environmental Fluid Dynamic Code，EFDC）	14
3.2 水動力模式	14
3.2.1 水平和垂直網格系統	15
3.2.2 基本水動力方程式	16
3.2.3 垂直紊流閉合公式	19
3.3 泥砂傳輸模式	20

3.3.1 懸浮泥砂傳輸之控制方程式.....	21
3.3.2 凝聚性泥砂之沉降、沉積及侵蝕.....	22
3.4 停留時間指標	25
第四章 模式建立及驗證	29
4.1 研究地點與颱風事件	29
4.1.1 研究地點	29
4.1.2 颱風事件選擇	30
4.2 資料蒐集及整理	31
4.2.1 地形資料	32
4.2.2 水位、流量資料	32
4.2.3 水溫資料	37
4.2.4 懸浮泥砂濃度資料	38
4.2.5 懸浮泥砂與底床泥砂粒徑資料	41
4.3 EFDC 模式建立	43
4.3.1 網格建立	45
4.3.2 初始條件與邊界條件	47
4.3.3 泥砂粒徑之簡化	51
4.4 模式驗證	52
4.4.1 水理模式	52
4.4.2 泥砂傳輸模式	60
第五章 現況及情境分析	66
5.1 現況分析	66
5.1.1 停留時間	66
5.1.2 不同時間下排砂之平均停留時間	80
5.2 情境分析	87
5.2.1 去除潮汐回流泥砂影響(Tidal effect, TDL)	87
5.2.2 去除支流泥砂影響(Tributary effect, Tri)	89
5.2.3 去除底床沖刷影響(Bed Erosion effect, BdE)	91

5.2.4 海平面上升(Sea Level Rise, SLR).....	92
5.2.5 上游入流量增加(Flow Rate Increase, FRI)	93
5.3 小結	115
第六章 結論與建議	117
6.1 結論	117
6.2 建議	119
參考資料	121
附錄	131



圖目錄

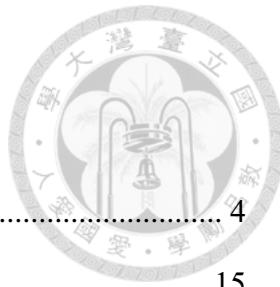


圖 1.3-1、整體研究流程圖	4
圖 3.2-1、EFDC 模式的基本概念圖（修改至 DSi, 2020）	15
圖 3.2-2、垂向座標系統轉換圖（DSi, 2020）	16
圖 3.4-1、綜合性平均停留時間和總停留時間計算流程	27
圖 3.4-2、平均停留時間計算流程	28
圖 4.1-1、石門水庫重要設施位置圖（北水局石門水庫網站）	30
圖 4.2-1、秀朗橋水位站 2015 年原率定曲線、修正曲線及當年水位流量實測值	34
圖 4.2-2、蘇迪勒颱風模擬期間之石門水庫放流量	35
圖 4.2-3、杜鵑颱風模擬期間之石門水庫放流量	36
圖 4.2-4、2015 年 8 月 6 日 0 時至 2015 年 9 月 2 日 0 時水位率定之流量	36
圖 4.2-5、2015 年 9 月 27 日 0 時至 2015 年 10 月 6 日 0 時水位率定之流量	37
圖 4.2-6、蘇迪勒颱風不同量測測站之懸浮固體濃度變化圖 (a)浮洲橋 (b)新海橋 (c)華中橋 (d)台北橋 (e)重陽橋 (f)大直橋 (g)淡水	39
圖 4.2-7、杜鵑颱風不同量測測站之懸浮固體濃度變化圖 (a)浮洲橋 (b)新海橋 (c)華中橋 (d)台北橋 (e)大直橋 (f)淡水	40
圖 4.3-1、模式區域地理位置	43
圖 4.3-2、模式區域底部地形高程	44
圖 4.3-3、模式網格和水位、懸浮泥砂濃度測站位置	46
圖 4.3-4、模式邊界網格設置 (a)入流邊界-大漢溪城林橋 (b)入流邊界-新店溪中正橋 (c)入流邊界-基隆河百齡橋 (d)出流邊界-淡水河口	47
圖 4.3-5、蘇迪勒颱風事件模擬之(a)水動力入流邊界條件 (b)水動力出流邊界條件 (c)泥砂傳輸邊界條件	49
圖 4.3-6、杜鵑颱風事件模擬之(a)水動力入流邊界條件 (b)水動力出流邊界條件 (c)泥砂傳輸邊界條件	50

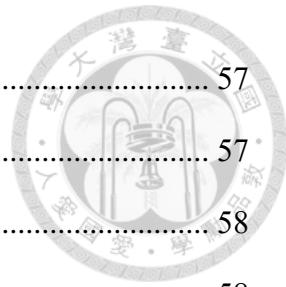


圖 4.4-1、模式水位率定結果（新海橋測站）	57
圖 4.4-2、模式水位率定結果（台北橋測站）	57
圖 4.4-3、模式水位率定結果（土地公鼻測站）	58
圖 4.4-4、模式水位驗證結果（新海橋測站）	58
圖 4.4-5、模式水位驗證結果（台北橋測站）	59
圖 4.4-6、模式水位驗證結果（土地公鼻測站）	59
圖 4.4-7、模式懸浮泥砂濃度率定結果（新海橋測站）	63
圖 4.4-8、模式懸浮泥砂濃度率定結果（台北橋測站）	64
圖 4.4-9、模式懸浮泥砂濃度率定結果（重陽橋測站）	64
圖 4.4-10、模式懸浮泥砂濃度驗證結果（新海橋測站）	65
圖 4.4-11、模式懸浮泥砂濃度驗證結果（台北橋測站）	65
圖 5.1-1、淡水河系泥砂濃度觀察斷面位置圖	67
圖 5.1-2、上游段斷面之原懸浮泥砂濃度歷線、門檻值和水位高程變化	72
圖 5.1-3、下游段斷面之原懸浮泥砂濃度歷線、門檻值和水位高程變化	73
圖 5.1-4、上游段斷面之原懸浮泥砂濃度歷線、門檻值和流速變化	74
圖 5.1-5、下游段斷面之原懸浮泥砂濃度歷線、門檻值和流速變化	75
圖 5.1-6、篩除門檻值後上游段斷面之新懸浮泥砂濃度歷線和水位高程變化	76
圖 5.1-7、篩除門檻值後下游段斷面之新懸浮泥砂濃度歷線和水位高程變化	77
圖 5.1-8、篩除門檻值後上游段斷面之新懸浮泥砂濃度歷線和流速變化	78
圖 5.1-9、篩除門檻值後下游段斷面之新懸浮泥砂濃度歷線和流速變化	79
圖 5.1-10、脈衝時間點之示意圖	81
圖 5.1-11、模式設定凝聚性泥砂參數	81
圖 5.1-12、模式編排種類泥砂及其入流時間	82
圖 5.1-13、脈衝時間點 t1-t3 之各斷面量測懸浮泥砂濃度	85
圖 5.1-14、脈衝時間點 t4-t6 之各斷面量測懸浮泥砂濃度	86
圖 5.2-1、去除潮汐回流泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化 ...	95



圖 5.2-2、去除潮汐回流泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化.....	96
圖 5.2-3、篩除門檻值後去除潮汐回流泥砂影響之新濃度歷線和水位高程變化...	97
圖 5.2-4、篩除門檻值後去除潮汐回流泥砂影響之新濃度歷線和流速變化.....	98
圖 5.2-5、去除支流(新店溪)泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化	
.....	99
圖 5.2-6、去除支流(新店溪)泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化..	100
圖 5.2-7、篩除門檻值後去除支流(新店溪)泥砂影響之新濃度歷線和水位高程變化	
.....	101
圖 5.2-8、篩除門檻值後去除支流(新店溪)泥砂影響之新濃度歷線和流速變化 ..	102
圖 5.2-9、去除底床沖刷泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化.	103
圖 5.2-10、去除底床沖刷泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化.....	104
圖 5.2-11、篩除門檻值後去除底床沖刷泥砂影響之新濃度歷線和水位高程變化	105
圖 5.2-12、篩除門檻值後去除底床沖刷泥砂影響之新濃度歷線和流速變化.....	106
圖 5.2-13、海平面上升與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化.....	107
圖 5.2-14、海平面上升與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化.....	108
圖 5.2-15、篩除門檻值後海平面上升之新濃度歷線和水位高程變化.....	109
圖 5.2-16、篩除門檻值後海平面上升之新濃度歷線和流速變化.....	110
圖 5.2-17、上游入流量增加與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化.....	111
圖 5.2-18、上游入流量增加與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化.....	112
圖 5.2-19、篩除門檻值後上游入流量增加之新濃度歷線和水位高程變化.....	113
圖 5.2-20、篩除門檻值後上游入流量增加之新濃度歷線和流速變化.....	114

表目錄



表 4.2-1、邊界條件採用之水位站座標位置及其率定曲線.....	33
表 4.2-2、秀朗橋原率定曲線及修正率定曲線.....	34
表 4.2-3、率定和驗證期間之水位站座標位置、資料數.....	35
表 4.2-4、環保署 2015 年 8、9 月水溫監測數據.....	37
表 4.2-5、環保署 2015 年 8 月至 10 月懸浮固體濃度監測數據.....	41
表 4.2-6、蘇迪勒颱風懸浮泥砂量測最大濃度中值粒徑.....	42
表 4.2-7、杜鵑颱風懸浮泥砂量測最大濃度中值粒徑.....	42
表 4.2-8、2008 年 7 月淡水河系底床表層泥砂試驗結果.....	42
表 4.3-1、水動力模式及泥砂傳輸模式之參數採用	44
表 4.4-1、NSE 之評斷標準 (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013).....	53
表 4.4-2、 R^2 之評斷標準 (Bae and Seo, 2018)	53
表 4.4-3、模式各區域率定參數值	55
表 4.4-4、蘇迪勒期間水位率定之各率定指標值	56
表 4.4-5、杜鵑期間水位驗證之各率定指標值	56
表 4.4-6、輸砂模式文獻參數值彙整	62
表 4.4-7、蘇迪勒期間懸浮泥砂濃度率定之各率定指標值	63
表 4.4-8、杜鵑期間懸浮泥砂濃度驗證之各率定指標值	63
表 5.1-1、前段時間篩選之停留時間計算結果	69
表 5.1-2、後段時間篩選之停留時間計算結果	70
表 5.1-3、不同脈衝時間點之選擇	80
表 5.1-4、各脈衝時間點下不同斷面位置計算之平均停留時間	84
表 5.2-1、去除潮汐回流泥砂影響 (TDL) 之停留時間	88
表 5.2-2、去除支流泥砂影響 (Tri) 之停留時間	90
表 5.2-3、去除底床沖刷影響 (BdE) 之停留時間	92

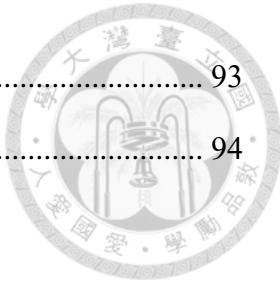


表 5.2-4、海平面上升 (SLR) 之停留時間.....	93
表 5.2-5、上游入流量增加 (FRI) 之停留時間.....	94

第一章 緒論



1.1 研究背景

坐落於大漢溪上游的石門水庫屬北台灣地區重要的多功能型水庫，具提供民生用水、發電、防洪及觀光等多項功能，然而，因攔阻了原河川的自然發展，在長年營運下，石門水庫淤砂的問題相對嚴重。為了延長水庫使用年限，政府開始規劃在颱風期間進行排洪減淤操作。颱風期間水庫的排洪排砂操作會同時產生洪水以及大量泥砂進入河道，此高濃度懸浮泥砂輸送到下游河口後，可能會受潮汐效應影響而延緩其流出出海口的時間，造成下游感潮段於該期間的水質狀態進一步變差，但其影響程度、影響時間迄今未有較詳盡的研究。

林幸助、施上粟（2015）為了解石門水庫排洪操作是否為導致基隆河、淡水河發生死魚事件之原因，在2015年曾進行下游河道生態調查研究，雖發現高濃度泥砂並非大量死魚事件主要肇因，但河道中的高懸浮泥砂濃度對水域環境仍有負面衝擊，是重要的水質指標。尤其在颱風過後，感潮河口段中物質的移動會同時受到河川流量和潮汐變動影響，而可能使來自上游的泥砂、污染物無法順利排出河口，若其長時間高濃度停留在下游河道中，極可能會使該處水質受到污染。而水庫排砂、集水區土石崩塌導致大量泥砂，也可能加遽此現象，導致水體變得混濁、透明度降低且水質狀態變差，不僅可能影響水中生物新陳代謝、移動行為，亦可能造成河道淤積阻塞的情況，使河道通洪受到影響，且淡水河下游河段具多處碼頭為觀光勝地，受損的水體亦會造成民眾觀感不佳。因此，在颱風期間水庫排洪排砂以及集水區產砂，對下游感潮河段之懸浮泥砂濃度變化及其停留時間是值得深入探討的內容。

1.2 研究目的

過去國內有關水庫清淤以增加庫容或減緩淤積的相關研究，多著重於水庫管



理、永續性和最佳化操作 (Wang et al., 2018 ; Chen et al., 2017)，只有少部分的學者對下游河道的影響進行討論 (Hsieh et al., 2022 ; Lee et al., 2022)，且多是談地貌的改變。Lui et al. (2004) 認為水庫泥砂沖刷 (reservoir sediment flushing) 會對下游河道的水生環境造成影響，例如高濃度的懸浮泥砂會改變魚類的生活條件 (Gallerano et al., 2012)，因此，水庫增加排砂雖能延長水庫壽命，但實務上需要與下游環境所受衝擊程度進行權衡考量。為延長石門水庫壽命，颱風期間降雨充足下會進行排砂操作，下游河道不免受到庫區泥砂以及各支流產生洪水對河床沖刷之泥砂所影響，進而導致颱風入侵期間甚至過後淡水河系河道中懸浮泥砂濃度比平時來的高許多，然潮汐之漲潮效應會使感潮河段的泥砂在流至外海的過程受到阻礙。影響下游河道生態系統的懸浮泥砂因素，不僅是單純考慮濃度大小，其暴露持續時間的長短也是非常關鍵的因子。河道中的懸浮泥砂因能改變水體透光度又有吸附污染物質之能力，若濃度長時間過高可能對河口水質、生態環境產生破壞。

因河口水理及泥砂傳輸的過程較複雜，本研究希望能建立一數值模式來探討上游水庫排砂運移受到潮汐推移之影響，藉由模擬有排砂之颱風事件，對感潮河段因流場變動、大量泥砂入流影響之懸浮泥砂濃度變化作分析，以連續排放泥砂觀點，探討模擬期間河口各處受水庫、上游集水區之高濃度泥砂影響，並評估其綜合性平均停留時間和總停留時間，另亦想了解石門水庫排砂和大漢溪泥砂因受到不同程度的流量推動與有無潮汐作用聯合影響的傳輸行為，故以脈衝排放觀點估計泥砂停留於河口的時間，期望本研究能對未來水庫進行排砂操作決策時提供參考的依據。

1.3 研究內容

1.3.1 論文架構

本研究共分為六個章節，內容簡述如下。



第一章 緒論

敘述本研究的背景、目的、論文基本架構和研究流程。

第二章 文獻回顧

概述河口中懸浮泥砂對於水生環境造成影響、回顧過去淡水河系輸砂模式模擬案例以及不同評估停留時間的方法。

第三章 研究方法

簡述本研究使用之 EFDC 水動力模式和凝聚性泥砂傳輸模式的基本理論以及針對颱風事件探討不同面向之懸浮泥砂停留時間計算方式。

第四章 數值模式建立

說明研究區域與颱風事件選用、資料蒐集、網格設計、水動力和凝聚性泥砂傳輸模式之建立、率定驗證與模擬結果。

第五章 現況及情境分析

估計現況之綜合性平均停留時間、總停留時間以及石門水庫、大漢溪上游一小時排砂的平均停留時間；設計不同情境評估停留時間（綜合性平均停留時間、總停留時間）與現況結果進行比較和分析。

第六章 結論與建議

針對研究結果進行總結，並提出模式未來可改善的部分以及建議可深入討論的方向。

1.3.2 研究流程

研究架構概略分為以下四個部分，研究流程如圖 1.3-1 所示：

1. 選擇研究區域和有水庫排砂颱風事件並蒐集各項模式所需重要數據資料，包含地形高程、水溫、出入邊界流量、水位和懸浮泥砂濃度等，後續建立二維模式曲線正交網格進行水動力和凝聚性泥砂傳輸模擬。



2. 應用 EFDC 模式進行水動力和凝聚性泥砂傳輸數值模擬，其中以蘇迪勒颱風事件(2015/8/6-2015/8/22)作為水動力和凝聚性泥砂參數率定依據，再由杜鵑颱風事件(2015/9/27-2015/10/13)進行模式驗證來證明模式之可靠性。
3. 使用蘇迪勒颱風事件作為現況分析，為研究颱風過後泥砂受潮汐推移影響，將模擬時間延長並假設該段時間上游入流泥砂濃度已回復至平時，藉此計算綜合性平均停留時間和總停留時間，以及不同時間下石門水庫和大漢溪上游一小時入流泥砂的平均停留時間。
4. 設計不同情境進行模擬分析，以了解包括：潮汐作用、新店溪入流泥砂、底床沖刷泥砂以及因氣候變遷導致之海平面上升和上游支流流量變化，在水庫排砂的颱風事件中對河口懸浮泥砂濃度之影響程度，並與蘇迪勒颱風事件實際情況之綜合性平均停留時間、總停留時間作比較分析。

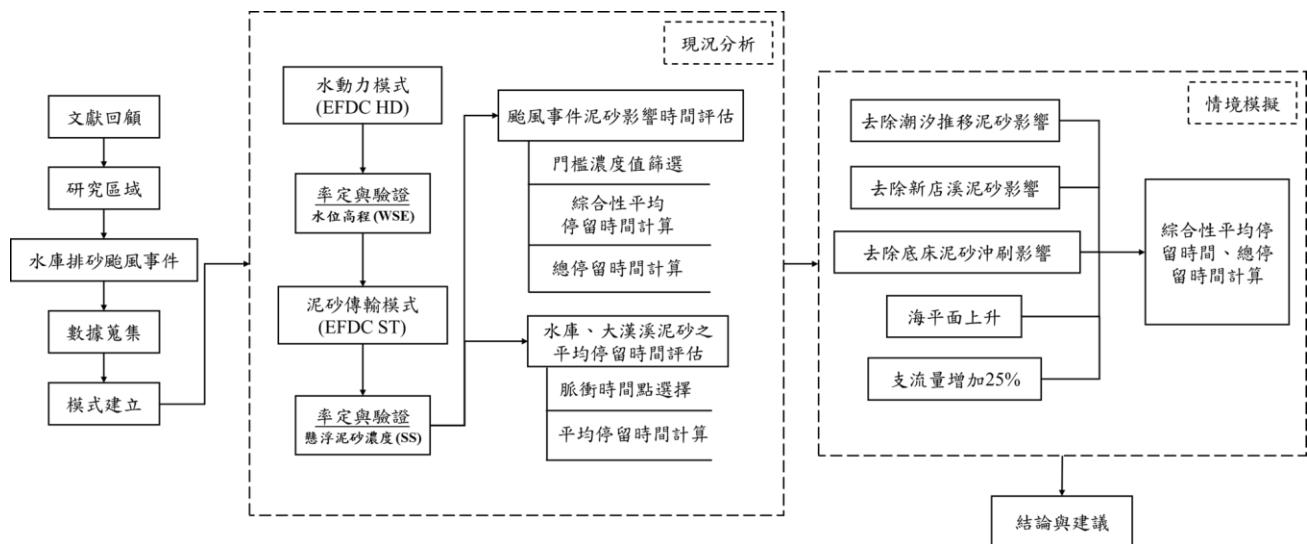


圖 1.3-1、整體研究流程圖

第二章 文獻回顧



2.1 河口懸浮泥砂

河口地區是上游淡水河流流動到外海的主要通道 (Gibson et al., 2002)，因受潮汐作用，成為兩者間水體、泥砂 (sediment) 交換的重要區域 (Chatterjee et al., 2007)。其中，泥砂顆粒會因流況而懸浮、傳輸、沉積，也因此對於河流、湖泊和沿海生態系統的物理化學循環均相當重要 (Kjelland et al., 2015)。泥砂運移過程通常被區分成底床載 (bed load) 和懸浮載 (suspended load) 兩大類具備造床能力，及沖洗載 (wash load)。此類不具造床能力，底床載指沿著底床以滾動、躍移等方式移動的較大粒徑泥砂，而懸浮載則是受紊流及平流影響而以懸浮方式於水體傳輸中的較小顆粒泥砂 (一般為粒徑小於 $62 \mu\text{m}$ 的黏土或坋土) (Garcia, 2008)。

根據 Liu and Huang (2009)，泥砂動力機制受到許多自然因素和人為因素的影響，包括潮汐、波浪、河川流量、風、海平面改變和水流都會改變河口感潮帶懸浮泥砂的傳輸及分布 (Muralidharan et al., 2015)。Kjelland et al. (2015) 認為懸浮泥砂負載 (load)、頻率以及其事件發生的時間與人類行為 (如疏濬) 有直接關係，與降雨模式的改變、溫度上升等氣候變遷問題間接相關。平時河川就挾帶懸浮泥砂顆粒、營養鹽和污染物等物質至下游河口帶，且通常隨著集水區面積增加，使其挾帶泥砂等物質的能力隨之上升 (Julian, 2002)。一般當降雨量增加時 (如洪汛時期)，集水區因受到沖刷而有更大量的泥砂產量，此時河道懸浮泥砂濃度也因此大幅提升 (Pak et al., 2015)。本研究所討論的颱風時期水庫排砂，引發河道懸浮泥砂濃度大幅提高，又因河床底泥再起懸、邊坡沖刷等作用，進一步增加水體懸浮泥砂、有機物和營養鹽濃度，使下游河口帶水質特性出現劇烈變化。



2.2 懸浮泥砂對水質之影響

總懸浮固體 (total suspended solids) 常作為懸浮泥砂 (suspended sediments) 的量度 (measure)，而懸浮固體是判斷水體品質的重要指標 (Pak et al., 2015)，因此，總懸浮固體和其他常見的水質參數包含葉綠素-a、濁度和鹽度等，都常被用以評估水生生態系統的健康程度 (Liu and Huang, 2009)。另根據國內環境保護署 (TEPA) 的規範，河川污染指標 (RPI) 由四個水質參數組成：懸浮固體 (suspended solids；SS)、生化需氧量、溶氧和氨氮，其中懸浮固體 SS 主要組成一般是泥砂，Bilotta et al. (2008) 亦認為濁度及懸浮固體濃度是重要的河川污染評估項目。水庫排砂勢必會提高下游河道懸浮泥砂濃度，其影響水質的物化及生物機制為何？以及可能造成哪些環境衝擊？以下進行重點回顧。

濁度反映水的光學特性，代表光入射水體時被吸收、散射的程度，與砂、淤泥、黏土、有機物、浮游生物或其他微生物所組成的懸浮物質有關 (ASTM International, 2003)，因此，大多情況下水中懸浮固體濃度、濁度和水透明度 (water clarity) 存在相關性 (Davies-Colley and Smith, 2001；Liu and Huang, 2009)。然而，濁度與濃度間的關係，仍需要考量懸浮泥砂顆粒粒徑大小、形狀等物理特性 (Merten et al., 2014)。濁度是水生系統中關鍵水質參數之一，因為它對補償點 (compensation point) (指植物行光合作用與呼吸作用相等時的平衡點) 具重要影響，是決定沉水植物 (submerged aquatic vegetation, SAV) 分佈的關鍵因素 (Batuik et al., 1992；Berry et al., 2003)。往往因河口中濁度上升，對水體透光有負面效果，除了可能對水生生物的棲地品質產生變化外，也可能降低植物行光合作用能力，進而降低水中溶氧 (Kirk, 1994)。此外，濁度也會影響視覺生物 (sighted organisms) 的反應距離，並改變其獵捕的行為，或是造成生物選擇或被迫遷移到其他棲地，即使被捕食的風險會提高 (Miner et al., 1996；Ranåker et al., 2012)。

而當水體濁度過高時，淨水廠、供水系統需要花費更多時間與經費進行淨化處理 (Kundell and Rasmussen, 1995)，有時甚至無法處理，導致出現缺水危機，2015



年的蘇迪勒颱風就曾引起新店溪濁度飆高，導致台北地區民生供水中斷。此外，因濁度過高的水體美觀程度較差，人們容易對該水域提供娛樂性、適用性的服務給予負面的評價 (Smith et al., 1995)。河口中懸浮泥砂傳輸情形不僅影響濁度變化，亦可能導致河道和港灣淤積、河岸沖蝕，為處理這些問題需進行昂貴的疏浚操作或是建設河岸保護措施，同時引發生態破壞或經濟方面的困難 (Liu et al., 2002)。因此，過去已發展許多結合輸砂模式與地貌模式 (morphological model) 的數值模型來進行相關研究 (Sam et al., 2004 ; Amoudry et al., 2011)。Grasso et al. (2019) 發現，地形幾何特性會影響潮汐作用力，窄深型河道可能使潮汐振幅加大 (tidal amplification)，並減少潮汐不對稱性延時 (tidal duration asymmetry)，而潮汐作用力及潮差的改變也會反過來影響懸浮泥砂濃度分布。

另外，水溫是相當重要的水質特性驅動條件，對於物理 (水理特性)、化學 (溶氧、化學反應速率)、生物 (生長和代謝速度) 方面均會有直接或間接的影響 (Manasrah et al., 2006 ; Ogata et al., 1987)。底床泥砂通常在白天保留熱量、黑夜釋放熱量，進而維持水體每日的熱震盪 (thermal oscillation) (Fuente et al., 2010)，懸浮泥砂增加會因其具有吸收輻射熱能而導致水溫上升 (de la Fuente et al., 2014)。由上述回顧可知，水中泥砂量的多寡、特性對水溫變化有明顯影響，也可能因此間接改變水生系統。懸浮顆粒物質之吸附、脫附釋放、硝化作用和脫硝作用機制常使營養鹽分布出現改變 (Kastelan-Macan and Petrovic, 1995)。泥砂表面電荷對污水的重金屬、油脂或是有毒物質具有吸附能力 (Al-Asadi et al., 2019)，根據 Novotny and Chesters (1989) 研究發現，泥砂運動過程中會同時挾帶重金屬或有毒物質，例如鉛、鎘、鉻、鋅、銅、錳、鐵等。在水流較緩時，這些物質可能會沉積於底床，而較強的潮流、波浪及風的作用下使其再起懸，並解吸附 (desorption) 或溶解於水中而造成生態系統嚴重失衡 (Liu et al., 2002)。此外，泥砂流入也會促使有機物質排入河道，而增加水體的呼吸負擔 (respiratory burden)，導致水生系統轉為異營系統 (heterotrophic system)。有機泥砂的沉積也會因增加泥砂需氧量 (sediment oxygen demand, SOD) 進一步促使河流和溪流出現厭氧狀態 (anaerobic conditions) (Kundell



and Rasmussen, 1995)。多數研究都表明水中泥砂傳輸、沉積和起懸以及其物化特性均會影響水質，因而可能對水生生態系統產生負面效應。

2.3 懸浮泥砂對水中生物之影響

懸浮泥砂傳輸引起的遮光效應、水質變化或棲地改變，均可能對河道中的水生生物造成衝擊，至今已有大量針對懸浮泥砂對水中生物產生之影響進行的研究，前後也有許多學者將相關文獻進行統整，例如，Newcombe and Macdonald (1991) 針對過去懸浮泥砂對魚類、底棲無脊椎動物和附生生物的影響進行整理，將各個研究中的懸浮泥砂濃度和持續暴露時間 (duration of exposure) 乘積取自然對數作為一壓力指標 (stress index)，並發現暴露時間長度對生物影響顯著。Kjelland et al. (2015) 主要回顧懸浮泥砂對魚類產生的潛在影響，並表明水中懸浮泥砂會對水生生物造成成長、短期影響，且具體取決於其懸浮泥砂數量 (quantity)、質量 (quality) 和持續暴露時間。

藻類是潮間帶生態系統的重要基礎生產者。懸浮泥砂對藻類的影響主要是行光合作用的速率，但高流量加上高泥砂量會對河床產生掏刷 (scouring)，也從而降低附生生物的生物質量 (biomass) (Alabaster and Lloyd, 1982)，且吸附於懸浮泥砂的營養鹽和毒物也會改變藻類的生長速率 (Newcombe and Macdonald, 1991)。因為懸浮泥砂濃度對藻類生長、生物質量、物種組成造成的改變可能降低次級生產，對以附生生物為食的底棲無脊椎動物間接產生負面影響。另對於濾食性底棲動物而言，濃度較高的懸浮泥砂易堵塞其捕食結構、降低捕食效率，進而降低成長速率，甚至導致其遭到窒息或埋葬而死亡 (Berry et al., 2003)。然而，不僅生物體本身會受到直接影響，泥砂沖刷導致的棲地變化，或是過度沉積堵塞底床石頭間的縫隙，也會間接干擾底棲生物的分布 (Jones et al., 2012)。

魚類是水域生態系統頂級消費者，常被當作指標或雨傘物種用以評估生態系統是否健全。對魚類的各階段生活史需求而言，懸浮泥砂可能導致其死亡、降低生



長速度或對疾病的抵抗力、干擾卵和幼蟲的發育、改變運動行為與洄游能力等 (Robertson et al., 2007; Wenger et al., 2012)，另因懸浮泥砂有吸附有毒物質的機會，亦可能因此影響魚類生殖行為，使其後代產生形態變異或基因劣化 (Arambourou et al., 2014)。

一般而言，因魚類比起底棲動物、移動性較差的物種來說具有較強的游泳能力，對於疏濬等人為工程造成的泥砂羽流 (sediment plumes) 沒有太高的死亡率 (Wilkens et al., 2015)，通常是受到亞致死壓力 (sublethal stress)，如生物體組織 (tissue) 受傷、疾病易感染性 (disease susceptibility) 等，且隨魚種、生長階段、泥砂種類、濃度、暴露時間等不同，魚類對突然高起的懸浮泥砂 (如疏濬、水庫排砂等) 反應也有所不同，部分極端條件可能會導致大量魚類死亡 (Hesse and Newcomb, 1982)，對河口渾濁水域的魚類亦可能幾乎無影響 (Parsley et al., 2011)。

2.4 淡水河系模式評估懸浮泥砂案例

由於實驗以及現地調查懸浮泥砂傳輸的動態變化相對困難，且亦需花費大量財力及人力，因此許多泥砂傳輸模式被開發用以研究河口、港灣及沿海水域的懸浮泥砂傳輸特性。河口泥砂傳輸機制相當複雜，侵蝕 (沖刷)、沉積、絮凝和潮汐不對稱等特性，都是造成河口泥砂傳輸難以模擬的原因 (Etemad-Shahida, 2010)；本節回顧淡水河系這方面的研究發現，過往已有許多使用不同數值模型和不同維度的泥砂傳輸模式模擬之案例，亦有部分延伸至模擬重金屬傳輸。

Liu et al. (2002) 使用垂向二維模式模擬水動力及凝聚性 (黏性) 泥砂傳輸，其中以改寫 Stokes' Law 成一與粒徑平均及變異數相關之沉降速度計算公式進行運算，並使用 Delo (1988) 提出的公式分別將淡水河口、竹圍量測之底床泥砂乾密度與臨界沖刷剪應力做連結。透過模式來調查低流量 (Q_{75}) 下的泥砂分布情況，該研究發現底部殘餘水流速度零點 (null point) 近乎為鹽度入侵終點處，且淡水大漢主流殘餘流速零點附近出現當地最大濃度。Hsu et al. (2006) 開發垂直二維數值模式模擬

淡水河口懸浮泥砂濃度分布，並以模式結果佐證 2003 年的現地調查成果。證實在流量較小時 (Q_{75})，關渡因水深較深產生河口環流而出現最大濁度，然隨著流量增大 (Q_{mean})，關渡附近殘餘環流 (residual circulation) 較弱，最大濁度相對變小。李俊賢(2006)以 HEM-3D 三維模式進行懸浮沉積物 (suspended sediment) 模擬，透過參數敏感度分析顯示對關渡橋和百齡橋懸浮沉積物濃度影響程度依序為臨界懸浮剪力最大，其次為懸浮率、沉降速度及臨界沉積剪力。後續模式應用有幾點不同發現，產生河口環流下表層和底層濃度有明顯垂直變化；無底床沉積物供沖刷時，水體懸浮沉積物濃度降低許多；平均流量下上游懸浮沉積物濃度較高，而下游因受地形較深、河道較寬使流速較小與小流量之濃度分布相似。Etemad-Shahida et al. (2010)應用 MIKE11 一維模式成功模擬淡水河凝聚性懸浮泥砂傳輸，是少數以一維模式模擬案例，主要研究上游支流流量變化對泥砂傳輸影響。與 Liu et al. (2002)相同在鹽度入侵終點發現最大泥砂濃度，且同流量下小潮 (neap tide) 的最大濁度位置 (estuary turbidity maximum, ETM) 比大潮 (spring tide) 更接近河口，因流量越大會使底床泥砂懸浮且不易沉積增加水中濃度，且較上游重陽橋測站泥砂濃度變化與流量相關。Chen et al. (2015)將三維 SELFE 懸浮泥砂模式用於調查淡水河河口最大濁度位置以及垂向混合作用、不同入流條件和關渡橋底床抬升對懸浮泥砂濃度分布影響。其中發現高流量不僅影響水體分層、垂向混合、殘餘流速和鹽度分布亦使懸浮泥砂濃度分布有所不同，在關渡地形深度抬升後，反而會因通水面積縮小、流速變大而沖刷導致濃度增加。Hsieh et al. (2020) 以颱風事件驗證 CCHE2D-Coast model，並應用於探討阿姆坪防淤隧道開通後對地貌的影響，以及颱風汛期、季風期間淡水河下游感潮段和出海口泥砂沖淤情形變化。結果發現，泥砂量增加但流量不變時，河道輸砂能力降低，且增加河道淤積。而颱風汛期泥砂易沉積於河口處和挖子尾沙洲 (Wazihwei sand spit)；季風期間則受洋流主導、多處沉積，但挖子尾會因回流現象受到沖刷。因此，Hsieh et al. (2022) 進行多年颱洪與季風季結合模擬，發現雖然東北季風會使挖子尾灘線退化，但颱風汛期會使泥砂稍微回淤。另外，該研究也提到颱風洪水到達河口段時潮位的不同也會造成水庫排砂傳輸受阻，更

使最高沉積位置改變。Lee et al. (2022) 則透過 NETSTARS 模式，模擬石門水庫在不同的聯合排砂操作（包含排砂隧道、阿姆坪防淤隧道、大灣坪防淤隧道）下，下游河道的濃度變化，並發現泥砂濃度隨傳遞距離呈指數下降，雖然對於水環境污染是好現象，但從該研究中仍可發現當下淡水河口的濃度仍相對平時濃度高許多。

另外，因汙染物模式與水動力和泥砂傳輸模式相關，其重金屬、有毒化合物可吸附或解吸附於水體及底床泥砂顆粒，因此，章書瑋 (2006) 以前人開發之垂直二維懸浮泥砂傳輸模式結合重金屬傳輸模式模擬淡水河系銅分布，並應用於了解不同沉積與侵蝕機制下水中懸浮泥砂與顆粒性、溶解性重金屬銅濃度變化以及沉降速度之敏感度分析，隨水體懸浮泥砂濃度減少，顆粒性重金屬濃度亦減少，而增加懸浮泥砂吸附重金屬銅比例；隨沉降速度增加泥砂沉積，亦使水中顆粒重金屬銅減少。而 Liu et al. (2012) 以垂直二維重金屬傳輸模式模擬基隆河懸浮泥砂及重金屬鉛傳輸，建立一與鹽度和懸浮泥砂濃度相關之指數關係來計算河口中鉛濃度分配係數，藉敏感度分析指出重金屬分配係數強烈影響不同型態的鉛濃度。

根據上述結果，我們可以發現潮汐作用、河川流量以及底床泥砂層對淡水河感潮段的懸浮泥砂濃度都具一定的影響，也可能改變河道地貌，而泥砂沉積、沖刷過程和淡水河水體重金屬的濃度也有相關，因此，我們更需要注重在颱洪期間水庫排放大量泥砂產生的效應，然而，因本研究並無模擬颱風事件產生地形變遷的相關資料，主要針對懸浮泥砂濃度的變化進行驗證分析。

2.5 停留時間計算方法

河口帶因受潮汐影響，水體交換過程較為複雜，因此有許多學者提出不同時間尺度的概念來代表河口水體的交換，如停留時間 (residence time)、沖刷時間 (flushing time)、年齡 (age) 等 (Dyer, 1973; Zimmerman, 1976)，然有時其概念相同，但命名不一，使其定義往往較令人困惑 (Takeoka, 1984)，且不同時間尺度因子亦有不同計算方法。

Officer (1976) 認為，沖刷時間是指將物質沖出系統所需要的時間，多被定義為河水取代原河口中所有淡水所需的時間；早期計算方式包含相對簡單的潮通量法 (tidal prism method)，或是由河口水體鹽度與海水鹽度作為比例關係之淡水分量法 (freshwater fraction method) (Dyer, 1973)。後續不同學者也提出不同時間尺度的做法，如 Bolin and Rodhe (1973) 紿予河口水體年齡基本概念嚴格定義；Zimmerman (1976) 則提出一與水齡有所不同的時間概念，將每個物質元素到達出流口所需的時間定義為停留時間，並應用於荷蘭西部瓦登海 (western Dutch Wadden Sea)；而依照 Zimmerman (1976) 的定義，Takeoka (1984) 建立殘餘函數 (remnant function) 用以評估局部區域或是總體區域的停留時間。總結而言，停留時間指一個水包 (water parcel) 或某種物質在系統中停留的時間，且往往與施放位置和時間有關 (van de Kreeke, 1983)，此研究所定義之停留時間應該較適合用以談論懸浮泥砂對河口產生的影響。然而，一般的停留時間計算是以瞬間投入均勻且守恆的物質於感興趣之研究區域，再依照濃度衰減進行推導 (Wang et al., 2004; Yuan et al., 2006; Cucco et al., 2006)，對於本研究著重的泥砂連續排放的運用有其困難，且泥砂的動力機制 (如：沉積、沖刷) 也會造成運算上更為複雜。Mitra and Kumar (2021) 使用另一種估計懸浮顆粒停留時間的方式是採用拉格朗日粒子進行模擬，然此方法仍有不易代表一場颱風事件下的高濃度泥砂顆粒移動情形。

近二十年因生態工法及人工濕地大力推行，因此相關評估水力效率的方法發展得較為完整。因人工濕地的水質淨化過程相當複雜，又包含許多不同的反應途徑，停留時間之概念亦運用於評估人工濕地之汙水處理 (Kadlec, 1994; Persson et al., 1999)，並延伸出不同計算方法，相較而言適合用在考慮懸浮泥砂停留時間，以下也將簡述人工濕地評估停留時間的方法。隨著流速空間變異性和由地形、植生因素產生的混合過程，水包有不同的移動行為，因而造成水包離開水體系統的時間有長有短。人工濕地研究多以短時間投入示蹤劑進行脈衝實驗 (pulse experiment)，並於出流口量測濃度曲線，此濃度曲線稱為停留時間分布 (residence time distribution, RTD)，再以 RTD 曲線進行平均停留時間計算 (Holland et al., 2004; Ioannidou and

Pearson, 2019; Shih and Wang, 2020)。由這些研究之道，藉由分析濃度歷線的方式，不僅能直接評估水體懸浮泥砂停留狀況，應該也有機會對連續排放泥砂的情況進行討論。其中，Ioannidou and Pearson (2019) 進行現地調查來研究流速變化和植生老化對濕地混合特性的影響，以平均停留時間概念當成一評估指標進行分析，將停留時間分布定義為與流量和濃度相關的函式；Shih and Wang (2020) 以水動力及污染物傳輸模式模擬人工濕地環境，藉其了解模式區域在不同水流特性和結構物擺設的條件下，濕地的處理效率以及死水區和短流區的分布。其中，以出流位置進行濃度量測得到的反應曲線 (response curve) 之一次矩來計算平均停留時間：

$$t_m = \frac{\int_0^\infty tc dt}{\int_0^\infty c dt} \approx \frac{\sum_{i=2}^n \left(\frac{t_i c(t_i) + t_{i-1} c(t_{i-1})}{2} \right) (t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=2}^n \left(\frac{c(t_i) + c(t_{i-1})}{2} \right) (t_i - t_{i-1})} \quad (2.5.1)$$

上式中， c 為濃度； t 為時間； n 為資料筆數。

第三章 研究方法



3.1 環境流體動力學模型（Environmental Fluid Dynamic Code，EFDC）

環境流體動力學模型（EFDC）最初是由 Dr. John M. Hamrick 於 1988 年在美國維吉尼亞海洋科學研究院（Virginia Institute of Marine Science, VIMS）及威廉與瑪麗學院海洋科學所（School of Marine Science of The College of William and Mary）發展出的一套模式。之後，環境流體動力學模型開始逐步開發，至今該模型主要區分為四個大模組，包含了水動力模組、優養化水質模組、泥砂傳輸模組及毒物傳輸模組，而其中亦有許多次要模組（sub-models），像是示蹤劑模組及拉格朗日粒子追蹤模組等。EFDC 模式能進行一維、二維和三維的模擬，且因其為一可同時解算水動力、傳輸和動力學（kinetics）的耦合模式，不需另外進行水動力模組和傳輸模組的外部耦合。另外，這些模組也有許多特別之處，舉例來說，水動力模組中包含可設計植被阻力、使用乾溼網格、設置水力結構物以及考慮波流邊界層相互作用（wave current boundary layer interaction）等功能。目前為止，EFDC 模式已被廣泛應用在各種不同水域系統的研究，其中包含河川、湖泊、河口、水庫、濕地及海岸等地區，並且展現其模式之強大的模擬能力。

3.2 水動力模式

EFDC 模式中水動力模組的基本原理為流體的質量、動量和能量守恆定律，而其基本假設為環境流體（ambient environmental flows）的水平長度尺度大於垂向長度尺度好幾個數量級，因此，垂向的控制方程式以不可壓縮的可變密度流體之垂直靜水壓進行計算。EFDC 模式流體的控制方程式為納維爾-史托克斯方程式（Navier-Stokes equation），水體中物質擴散傳輸的控制式，如鹽度、溫度、營養鹽、毒物、懸浮物等，則為平流擴散方程式（Hamrick and Wu, 1997；Hamrick, 1992, 1996）。水



體密度變動則主要受到壓力、溫度、鹽度、懸浮泥砂濃度的影響，且針對變密度流體以布氏近似法（Boussinesq approximation）進行簡化。

透過水動力模式的模擬建構水體的流動情形，而流體運動行為就是帶動泥砂、汙染物傳輸最重要的因子之一。在 EFDC 模式中，水動力模組可與水質模組、泥砂傳輸模組、染劑模組、拉格朗日粒子追蹤模組等其他模組進行結合，並透過水動力模組計算得出的流速、流量、水位、密度等流體因子提供這些模組進行演算。EFDC 的水動力模式不僅能模擬風速、風向、大氣作用對流場之影響，也可與其他波浪模式進行外部結合，下圖用以表示 EFDC 模式中的基本概念。

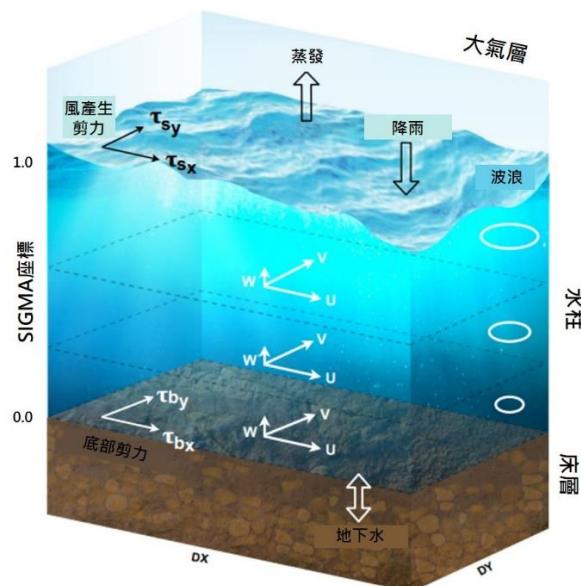


圖 3.2-1、EFDC 模式的基本概念圖（修改至 DS, 2020）

3.2.1 水平和垂直網格系統

為了能更接近真實水平方向之邊界，模式在 x 方向和 y 方向均使用曲線且正交的網格系統，而在 z 方向採用 σ 座標系統的方式，以達到均勻的垂向解析度（uniform resolution），以及確保網格能以水流自由表面和底部地形為界。 σ 座標系統的轉換公式可表示為式 3.2.1：



$$z = \frac{z^* + h}{\zeta + h} = \frac{z^* + h}{H} \quad (3.2.1)$$

上式中， z 表示無因次的 σ 座標； z^* 表示以垂向參考水平為基準的垂向座標 (m)； h 表示垂向參考水平以下的水深 (m)； ζ 表示垂向參考水平以上的水位高程 (m)； H 表示前兩項相加即為總水深 (m)。圖 3.2-2 為垂向座標系統於物理空間域 (左) 和 σ 座標空間域 (右) 轉換的示意圖。

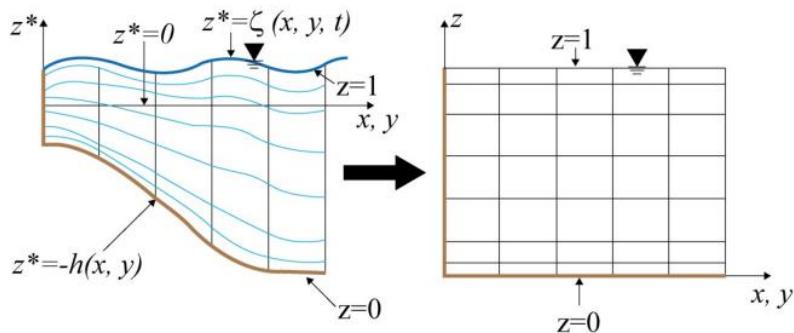


圖 3.2-2、垂向座標系統轉換圖 (DSI, 2020)

3.2.2 基本水動力方程式

根據前述的基本假設， z 方向的動量方程式以垂向靜水壓公式進行計算，而針對變密度流體則以布氏近似法來簡化模式中的未知數，該方法是指流體密度改變對慣性力項的影響可以忽略不計，只需考慮在壓力梯度項的影響，因此，在這個情況下，流體的動量方程式、連續方程式、狀態方程式、 σ 座標中垂直方向的速度式以及鹽度和溫度的傳輸方程式可被寫為以下的公式。在三維情況下， x 方向的動量方程式以式 3.2.2 所示：



$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H u) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u u) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v u) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w u) \\
& - m_x m_y f H v - \left[v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right] H v \\
& = -m_y H \frac{\partial}{\partial x}(g \zeta + p + P_{atm}) - m_y \left[\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right] \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{m_y}{m_x} H A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{m_x}{m_y} H A_H \frac{\partial u}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{m_x m_y}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right] - m_x m_y c_p D_p u \sqrt{u^2 + v^2} + S_u
\end{aligned} \tag{3.2.2}$$

y 方向的動量方程式以式 3.2.3 所示：

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H v) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u v) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v v) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w v) \\
& + m_x m_y f H u + \left[v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right] H u \\
& = -m_x H \frac{\partial}{\partial y}(g \zeta + p + P_{atm}) - m_x \left[\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right] \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{m_y}{m_x} H A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right] \\
& + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{m_x}{m_y} H A_H \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{m_x m_y}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right] - m_x m_y c_p D_p v \sqrt{u^2 + v^2} + S_v
\end{aligned} \tag{3.2.3}$$

z 方向的動量方程式以式 3.2.4 所示：

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g H \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = -g H b \tag{3.2.4}$$

內模與外模的連續方程式分別以式 3.2.5 和式 3.2.6 所示：

$$\frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y \zeta) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w) = S_h \tag{3.2.5}$$

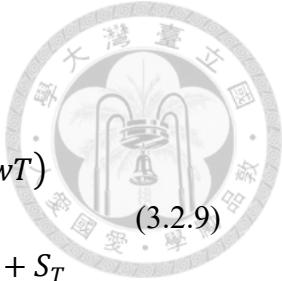
$$\frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y \zeta) + \frac{\partial \left(m_y H \int_0^1 u dz \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(m_x H \int_0^1 v dz \right)}{\partial y} = S_h \tag{3.2.6}$$

狀態方程式以式 3.2.7 所示：

$$\rho = \rho(p, S, T, C) \tag{3.2.7}$$

σ 座標系統與物理空間域(physical space)於垂直方向的速度轉換以式 3.2.8 所示：

$$w = w^* - z \left(\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{u}{m_x} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{v}{m_y} \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) + (1 - z) \left(\frac{u}{m_x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{v}{m_y} \frac{\partial h}{\partial y} \right) \tag{3.2.8}$$



溫度傳輸方程式以式 3.2.9 所示：

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H T) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u T) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v T) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w T) \\
 &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{m_y}{m_x} H A_h \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{m_x}{m_y} H A_h \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{m_x m_y}{H} A_b \frac{\partial T}{\partial z}\right) + S_T
 \end{aligned} \tag{3.2.9}$$

鹽度傳輸方程式以式 3.2.10 所示：

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H S) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u S) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v S) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w S) \\
 &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{m_y}{m_x} H A_h \frac{\partial S}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{m_x}{m_y} H A_h \frac{\partial S}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{m_x m_y}{H} A_b \frac{\partial S}{\partial z}\right) + S_S
 \end{aligned} \tag{3.2.10}$$

以上公式中

u 、 v ：分別代表曲線正交網格下 x 方向和 y 方向的水平速度分量 (m/s)；

w 、 w^* ：分別代表 σ 座標系統下的垂向速度分量和實際垂向速度 (m/s)；

x 、 y ：分別代表曲線正交網格下 x 方向和 y 方向的座標 (m)；

z ： σ 座標系統的無因次座標；

t ：時間 (s)；

m_x 、 m_y ：張量對角線分量之平方根，使用於座標轉換；

m ：為一雅可比矩陣，且 $m = m_x m_y$ ；

p ：靜水壓力， $p = \rho_0 g H (1 - z)$ (m²/s²)；

P_{atm} ：正壓壓力 (Pa)；

ρ_0 ：參考水密度 (kg/m³)；

b ：浮力；

f ：科氏力參數 (1/s)；

A_H ：水平動量與質量擴散係數 (m²/s)；

A_v ：垂直紊流黏滯係數 (m²/s)；

S_u 、 S_v ：分別代表 x 方向和 y 方向水平動量之源匯項 (m²/s²)；

S_h ：質量守恆方程式的源匯項 (m³/s)；

T ：溫度 (°C)；



S ：鹽度 (ppt)；

A_h ：水平紊流擴散係數 (m^2/s)；

A_b ：垂向紊流擴散係數 (m^2/s)；

S_T 、 S_S ：分別代表溫度和鹽度的源匯項；

另外，模式允許透過改變底部摩擦力(式 3.2.11)或水平紊流擴散情形(式 3.2.12)

修正流況：

$$C_b = \left[\frac{\kappa}{\ln(\Delta z_b \cdot H / 2z_0^*) + (\Pi - 1)} \right]^2 \quad (3.2.11)$$

其中， C_b 為無因次阻力係數； κ 為馮·卡門常數 (von Karman constant)； Δz_b 為無因次底層厚度； z_0^* 為粗糙高度 (m)； Π 為強度參數 (wake strength parameter)，模式假設為 0。

$$A_H = AHO + AHD \Delta x \Delta y \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2.12)$$

其中， AHO 為水平紊流係數 (m^2/s)； AHD 為 Smagorinsky 係數。

3.2.3 垂直紊流閉合公式

在給定垂直紊流黏滯係數(A_v)、溫鹽垂向紊流擴散係數(A_b)和源匯項(S_u 、 S_v)的情況下，式 3.2.2 至式 3.2.10 能用以求解方程式中的八個變數 (u 、 v 、 w 、 p 、 ζ 、 ρ 、 T 、 S)，且為一個封閉的計算系統。因此，EFDC 模式使用由梅勒一山田(Mellor and Yamada, 1982)發展以及加爾佩林等人(Galperin et al., 1988)修正的二階紊流閉合模式，來計算動量方程式中的垂直紊流黏滯係數和傳輸方程式中的質量擴散係數。在此方法中，兩係數與紊流強度(q)、紊流長度尺度(l)及理查遜數(R_q , Richardson number)相關，並將其表示為以下式子：

$$A_v = \phi_A A_0 q l = 0.4 (1 + 36R_q)^{-1} (1 + 6R_q)^{-1} (1 + 8R_q) q l \quad (3.2.13)$$



$$A_b = \phi_b ql = 0.5(1 + 36R_q)^{-1}ql \quad (3.2.14)$$

$$R_q = \frac{gH}{q^2} \frac{l^2}{H^2} \frac{\partial b}{\partial z} \quad (3.2.15)$$

上式中， q 表示紊流強度； l 表示紊流長度尺度； R_q 表示理查遜數； ϕ_v 和 ϕ_b 則分別表示穩定黏滯係數和穩定擴散係數。其中，紊流強度和紊流長度尺度又各別由式 3.2.16 和式 3.2.17 來定義：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHq^2) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huq^2) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvq^2) + \frac{\partial}{\partial z}(mwq^2) \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{A_q}{H} \frac{\partial q^2}{\partial z} \right) 2m \frac{A_v}{H} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + 2mgA_b \frac{\partial b}{\partial z} - 2m \frac{Hq^3}{B_1 l} + S_q \end{aligned} \quad (3.2.16)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(mHq^2l) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y Huq^2l) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x Hvq^2l) + \frac{\partial}{\partial z}(mwq^2l) \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{A_{ql}}{H} \frac{\partial q^2l}{\partial z} \right) + mlE_1 \left\{ \frac{A_v}{H} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + E_3 g A_b \frac{\partial b}{\partial z} \right\} \\ & \quad - mE_2 \frac{Hq^3}{B_1} \left[1 + E_4 \left(\frac{1}{\kappa Hz} \right)^2 + E_5 \left(\frac{1}{\kappa H(1-z)} \right)^2 \right] + S_l \end{aligned} \quad (3.2.17)$$

其中， E_1 至 E_5 為經驗常數，其值分別為 $E_1 = 1.8$ 、 $E_2 = 1.0$ 、 $E_3 = 1.8$ 、 $E_4 = 1.33$ 、 $E_5 = 0.25$ ； S_q 和 S_l 各自為紊流強度公式和紊流長度尺度公式中的源匯項，該源匯項可代表次網格尺度（subgrid scale）的水平紊流擴散、波浪或植被影響； A_q 和 A_{ql} 則各別表示為紊流強度公式和紊流長度尺度公式中的垂直紊流擴散係數，而根據梅勒－山田(Mellor and Yamada, 1982)的方法，紊流強度公式的垂直紊流擴散係數 (A_q) 假設為 $0.2ql$ 。

3.3 泥砂傳輸模式

EFDC 模式中有兩種計算泥砂傳輸的方式，分別為原始 EFDC 泥砂傳輸和 SEDZLJ 泥砂傳輸。上述兩種方式在處理水體中泥砂傳輸的方法是相同的，不同之

處是在於水體中泥砂與沉積物底床相互作用之模擬模式（沉積、侵蝕）及處理沉積物底床的方法。本研究選用由 Hamrick 開發之原始 EFDC 泥砂傳輸模式進行懸浮泥砂的模擬，此方法能夠各別模擬不同粒徑的凝聚性（cohesive）及非凝聚性（noncohesive）懸浮泥砂之底床沉積和沖刷懸浮等移動行為。透過分析過去在淡水河底床及懸浮物質量測數據之文獻後，發現底床近表層泥砂中值粒徑以及颱風期間的懸浮泥砂中值粒徑均屬於模式中凝聚性泥砂之範圍，即中值泥砂粒徑小於 62μm，因此，為簡化問題僅使用凝聚性泥砂來進行模擬。

3.3.1 懸浮泥砂傳輸之控制方程式

懸浮泥砂傳輸的控制方程式源於溶解物質和懸浮物質的通用傳輸方程式，不同的是由於在計算中可能產生小型的內在數值擴散（inherent numerical diffusion），模式不考慮水平紊流擴散項，修正後的懸浮泥砂傳輸方程式寫為式 3.3.1：

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(m_x m_y H C_j) + \frac{\partial}{\partial x}(m_y H u C_j) + \frac{\partial}{\partial y}(m_x H v C_j) + \frac{\partial}{\partial z}(m_x m_y w C_j) \\ - \frac{\partial}{\partial z}(m w_{s,j} C_j) = \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{m_x m_y}{H} A_b \frac{\partial C_j}{\partial z}\right) + S_{s,j}^E + S_{s,j}^I \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

上式中，代表 C_j 泥沙種類 j 的濃度； $S_{s,j}^E$ 和 $S_{s,j}^I$ 則分別代表外部源匯項和內部源匯項。模式將源匯項分為兩部分，外部源匯項可包含點源和非點源負載，而內部源匯項則可包含有機泥砂的衰變及不同泥砂種類間的質量交換，若模擬絮團的形成和破碎，則可能產生上述的質量交換情形。泥砂傳輸方程式中垂直方向的上、下邊界條件則可分別表示為式 3.3.2 和式 3.3.3：

$$-\frac{A_b}{H} \frac{\partial C_j}{\partial z} - w_{s,j} C_j = 0 \quad z = 1 \quad (3.3.2)$$

$$-\frac{A_b}{H} \frac{\partial C_j}{\partial z} - w_{s,j} C_j = J_{j,o} \quad z = 0 \quad (3.3.3)$$

上式中， $J_{j,o}$ 為水體和底床之間的淨交換通量，往水體方向為正。



3.3.2 凝聚性泥砂之沉降、沉積及侵蝕

3.3.2.1 沉降 (settling)

凝聚性無機泥砂和有機顆粒物質沉降的模擬相當複雜，因其重力沉降過程中可能會受到顆粒間的內聚力而產生絮凝現象，該現象是指凝聚性泥沙顆粒有機會在懸浮移動過程中與顆粒有機物結合成更大的顆粒，可稱之為絮團 (floc)，導致其沉降速度與原本凝聚性泥砂顆粒的沉降速度差異很大 (Gibbs, 1985; Burban et al., 1989, 1990; Mehta et al., 1989)。絮團的形成取決於懸浮物質的濃度和型態、環境的離子特性及水流的剪力和紊流強度，目前已有一些詳細模擬絮團形成、聚集和分離的研究，但因為計算成本太高，在 EFDC 模式中並沒有直接模擬絮凝行為，而是透過其他替代方式來表示，主要根據凝聚性泥砂特性和水流型態來進行計算，為一個包含泥砂粒徑、濃度、垂直方向剪力和紊流強度等參數的半經驗公式：

$$w_{se} = w_{se} \left(d, C, \frac{du}{dz}, q \right) \quad (3.3.4)$$

模式可由使用者給定沉降速度，亦提供以下幾種計算方法：

(1) 基於奧基喬比湖 (Okeechobee Lake) 的沉降觀測結果，Hwang and Mehta (1989) 提出計算沉降速度之經驗公式，式 3.3.5 雖無考慮流況，但其數據採樣於受水流和風浪影響的流場，在相對低濃度和高濃度時均為較小的沉降速度：

$$w_s = \frac{aC^n}{(C^2 + b^2)^m} \quad (3.3.5)$$

上式中，四個參數的平均值分別被估計為 $a = 33.38$ 、 $b = 3.7$ 、 $m = 1.78$ 、 $n = 1.3$ ； w_s 單位為 mm/s； C 單位為 g/L。

(2) 根據剪應力和濃度計算沉降速度的 Shrestha and Orlob (1996) 修正方法為：

$$w_s = a \left(\frac{C}{2650} \right)^{0.3333} \quad (3.3.6)$$



$$a = \begin{cases} \frac{0.06}{\sqrt{\tau}} & , \tau \geq 0.1 \\ 0.1 & , \tau \leq 0.1 \end{cases} \quad (3.3.7)$$

上式中， τ 為剪應力 (m^2/s^2)； C 為總凝聚性泥砂濃度 (g/L)。

3.3.2.2 沉積 (deposition)

凝聚性泥砂和有機固體在水體和底床的交換過程受到近底床的水流條件和底床的地質條件所影響，當流動引起的底床表面應力減少時，底床就會發生淨沉積，最廣泛使用的沉積通量為式 3.3.8：

$$J_o^d = \begin{cases} -w_s C_d \left(\frac{\tau_{cd} - \tau_b}{\tau_{cd}} \right) & = -w_s P_d C_d : \tau_b \leq \tau_{cd} \\ 0 & : \tau_b \geq \tau_{cd} \end{cases} \quad (3.3.8)$$

上式中， τ_b 為受水流影響的底床應力； τ_{cd} 為臨界沉積應力，該值取決於沉積物材質和絮團的物化性質 (Mehta et al., 1989)； C_d 為近底床的泥砂濃度；沉積機率 P_d 為臨界沉積應力和底床應力的函數。臨界沉積應力通常由實驗資料或現場觀測決定，根據文獻其值範圍於 0.06 到 1.1 N/m^2 (Hwang and Mehta, 1989; Ziegler and Nesbitt, 1995)，因為上述數值範圍很大，在沒有現場數據的情況下，臨界沉積應力通常被當成一個率定參數使用。

模式中水流引起之底床剪應力 (τ_b) 可由式 3.3.9 計算得出：

$$\tau_b = C_b \rho_w u^2 \quad (3.3.9)$$

上式中， C_b 為無因次的底床阻力係數； ρ_w 為流體密度 (kg/m^3)； u 為近底床之流速 (m/s)。

3.3.2.3 侵蝕 (erosion)

凝聚性泥砂的運動行為非常複雜，其不只與流況相關，也與泥砂的電化學特性有關，因此，水動力條件、粒徑分布、植被類型和分布、底床層的生化特性、底床層的時間歷程都有可能會是影響凝聚性泥砂底床侵蝕情形的原因。

當水流或波浪帶動的底部應力 (τ_b) 大於臨界侵蝕或再懸浮 (resuspension) 應力 (τ_{ce}) 時，泥砂底床就會逐漸發生侵蝕現象，其中臨界侵蝕應力取決於水流剪力強度和底床密度。一般而言，在加速流動並增加水流帶動之剪力的情況下，也可能發生快速的大量侵蝕，但如果底床具足夠強的剪力剖面，就只會有表面侵蝕發生 (Tetra Tech, 2002)。床層侵蝕並懸浮到水體的泥砂濃度傳輸式以下式表示：

$$J_o^r = w_r C_r = \frac{dm_e}{dt} \left(\frac{\tau_b - \tau_{ce}}{\tau_{ce}} \right)^\alpha \quad : \quad \tau_b \geq \tau_{ce} \quad (3.3.10)$$

公式中， $\frac{dm_e}{dt}$ 為底床每單位表面積的侵蝕率 ($\text{g/m}^2/\text{s}$ ；簡稱 $rser$)； τ_{ce} 為臨界侵蝕或懸浮應力 (N/m^2)； α 為參數。上述值一般可透過實驗值及現地觀測來決定，且侵蝕速率和臨界侵蝕應力通常取決於泥砂種類、含水量、鹽度和溫度等參數。侵蝕速率的文獻範圍為 0.005 至 $0.1 \text{ g/m}^2/\text{s}$ ，其數值通常隨總體密度增加而減少。

臨界侵蝕應力與底床剪力強度相關，但通常小於該值，並受到泥砂種類和底床壓密的狀態所影響。模式能設定臨界侵蝕應力為一常數，亦提供其他經驗公式進行計算，如 Hwang and Mehta (1989) 結合底床總體密度和臨界侵蝕應力，並提出一關係式計算臨界侵蝕應力：

$$\tau_{ce} = \begin{cases} a(\rho_b - \rho_l)^b + c & : \rho_b > 1.065 \\ 0 & : \rho_b \leq 1.065 \end{cases} \quad (3.3.11)$$

上式中， ρ_b 為底床總體密度 (g/cm^3)；參數值分別為 $a = 0.883$ 、 $b = 0.2$ 、 $c = 0.05$ 、 $\rho_l = 1.065$ 。

藉由定義泥砂比重 (specific gravity)、孔隙比 (porosity)，可由以下兩公式推算得出床層之乾密度 (dry density) 與總體密度 (bulk density)，並將其應用於床層的侵蝕計算：

$$\rho_d = SG \rho_w (1 - n) \quad (3.3.12)$$



$$\rho_d = \rho_s \frac{(\rho_b - \rho_w)}{(\rho_s - \rho_w)} \quad (3.3.13)$$

上式中， ρ_d 為乾密度 (kg/m^3)； SG 為比重； ρ_w 為水體密度 (kg/m^3)； n 為孔隙比； ρ_s 為顆粒密度 (grain density ; kg/m^3)； ρ_b 為總體密度 (kg/m^3)。

3.4 停留時間指標

為了對颱風期間淡水河系因受上游水庫排放泥砂、各支流入流泥砂、底床沖刷泥砂和潮汐推移對懸浮泥砂濃度變遷進行討論，本研究採用源自 Danckwerts 於 1953 年提出的停留時間分布 (Residence Time Distribution, RTD) 之概念進行影響時間的評估，透過擷取斷面平均之懸浮泥砂濃度歷線作為 RTD，以反映河道中懸浮泥砂於選取斷面以上游河段的平均停留情形。平均停留時間指標引用 Shih and Wang (2020) 使用之研究方法，對模式模擬之懸浮泥砂濃度反應曲線進行計算，並將此時間指標應用於兩個不同面向之研究，一為主要針對水庫有排砂之颱風事件產生之高濃度懸浮泥砂進行綜合性平均停留時間估計，另一則是針對不同時間點石門水庫排砂和大漢溪入流泥砂做平均停留時間計算。

綜合性平均停留時間 (t_{cm}) 為一偵測實際情況下連續入流泥砂濃度的計算結果，而非針對一脈衝 (pulse) 入流泥砂計算得到的平均停留時間，因此，此指標能用以表示現況中不同斷面以上游河段受颱風期間和過後高濃度懸浮泥砂影響的平均時間；此外，同時以表示不同斷面受到高濃度泥砂持續影響的總停留時間 (T_b)，加以分析模擬期間濃度高過平時的實際時間。研究使用蘇迪勒颱風事件做為現況案例分析，綜合性平均停留時間和總停留時間詳細計算步驟如下列說明，計算流程圖可見圖 3.4-1；綜合性平均停留時間計算公式如式 3.4.1；總停留時間計算公式如式 3.4.2。

1. 選擇不同感興趣斷面，並計算其斷面平均懸浮泥砂濃度歷線 ($c(t_i)$)。



2. 篩選各感興趣之斷面的門檻濃度值 ($c_{threshold}$) (或稱背景濃度值) 來做為判斷模擬期間實際受到高於平時泥砂濃度影響的時間段。
3. 將原濃度歷線去除門檻值後得到新濃度歷線 ($\hat{c}(t_i)$)，並將新濃度歷線中低於或等於門檻值之濃度設為 0 來代表當下不屬於高懸浮泥砂濃度影響。
4. 因是一連續排放泥砂下的濃度歷線，需選擇一基準時間做為比較不同斷面之綜合性平均停留時間的依據，因此，統一以受颱風外圍環流產生之較高濃度泥砂影響前之 8 月 7 日 0 時，當作時間基準 (t_0) 進行計算。
5. 判斷該斷面平均懸浮泥砂濃度第一筆高於門檻值的時間為第一筆超越濃度時間 (t_b)。
6. 判斷該斷面平均懸浮泥砂濃度最後一筆高於門檻值的時間為最後一筆超越濃度時間 (t_l) (或稱結束計算時間)。
7. 以新濃度歷線從時間基準 (t_0) 開始至結束時間 (t_l) 進行綜合性平均停留時間 (t_{cm}) 計算。
8. 以各斷面最後一筆超越濃度時間 (t_l) 減去第一筆超越濃度時間 (t_b) 計算總停留時間 (T_b)。

$$t_{cm} = \frac{\int_{t_0}^{t_l} tc dt}{\int_{t_0}^{t_l} c dt} \approx \frac{\sum_{i=1}^l \left(\frac{t_i c(t_i) + t_{i-1} c(t_{i-1})}{2} \right) (t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=1}^l \left(\frac{c(t_i) + c(t_{i-1})}{2} \right) (t_i - t_{i-1})} \quad (3.4.1)$$

$$T_b = t_l - t_b \quad (3.4.2)$$

上式中， t_{cm} 為綜合性平均停留時間； t 為時間； c 為懸浮泥砂濃度； t_0 為開始計算時間； t_l 為結束計算時間； T_b 為總停留時間； t_b 為第一筆超越濃度時間。

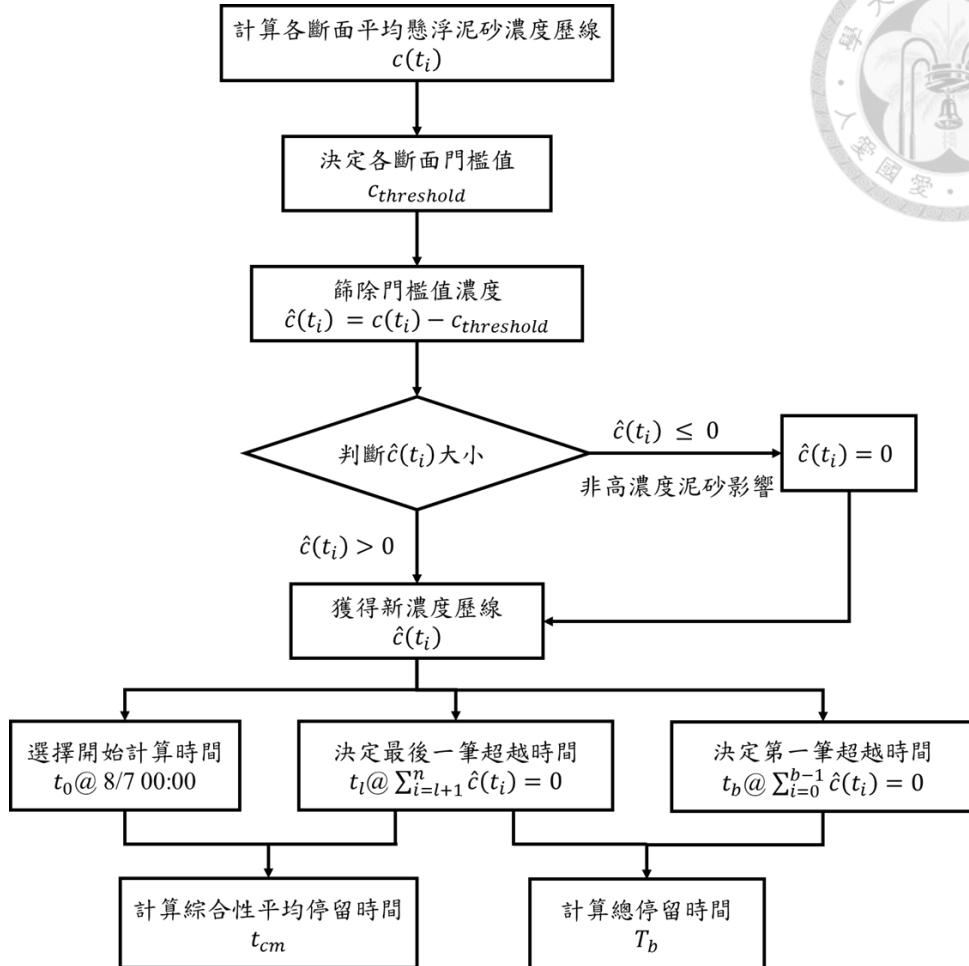


圖 3.4-1、綜合性平均停留時間和總停留時間計算流程

若濃度低於門檻值，代表河道中的懸浮泥砂濃度已回復到背景條件，此時高濃度泥砂完全流出篩選斷面，河段已恢復至平時濃度狀態。然而受河口水理變化、入流泥砂通量隨時間變動等原因影響導致門檻濃度值不易決定，研究嘗試兩種不同的篩選方式來決定門檻值，並選擇較適合的方式作為後續情境分析所用。

另以脈衝時間點 (t_{pulse}) 後排入一小時泥砂為條件，分析蘇迪勒颱風事件發生後，石門水庫和大漢溪上游在不同時間段流入之泥砂受不同上游流量、潮汐效應的平均停留時間 (t_m)。因在下游擷取之斷面平均懸浮泥砂濃度均來自當時脈衝投入的泥砂，不需去除背景濃度，並計算至模擬時間最後一筆數據，其計算流程如圖 3.4-2、平均停留時間計算公式如式 3.4.3。



$$t_m = \frac{\int_{t_{pulse}}^{t_n} t c dt}{\int_{t_{pulse}}^{t_n} c dt} \approx \frac{\sum_{i=pulse+1}^n \left(\frac{t_i c(t_i) + t_{i-1} c(t_{i-1})}{2} \right) (t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=pulse+1}^n \left(\frac{c(t_i) + c(t_{i-1})}{2} \right) (t_i - t_{i-1})} \quad (3.4.3)$$

上式中， t_m 為平均停留時間； t 為時間； c 為懸浮泥砂濃度； n 為資料筆數； t_{pulse} 為脈衝時間點。

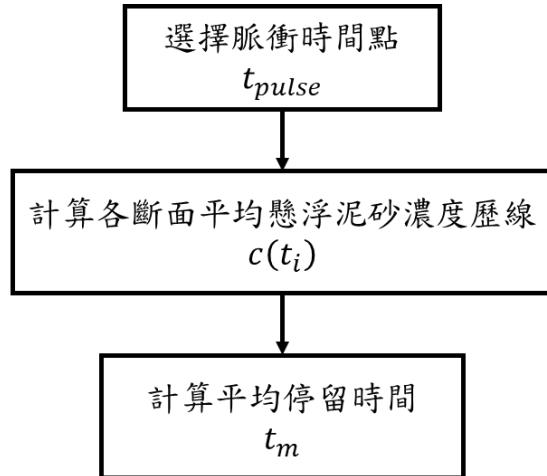


圖 3.4-2、平均停留時間計算流程

第四章 模式建立及驗證



4.1 研究地點與颱風事件

4.1.1 研究地點

研究區域為淡水河流域感潮河口段，數值模式範圍則含括淡水河上游的三大支流，且為探討颱風事件中因上游水庫進行排砂操作後下游河口之效應，亦考慮位於大漢溪上游之石門水庫放流排砂過程。若颱風事件帶來較大的降雨量，石門水庫需進行放流調節時，其排流量會佔淡水河系上游入流很大的比例，為大漢溪流量增加的主因之一，將使其在颱風時期成為主要影響河口水動力的重要驅動力，且若同時進行排砂操作，亦將挾帶大量水庫淤砂入河，而在颱風過後，則改為三大支流之河川水流及潮流主導河口水理及懸浮泥砂濃度變化。

淡水河系屬感潮河段，潮汐影響總長以淡水河起算至大漢溪約 32 公里；因新店溪底部高程由秀朗橋以上漸高於海平面，因此直至秀朗橋附近均為感潮段，由大漢新店匯流口起算之感潮長度約 11 公里；基隆河的感潮終點則是位於江北大橋至五堵水位站之間，長度約 30 多公里。其潮汐變動之潮型主要為太陰半日潮 (M2 tide)，週期約為 12.5 小時，依照常年潮位資料顯示淡水河口年平均高、低潮位分別約為 1.24 及 -0.96 公尺、平均潮差約為 2.2 公尺。

淡水河整體流域屬副熱帶季風氣候區，年平均降雨量可達 2500 毫米以上，根據歷年降雨資料，雨量主要分佈於五、六月的梅雨、七月至九月的颱風雨以及冬季的東北季風雨，而雨量多寡也會直接影響河川流量，根據歷年平均流量顯示，在淡水河流域的三個支流中以新店溪流量最大，大漢溪次之，基隆河最小。若將豐水期及枯水期各別分為五至十月和十一至四月來看，近年來有兩者間降雨差距有更明顯的趨勢，因此透過水庫建設來進行水資源分配與運用是必要的。

石門水庫並未被涵蓋於模式中，其位處研究區域上游，在颱風事件下其洩洪排

砂對本研究的相關條件設定及數值模擬影響極大。石門水庫於 1964 年 6 月正式竣工，屬於多功能型水庫，能提供灌溉、給水、防洪、發電和觀光等多項功能，為臺灣北部重要的水庫之一。為減緩水庫淤積速度以延長水庫壽命，石門水庫將發電鋼管改建成排砂隧道，在流量夠高時會以異重流的方式將水庫淤砂排出以增長水庫的使用年限。颱風期間水庫的排洪排砂操作會同時產生洪水以及大量泥砂進入河道，在這種強降雨、高流量事件下，也可能導致邊坡、河岸產生嚴重沖蝕，兩者加乘下便使河道中的懸浮泥砂量飆升，在其泥砂輸送到下游河口後，即可能會受潮汐效應影響而延緩其流出出海口的時間，造成下游感潮段於該期間的水質狀態較差，也可能有底床淤積的情況發生，因此，在石門水庫進行排砂後，淡水河河口帶的懸浮泥砂濃度受潮汐影響而變動的情形及其影響程度是需要進行考量的一部分。



圖 4.1-1、石門水庫重要設施位置圖（北水局石門水庫網站）

4.1.2 颱風事件選擇

本研究預探究水庫排砂後，其懸浮泥砂於下游河口帶的濃度變動情形，因此需選擇石門水庫近年曾進行排砂操作之颱風事件進行模擬：2015 年 8 月的蘇迪勒颱



風以及 2015 年 9 月的杜鵑颱風；這兩場颱風期間除了有進行排砂操作外，其颱風事件的相關調查資料也較詳細（包括下游河道全洪程泥砂特性調查）。

蘇迪勒颱風 (Typhoon Soudelor) 在 2015 年 7 月 30 日 12UTC 形成於關島東方海面，8 月 3 日 12UTC 曾增強為強烈颱風，後於 8 月 5 日漸弱轉為中度颱風，便一路向西北移動逼近臺灣本島。雖然蘇迪勒僅為中度颱風，卻為臺灣本島及外島帶來了極大的降雨，臺北氣象站於 8 月 8 日的單日雨量高達 306.7 mm，不僅造成大臺北地區多處河川水位達到一級警戒，且因烏來和新店地區發生土石崩塌，而導致下游河水濁度上升影響供水需求。蘇迪勒颱風期間，石門水庫排洪持續 5 天，並曾二度排砂，最大出流量約 $5,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，後池堰量得之出庫砂量最高約 50,000 ton/hr。在排洪期間加上強降雨使河川入流量較大，導致大漢溪河岸有沖刷情況發生，且新店溪集水區大量崩塌也造成下游河道懸浮泥砂量大幅增加。

杜鵑颱風 (Typhoon Dujuan) 在 2015 年 9 月 22 日 18UTC 形成於關島西北西方海面，並向西北方向移動，9 月 27 日 09UTC 發展為強烈颱風。中央氣象局於臺灣時間 27 日 8 時 30 分發布海上警報，17 時 30 分發布陸上警報，颱風中心在 28 日 17 時 40 分登陸於宜蘭南澳鄉，隔日 1 時從彰化芳苑鄉出海，且因受到地形破壞弱化為中度颱風，而後在 29 日 17 時 30 分解除海陸警報。杜鵑颱風期間石門水庫進行 3 天左右的排洪操作，水庫最大出流量約 $3,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，出庫砂量最高達 36,000 ton/hr。雖杜鵑颱風屬強颱等級，但該颱風入侵期間在北部地區氣象站的最大日雨量整體小於蘇迪勒颱風之測值，舉例來說，杜鵑颱風之臺北氣象站最大日雨量為 203.9 mm；蘇迪勒颱風則為 306.7 mm。

4.2 資料蒐集及整理

建立數值模式所需之數據的齊全性及準確度相當重要，若有足夠且可用的資料，能夠降低模擬的不確定性。模式中使用的資料包含底床地形、水位、上游入流量、水溫、懸浮泥砂濃度及粒徑值等，進行水理和泥砂傳輸模式率定和驗證之颱風

事件為 2015 年 8 月的蘇迪勒颱風事件及 2015 年 9 月的杜鵑颱風事件，且後續將延長蘇迪勒颱風模擬時間做為泥砂影響時間分析之用。以下將說明各項數據之資料來源及使用。



4.2.1 地形資料

本研究之地形原始數據收集自經濟部水利署第十河川局在 2014 年 12 月量測之淡水河流域河川大斷面地形，以及該局於 2014 年 9 月量測之淡水河口海域斷面地形。其斷面椿座標系統之大地基準為 TWD97、座標格式則為二度分帶座標(TM2)，然而 EFDC 模式使用的座標系統大地基準為 WGS84、座標格式為六度分帶座標 (UTM)，因此，需先透過程式碼或地理資訊系統軟體將原座標轉換成 WGS84 UTM51 區之座標。經過座標轉換後，採用 HEC-RAS 進行斷面間地形內插，以取得精度較高的數值高程模型 (DEM)，將其輸出成 tiff 檔，再由 ArcGIS 輸出為模式能夠讀入之含點座標位置及點高程的檔案格式。

4.2.2 水位、流量資料

EFDC 水理模式需使用資料包含各支流上游流量以及下游水位，其中上游河川流量資料包含由 2015 年各支流上游水位站之水位—流量率定曲線進行推算之結果以及石門水庫排流量，另採用位於本研究區域內大漢溪新海橋、淡水河台北橋及土地公鼻三處水位站資料做為模式率定以及驗證之用。綜合以上所需水位資料為經濟部水利署第十河川局所量測，石門水庫出水量則來自於 2015 年經濟部水利署北區水資源局研究報告中之調查。

上游支流流量條件部分，大漢溪流量為三峽河流量及石門水庫出流量加總，三峽河流量採用「三峽(2)」、「橫溪」兩水位站之率定曲線轉換得到之流量，三峽水位站於 2015 年 8 月 8 日以前使用第一條公式計算，8 月 8 日以後使用第二條公式計算；新店溪流量採用「秀朗」和「寶橋」兩水位站之率定流量總和；基隆河流量則為「五堵」水位站率定之流量值。下游水位則採用位於新北市淡水區第二漁港內的

「河口」水位站之實測值（表 4.2-1）。其中，本研究針對新店溪之秀朗水位站在高水位期間的率定曲線做了修正，因該率定曲線的原始數據較缺乏高流量數據，恐發生高水位時有高估流量的情形，故有必要進行流量修正以滿足本研究的高流量模擬需求（圖 4.2-1），修正方式是以 2015 年的實測水位流量值進行兩點對數線性內插為修正率定曲線(1)，另也發現颱風期間之水位高於當年實測水位的最大值，然而當年實測最高和次高之水位下的流量值已相差不大，因此，本研究再以該兩點進行對數線性外插為修正率定曲線(2)，以計算更高水位之流量值，前述各率定曲線之迴歸公式及使用條件整理於表 4.2-2。

表 4.2-1、邊界條件採用之水位站座標位置及其率定曲線

入出流 邊界條件	X 座標 (TWD97 TM2)	Y 座標	2015 年率定曲線
淡水河口	河口	291342.27 2786073.75	-
三峽河	三峽(2)	287752.81 2758581.45	$Q = 73.898(H - 28.42)^{1.828}$
			$Q = 57.329(H - 28.23)^{1.934}$
新店溪	橫溪	289877.43 2758720	$Q = 36.769(H - 21.83)^{2.095}$
	秀朗	303419 2764707.25	$Q = 302.000(H - 1.96)^{1.132}$
基隆河	寶橋	305851.87 2763650.41	$Q = 32.114(H - 6.88)^{1.419}$
	五堵	320267.38 2774725.35	$Q = 30.175(H - 3.92)^{1.548}$

表 4.2-2、秀朗橋原率定曲線及修正率定曲線

水位-流量率定曲線	使用條件	公式
原率定曲線	$H < 4.02$	$Q = 302.000(H - 1.96)^{1.132}$
修正率定曲線(1)	$4.02 \leq H \leq 10.68$	$\log(Q) = 1.894 \log(H) + 1.564$
修正率定曲線(2)	$H > 10.68$	$\log(Q) = 0.152 \log(H) + 3.356$

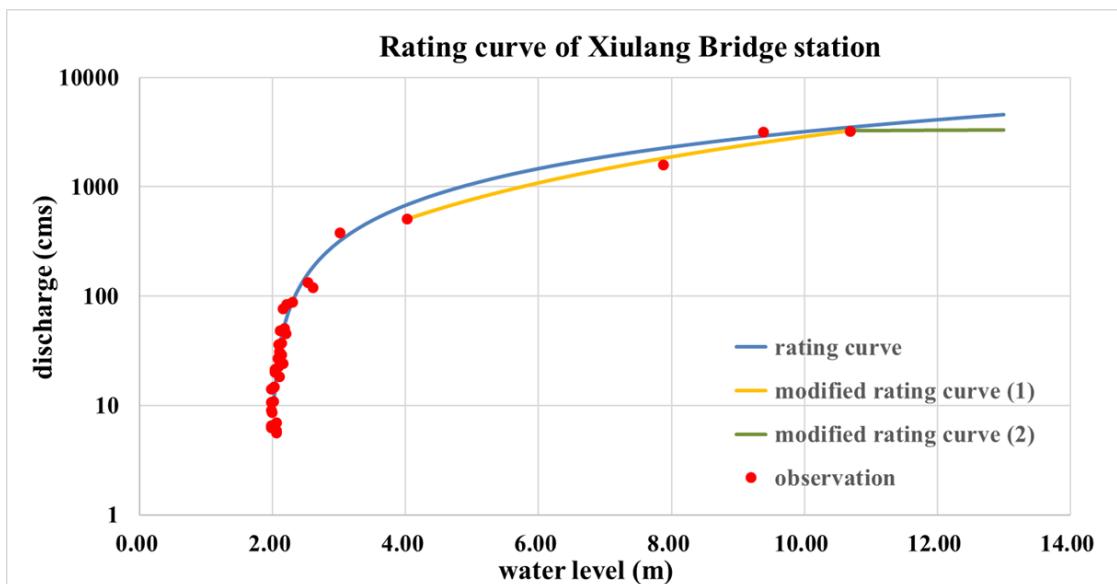


圖 4.2-1、秀朗橋水位站 2015 年原率定曲線、修正曲線及當年水位流量實測值

石門水庫出流量和模式入、出流所使用之水位資料均採每小時一筆數據，蘇迪勒颱風事件率定模擬採用之水庫出水量資料時間為 2015 年 8 月 7 日 0 時至 2015 年 8 月 21 日 23 時，共計 360 筆數據，其中 8 月 7 日 0 時至 12 日 7 時以及 19 日 16 時至 20 日 9 時水庫均曾洩洪（圖 4.2-2）。河川入流量和下游水位所使用之各水位站資料時間為 2015 年 8 月 6 日 0 時至 2015 年 8 月 22 日 0 時，各為 385 筆數據；杜鵑颱風事件驗證模擬使用之水庫出水量資料時間為 2015 年 9 月 28 日 0 時至 2015 年 10 月 13 日 0 時，共計 361 筆數據，前後經歷了三次洩洪排砂操作（圖 4.2-3），各水位站資料採用時間為 2015 年 9 月 27 日 0 時至 2015 年 10 月 13 日 0 時，除寶橋測站因資料部分缺漏（383 筆），其他測站均有完整時序資料（385 筆）；



後續以蘇迪勒颱風事件來評估高濃度泥砂條件，是採用 2015 年 8 月 7 日 0 時至 2015 年 9 月 2 日 0 時之水位站數據，將上述採用時間之水位數據轉換成三峽河、新店溪和基隆河流量時間序列分別可見圖 4.2-4 和圖 4.2-5。本研究使用水位測站的實測水位數據進行水理模式的率定和驗證（每 10 分鐘一筆），兩場颱風事件均有部分量測資料缺漏，率定期間新海橋、台北橋及土地公鼻水位站各有 1316、1302 和 1293 筆數據，驗證期間則各為 2300、2293 和 2300 筆數據（表 4.2-3）。

表 4.2-3、率定和驗證期間之水位站座標位置、資料數

水位測站	X 座標 (TWD97 TM2)	Y 座標	資料筆數	
			率定期間	驗證期間
新海橋	295896	2769545	1316	2300
台北橋	300945.82	2771605.79	1302	2293
土地公鼻	296024.41	2780761.9	1293	2300

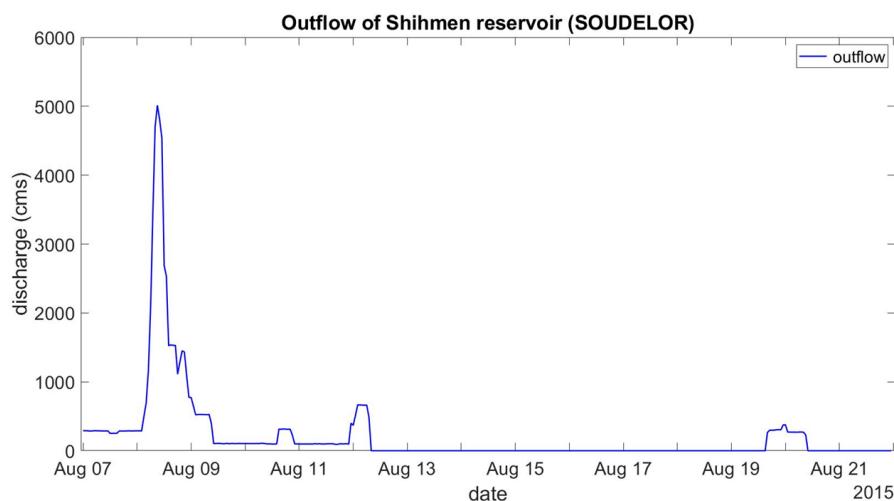


圖 4.2-2、蘇迪勒颱風模擬期間之石門水庫放流量

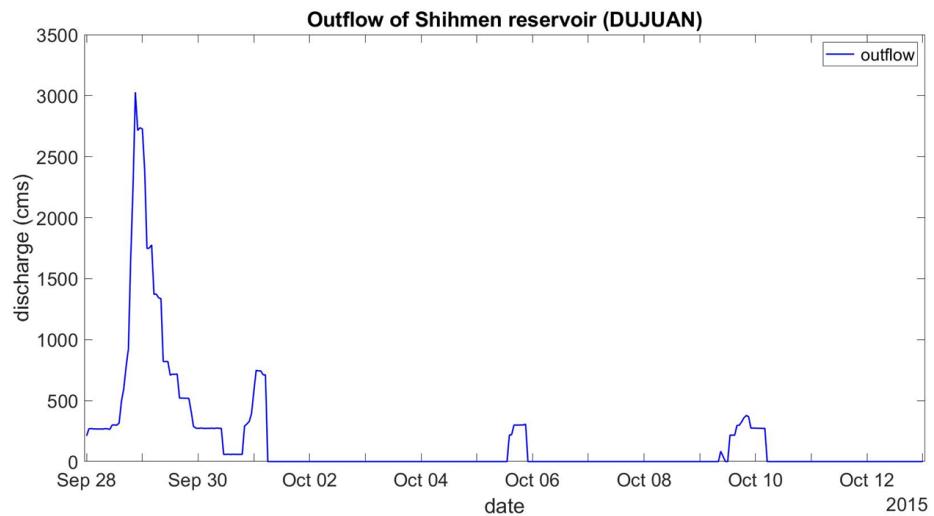


圖 4.2-3、杜鵑颱風模擬期間之石門水庫放流量

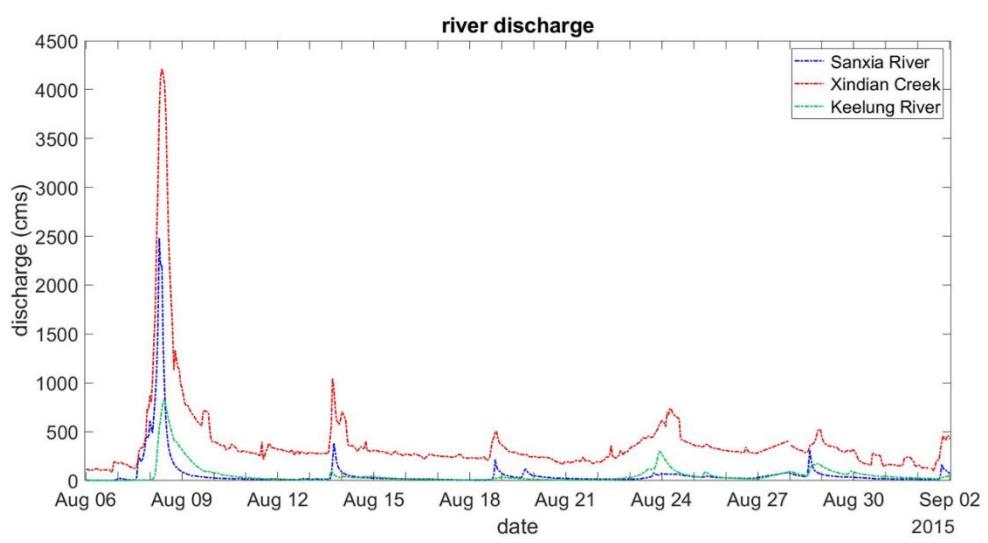


圖 4.2-4、2015 年 8 月 6 日 0 時至 2015 年 9 月 2 日 0 時水位率定之流量

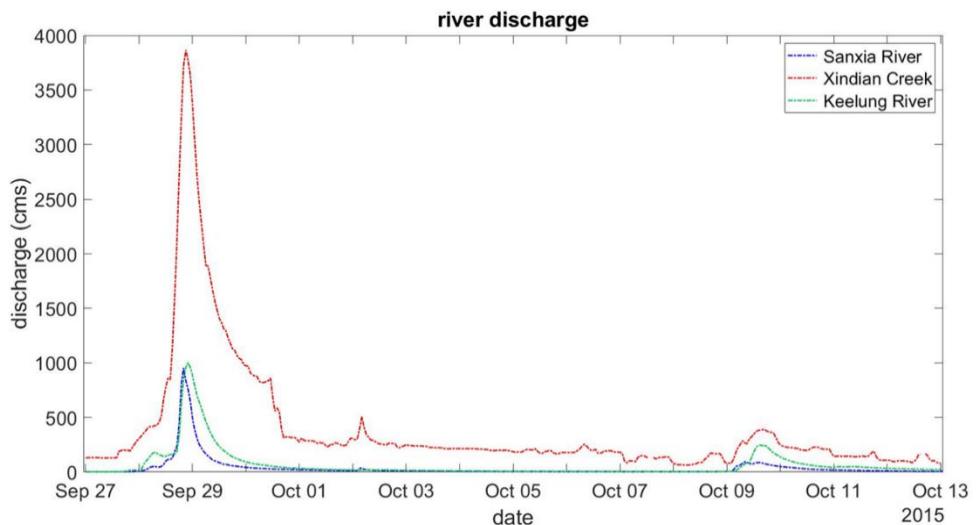


圖 4.2-5、2015 年 9 月 27 日 0 時至 2015 年 10 月 6 日 0 時水位率定之流量

4.2.3 水溫資料

因無詳細時水溫資料，採用 2015 年行政院環境保護署每月水質監測分別於浮洲橋、中正橋、百齡橋及淡水河口調查之 8、9 月水溫，如表 4.2-4。

表 4.2-4、環保署 2015 年 8、9 月水溫監測數據

調查測站	日期	時間	水溫(°C)
淡水河口	2015/08/04	06:45	29.5
	2015/09/03	07:05	24.9
浮洲橋	2015/08/03	08:45	29.2
	2015/09/01	08:21	24.3
中正橋	2015/08/04	09:15	23.6
	2015/09/03	09:35	23.0
百齡橋	2015/08/03	07:55	29.6
	2015/09/01	07:25	24.8



4.2.4 懸浮泥砂濃度資料

本研究使用「石門水庫排洪減淤操作對下游河道生態影響及改善方案研究」所調查之颱風全洪程懸浮固體濃度（林幸助、施上粟，2015），以及行政院環境保護署 2015 年水質監測調查的懸浮固體濃度做為泥砂傳輸模式所需資料。上述研究報告中的濃度調查是以 DH-59 懸浮含砂量取樣器進行採樣，因感潮河口段泥砂顆粒會受鹽水影響而產生結晶，樣品烘乾後已先透過濾紙進行過濾再秤重；另環保署之懸浮固體濃度檢測採 103-105 °C 乾燥法量測。

研究報告測站包含淡水河的淡水（淡水老街附近碼頭岸邊）、重陽橋和台北橋、大漢溪的新海橋和浮洲橋、新店溪的華中橋以及基隆河的大直橋，並選用蘇迪勒和杜鵑兩颱風全洪程的濃度調查資料。其中，蘇迪勒颱風期間懸浮固體濃度調查之採樣資料時間由 2015 年 8 月 7 日 9 時至 8 月 21 日為止，因不少樣站資料於 8 日 5 時資料缺漏，故除浮洲橋為 26 筆資料外，其餘測站均為 25 筆資料（圖 4.2-6）。杜鵑颱風期間之調查則是從 2015 年 9 月 28 日 9 時到 10 月 12 日，各測站均為 26 筆數據（圖 4.2-7）。另外，為延長模擬時間，採用環保署 2015 年 8 月至 10 月每月一筆之水質監測調查之懸浮固體濃度與全洪程調查結果進行資料整合，環保署懸浮固體濃度資料之測站所採用、調查時間及濃度值如表 4.2-5。

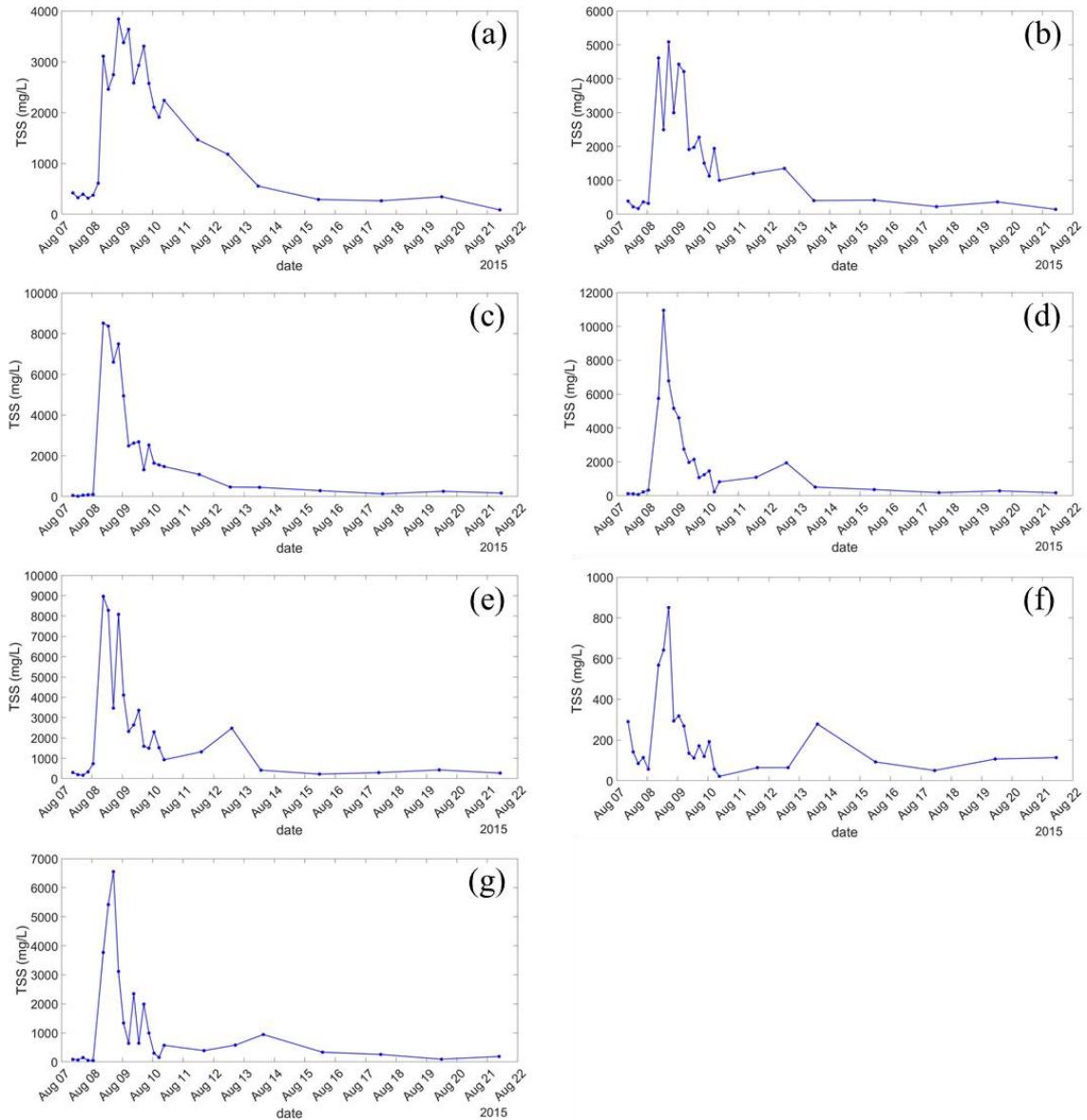


圖 4.2-6、蘇迪勒颱風不同量測測站之懸浮固體濃度變化圖 (a)浮洲橋 (b)新海橋
(c)華中橋 (d)台北橋 (e)重陽橋 (f)大直橋 (g)淡水

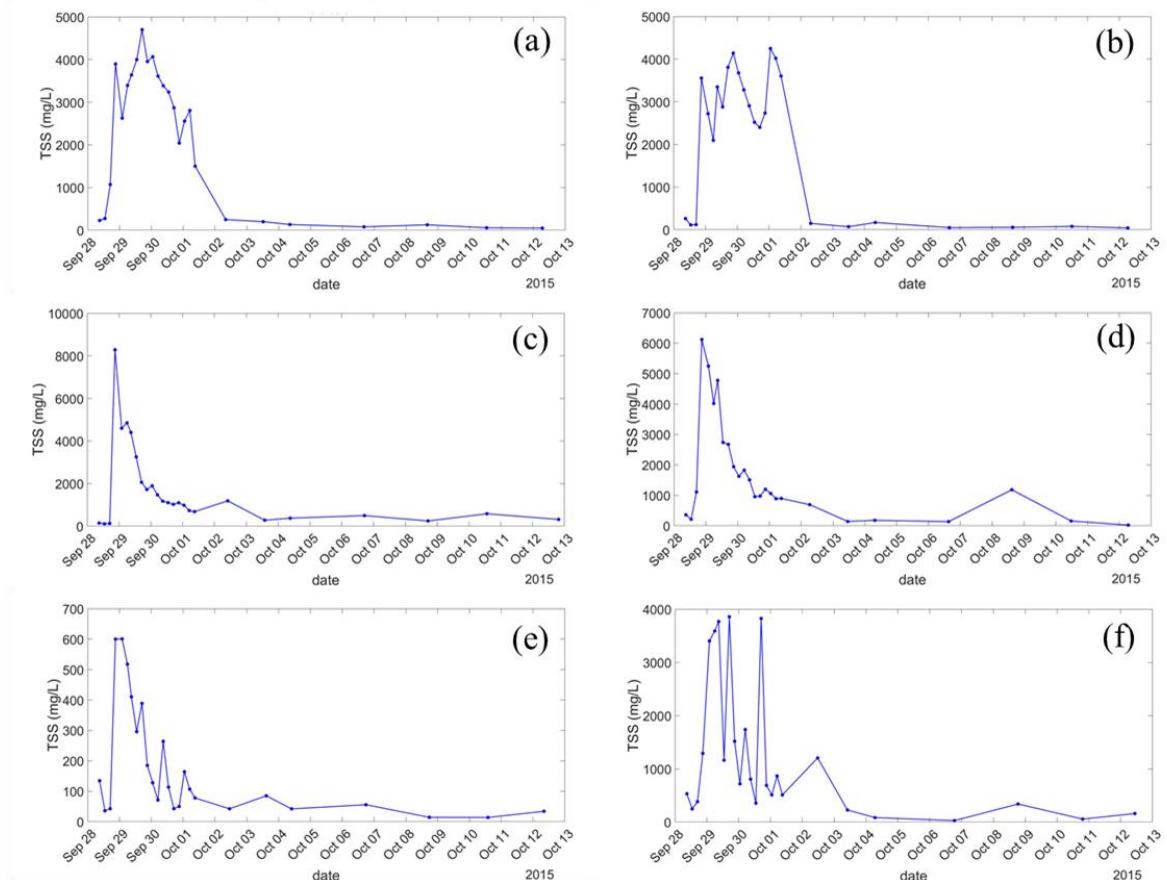


圖 4.2-7、杜鵑颱風不同量測測站之懸浮固體濃度變化圖 (a)浮洲橋 (b)新海橋
(c)華中橋 (d)台北橋 (e)大直橋 (f)淡水

表 4.2-5、環保署 2015 年 8 月至 10 月懸浮固體濃度監測數據

調查測站	日期	時間	懸浮固體濃度(mg/L)
淡水河口	2015/08/04	06:45	25.4
	2015/09/03	07:05	559.0
	2015/10/18	06:45	50.9
浮洲橋	2015/08/03	08:45	22.2
	2015/09/01	08:21	72.2
	2015/10/17	08:45	18.7
中正橋	2015/08/04	09:15	7.2
	2015/09/03	09:35	614.0
	2015/10/18	09:19	117.0
百齡橋	2015/08/03	07:55	37.0
	2015/09/01	07:25	23.9
	2015/10/17	08:05	10.9

4.2.5 懸浮泥砂與底床泥砂粒徑資料

為決定泥砂傳輸模式之模組設定，需先了解模擬期間之泥砂顆粒大小，因此本研究進行懸浮泥砂粒徑以及底床泥砂粒徑級配之蒐集。懸浮泥砂粒徑資料使用前述林幸助、施上稟(2015)的研究調查結果，其粒徑採樣是由雷射光繞射儀(LS230)作為樣本分析，適用粒徑範圍由 0.00004 mm-2 mm。研究採用蘇迪勒與杜鵑颱風全洪程量測期間各測站最大濃度之中值粒徑(D_{50})作為模式模擬決策之一(表 4.2-6、表 4.2-7)；另底床泥砂粒徑資料則採用施上稟等人(2008)執行經濟部水利署第十河川局之計畫的調查成果，並使用其 2008 年 7 月 10 日至 7 月 15 日分別於淡水河兩處(淡水老街附近和台北橋)、大漢溪(大漢橋)、新店溪(華中橋)、基隆河(關渡濕地)各一處河川大斷面上進行鑽探採樣之試驗資料，且主要依統一土壤分類法(Unified Soil Classification System, USCS)分類之表層泥砂類別及其孔隙比(void ratio)進行分析(表 4.2-8)。

表 4.2-6、蘇迪勒颱風懸浮泥砂量測最大濃度中值粒徑

測站	淡水	重陽橋	台北橋	大直橋	華中橋	新海橋	浮洲橋
D ₅₀ (mm)	0.011	0.0086	0.0108	0.0188	0.0052	0.0082	0.010

表 4.2-7、杜鵑颱風懸浮泥砂量測最大濃度中值粒徑

測站	淡水	重陽橋	台北橋	大直橋	華中橋	新海橋	浮洲橋
D ₅₀ (mm)	0.0097	0.0083	0.0098	0.0159	0.0085	0.0048	0.0048

表 4.2-8、2008 年 7 月淡水河系底床表層泥砂試驗結果

採樣地點	表層泥砂分類	表層泥砂厚度(m)	孔隙比(e)
淡水河 T-03	粉土質黏土層(CL-1)	0.3	-
淡水河 T-24	細砂質粉土層(ML-1)	0.71	-
大漢溪 T-35	粉土質黏土層(CL-1)	0.8	-
新店溪 H-05	粉土質黏土層(CL-1)	0.4	-
基隆河 K-03	粉土質黏土層(CL-1)	0.3	1.22



4.3 EFDC 模式建立

EFDC 模式的模擬範圍下游至淡水河口，上游含括大漢溪、新店溪和基隆河等三大支流（圖 4.3-1）。因研究重點是針對颱風期間及過後河口水動力行為對於來自石門水庫排砂之傳輸影響，無論上游各支流河川流量、水庫放流流量亦或是下游潮流量，均可能影響潮間帶懸浮泥砂傳輸特性，故上游邊界分別為大漢溪之城林橋、新店溪之中正橋、基隆河之百齡橋，河系中的二重疏洪道於蘇迪勒颱風期間有分洪，故亦將此人工渠道納入 EFEC 模式的河系範圍（圖 4.3-2）。EFDC 的水動力模組以及泥砂傳輸模組之凝聚性泥砂參數設定請參見表 4.3-1。

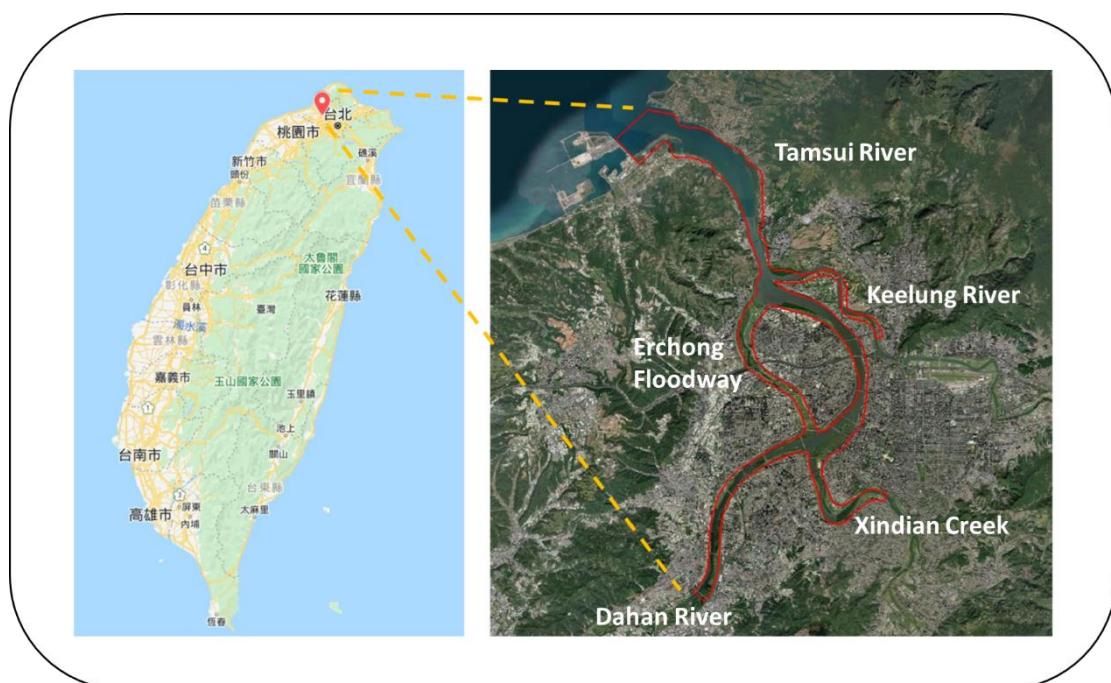


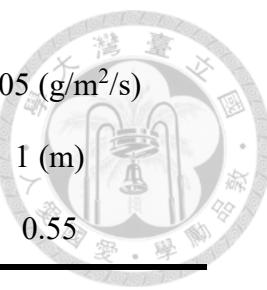
圖 4.3-1、模式區域地理位置



圖 4.3-2、模式區域底部地形高程

表 4.3-1、水動力模式及泥砂傳輸模式之參數採用

模式參數	參數範圍	參數值
粗糙高度(z_0^*)	0.1-0.0001	0.1-0.001 (m)
水平渦流黏度(AHO)	0.25-20	0.5-20 (m ² /s)
凝聚性泥砂(8μm)		
比重(SG)	2.70-2.80	2.7
比體積(Specific Volume)	-	3.773E-07
沉降速度(w_s)	2×10^{-3} - 9×10^{-6}	0.0003 (m/s)
臨界沉積應力(τ_{cd})	1.1×10^{-3} - 6×10^{-5}	0.00006 (m ² /s ²)
臨界沖刷應力(τ_{ce})	1.1×10^{-3} - 2×10^{-6}	0.0011 (m ² /s ²)
沖刷指數(α)	-	2.1



表面沖刷率($rser$)	0.005-0.1	0.005 (g/m ² /s)
底層泥砂厚度	-	1 (m)
底層泥砂孔隙比(porosity)	-	0.55

4.3.1 網格建立

本研究採用 EFDC 模型的曲線正交網格，其優點為邊界處的網格能更貼齊河道邊界及河岸處。以網格尺寸 35m×35m 進行全河系網格設計，建置完成後共 25,546 個網格，其中最大網格面積為 7,608.030 m²、最小網格面積 219.958 m²、平均網格面積為 1475.357 m²。為確認 DEM 內插之網格高程準確性，藉由比對各河川大斷面測量點高程與模式網格底部高程進行地形檢核，數值地形建立結果整體而言與大斷面資料相當吻合(比對結果請參閱本文附錄)。另因大漢溪城林橋之河寬較窄，亦檢核模擬期間最低水位高程下河道斷面濕網格數量，以降低模式斷面單寬流量可能產生錯估，結果發現城林橋斷面之濕網格數量為 3 個，總和寬度約 100 m 應為合理範圍。研究區域之網格高程最小值為-12.711 m，最大值則因包含高灘地形和堤防可達 10.368 m，故需設定乾濕網格模式以確保模擬能穩定收斂，本研究設定 0.03 m 水深以下之網格為乾網格避免模式發散。圖 4.3-3 為模式網格、水位驗證測站和懸浮泥砂濃度驗證測站位置；圖 4.3-4 為模式入出流邊界網格之標示。(各測站簡稱為其英文名縮寫，其中「新海橋」為 HHB、「台北橋」為 TPB、「重陽橋」為 CYB、「土地公鼻」為 TDKB)

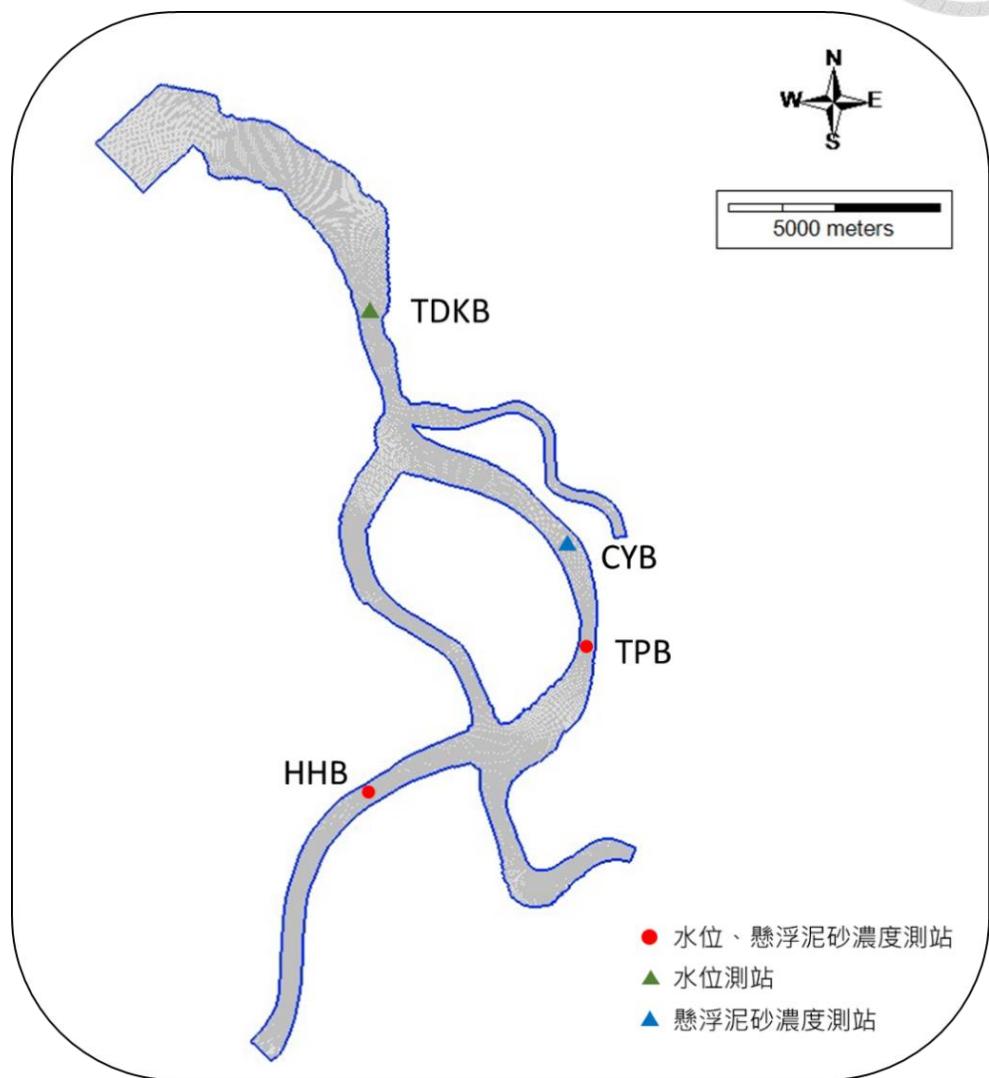


圖 4.3-3、模式網格和水位、懸浮泥砂濃度測站位置

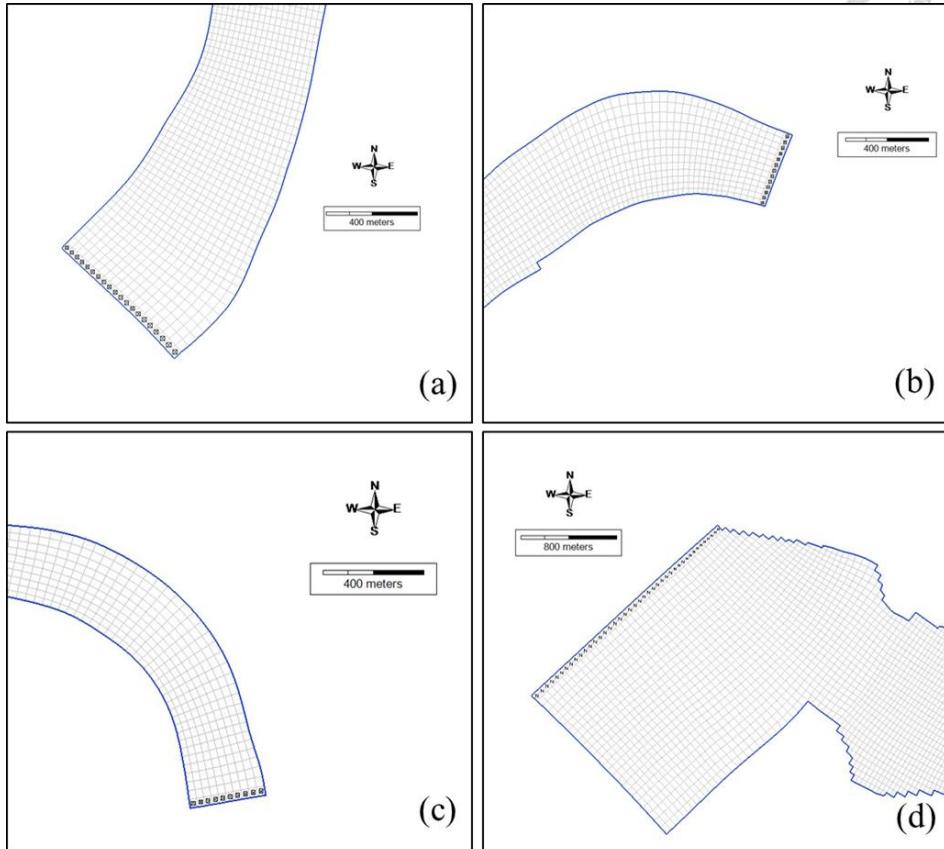


圖 4.3-4、模式邊界網格設置 (a)入流邊界-大漢溪城林橋 (b)入流邊界-新店溪中正橋 (c)入流邊界-基隆河百齡橋 (d)出流邊界-淡水河口

4.3.2 初始條件與邊界條件

本節說明設定水動力模式和泥砂傳輸模式所需之初始及邊界條件，包含初始水位、鹽度、水溫、水體懸浮泥砂濃度和底層泥砂厚度及其孔隙比等。為了解颱風期間及過後水理及懸浮泥砂濃度時空變化，本模式率定和驗證之模擬時間和颱風事件分別為 2015 年 8 月 6 日 0 時至 8 月 22 日 0 時之蘇迪勒颱風事件及 2015 年 9 月 27 日 0 時至 10 月 13 日 0 時之杜鵑颱風事件，模擬天數均為 16 天。其中，水位高程初始條件設為 0 m、鹽度初始條件設為 0 ppt、水溫和懸浮泥砂濃度則基於環保署 2015 年 8 月之量測分別設為 29 °C 和 20 mg/L，底層泥砂厚度及其孔隙率 (porosity) 參考第十河川局於 2008 年 7 月淡水河系調查數據，分別設為 0.1 m 及 0.55。為避免模式初始條件設定不當導致模式發散或模擬結果收斂不佳，均事先進

行 30 天的暖機模擬 (spin-up time)，時間步長則設定為 0.5 秒。

另外，水動力模式中入、出流邊界條件分別給定上游入流量、下游水位、水溫及鹽度變化 (影響水體密度)，泥砂傳輸模式入、出流邊界條件則為懸浮泥砂濃度。本模式包含三個入流邊界以及一個出流邊界，其中三個入流邊界位置分別為城林橋 (大漢溪)、中正橋 (新店溪) 及百齡橋 (基隆河)，出流邊界則約至淡水河口；入流量和下游水位採用十河局水位數據和北水局調查報告數據 (石門水庫放流量)；水溫採用環保署於淡水河口、浮洲橋、中正橋和百齡橋量測數據；上游鹽度設為淡水入流 0 ppt、下游則假設為海水平均鹽度 35ppt；懸浮固體濃度如前述，同時採用林幸助、施上粟 (2015) 的調查報告 (汛期，颱洪事件為主)，及環保署的每月常實調查資料量測之。上述入出流邊界條件整理於圖 4.3-5 和圖 4.3-6。

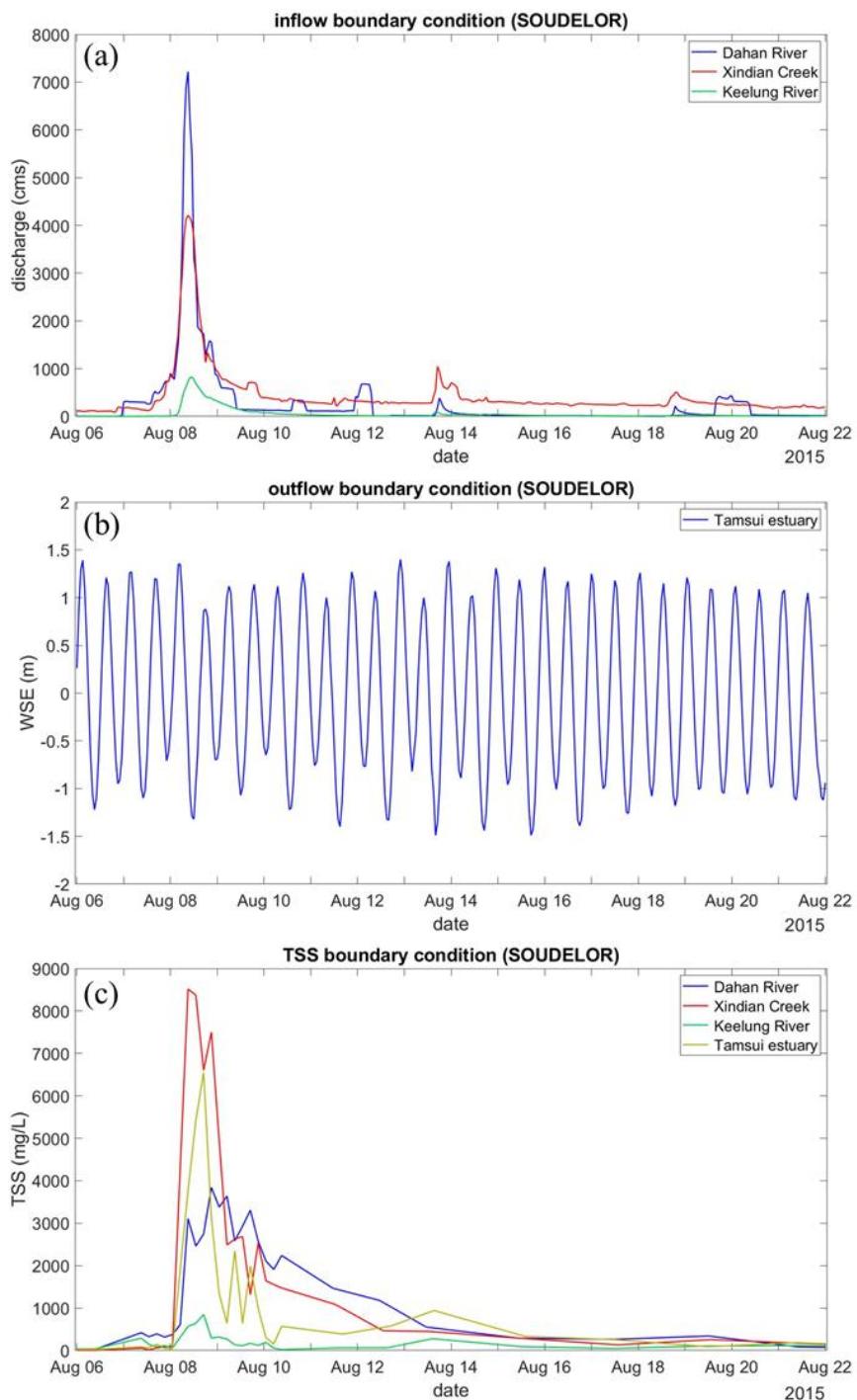


圖 4.3-5、蘇迪勒颱風事件模擬之(a)水動力入流邊界條件 (b)水動力出流邊界條件 (c)泥砂傳輸邊界條件

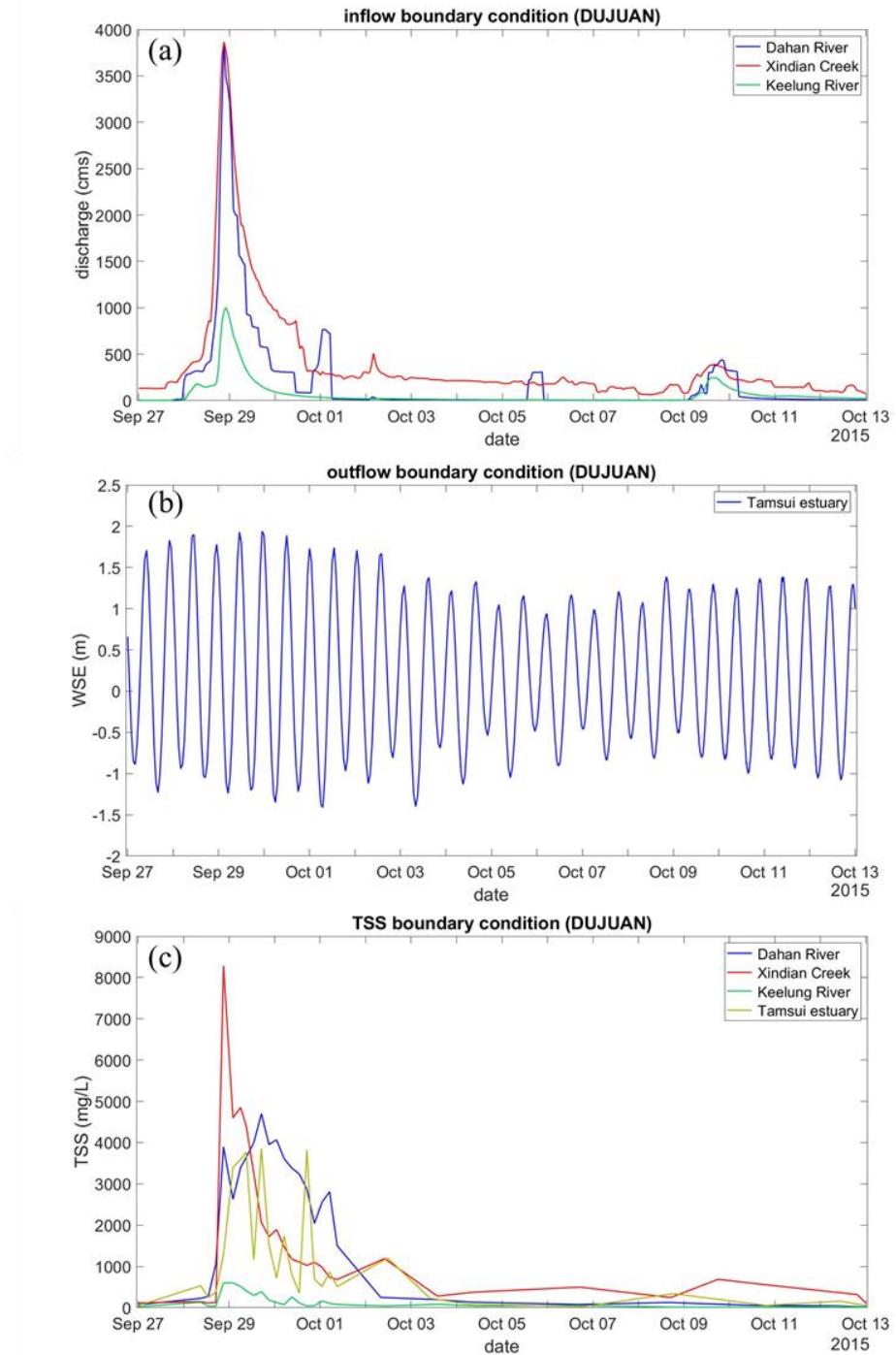


圖 4.3-6、杜鵑颱風事件模擬之(a)水動力入流邊界條件 (b)水動力出流邊界條件
(c)泥砂傳輸邊界條件



4.3.3 泥砂粒徑之簡化

本研究根據林幸助、施上粟 (2015) 執行調查報告中蘇迪勒颱風和杜鵑颱風懸浮泥砂量測最大濃度之中值粒徑尺度，以及 2008 年施上粟執行十河局調查計畫時，於淡水河系底泥粒徑調查的結果進行輸砂模式的粒徑設定。在蘇迪勒颱風事件調查中，除基隆河大直橋測站的中值粒徑為 $18.8 \mu\text{m}$ 稍大外，其餘測站的粒徑範圍於 $5.2 \mu\text{m}$ - $11 \mu\text{m}$ ，而杜鵑颱風事件調查測站中最大粒徑亦出現於大直橋測站為 $15.9 \mu\text{m}$ ，其餘測站之範圍則為 $4.8 \mu\text{m}$ - $9.8 \mu\text{m}$ ，兩颱風期間與林幸助、施上粟 (2015) 調查報告於汛期前 (3 月) 量測的結果相比泥砂粒徑相對較小，可能因上述兩場颱風事件發生時石門水庫均有進行排砂，大漢溪河道中的泥砂來源主要為水庫淤泥所致，而蘇迪勒颱風事件發生後新店溪集水區崩塌，有大量泥砂流入下游河道，則為可能影響新店溪測站泥砂粒徑較小的原因之一。根據 USDA 土壤分類，以上兩場颱風事件之中值粒徑範圍於 $2 \mu\text{m}$ - $50 \mu\text{m}$ 間，均屬坋土 (silt)。

淡水河系底質鑽探調查 5 個不同位置，分別為淡水河之淡水老街附近和臺北橋、大漢溪之大漢橋、新店溪之華中橋以及基隆河之關渡濕地，透過統一土壤分類法分類之結果顯示，除台北橋表層泥砂分層屬細砂質粉土層 (ML-1) 外，其餘測站表層泥砂均屬粉土質黏土層 (CL-1)，其中兩者的分類標準均為通過 #200 號篩之百分比需大於 50%，即孔徑小於 $75 \mu\text{m}$ 的泥砂超過 50%。雖報告中並無各測站表層土壤完整的粒徑分布曲線，然經由分類可知當時淡水河系底床表面泥砂中值粒徑均小於或遠小於 $75 \mu\text{m}$ ，並將此結果做為模式運用之依據。

根據 EFDC 模式之建議，泥砂粒徑小於 $62 \mu\text{m}$ 即屬凝聚性泥砂範圍，颱風期間水中懸浮泥砂顆粒中值粒徑均遠小於此數值，而底床調查結果雖無詳細粒徑，亦大致可將其假設為凝聚性泥砂，且如 Hsu et al. (2006) 研究中提到淡水河系底床粒徑雖較大，但水中懸浮物粒徑小，代表極可能僅有小顆粒泥砂被懸浮。本研究基於前述的彙整分析進行適度之粒徑簡化，另根據 Mehta et al. (1989) 分析 Migniot (1968) 和 Chase (1979) 之沉降筒 (settling tube) 實驗數據結果，發現粒徑大小為

0.2、2 和 20 μm 之絮凝泥砂團沉降速度 (aggregate settling velocity) 分別為 0.11、0.17 和 0.27 mm/s ，屬同一數量級。模式以單一條件之凝聚性泥砂進行模擬，並依照颱風期間量測之懸浮泥砂粒徑結果，將模式泥砂代表中值粒徑設定為 8 μm 。

4.4 模式驗證

4.4.1 水理模式

為了檢核此數值模型對於模擬真實流況的能力，模式率定及驗證過程使用均方根誤差 (Root Mean Square Error；RMSE)、有效性係數 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient；NSE) 和相關係數 (Correlation Coefficient； R^2) 來當成水位率定指標，詳細計算公式如下所述：

(1) 均方根誤差 (RMSE)

RMSE 能夠避免模擬值和實測值間的誤差值因正負號加總而抵銷，因此，其數值越小就表示誤差越小、準確性越高。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Y(t) - O(t))^2} \quad (4.4.1)$$

上式中， $Y(t)$ 表示模擬水位； $O(t)$ 表示實測水位； N 為資料總筆數。

(2) 有效性係數 (NSE)

此係數是由殘餘誤差變異數 (error sum of squares；SSE) 與平均值總變異數 (total sum of squares；SST) 計算得出：

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Y(t) - O(t))^2}{\sum_{t=1}^N (Y(t) - \bar{Y}(t))^2} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4.4.2)$$



上式中， $\bar{Y}(t)$ 表示模擬水位之平均。有效性係數能用以判定模式效能表現，其數值範圍為 $-\infty \leq NSE \leq 1$ ，根據 Ritter and Muñoz-Carpena (2013) 研究提出 NSE 的評估判斷標準如表 4.4-1 所示：

表 4.4-1、NSE 之評斷標準 (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013)

NSE	模式表現
1.0 - 0.90	非常好
0.90 - 0.80	好
0.80 - 0.65	可接受
< 0.65	不盡滿意

(3) 相關係數 (R^2)

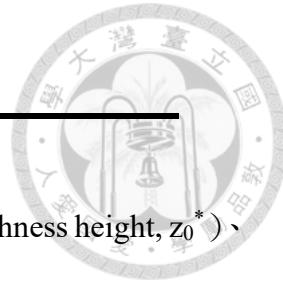
相關係數是一種可反映出模擬值和實測值間相關關係的指標，因平方關係數值範圍於 0 至 1 之間，其中，數值越接近 1 就表示兩變數能以線性方程式來描述，呈高度相關，反之，越接近 0 就代表兩變數之間的相關性越低。

$$R^2 = \frac{\{\sum_{t=1}^N (Y(t) - \bar{Y}(t))(O(t) - \bar{O}(t))\}^2}{\sum_{t=1}^N (Y(t) - \bar{Y}(t))^2 \sum_{t=1}^N (O(t) - \bar{O}(t))^2} \quad (4.4.3)$$

上式中， $\bar{O}(t)$ 表示實測平均值。根據 Bae and Seo (2018) 總結過去研究中 R^2 大小反應模式表現如表 4.4-2：

表 4.4-2、 R^2 之評斷標準 (Bae and Seo, 2018)

R^2	模式表現
> 0.65	非常好
0.50 - 0.65	好
0.20 - 0.50	可接受



EFDC 模式中常用以率定之水理參數分別為粗糙高度 (roughness height, z_0^*)、水平紊流係數 (Background Horizontal Eddy Viscosity, AHO) 和 Smagorinsky 係數 (AHD) (Smagorinsky, 1963)。其中，粗糙高度數值與水深有關，模式藉調整粗糙高度大小來改變無因次阻力係數 (drag coefficient, C_b)，產生不同底床剪力以修正流況。AHO 和 AHD 具相同作用，均藉改變水平渦流之擴散力來進行率定，而無因次之 AHD 參數則與網格大小和水流剪力進行連接來修正水平渦流黏度 (Ji, 2017)。因本研究以試誤法 (trial and error method) 進行水理率定，以粗糙高度和水平渦流係數作為主要率定水位之參數。

經過敏感度分析發現，在流量較低、水位變動受潮汐影響期間，提高粗糙高度及水平紊流係數會使整體水位起伏較小，各水位站之模擬結果均顯示出高水位較低、低水位較高的情形，推測粗糙高度變大會導致底部磨擦增加，而紊流擴散增加則會使能量削減，造成潮汐傳遞能力下降；反之，颱風期間之水位改變主要受上游洪流影響，此時粗糙高度和水平紊流係數提高則會使水位上升，推測在增加底部摩擦以及紊流擴散消散能量的情況下，大量的水由上游排入，水流速度可能被降低，洪水傳遞較慢，反而導致該期間的水位上升。故為能在整個模擬期間均有良好的模擬結果，將河系細分為不同的空間特徵：出海口、淡水河、大漢溪、新店溪、基隆河與二重疏洪道，每區空間再細分為主河道、高灘地和濕地等設定不同參數值，其中高灘地是以地形高程 1.5 m 以上做為判斷基準。此外，主河道之粗糙高度及水平紊流係數主要率定非颱風期間隨潮汐變動之水位，而在高流量颱風期間，則藉合理調整高灘地、濕地的粗糙高度及水平渦流係數來擬和颱風期間之高水位，期望能透過提高兩區域粗糙高度表現出河道兩岸植生對整體流況的影響。

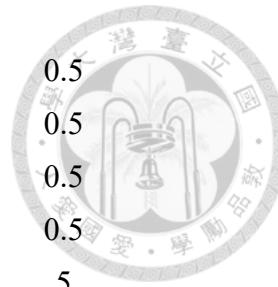
以蘇迪勒颱風事件 2015 年 8 月 6 日 0 時至 8 月 22 日 0 時作為率定，並採用研究區域中的新海橋、台北橋與土地公鼻三處水位站每 10 分鐘一筆資料作為參數

率定之各區域參數值如表 4.4-3。各水位站的模擬結果均與實測值滿吻合（圖 4.4-1 至圖 4.4-3），除高、低潮位處差異較明顯，實測值相較高一些，大致上潮汐起伏與颱風期間漲、退水有相近趨勢；土地公鼻站在颱風期間水位模擬值與實測值相差較多，實測水位並無像上游測站有明顯漲水，然經調查土地公鼻站附近之獅子頭測站當時之水位變化，發現有明顯水位抬升，故推測當時土地公鼻站可能出現水位異常。各統計指標計算結果顯示模式的水理模擬結果是可靠的：新海橋測站均方根誤差（RMSE）為 0.309 m、相關係數（ R^2 ）為 0.967、有效性係數（NSE）為 0.951；台北橋測站均方根誤差（RMSE）為 0.230 m、相關係數（ R^2 ）為 0.973、有效性係數（NSE）為 0.958；土地公鼻測站均方根誤差（RMSE）為 0.280 m、相關係數（ R^2 ）為 0.946、有效性係數（NSE）為 0.876（表 4.4-4），土地公鼻測站雖受颱風期間水位影響有效性係數相對稍低，但其值於 0.8 至 0.9 之間，依照評判標準仍為「好」的模式表現。

參數經前述率定過程後即不再改變，接著以杜鵑颱風事件 2015 年 9 月 27 日 0 時至 10 月 13 日 0 時進行驗證，結果顯示模擬值與實測值相近（圖 4.4-4 至圖 4.4-6）。與率定期間較不同之處為，三水位站於高、低潮位時，模擬值大部分情況相對較高，推測可能由於無進行風速、風向之模擬或邊界條件給定產生之不確定性所致。驗證之水位統計指標計算結果大致顯示比率定結果更佳，尤其土地公鼻測站之有效性係數提高：新海橋測站均方根誤差（RMSE）為 0.221 m、相關係數（ R^2 ）為 0.960、有效性係數（NSE）為 0.956；台北橋測站均方根誤差（RMSE）為 0.233 m、相關係數（ R^2 ）為 0.969、有效性係數（NSE）為 0.940；土地公鼻測站均方根誤差（RMSE）為 0.178 m、相關係數（ R^2 ）為 0.977、有效性係數（NSE）為 0.955（表 4.4-5）。

表 4.4-3、模式各區域率定參數值

區域	粗糙高度(m)	AHO(m^2/s)
淡水河主河道	0.001	5



大漢溪主河道	0.005	0.5
新店溪主河道	0.005	0.5
基隆河主河道	0.005	0.5
二重疏洪道	0.001	0.5
出海口	0.01	5
淡水河高灘地	0.01	5
大漢溪高灘地	0.1	20
新店溪高灘地	0.1	20
基隆河高灘地	0.01	0.5
濕地(關渡、竹圍、挖子尾)	0.1	20

表 4.4-4、蘇迪勒期間水位率定之各率定指標值

測站	RMSE (m)	R ²	NSE
HHB	0.309	0.967	0.951
TPB	0.230	0.973	0.958
TDKB	0.280	0.946	0.876

表 4.4-5、杜鵑期間水位驗證之各率定指標值

測站	RMSE (m)	R ²	NSE
HHB	0.221	0.960	0.956
TPB	0.233	0.969	0.940
TDKB	0.178	0.977	0.955

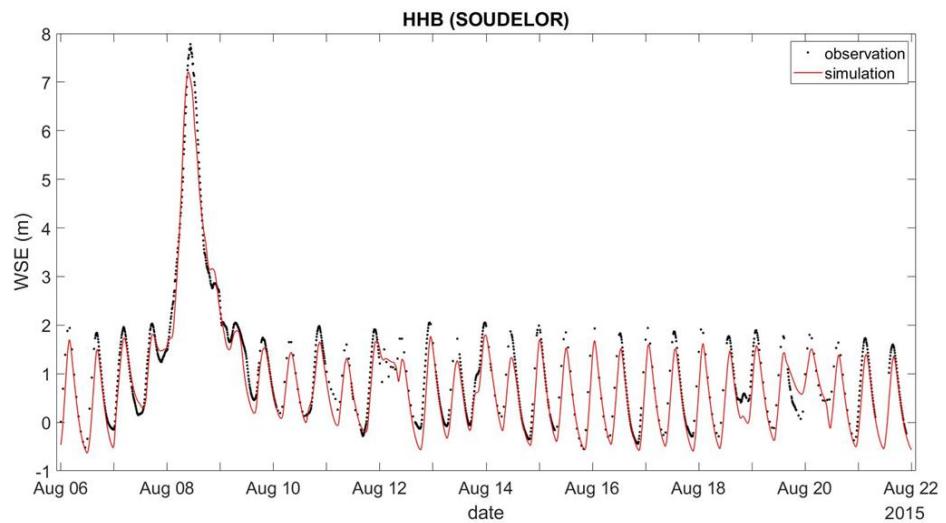


圖 4.4-1、模式水位率定結果（新海橋測站）

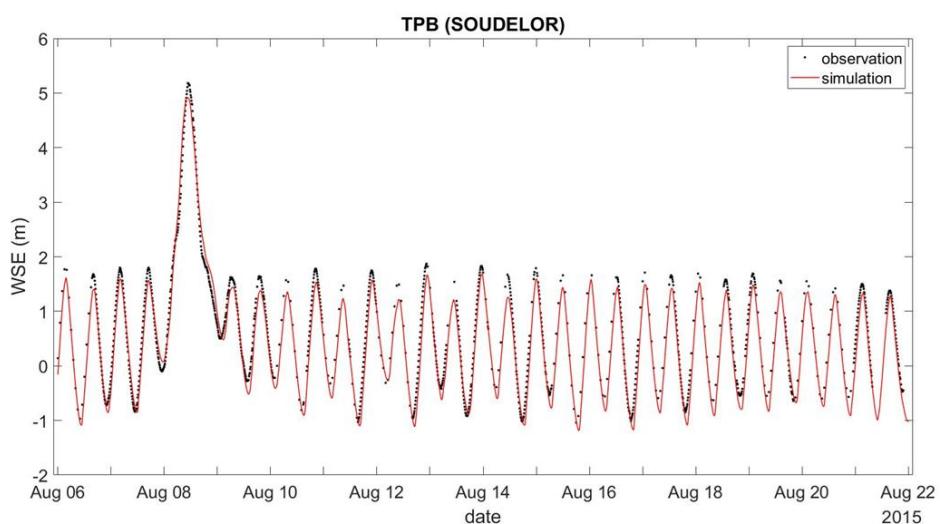


圖 4.4-2、模式水位率定結果（台北橋測站）

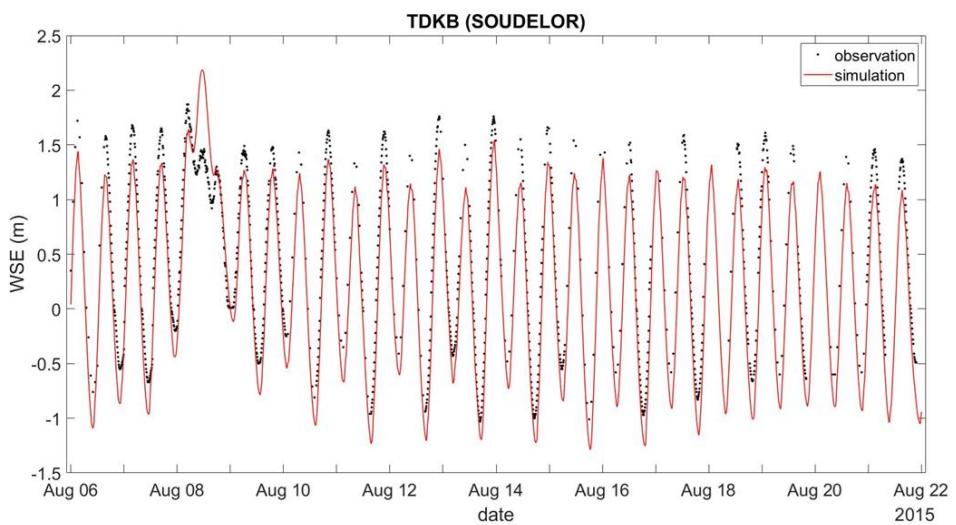


圖 4.4-3、模式水位率定結果（土地公鼻測站）

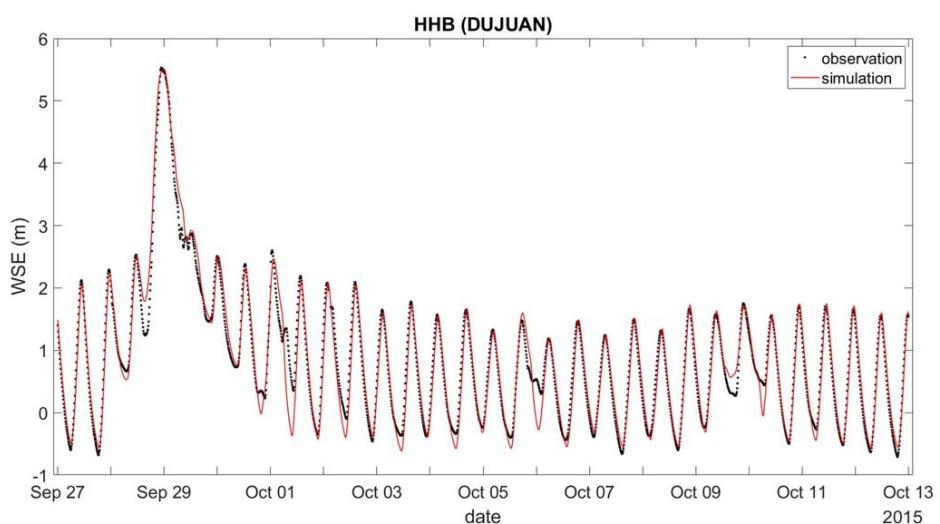


圖 4.4-4、模式水位驗證結果（新海橋測站）

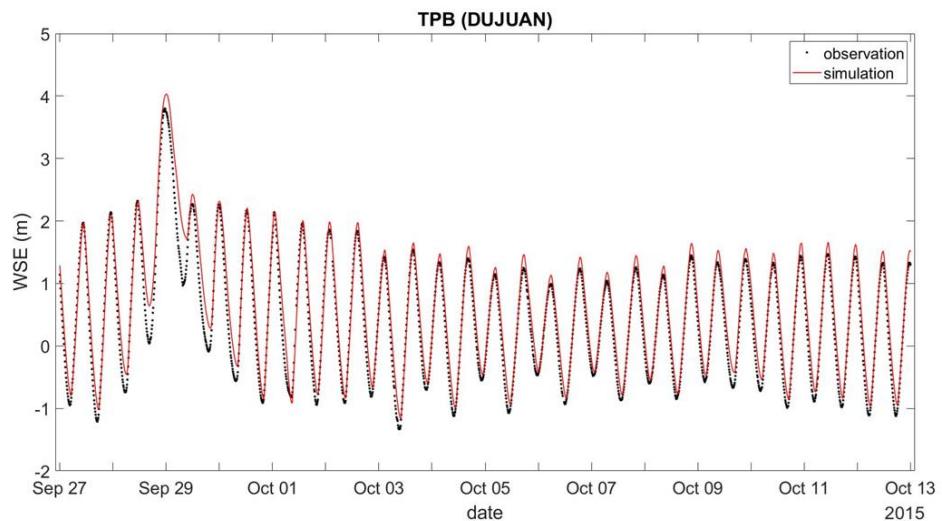


圖 4.4-5、模式水位驗證結果（台北橋測站）

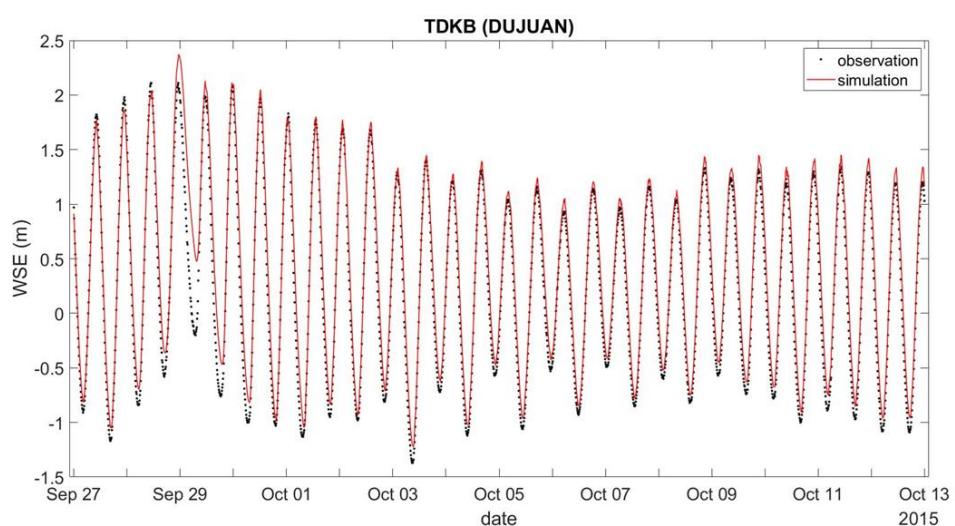


圖 4.4-6、模式水位驗證結果（土地公鼻測站）



4.4.2 泥砂傳輸模式

泥砂傳輸模擬的率定及驗證是以全洪程實測之懸浮泥砂濃度為模式比對對象。懸浮泥砂的傳輸是相當複雜的過程，與底床沖刷、泥砂沉降與沉積相關，且實際上泥砂的運動行為常具有高度隨機性，因此其模擬的擬真能力通常不如水理模擬。EFDC 原始泥砂傳輸模式中含相當多可率定的參數，根據過去文獻 (Cho et al., 2016; Pak et al., 2016; Ji et al., 2002; Liu and Huang, 2009)，常使用之泥砂參數包含沉降速度 (settling velocity, w_s)、臨界沉積剪力 (critical shear stress for deposition, τ_{cd})、臨界沖刷剪力 (critical shear stress for erosion, τ_{ce}) 及表面沖刷率 (reference surface erosion rate, $rser$)。另根據 Mehta (1986) 提出凝聚性泥砂底床的沖刷可分為兩種形式，分別為表面侵蝕 (surface erosion) 和大量侵蝕 (mass erosion)，當水體流動產生之侵蝕力超過摩擦力、重力和黏性床結合力時，會產生單個泥砂顆粒離開床面的侵蝕行為，而若床面下某處之剪力強度無法抵抗水流剪力，就可能會發生大片土壤侵蝕情形。由此可知，底質泥砂沖刷並非一線性行為，根據水流強度改變即有機率產生大量泥砂沖刷，而本研究即是模擬此種可能產生高強度沖刷的颱風事件，因此，亦將沖刷指數 (α) 作為率定參數之一。

凝聚性泥砂傳輸模式由單一條件泥砂來模擬，採用蘇迪勒颱風事件 2015 年 8 月 7 日至 8 月 21 日之懸浮泥砂濃度值作為率定，以研究區域內新海橋、台北橋與重陽橋三處資料當成率定參數依據。有許多重要的泥砂參數會影響泥砂傳輸過程和數值模擬結果，根據不同地區的泥砂條件，泥砂率定參數數值差異甚至橫跨了幾個數量級 (Liu and Huang, 2009)，因本研究並未針對淡水河系泥砂特性進行實驗來評估其沉降速度及臨界應力等參數，而是以過去淡水河系和其他研究地區文獻之泥砂參數值範圍作依據進行率定 (表 4.4-6)，參數率定結果：沉降速度為 0.0003 m/s、臨界沉積應力為 $0.00006 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、臨界沖刷應力為 $0.0011 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 、表面沖刷率為 $0.005 \text{ g/m}^2/\text{s}$ 、沖刷指數為 2.1。

各測站之率定模擬結果與實測值之比對結果如圖 4.4-7 至圖 4.4-9 所示。整體



而言，模擬結果與實測數據的趨勢非常吻合，然在各測站中有濃度量測值出現突升或突降的現象，這部分或許有其他原因導致非數值模式所能掌握，如台北橋測站於 8 月 8 日 13 時之懸浮泥砂濃度量測超過 10000 mg/L，或於 8 月 10 日量測到濃度低點。另於颱風過後，新海橋測站模擬值因受新店溪泥砂濃度影響，隨著潮汐漲退產生較大的濃度變化，然實測資料卻並未反應此現象，推測是參數率定過程的不確定性導致。雖模式無法抓到這些特殊的濃度離群值，但各指標結果顯示懸浮泥砂濃度模擬結果具有可靠度：新海橋測站均方根誤差 (RMSE) 為 758.206 mg/L、相關係數 (R^2) 為 0.761、有效性係數 (NSE) 為 0.749；台北橋測站均方根誤差 (RMSE) 為 1044.153 mg/L、相關係數 (R^2) 為 0.850、有效性係數 (NSE) 為 0.842；重陽橋測站均方根誤差 (RMSE) 為 1265.137 mg/L、相關係數 (R^2) 為 0.756、有效性係數 (NSE) 為 0.754 (表 4.4-7)。

再以杜鵑颱風事件 2015 年 9 月 28 日至 10 月 12 日之新海橋及台北橋測站進行輸砂模式驗證，模擬結果亦與實測值有相似濃度變化趨勢 (圖 4.4-10、圖 4.4-11)。其中，兩測站驗證期間第一個濃度高峰值 (約 9 月 28 日 21 時) 比實測值來的高，然因當時正臨水庫排洪，水流產生之底床剪力相當高，故推測誤差可能來自幾個原因：(1) 蘇迪勒颱風過後河床底泥已被大面積沖刷，使相差不久的杜鵑颱風事件發生時，底床質多為顆粒較粗之泥砂，而無產生如此大量的底泥沖刷行為；(2) 因颱風期間泥砂濃度變化不確定性極高，且無法確認其實際量測位置，然本研究使用斷面平均濃度進行比對，可能導致模擬值與實測值之差值稍大。另與蘇迪勒颱風事件相似，模式無法反映出新海橋測站中 10 月 2 日和 3 日突降之濃度值。率定指標計算結果顯示：新海橋測站均方根誤差 (RMSE) 為 718.294 mg/L、相關係數 (R^2) 為 0.828、有效性係數 (NSE) 為 0.800；台北橋測站均方根誤差 (RMSE) 為 690.724 mg/L、相關係數 (R^2) 為 0.881、有效性係數 (NSE) 為 0.823 (表 4.4-8)，兩測站 NSE 結果均已達到好的模式表現。

表 4.4-6、輸砂模式文獻參數值彙整

研究區域	泥砂率定參數				參考文獻
	W_s (m/s)	τ_{cd} (N/m ²)	τ_{ce} (N/m ²)	r_{ser} (g/m ² /s)	
淡水河系	0.00026	0.05	0.1	0.003	Liu et al. (2002)
淡水河系	0.005C	0.05	0.1	-	Hsu et al. (2006)
淡水河系	0.000152	0.12	0.35	0.003	李俊賢 (2006)
淡水河	0.00026	0.05	0.1	0.02(無顯 示單位)	Etemad- Shahida (2009)
基隆河	0.00026	0.065	0.115	0.0012	Liu et al. (2011)
淡水河系	0.000152	0.25	0.25	0.03	Chen et al. (2015)
淡水河系	0.00036	0.06	1.1	-	十河局 (2008)
Blackstone River, Mass USA	0.002	0.25	0.3	-	Ji et al. (2002)
Baekje Weir reach of Geum River, Korea	0.00003	0.0002	0.0002	0.005	Pak et al. (2016)
Middle reach of Geum River, Korea	0.00022	0.4	0.2	-	Cho et al. (2016)
Hartwell Lake, USA	0.0001	0.002 (m ² /s ²)	0.002 (m ² /s ²)	0.01	Elçi et al. (2007)
Apalachicola Bay, USA	0.2	0.04	0.03	0.3	Liu and Huang. (2009)



表 4.4-7、蘇迪勒期間懸浮泥砂濃度率定之各率定指標值

測站	RMSE (mg/L)	R^2	NSE
HHB	758.206	0.761	0.749
TPB	1044.153	0.850	0.842
CYB	1265.137	0.756	0.754

表 4.4-8、杜鵑期間懸浮泥砂濃度驗證之各率定指標值

測站	RMSE (mg/L)	R^2	NSE
HHB	718.294	0.828	0.800
TPB	690.724	0.881	0.823

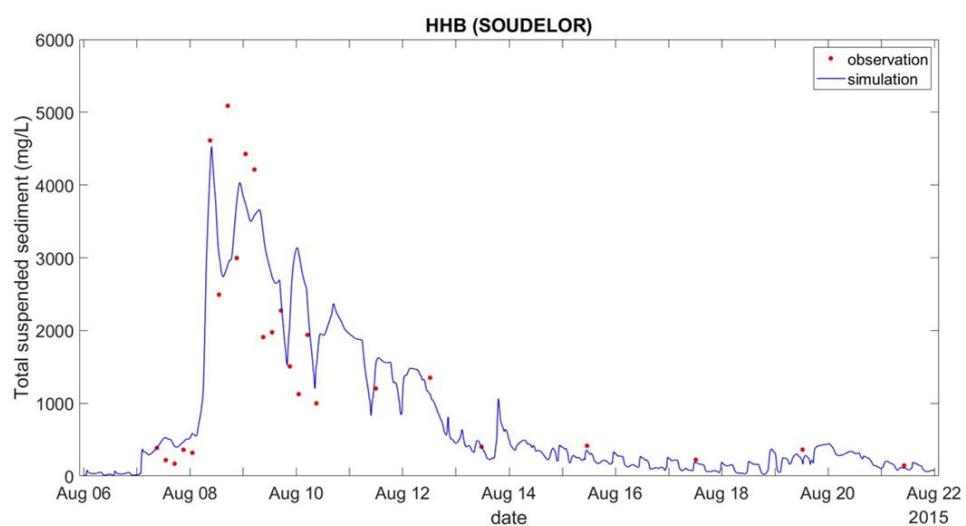


圖 4.4-7、模式懸浮泥砂濃度率定結果（新海橋測站）

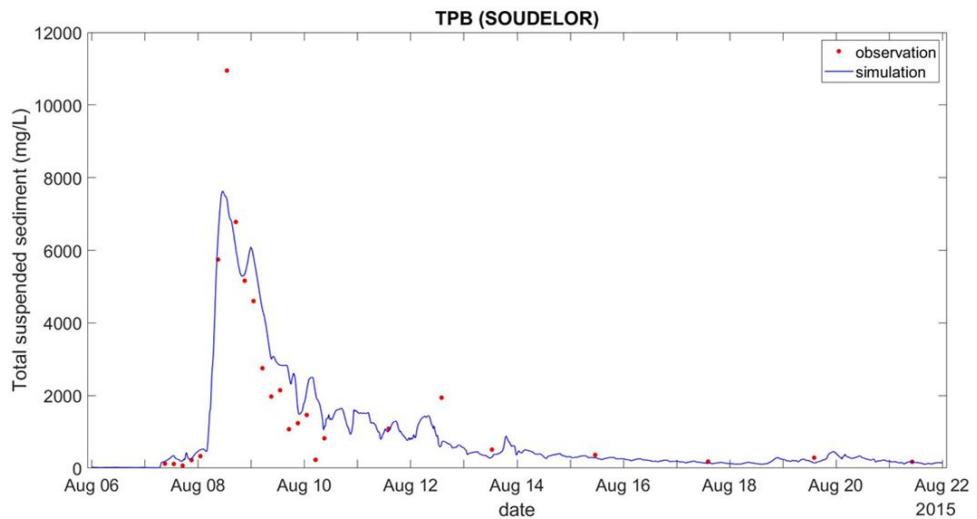


圖 4.4-8、模式懸浮泥砂濃度率定結果（台北橋測站）

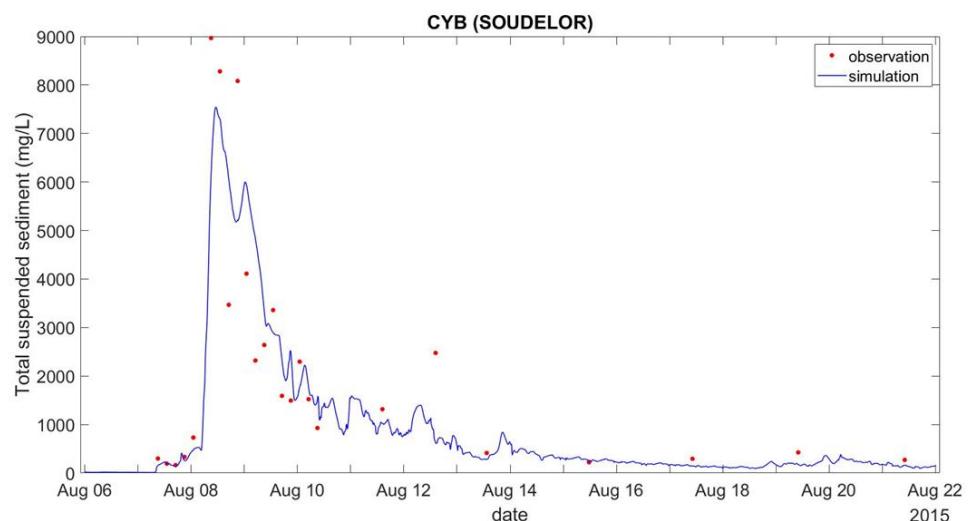


圖 4.4-9、模式懸浮泥砂濃度率定結果（重陽橋測站）

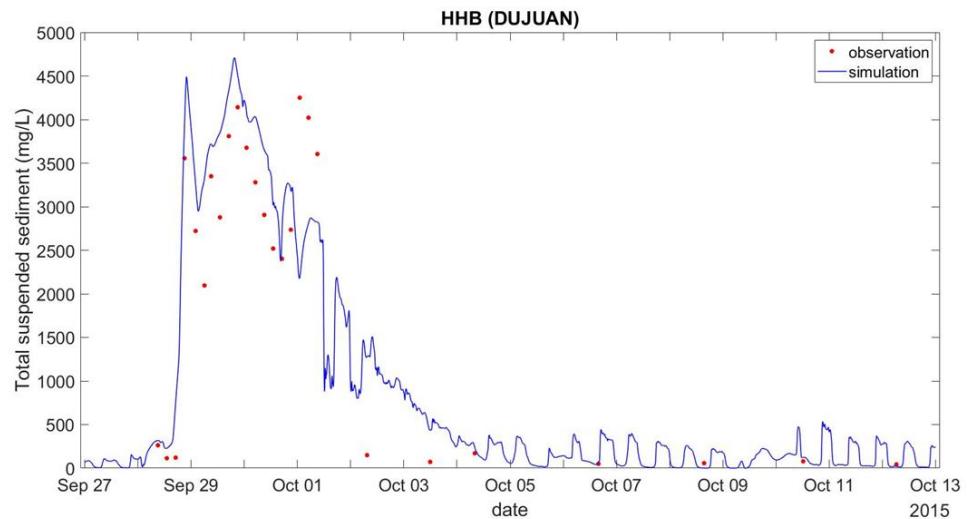


圖 4.4-10、模式懸浮泥砂濃度驗證結果（新海橋測站）

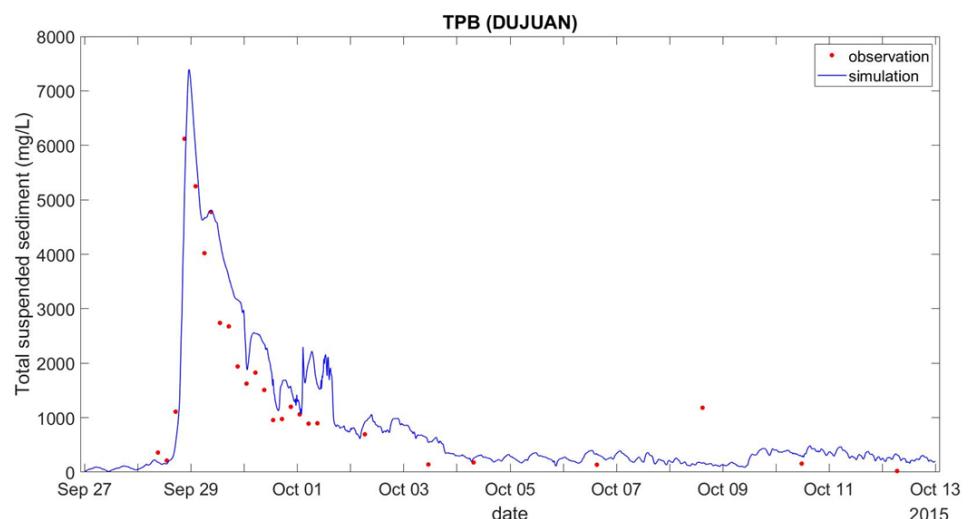


圖 4.4-11、模式懸浮泥砂濃度驗證結果（台北橋測站）

第五章 現況及情境分析



5.1 現況分析

5.1.1 停留時間

淡水河系水理方面主要受到上游支流量與潮汐作用影響，河口泥砂也因上述影響產生傳輸、沉積和沖刷等行為。現況中泥砂為一多源連續輸入的情況，包含了水庫排砂、各支流及底床掏刷泥砂，因此，多數情況下，並無法輕易判別懸浮泥砂來源以及分離受潮汐回流影響的懸浮泥砂量。本研究以蘇迪勒颱風事件為例，由綜合性平均停留時間和總停留時間來估計，各河段於石門水庫有排砂之颱風事件發生後受高濃度懸浮泥砂的影響，並將現況時間當成一基準，與後續情境模擬結果作比較分析，其中於大漢溪-淡水河選擇的 7 個河道觀察斷面位置如圖 5.1-1 所示。

因採樣調查僅至 8 月 21 日，未量測至回復平時懸浮泥砂濃度時，為了解颱風期間和過後排放之高濃度懸浮泥砂可能影響的程度，研究將模擬期間延長至 9 月 2 日，並假設延長期間上游入流泥砂濃度已逐漸回歸平常（8 月 25 日後假設為環保署 8 月調查濃度）。

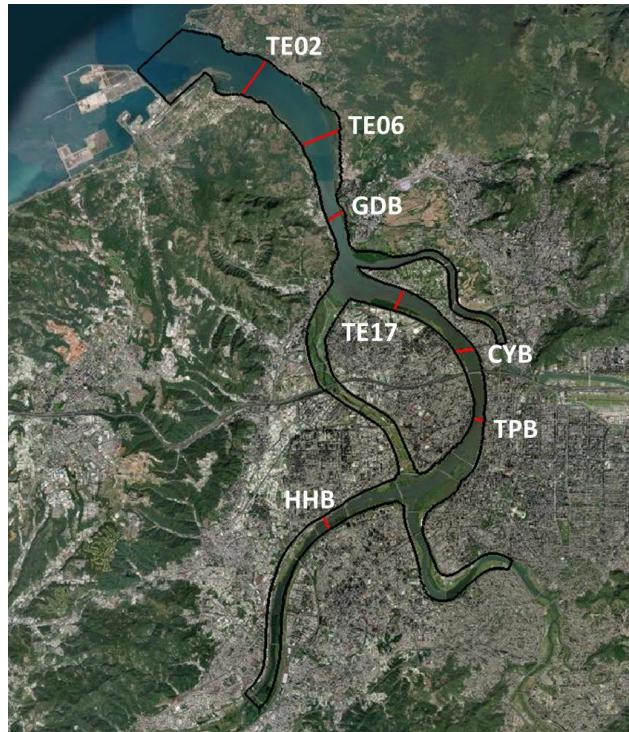


圖 5.1-1、淡水河系泥砂濃度觀察斷面位置圖

5.1.2.1 門檻值篩選過程與計算結果

為分辨模擬期間受到颱風期間產生高濃度泥砂影響的時間段，嘗試以颱風發生前時間和恢復平時濃度之後段時間，做為分離相當於常流量、平常潮汐作用下之常時懸浮泥砂濃度的方法。颱風前時間篩選方法：選用蘇迪勒颱風登陸前一天（8月7日至8月8日）懸浮泥砂平均濃度為門檻濃度，根據調查資料發現此段時間因受颱風外圍環流影響，大漢溪浮洲橋量測之濃度已比平時高，然而各處水位站仍有漲退潮現象，因此，希望藉平均方式去除非受颱風影響的時段；回復後段時間篩選方法：因已設計延長段入流泥砂濃度回復平時，故假設8月28日0時後下游河道不受高濃度泥砂影響，應屬合理，亦表示懸浮泥砂濃度基本上僅受平時入流泥砂、水流引起底床沖刷的綜合影響，並選用該時間過後（8月28日至9月2日）最大值作為門檻濃度。

由前段時間篩選之HHB-TE02綜合性平均停留時間範圍於2天23.70小時至3天16.15小時（表5.1-1）；後段時間篩選為3天7.10小時至3天15.19小時（表



5.1-2)，可見門檻值大小對計算結果有一定的影響，但決定不受颱風事件高濃度泥砂影響的背景值並不容易。模擬期間高濃度泥砂主要從上游流入，因此，前、後段時間篩選得到的綜合性平均停留時間大致從上游至下游為小至大，也代表越下游斷面以上區域，受整體高濃度泥砂影響的平均時間相對越長，但實際情況會受到許多因素影響篩選結果（如：各支流泥砂、潮汐、底泥沖刷等），亦可能出現上游斷面綜合性平均停留時間較高的情況。另外，前、後段篩選方法在 HHB 的評估時間均比 TPB 大一些，推測因 HHB 受石門水庫排砂及大漢溪泥砂濃度影響大於新店溪，與淡水河上斷面的峰值濃度不同（圖 5.1-2），而計算方法與濃度權重有關，使其得到的時間指標略高。然而，綜合性平均停留時間為一計算結果，無法比較兩者差異來決定篩選方法，故本研究是以門檻濃度值和超越濃度時間的方式進行門檻濃度篩選。

前段篩選因考慮颱風前期已有高於平時濃度的泥砂入流，大漢溪-淡水河上游河段 (HHB-TE17) 計算得到偏高的門檻濃度，然卻因距離、潮汐推移，上游泥砂較慢傳輸到淡水河下游河道，使下游段斷面 (GDB-TE02) 門檻值低許多，判斷斷面偵測到超越濃度的持續時間，即總停留時間，從上游至下游為 12 天 16.83 小時至 22 天 13.17 小時（表 5.1-1）。颱風發生使高濃度泥砂流到下游河道，基本上第一筆超越時間應為上游段時間較早，然報告調查中，淡水測站 8 月 7 日 9 時之濃度比環保署 2015 年 1 至 8 月河口站測值高，可能已受颱風外圍環流或兩者量測位置稍有不同所影響，反使最下游兩斷面 (TE06、TE02) 第一筆超越背景濃度時間早於較上游段。下游斷面中最後一筆超越背景濃度時間比上游斷面晚許多，根據 Wang et al. (2004) 的研究，平均流量下淡水河口的停留時間約 1 天 1.92 小時，故可推測 8 月 29 日應不受 8 月 25 日前泥砂影響，因此，以此方法判斷下游河段門檻值可能過低。與前段時間篩選方法相比，後段時間篩選得到的上游段 (HHB-TE17) 門檻值較低，下游段 (GDB-TE02) 則較高，總停留時間範圍為 15 天 2.50 小時至 18 天 9.33 小時（表 5.1-2）。由超越濃度時間發現，以後段時間篩選時，上游段第一筆超越時間較早、最後一筆超越時間延後；且 TE06 第一筆超越時間比上游晚，

下游段之最後一筆超越時間屬合理範圍。

整體而言，前段時間篩選對下游河段結束計算時間之決定較不理想，且對上游河段的篩選門檻相對較高，與 2015 年環保署調查資料進行比對發現，此法可能低估水庫排砂和各支流產砂的影響；從後段時間篩選則對辨別高濃度泥砂影響表現相對較好，且上、下游門檻濃度亦沒有過度估算的問題。故本研究認為，從後段時間濃度最大值來決定門檻，較適合作為判斷颱風期間和過後，各河段是否仍受到水庫、上游支流、再起懸泥砂等產生之高濃度懸浮泥砂影響的依據。

總結後段時間篩選結果有兩點發現：(1) 淡水河系中高濃度泥砂的綜合性平均停留時間於 4 天以內；(2) 各河段超越濃度的總停留時間約 15 天以上。綜合性平均停留時間計算方法含權重分布，其時間長度應能反應濃度峰值，並表示下游河道處於高泥砂濃度的平均時間超過 3 天，但實際上，在本次颱風事件中，河道懸浮泥砂濃度高於平常達兩週以上。為此，本研究想探討究竟是甚麼因素，使河口區域持續受高濃度泥砂影響，並先進一步分析篩選斷面濃度歷線，來找出可能的主要因子。

表 5.1-1、前段時間篩選之停留時間計算結果

斷面位置	TE02	TE06	GDB	TE17
綜合性平均停留時間(t_{cm})	3d 16.15h	3d 13.95h	3d 11.76h	3d 2.94h
門檻值/背景值($C_{threshold}$)	47.0	48.5	53.5	117.1
第一筆超越濃度時間(t_b)	2015/8/7 1:30	2015/8/7 3:30	2015/8/7 19:20	2015/8/7 9:50
最後一筆超越濃度時間(t_l)	2015/8/29 14:40	2015/8/29 13:20	2015/8/29 8:30	2015/8/24 22:10
總停留時間($T_b = t_l - t_b$)	22d 13.17h	22d 9.83h	21d 13.17h	17d 12.33h

斷面位置	CYB	TPB	HHB
綜合性平均停留時間(t_{cm})	3d 0.73h	2d 22.40h	2d 23.70h
門檻值/背景值($C_{threshold}$)	151.3	195.5	390.2



第一筆超越濃度時間(t_b)	2015/8/7 8:50	2015/8/7 9:20	2015/8/7 9:10
最後一筆超越濃度時間(t_l)	2015/8/24 16:50	2015/8/24 15:10	2015/8/20 2:00
總停留時間($T_b=t_l - t_b$)	17d 8.0h	17d 5.83h	12d 16.83h

表 5.1-2、後段時間篩選之停留時間計算結果

斷面位置	TE02	TE06	GDB	TE17
綜合性平均停留時間(t_{cm})	3d 15.19h	3d 12.02h	3d 10.21h	3d 10.26h
門檻值/背景值($C_{threshold}$)	51.5	57.1	60.6	70.8
第一筆超越濃度時間(t_b)	2015/8/7 2:10	2015/8/7 20:20	2015/8/7 19:20	2015/8/7 9:30
最後一筆超越濃度時間(t_l)	2015/8/25 11:30	2015/8/25 10:00	2015/8/25 8:50	2015/8/24 23:40
總停留時間($T_b=t_l - t_b$)	18d 9.33h	17d 13.67h	17d 13.5h	17d 14.17h
斷面位置	CYB	TPB	HHB	
綜合性平均停留時間(t_{cm})	3d 12.10h	3d 7.10h	3d 11.31h	
門檻值/背景值($C_{threshold}$)	73.1	116.9	156.0	
第一筆超越濃度時間(t_b)	2015/8/7 8:20	2015/8/7 7:20	2015/8/7 2:00	
最後一筆超越濃度時間(t_l)	2015/8/24 22:10	2015/8/24 19:00	2015/8/22 4:30	
總停留時間($T_b=t_l - t_b$)	17d 13.83h	17d 11.67h	15d 2.50h	

5.1.2.2 後段時間篩選之斷面平均濃度歷線

為探討潮汐漲退對河道懸浮泥砂濃度的影響，本研究繪製各斷面濃度歷線與水位變化進行分析討論。以 HHB 斷面來說，結果可明顯看到退水後（8 月 9 日 5 時）的潮汐主導現象（圖 5.1-2 (a)），漲潮時，下游懸浮泥砂濃度較低的水體往上游傳輸、斷面平均濃度迅速下降，退潮時，石門水庫排砂和大漢溪泥砂往下游傳輸、濃度迅速上升；後續，因大漢溪上游產砂量降低（8 月 15 日至 18 日），出現漲潮



段濃度上升、退潮段濃度下降的現象，由去除門檻值的新濃度歷線可發現（圖 5.1-6(a)），該期間回推的泥砂也計入高濃度泥砂影響，而增長了計算時間；於 8 月 18 日後，HHB 斷面似已逐漸回復至平時狀態，但 8 月 20 日時懸浮泥砂濃度又再度提高，表示該河段仍含有高濃度泥砂，為了解可能影響的因素，再比對濃度歷線與流速的關係。結果發現，8 月 19 至 20 日 HHB 斷面之流速較常時大且方向持續往下游（圖 5.1-4(a)），此顯示當時河川流量大於漲潮流量，故可推測該濃度上升是受大漢溪入流量變大使入流泥砂量增加，以及流速上升使河道底床沖刷能力增加的雙重影響，而淡水河段也受此影響導致濃度上升，同時，上游段斷面因入流量增加，漲潮流速明顯降低（圖 5.1-4(b)-(d)、圖 5.1-5）。

TPB 斷面以下游河段因同時受到大漢溪、新店溪、基隆河上游泥砂等聯合影響，濃度峰值、歷線明顯與 HHB 斷面結果不同（圖 5.1-2、圖 5.1-3）。由颱風期間的濃度峰值差異可以推測得知，因為蘇迪勒颱風事件造成新店溪上游集水區崩塌，對下游河道懸浮泥砂濃度上升影響程度相當顯著，此外，伴隨著颱風期間水庫排洪、河川入流量飆升，各斷面流速相對大，估計當時泥砂濃度也因底泥起懸而提升，其中，濃度峰值發生時間明顯比流速峰值延遲（圖 5.1-4、圖 5.1-5）。

由上述歷線分析初步發現，潮汐作用、流量大引起底床沖刷、上游集水區陸續產砂、新店溪集水區崩塌都可能是本次水庫排砂颱風事件中，延長淡水河系受到高濃度懸浮泥砂影響的主要原因。因此，後續將針對去除幾個主要的影響包含：潮汐作用、新店溪產砂、床層沖刷，作為情境模擬案例，並藉由評估綜合性平均停留時間、總停留時間與現況做比較分析，以了解上述各因子對潮間帶懸浮泥砂濃度的影響程度。

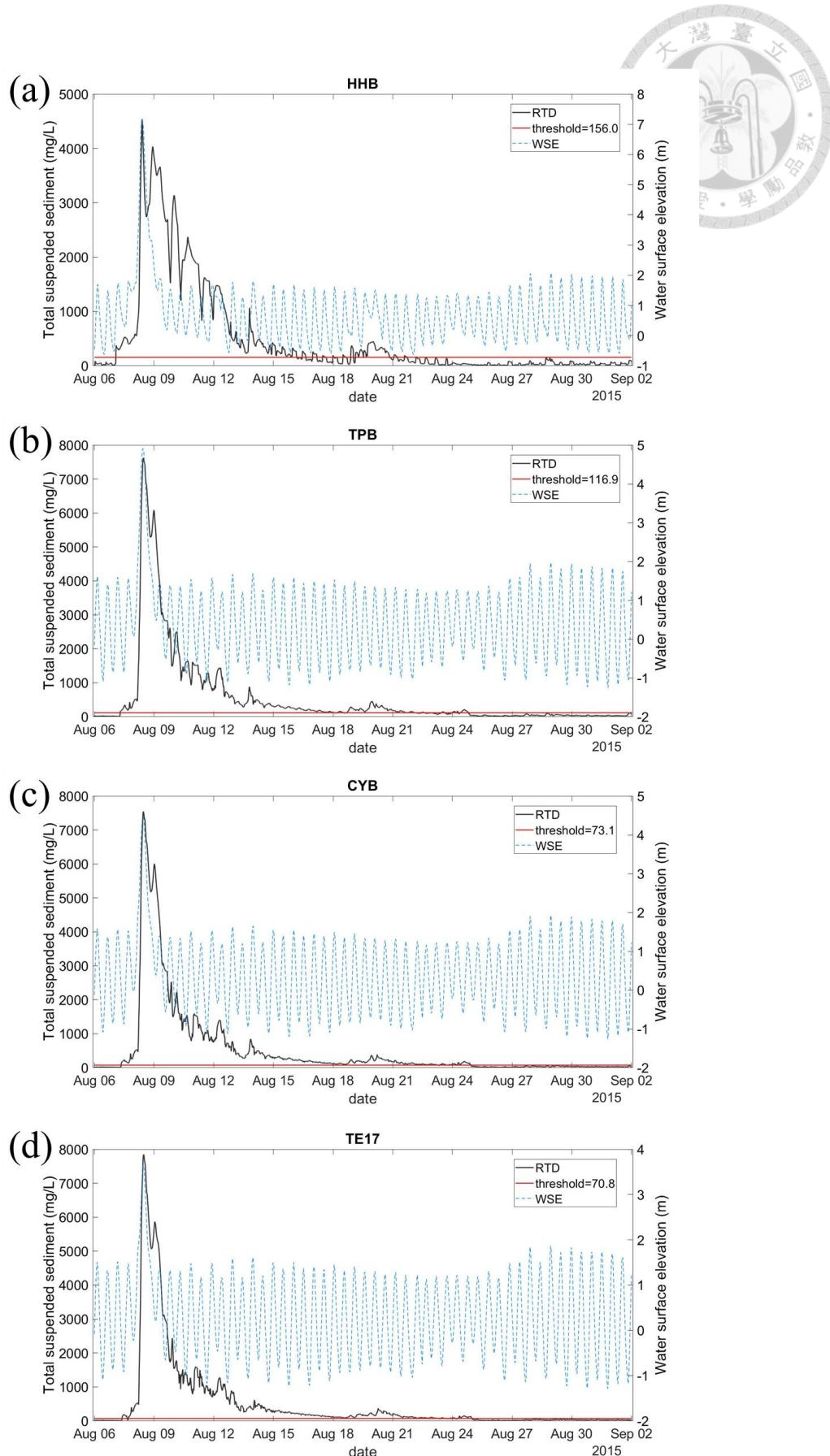


圖 5.1-2、上游段斷面之原懸浮泥砂濃度歷線、門檻值和水位高程變化

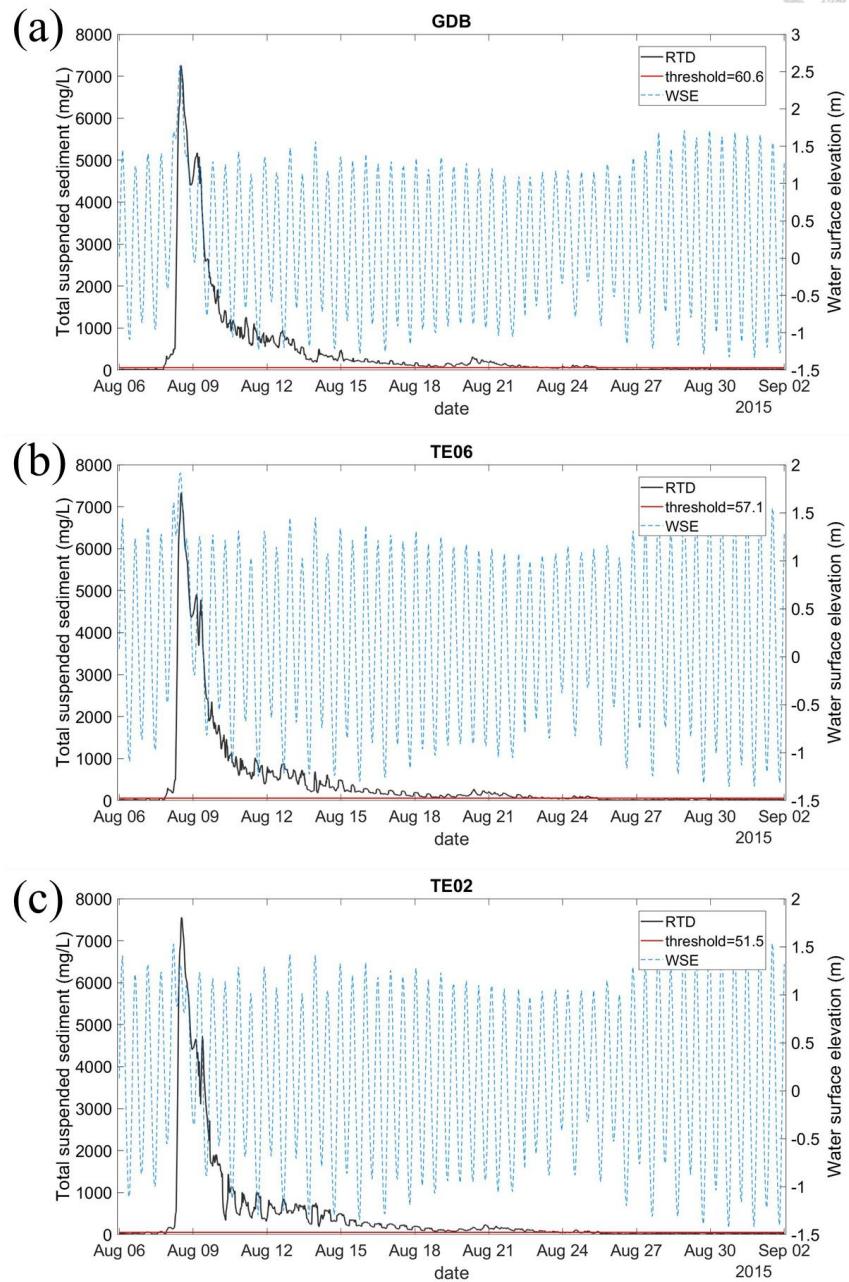


圖 5.1-3、下游段斷面之原懸浮泥砂濃度歷線、門檻值和水位高程變化

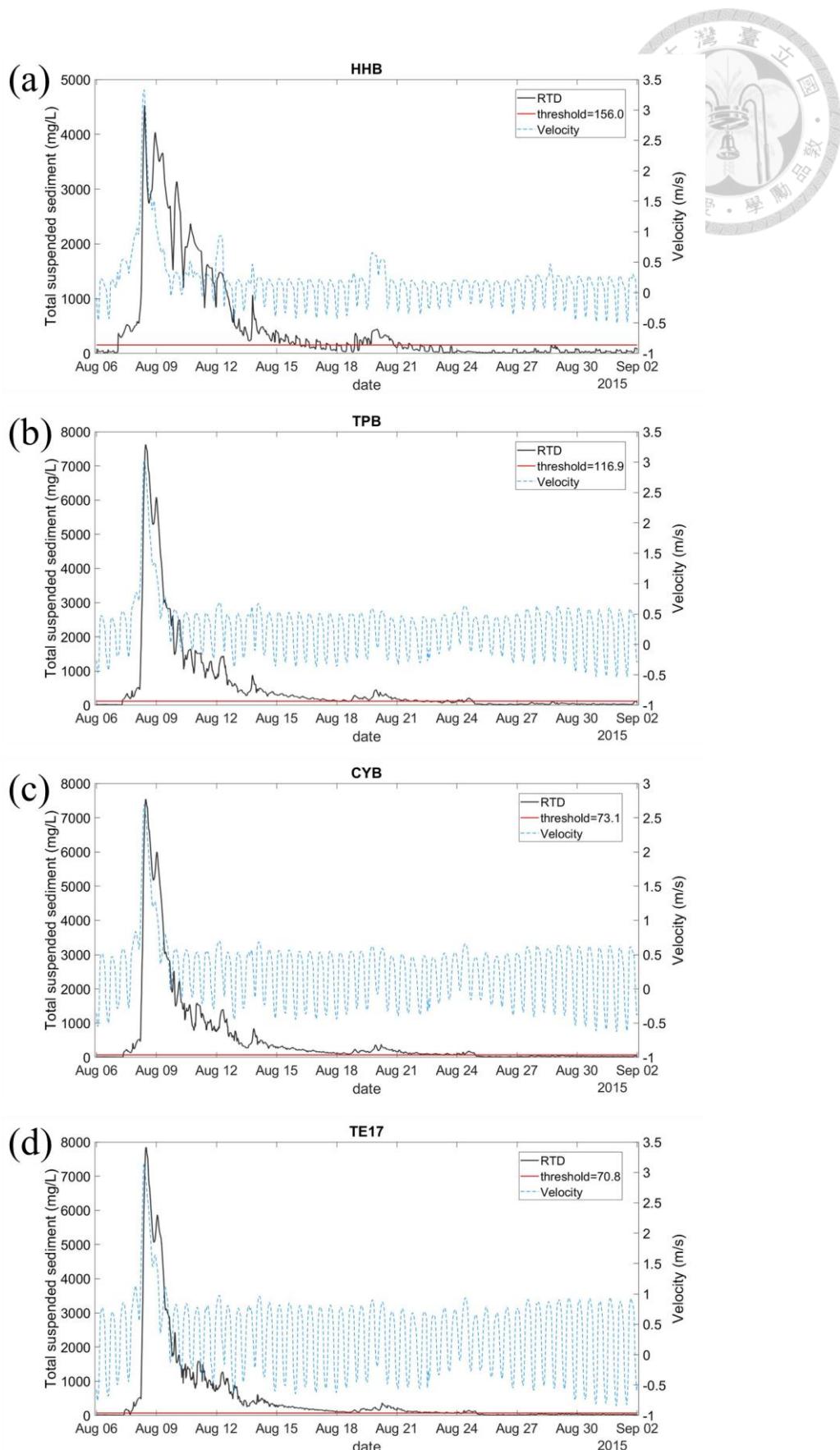


圖 5.1-4、上游段斷面之原懸浮泥砂濃度歷線、門檻值和流速變化

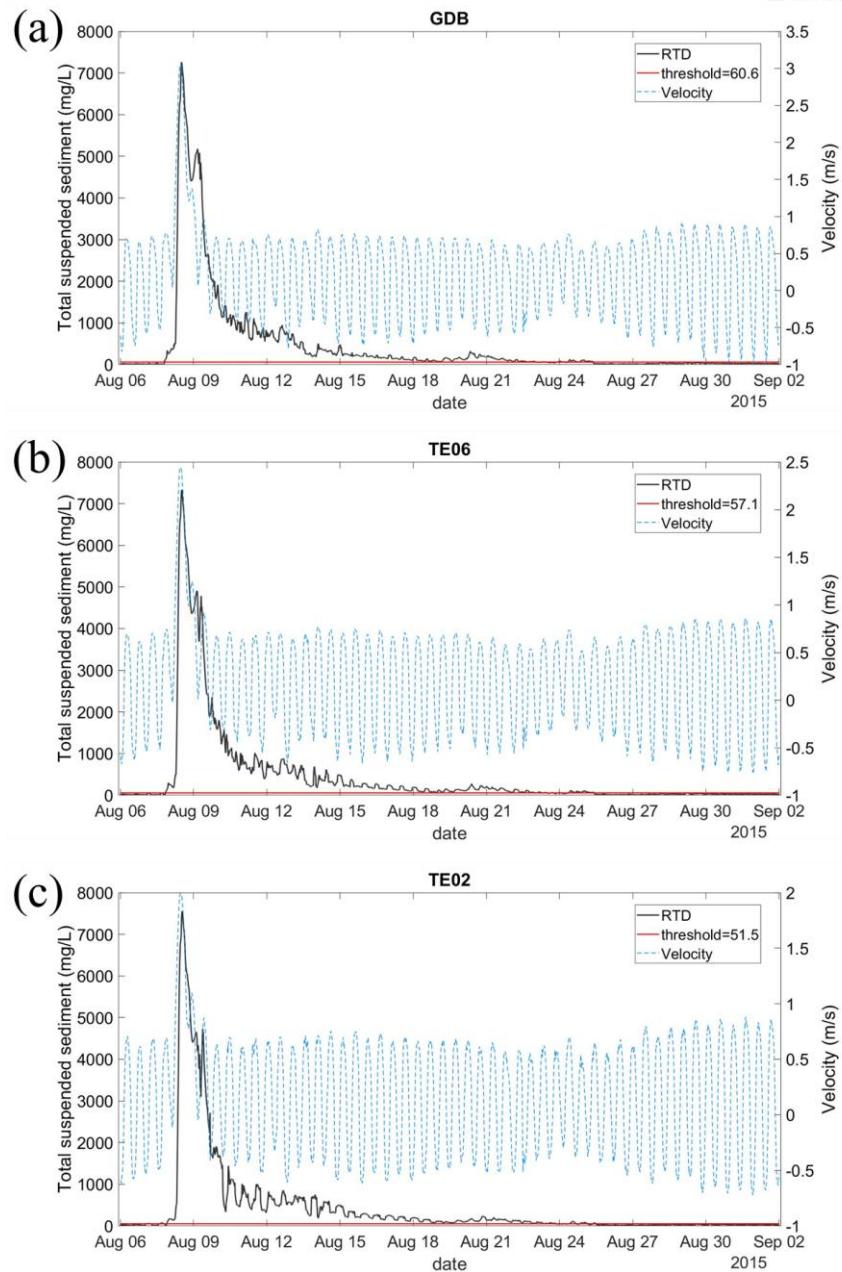


圖 5.1-5、下游段斷面之原懸浮泥砂濃度歷線、門檻值和流速變化

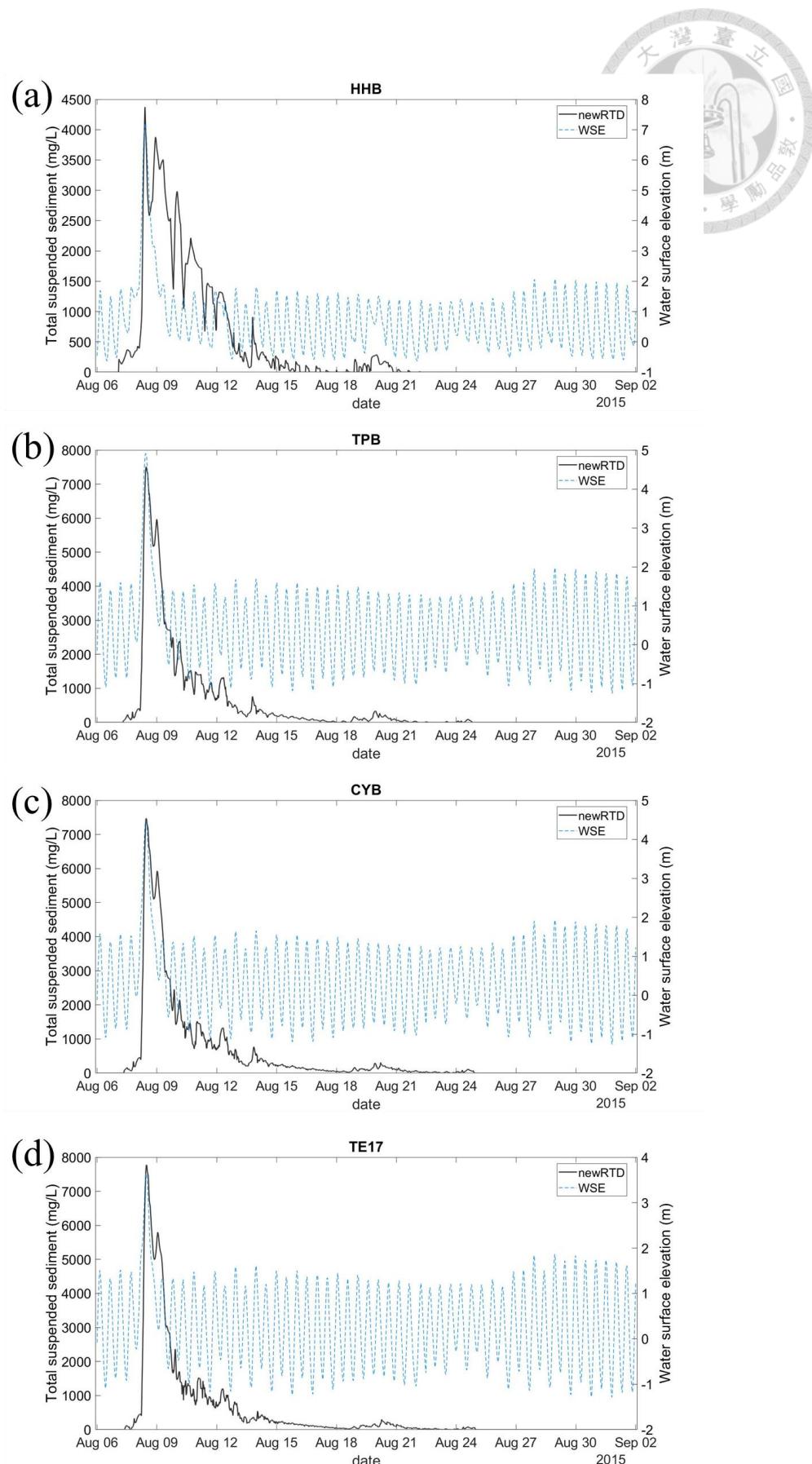


圖 5.1-6、篩除門檻值後上游段斷面之新懸浮泥砂濃度歷線和水位高程變化

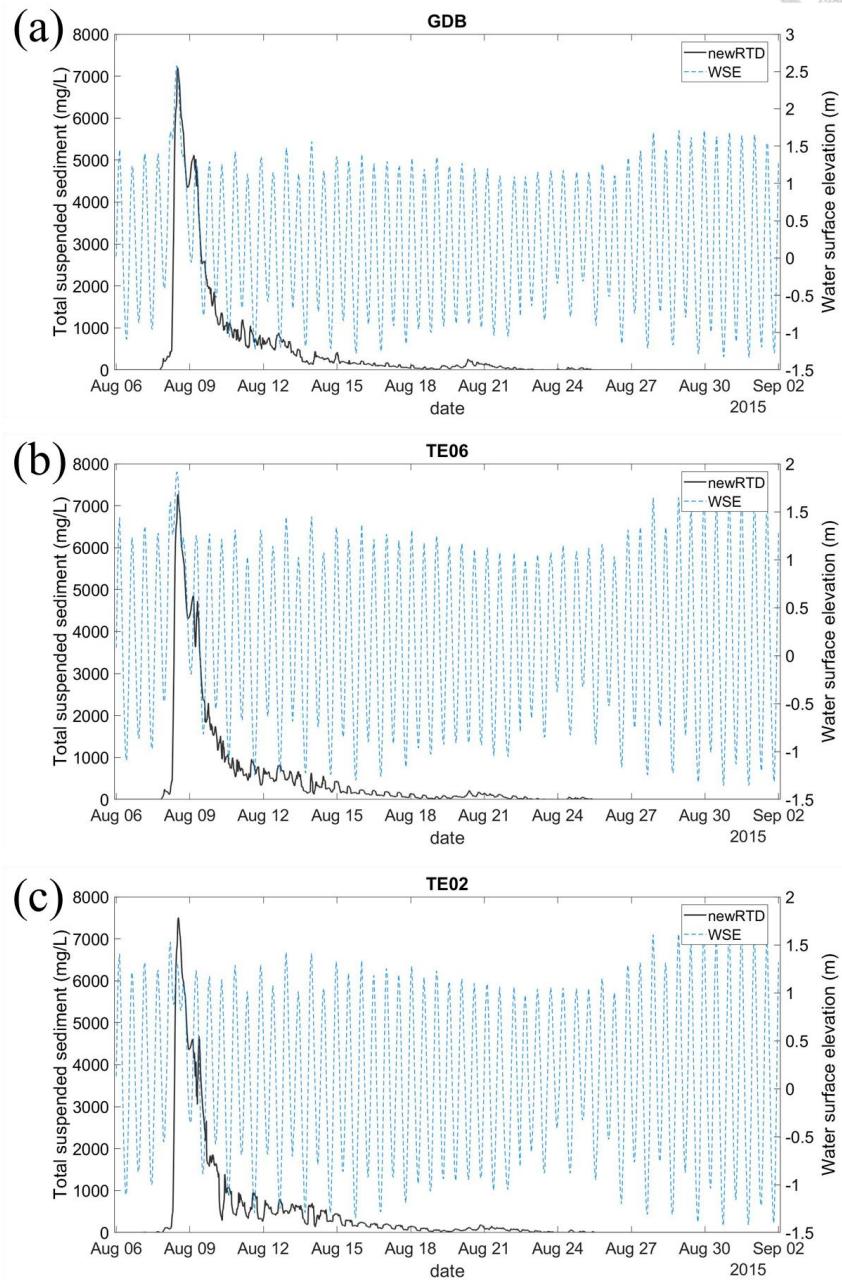


圖 5.1-7、篩除門檻值後下游段斷面之新懸浮泥砂濃度歷線和水位高程變化

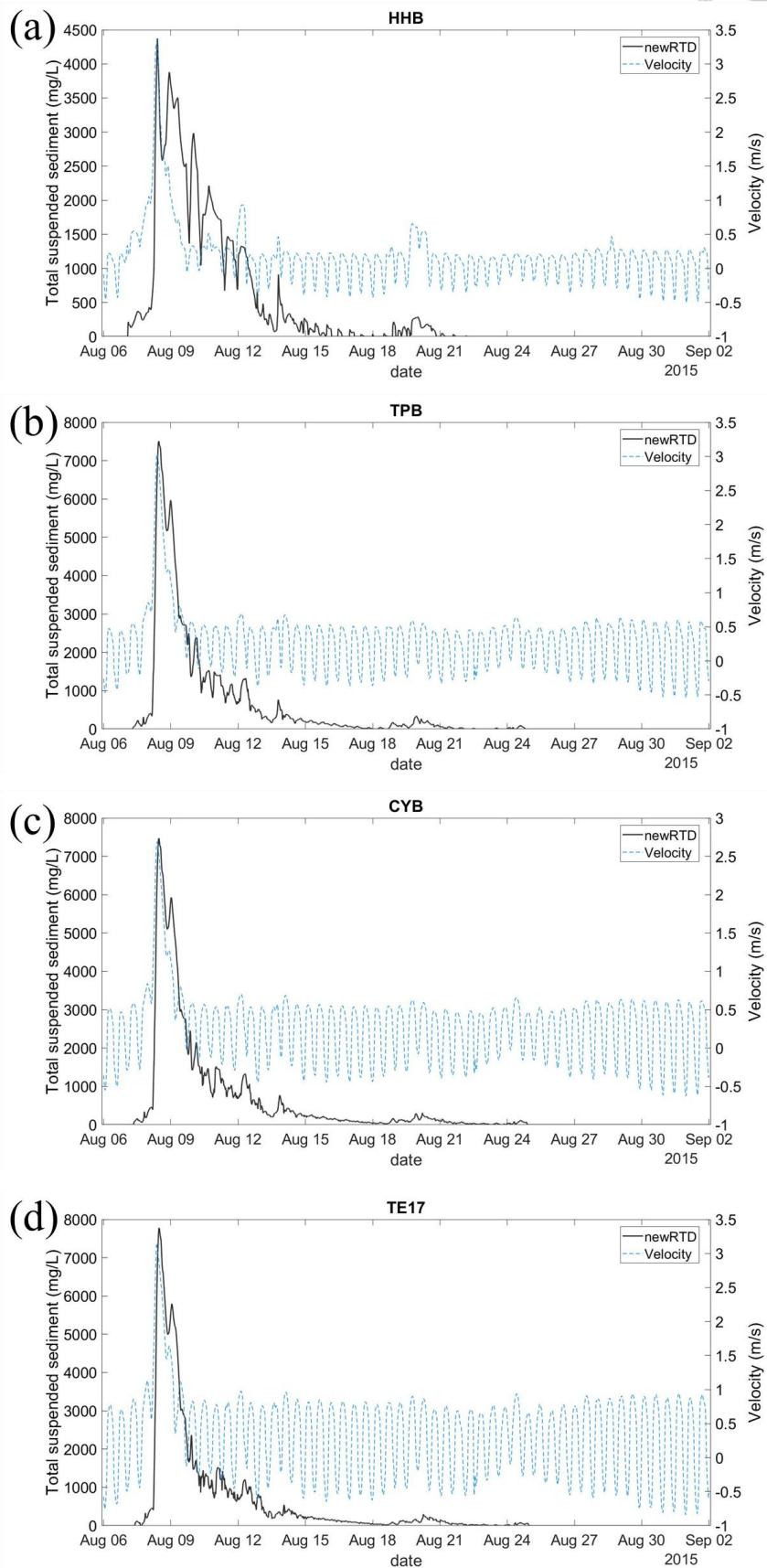


圖 5.1-8、篩除門檻值後上游段斷面之新懸浮泥砂濃度歷線和流速變化

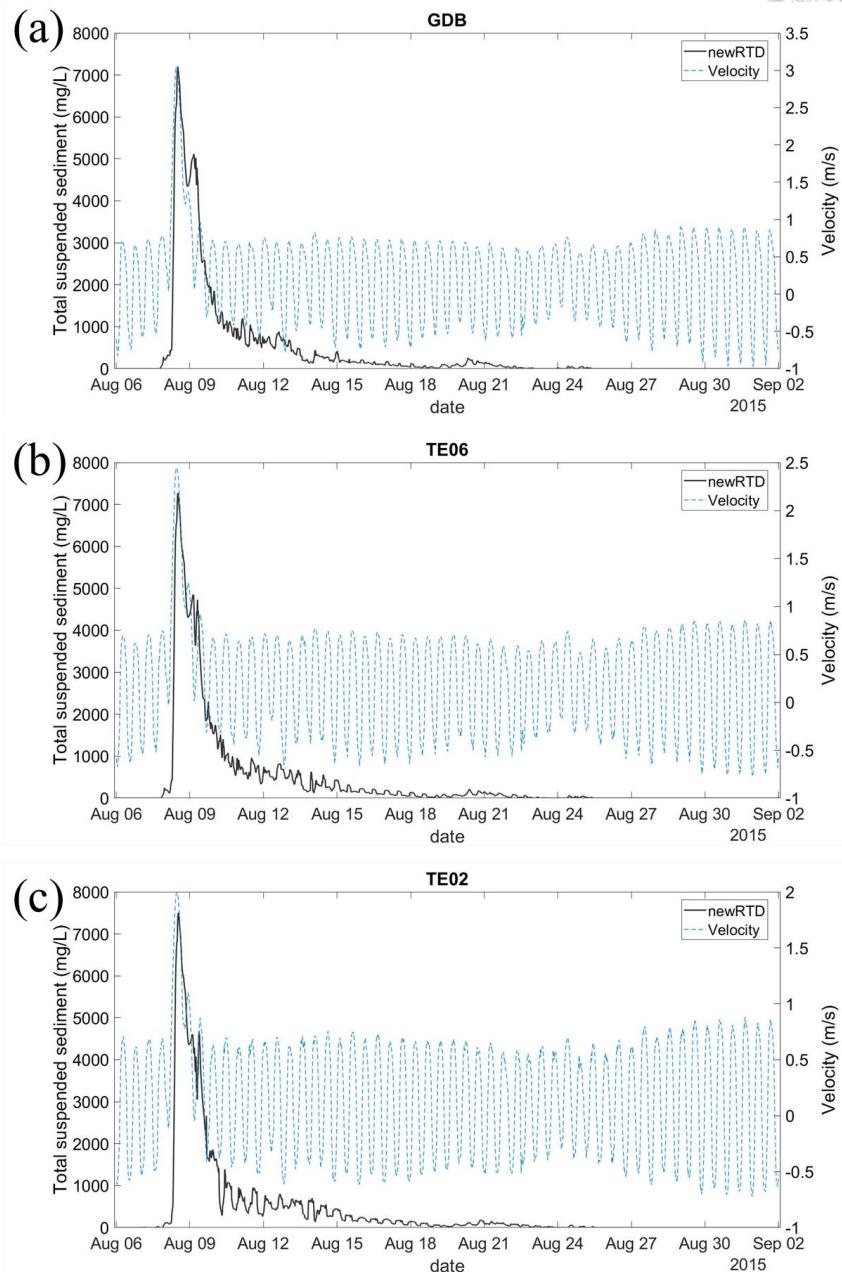


圖 5.1-9、篩除門檻值後下游段斷面之新懸浮泥砂濃度歷線和流速變化



5.1.2 不同時間下排砂之平均停留時間

本研究針對石門水庫排砂加上大漢溪泥砂對下游河道的影響作分析，同樣以蘇迪勒颱風為例，以實測之泥砂歷線數據作為脈衝條件進行懸浮泥砂平均停留時間的估算依據，並從颱風期間水位最高處至回復潮汐影響後分別選擇 6 個不同的時間點（表 5.1-3；圖 5.1-10），藉此了解當時受不同支流量和潮汐作用的情況下，石門水庫和大漢溪懸浮泥砂於下游河道停留的時間長度和其差異性。另亦測試回復潮汐影響後，不同潮位下投入之泥砂的停留時間，因此選擇以新海橋為準之低、平均、高潮位進行模擬。為分辨出不同時間投入泥砂的停留時間，本研究增建六種類泥砂，並給定相同參數條件（如圖 5.1-11），將不同脈衝時間點以後一小時懸浮泥砂濃度分別令為各種類泥砂的邊界條件（如圖 5.1-12），再將原大漢溪入流泥砂條件中各脈衝時間段的濃度假設為 0，就此，模式可在河道中擷取特定種類的泥砂，並進行濃度歷線分析。然而，因出流邊界位置位於河口，此法在估算平均停留時間上有一缺陷是，懸浮泥砂離開出流邊界後，不易估計、模擬受潮汐回推的懸浮泥砂通量，可能會略低估平均停留時間。

表 5.1-3、不同脈衝時間點之選擇

#	脈衝時間點(Pulse time)	代表意義
t1	8/8 9:00	颱風期間最高水位
t2	8/8 21:00	颱風過後退水段
t3	8/9 5:00	開始漲退潮且上游流量較大
t4	8/9 15:20	回復潮汐影響之低潮位
t5	8/9 17:20	回復潮汐影響之平均潮位
t6	8/9 19:50	回復潮汐影響之高潮位

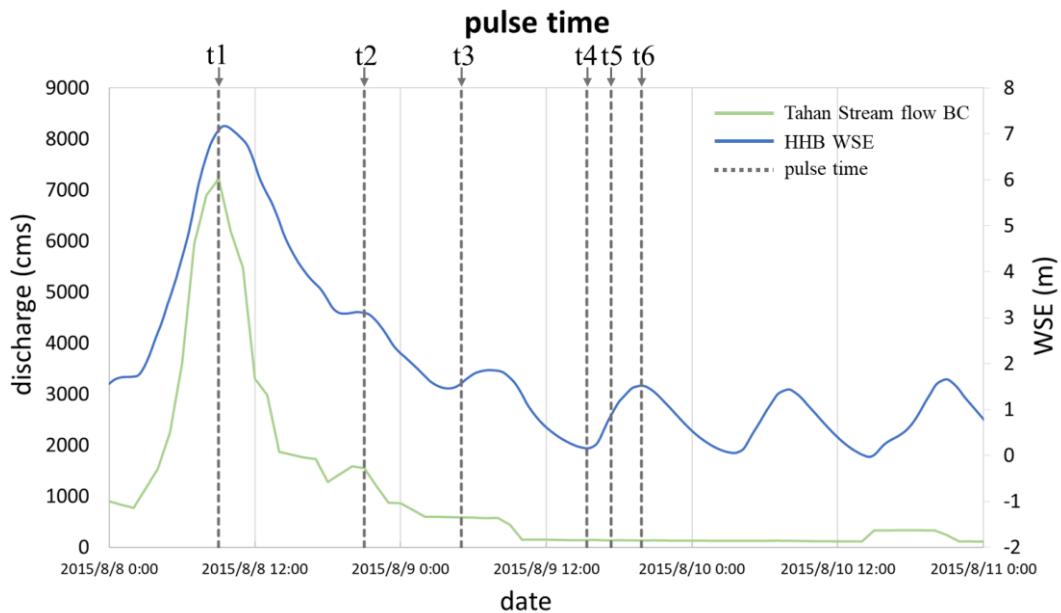
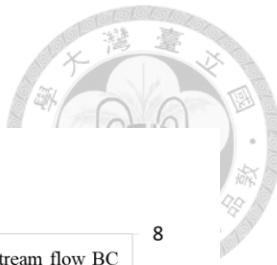


圖 5.1-10、脈衝時間點之示意圖

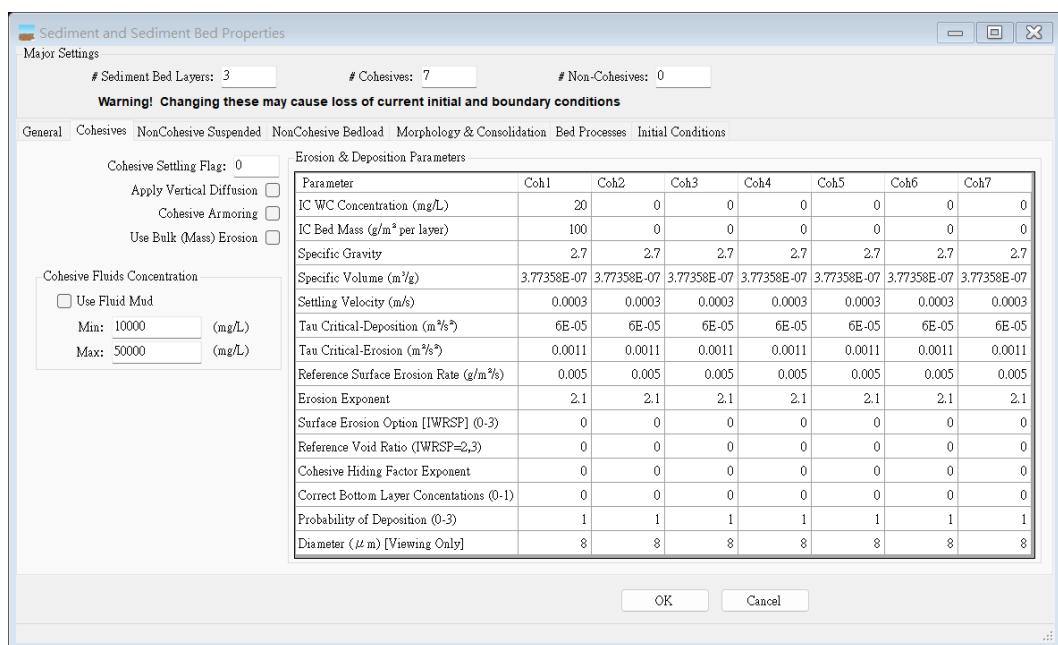


圖 5.1-11、模式設定凝聚性泥砂參數

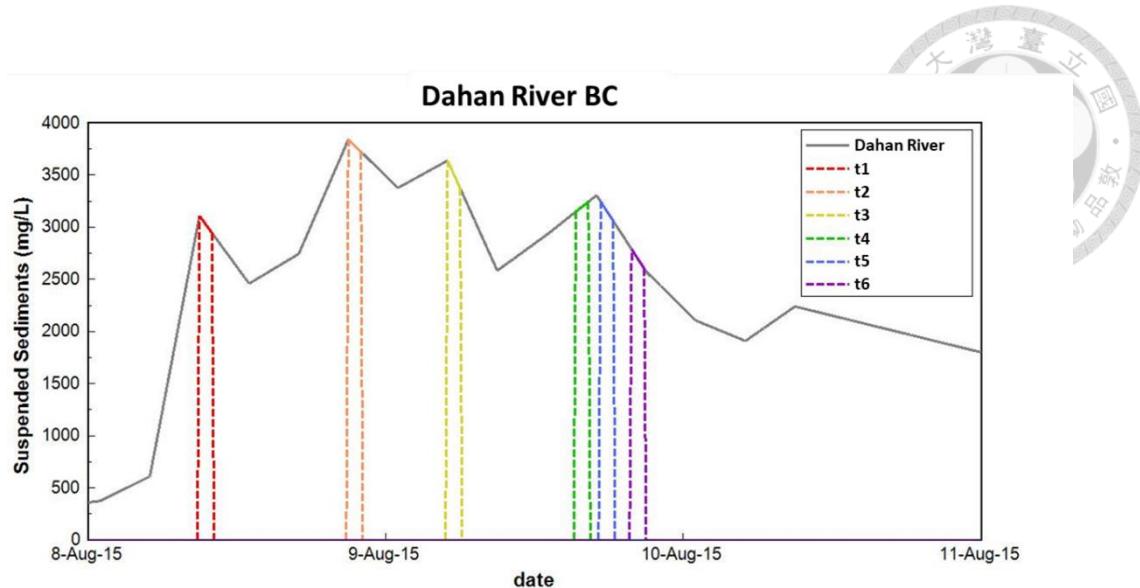


圖 5.1-12、模式編排種類泥砂及其入流時間

隨上游流量改變、河口受潮汐作用，各斷面懸浮泥砂濃度歷線變化有所不同。由圖 5.1-13(a)可見，因流量較大，不同斷面偵測到脈衝時間點 t1 的泥砂濃度歷線，除了有時間延遲和濃度消散外，均為單峰曲線；圖 5.1-13(b)中，因流量漸減，除 HHB 至 TE17 斷面，GDB 以下斷面均開始受潮汐影響，濃度曲線出現變化，尤其以 GDB 和 TE06 斷面在漲潮時較為明顯；圖 5.1-14(a)-(c)中，因淡水河系已回復潮汐作用，上游斷面也受到潮汐推移，懸浮泥砂濃度有所回升，甚至出現濃度雙峰，如圖 5.1-14(b)的 TPB 斷面濃度歷線，上述結果顯示，不同於連續排放下各斷面的歷線變化，脈衝投入能更明確看出潮汐漲退對泥砂傳輸的影響。後續，將透過各斷面的濃度歷線進行平均停留時間計算，進一步對不同流況下投入的泥砂停留情形做比較。

平均停留時間計算結果見表 5.1-4，表中數值表示一小時入流的懸浮泥砂從投入後傳遞至該斷面所需的平均時間，理論上從上游到下游斷面的平均停留時間會越長，如在脈衝時間點 t1 下的泥砂傳遞至 HHB 斷面需 1.31 小時、TPB 斷面則需 2.48 小時。相比不同脈衝時間點後也發現，t1 至 t3 後一小時入流泥砂的平均停留時間由短至長。在脈衝時間點 t1 後一小時入流泥砂，平均只需要 5.25 小時流出 TE02 斷面，應是因當時大漢溪和其他兩支流流量相當高、河道水流速度大，懸浮



泥砂很快地傳遞到下游河口（圖 5.1-13 (a)）。隨著上游入流量漸減、水位降低， t_2 和 t_3 時間後排放的泥砂，則平均需要 13.27 小時和 20.86 小時流出 TE02 斷面，然而，其時間也相當短暫均不到一天。這個結果也表示，雖然颱風期間和過後，水庫排砂可能導致下游河道濃度突然上升，但是若能適當控制排流量以加速傳輸，水庫淤泥應該很快就能被排出河口。

比較 t_3 和 t_4-t_6 的計算結果也發現，雖 t_3 時間後新海橋附近已受潮汐作用，然當時大漢溪流量仍大（約 600 cms），使各斷面計算之泥砂平均停留時間均小於 t_4-t_6 （表 5.1-4），而 t_4-t_6 各斷面平均時間基本上差異並不大。其中， t_3 與三個時間點於 HHB 相差約 5 小時、TE02 相差約 15 小時，整體從上到下游相差越大。由 HHB 的平均停留時間計算結果顯示，低潮位下流入之泥砂停留時間最長（ t_4 ）、平均潮位次之（ t_5 ）、高潮位最短（ t_6 ）。可惜從其他不同斷面平均停留時間來看長短不一，可能與幾個因素相關，一為變量流造成流速隨不同時間持續改變；一為潮汐組成並非完全 M2 半日潮，漲退潮變化不一，使流場更為複雜；另一為各河段的漲退潮時間延遲特性，導致不同位置的泥砂受到潮汐作用的時間不同。

總結來說，研究發現懸浮泥砂的傳輸與上游支流量高度相關，且隨著流量變大，停留時間會減短，此結果與過去的研究有相似之處，如 Liu et al. (2008) 用淡水分量法的概念評估停留時間也有相同結論。在蘇迪勒颱風離開、大漢溪流量和潮汐均回復平時後，來自石門水庫和大漢溪上游的一小時入流泥砂平均僅在淡水河口停留 36 小時左右，而颱風過後新店溪流量仍然不低可能是影響其平均停留時間變短的主因，由此結果可推測因各支流仍然不斷產砂並排入下游，因而導致河口懸浮泥砂濃度持續偏高長達 15 天以上。

表 5.1-4、各脈衝時間點下不同斷面位置計算之平均停留時間

#	TE02	TE06	GDB	TE17	CYB	TPB	HHB
t1	5.25	4.65	4.37	3.09	2.74	2.48	1.31
t2	13.27	10.11	8.10	5.91	4.84	4.05	2.23
t3	20.86	17.05	11.87	9.10	7.28	6.10	3.36
t4	33.95	26.73	26.47	22.04	19.52	14.12	8.77
t5	35.95	27.92	25.78	22.93	19.91	16.46	8.49
t6	34.65	33.98	31.44	21.88	18.88	17.44	8.46

(時間單位：小時)

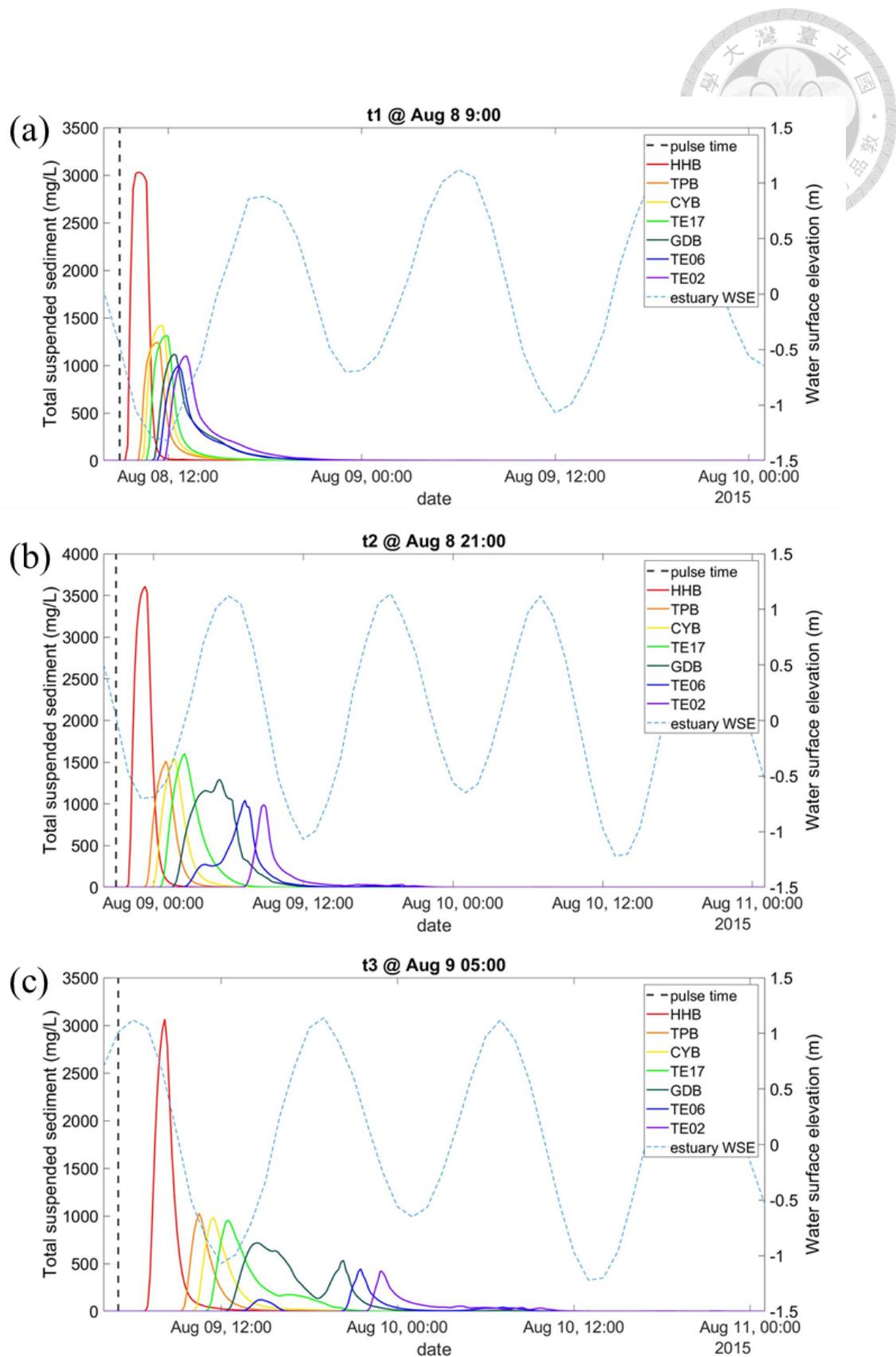


圖 5.1-13、脈衝時間點 t1-t3 之各斷面量測懸浮泥砂濃度

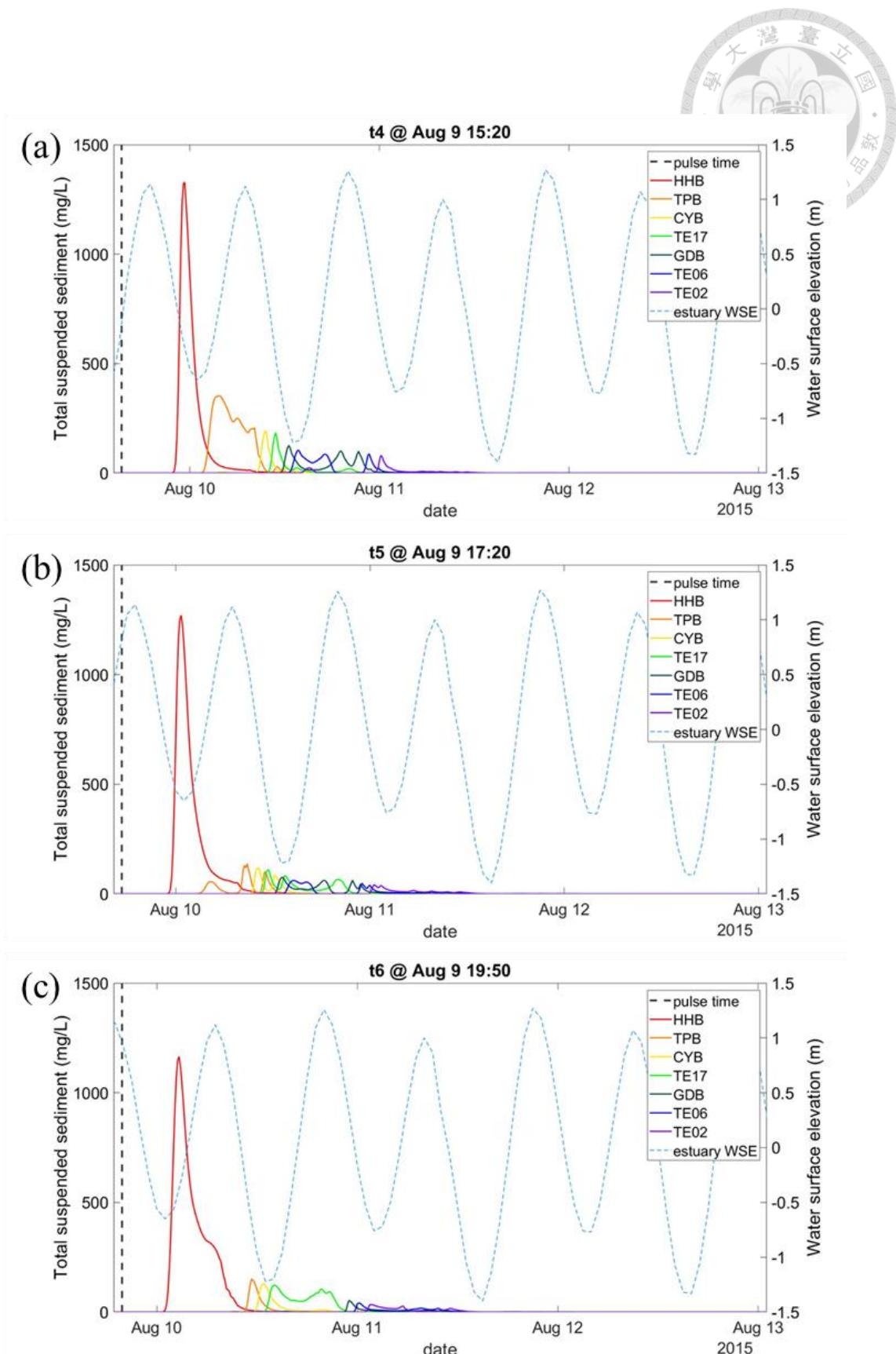


圖 5.1-14、脈衝時間點 t4-t6 之各斷面量測懸浮泥砂濃度



5.2 情境分析

由現況分析的結果顯示，在蘇迪勒颱風期間上游支流量和潮汐都對河道懸浮泥砂濃度變化有一定程度之影響，其中又因上游集水區崩塌，新店溪入流泥砂在蘇迪勒颱風中占了相當大的比例，且颱風期間高流量產生的底泥沖刷亦可能是重要泥砂來源之一。因此，本節針對潮汐回推泥砂、支流泥砂、底床沖刷泥砂之三個變因進行情境設計及模擬分析。此外，隨著全球暖化、海平面上升、溫室氣體濃度遞增，近年來氣候變遷的字詞已不少見，且為了預測並趨緩氣候變遷帶來的影響，政府間氣候變遷委員會（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）也持續針對氣候變遷議題發布評估報告，就此研究亦以氣候變遷可能引起的海平面上升和降雨量變化進行模擬，並應用綜合性平均停留時間和總停留時間作為上述情境造成水庫排砂颱風事件中淡水河口懸浮泥砂濃度變遷的評估指標，由大漢溪—淡水河上游至下游分別選用 HHB、TPB、GDB 和 TE02 等觀察斷面結果進行討論。

5.2.1 去除潮汐回流泥砂影響(Tidal effect, TDL)

因為不易釐清實際情況下受潮汐回流的泥砂量，故此情境中假設下游出流邊界的懸浮泥砂濃度為 0 mg/L，來代表泥砂流出出海口後不回流，希望藉此分析潮汐對河口懸浮泥砂濃度的影響以及潮汐作用的上限。

表 5.2-1 為去除潮汐回流泥砂影響 (TDL) 後的停留時間計算總表；圖 5.2-1、圖 5.2-2 分別為各斷面現況和 TDL 情境量測之懸浮泥砂濃度歷線與水位、流速變化比對圖；圖 5.2-3、圖 5.2-4 則分別為各斷面 TDL 情境去除門檻值後的新濃度歷線與水位、流速變化比對圖。因較下游斷面離出海口相對近，直接受到潮汐作用的影響相當大，由圖 5.2-1(a)、(b)可見，現況與 TDL 模擬中 TPB 和 HHB 的濃度歷線改變幅度由肉眼幾乎看不出來；GDB 斷面僅在漲潮振幅較大且流速較快時有較明顯濃度降低趨勢（圖 5.2-1(c)、圖 5.2-2(c)）；然而，TE02 斷面約從 8 月 9 日 15 時開始，隨著漲潮、河口受到無挾砂的乾淨海水洗滌，懸浮泥砂濃度下降的幅度非



常明顯（圖 5.2-1(d)）。另外，也發現到各斷面在颱風入侵前後（8 月 7 日至 8 月 9 日）的濃度歷線並無明顯變化，由圖 5.2-2 可看出當時各斷面流速方向往下游，故濃度受來自上游之泥砂主導，該現象也顯示當時河口水動力特性是由上游支流所主導。

比對現況和情境的綜合性平均停留時間（表 5.2-1），發現 HHB 斷面的平均時間完全沒有變化，而 TPB-TE02 斷面在去除潮汐回流後泥砂的平均時間變小 0.02 至 17.70 小時，且從上游到下游差異越大。其中，由 HHB 斷面的平均時間計算結果可見，如果水庫淤泥或各支流泥砂已被水流運送到出海口，潮汐並沒有再將其回送至較上游斷面的能力，以四個斷面的計算結果顯示，在模擬期間潮汐運移泥砂距離上限最遠僅到 TPB 斷面。另外，TE02 斷面計算得到的綜合性平均停留時間不僅減少 17.70 小時，甚至小於更上游的斷面，此結果表明若潮汐不會將已流到外海的懸浮泥砂傳遞回淡水河口，颱風事件產生的高濃度泥砂對下游河道的影響會降低許多。

去除潮汐對泥砂往復的影響後，TE02 斷面量測到的第一筆超越時間明顯比現況來的晚（表 5.2-1），同時使總停留時間降低至約 19.50 小時，此結果證實現況中初次超越濃度的確受到來自出海口泥砂的加成影響；除此之外，其餘斷面的超越濃度時間和其總停留時間均未改變，此結果表明在 TDL 情境中，與綜合性平均停留時間的現象不同，上游斷面的總停留時間並不受影響，由此可推測因河道受到持續的入流泥砂影響，致使在模擬後段仍有高於平時的濃度產生，因此各斷面總停留時間維持在 15 天以上。

表 5.2-1、去除潮汐回流泥砂影響（TDL）之停留時間

情境(TDL)	TE02	GDB	TPB	HHB
綜合性平均停留時間(t_{cm})	2d 21.49h	3d 7.91h	3d 7.08h	3d 11.31h
現況 t_{cm} -情境 t_{cm}	17.70 h	2.29 h	0.02 h	0.00 h



門檻值	51.5	60.6	116.9	156.0
第一筆超越時間(t_b)	2015/8/7 21:40	2015/8/7 19:20	2015/8/7 7:20	2015/8/7 2:00
最後一筆超越時間(t_l)	2015/8/25 11:30	2015/8/25 8:50	2015/8/24 19:00	2015/8/22 4:30
總停留時間($T_b=t_l - t_b$)	17d 13.83h	17d 13.50h	17d 11.67h	15d 2.50h
現況 T_b -情境 T_b	19.50 h	0.00 h	0.00 h	0.00 h

5.2.2 去除支流泥砂影響(Tributary effect, Tri)

從調查資料和現況模擬中均發現蘇迪勒颱風發生造成的新店溪集水區崩塌，使大量泥砂被帶往下游河道、懸浮泥砂濃度飆升。由此可知，颱風期間及過後淡水河口懸浮泥砂濃度高不單單僅因水庫排砂導致，來自其他支流的泥砂亦是原因之一，因此，本節以排除當時最具影響力的新店溪泥砂作為情境，將其入流懸浮泥砂濃度假設為 0 mg/L。

從圖 5.2-5 中各斷面之濃度歷線均能明顯看出 Tri 情境與現況的差別。HHB 斷面的結果顯示，在 8 月 12 日前兩者的濃度歷線差異並不大，乃是因颱風期間及颱風通過後大漢溪流量相對高所致，該河段雖受潮汐作用，水位有明顯漲退，但水流持續向下游，也就是說，在現況當中，新店溪入流泥砂並不因漲潮被推移至該處；隨著大漢溪上游流量減少且漲潮流量大於河流量，水流方向開始呈現漲潮往上游流動的特性，可看見兩條濃度歷線在漲潮期間的差異（圖 5.2-6(a)）。然而，淡水河上斷面 (TPB、GDB、TE02) 量測的濃度歷線在模擬期間就有劇烈改變（圖 5.2-5(b)-(d)），舉例來說，颱風入侵時，GDB 斷面原本於 8 月 8 日 12 時會出現約高達 7300 mg/L 的斷面平均濃度峰值，去除新店溪泥砂入流後則減少成 4300 mg/L 左右，且颱風過後亦持續看到濃度歷線的不同（圖 5.2-5(c)）。

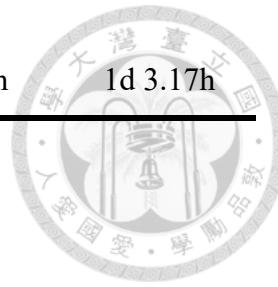
由去除支流泥砂影響 (Tri) 之綜合性平均停留時間計算結果顯示（表 5.2-2），在 Tri 情境中 HHB 至 GDB 斷面的平均時間減少約 3.02 至 7.64 小時不等，越下游

斷面差異越大，代表颱風強降雨若不會使其他支流有長時間的高濃度泥砂入流，水庫排砂本身產生的影響並不那麼大。然而 TE02 斷面平均時間增加 8.80 小時，估計是受邊界條件影響，因模擬中並無改變現況的出流泥砂條件，使出海口回推泥砂濃度必估計過高，雖然其他斷面應也會受其影響，但程度相對不大。此外，四個斷面的最後一筆超越時間均提前，使總停留時間縮短 0.17 小時至 1 天，其中以 HHB 斷面的時間幅度改變最大，由此可知：(1) 颱風事件後，淡水河段並非主要受新店溪挾帶泥砂影響，而延長總停留時間，推測受到其他支流或底床沖刷所致；(2) 現況中回復潮汐作用後，大漢溪下游段易受到新店溪泥砂的加成影響，使泥砂濃度高於平時。

綜合以上結果發現，蘇迪勒颱風發生時，主要是由水庫排砂大幅影響大漢溪河道，而淡水河感潮段則是受到水庫排砂和新店溪泥砂的共同影響；颱風離開後，因為潮汐作用，使大漢溪也會因新店溪集水區崩塌導致河道懸浮泥砂濃度增加。從濃度歷線、平均時間和總停留時間的比對結果顯示，蘇迪勒颱風事件中，新店溪上游泥砂對淡水河口的懸浮泥砂濃度上升貢獻很高，同時造成下游河道含高濃度泥砂的時間指標均增加。

表 5.2-2、去除支流泥砂影響 (Tri) 之停留時間

情境(Tri)	TE02	GDB	TPB	HHB
綜合性平均停留時間(t_{cm})	3d 23.99h	3d 2.57h	3d 0.81h	3d 8.28h
現況 t_{cm} -情境 t_{cm}	-8.80 h	7.64 h	6.29 h	3.02 h
門檻值	51.5	60.6	116.9	156.0
第一筆超越時間(t_b)	2015/8/7 2:10	2015/8/7 19:20	2015/8/7 7:20	2015/8/7 2:00
最後一筆超越時間(t_l)	2015/8/25 11:20	2015/8/25 8:20	2015/8/24 18:30	2015/8/21 1:20
總停留時間($T_b=t_l - t_b$)	18d 9.17h	17d 13.00h	17d 11.17h	13d 23.33h



5.2.3 去除底床沖刷影響(Bed Erosion effect, BdE)

根據前人研究發現，平時若無底床泥砂可侵蝕的情況下，淡水河口懸浮泥砂濃度會明顯下降（李俊賢，2006），在颱風事件中流量更大，因此推測水流對底泥沖刷的強度更高，原本模式以 1 m 作為沉積床厚度，此情境中則改假設為 0 m（模擬颱風事件中床層泥砂沖刷對水體懸浮泥砂濃度的影響）。

不同於新店溪泥砂影響，在去除床層供以沖刷後，HHB 於颱風入侵期間（8 月 8 日至 9 日）會有相當程度的懸浮泥砂濃度下降（圖 5.2-9(a)）；另因石門水庫放水、水流速度變快，可能造成較多的底泥沖刷量，HHB 約於 8 月 12 日和 8 月 20 日均有較顯著的懸浮泥砂濃度差異（圖 5.2-10(a)）。淡水河各斷面則主要在颱風期間才較能看見明顯的濃度削減（圖 5.2-9(b)-(d)）。比對濃度歷線可知，強降雨以及石門水庫排洪造成的底質泥砂沖刷，均是導致颱風期間或過後下游河道懸浮泥砂濃度提升的因素。

由上游三處斷面計算得到之綜合性平均停留時間比現況來的短 0.63 至 3.13 小時，下游 TE02 斷面則相反（表 5.2-3），與去除新店溪泥砂入流影響之計算結果有相似變化，推測 TE02 之時間指標也同於 Tri 情境受到邊界條件干擾。在三個上游斷面間，以 TPB 斷面的平均時間減少 3.13 小時，幅度最大，也就是說 BdE 情境中該斷面濃度變化很顯著，原因可能為 TPB 離匯流口較近，因而直接受到大漢溪和新店溪底床沖刷泥砂的影響。在缺少底質沖刷的加成影響後，HHB 至 GDB 斷面中第一筆超越時間較晚，最後一筆超越時間均提前，各斷面受高濃度泥砂影響的總停留時間減短 1 至 2 天左右。總結以上結果顯示，如果排除底泥沖刷的影響，則模擬期間河道受到高懸浮泥砂濃度影響的綜合性平均停留時間、總停留時間均降低。

表 5.2-3、去除底床沖刷影響 (BdE) 之停留時間

情境(BdE)	TE02	GDB	TPB	HHB
綜合性平均停留時間(t_{cm})	3d 18.24h	3d 9.58h	3d 3.96h	3d 9.93h
現況 t_{cm} -情境 t_{cm}	-3.05 h	0.63 h	3.13 h	1.37 h
門檻值	51.5	60.6	116.9	156.0
第一筆超越時間(t_b)	2015/8/7 2:10	2015/8/7 19:40	2015/8/7 8:10	2015/8/7 3:50
最後一筆超越時間(t_l)	2015/8/24 4:50	2015/8/23 8:40	2015/8/22 13:00	2015/8/21 4:20
總停留時間($T_b=t_l-t_b$)	17d 2.67h	15d 13.00h	15d 4.83h	14d 0.50h
現況 T_b -情境 T_b	1d 6.67h	2d 0.50h	2d 6.83h	1d 2.00h

5.2.4 海平面上升(Sea Level Rise, SLR)

根據 IPCC 第六次評估報告 (Sixth Assessment Report, AR6) 提到 21 世紀中全球海平面高度 (global mean sea level, GMSL) 將會繼續上升，相對於 1995 年至 2014 年之海平面高度，不同程度的溫室氣體排放情境 (SSP1-SSP8.5) 估計到 2100 年前 GMSL 可能上升約 0.28 至 1.01 m，因此，研究以設計情境海平面上升 (sea level rise, SLR) 0.65 m 作為模擬，並分析因海平面上升所改變之潮汐作用對颱風期間和過後河口泥砂變遷造成的效應。

不同於前三個情境，在海平面上升 (SLR) 的情境下，各斷面之濃度歷線僅有微幅差異，且多數情形以 SLR 情境的斷面平均濃度較小 (圖 5.2-13)，相同於判斷為高於門檻濃度的懸浮泥砂相對減少，推測有兩個可能的原因：(1) 因海平面上升造成整個河口水體積增加，導致懸浮泥砂濃度受到稀釋而下降；(2) 則因通水面積增加，但上游支流量不變，使流速減小、懸浮泥砂容易產生沉降且沉積於底床，進而使水體中濃度下降。也因此，海平面上升使各斷面計算得到的綜合性平均停留時間均比現況短，其中影響 TPB 斷面計算結果最多 (表 5.2-4)。

除 TE02 斷面，其他斷面第一筆超越時間較現況晚；HHB 和 TPB 斷面的最後一筆超越時間則提前，以 HHB 提前較多約 12 小時；GDB 和 TE02 斷面最後一筆超越時間無太大差異。另外，上游三斷面之總停留時間均減少，以 HHB 差異最多、TPB 次之、GDB 最小，綜合以上結果說明，模擬期間回復潮汐作用後，海平面上升對下游河段懸浮泥砂濃度的影響較小，反之，對上游段產生的稀釋效果較強抑或使上游段泥砂顆粒更容易沉積。

表 5.2-4、海平面上升 (SLR) 之停留時間

情境(SLR)	TE02	GDB	TPB	HHB
綜合性平均停留時間(t_{cm})	3d 13.88h	3d 6.90h	3d 3.68h	3d 10.18h
現況 t_{cm} -情境 t_{cm}	1.31 h	3.30 h	3.41 h	1.13 h
門檻值	51.5	60.6	116.9	156.0
第一筆超越時間(t_b)	2015/8/7 2:00	2015/8/7 20:20	2015/8/7 8:40	2015/8/7 4:30
最後一筆超越時間(t_l)	2015/8/25 11:50	2015/8/25 8:50	2015/8/24 17:50	2015/8/21 15:30
總停留時間($T_b=t_l-t_b$)	18d 9.83h	17d 12.50h	17d 9.17h	14d 11.00h
現況 T_b -情境 T_b	-0.50 h	1.00 h	2.50 h	15.50 h

5.2.5 上游入流量增加(Flow Rate Increase, FRI)

陳韻如等人 (2016) 以 IPCC 於第四、五次評估報告 (AR4、AR5) 提出之氣候變遷情境，估計未來淡水河豐枯水期的流量改變率，不同情境下，豐水期之流量大致增加，其中豐水期流量改變率最大的情境為 AR5 中的 RCP2.6 情境，改變範圍從-2 %至 45 %；改變率最小的情境則為 AR4 中的 B1 情境，範圍從-1 %至 19 %。本研究以增加三支流 25% 流量做為依據，評估未來在氣候變遷造成流量增加的情況下，河道中高濃度懸浮泥砂綜合性平均停留時間和總停留時間的反應。

由圖 5.2-17 可發現在颱風最高水位下的 HHB-TE02 斷面峰值濃度均上升，且在整個模擬期間，FRI 情境下的濃度歷線多高於現況，綜合性平均停留時間計算結果也以 FRI 情境模擬較長（表 5.2-5），各斷面以上河段的平均時間約相差 0.5 至 4 小時，並以 TPB 和 GDB 受到的影響相對較大。上游流量變大使流速增加（圖 5.2-18），懸浮泥砂的傳輸隨之變快，但同時因流量增加導致入流泥砂通量增加，且流速變大使底床泥砂起懸可能性增加，整體泥砂濃度上升，反而判斷受到濃度較高、時間較長的高濃度懸浮泥砂影響，使綜合性平均停留時間上升。

從超越門檻濃度時間結果表示，因為 FRI 情境模擬整體濃度較高，除 TE02 受邊界影響外，其餘斷面的第一筆超越時間提前，其中又以 GDB 提前 9 小時幅度最大，推測是因流速增加，颱風入侵前的高濃度泥砂較快傳遞至此，此外，全部斷面最後一筆超越時間均延後許多，整體河段總停留時間也隨之增長 4 至 8 天左右，以 TPB 斷面影響最多。同時從情境中發現，雖於 8 月 25 日後上游濃度已回復至平時水準，但因泥砂通量增加、底泥沖刷增加之故，導致洪水退水後段濃度仍高於現況。

表 5.2-5、上游入流量增加 (FRI) 之停留時間

情境(FRI)	TE02	GDB	TPB	HHB
綜合性平均停留時間(t_{cm})	3d 16.35h	3d 13.62h	3d 10.94h	3d 11.79h
現況 t_{cm} -情境 t_{cm}	-1.16 h	-3.41 h	-3.84 h	-0.48 h
門檻值	51.5	60.6	116.9	156.0
第一筆超越時間(t_b)	2015/8/7 2:50	2015/8/7 10:20	2015/8/7 6:30	2015/8/7 1:30
最後一筆超越時間(t_l)	2015/8/30 3:40	2015/8/29 11:40	2015/9/2 0:00	2015/8/28 17:10
總停留時間($T_b=t_l-t_b$)	23d 0.83h	22d 1.33h	25d 17.50h	21d 15.67h
現況 T_b -情境 T_b	-4d 15.50h	-4d 11.83h	-8d 5.83h	-6d 13.17h

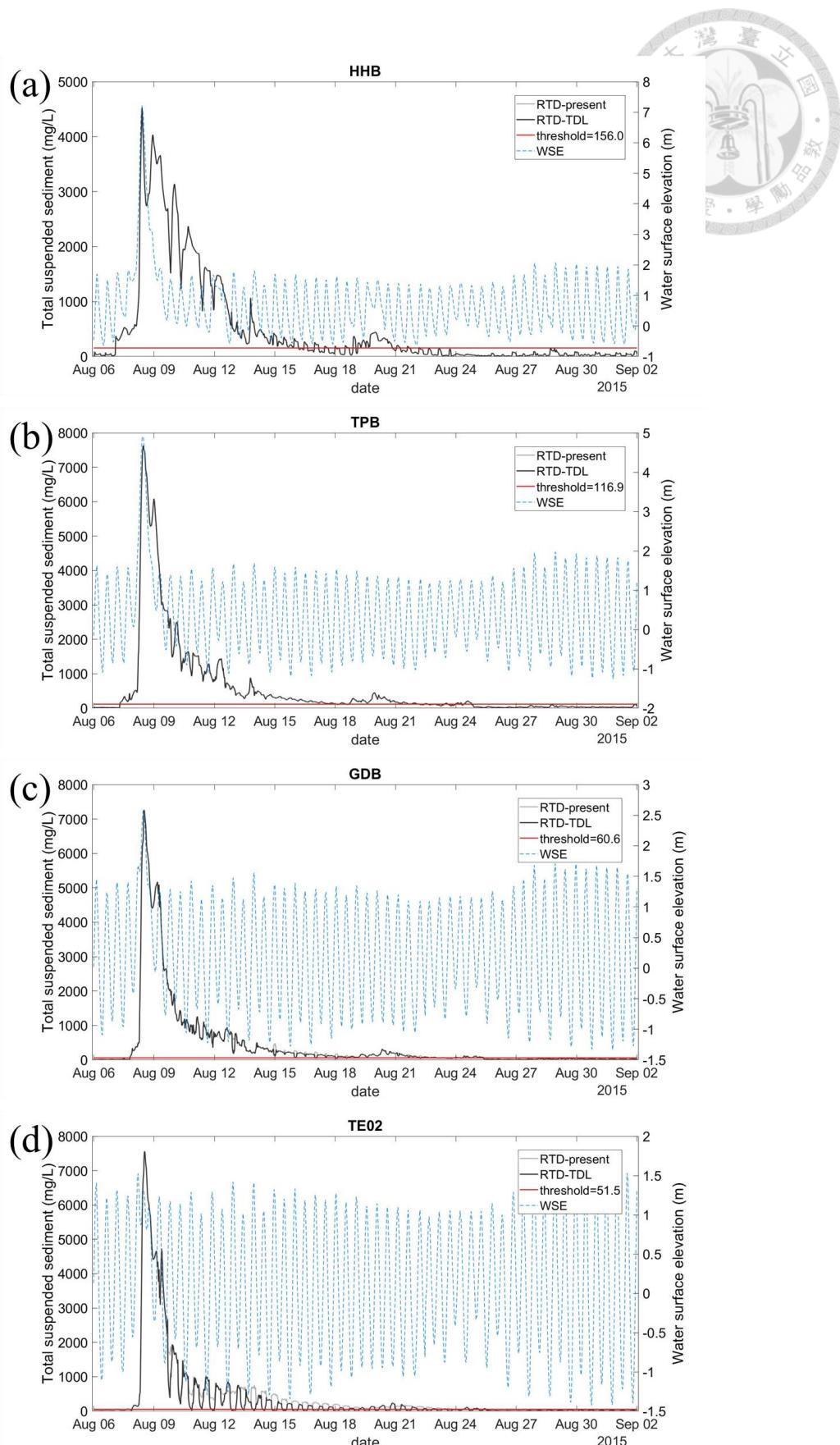


圖 5.2-1、去除潮汐回流泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化

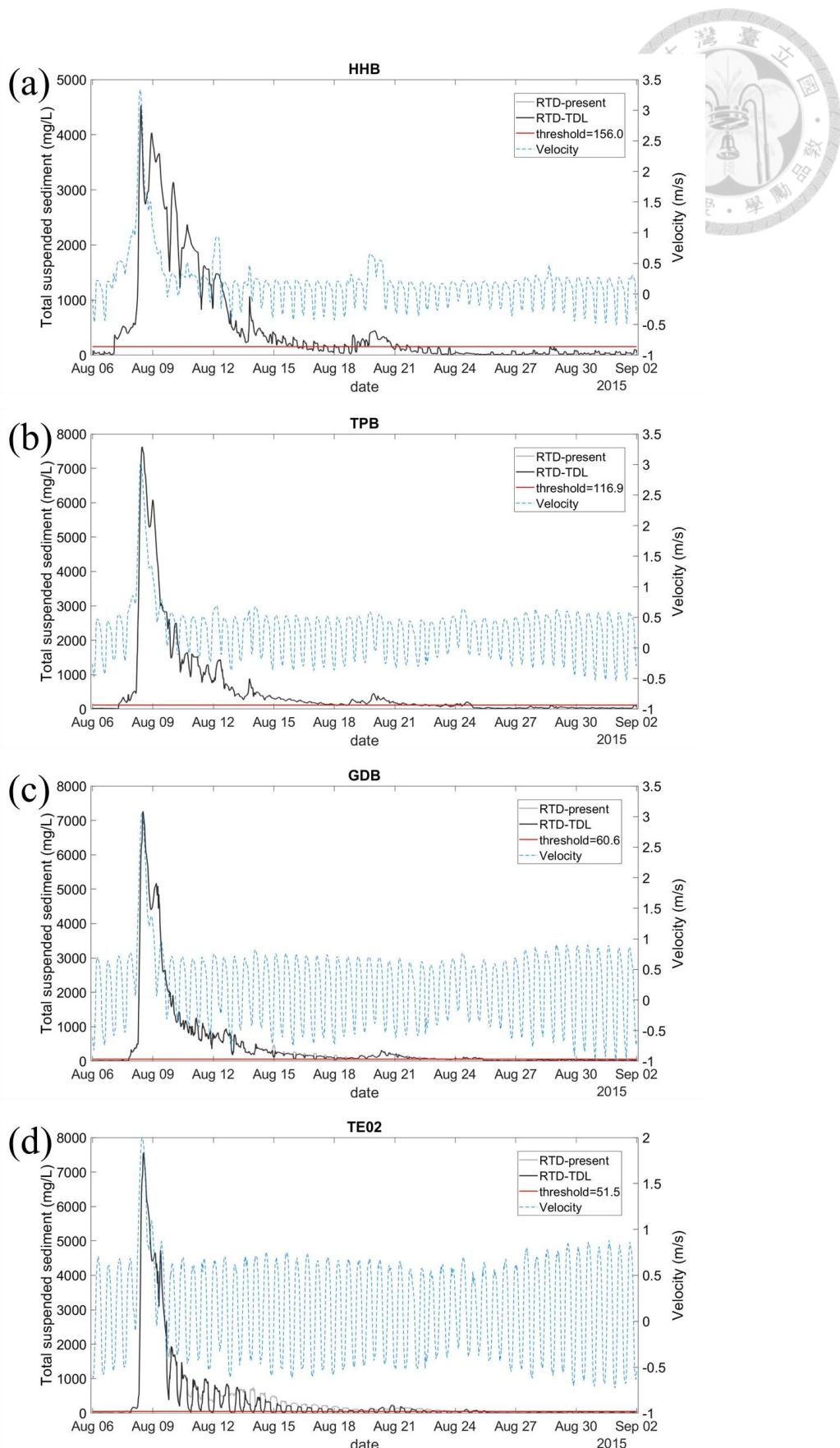


圖 5.2-2、去除潮汐回流泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化

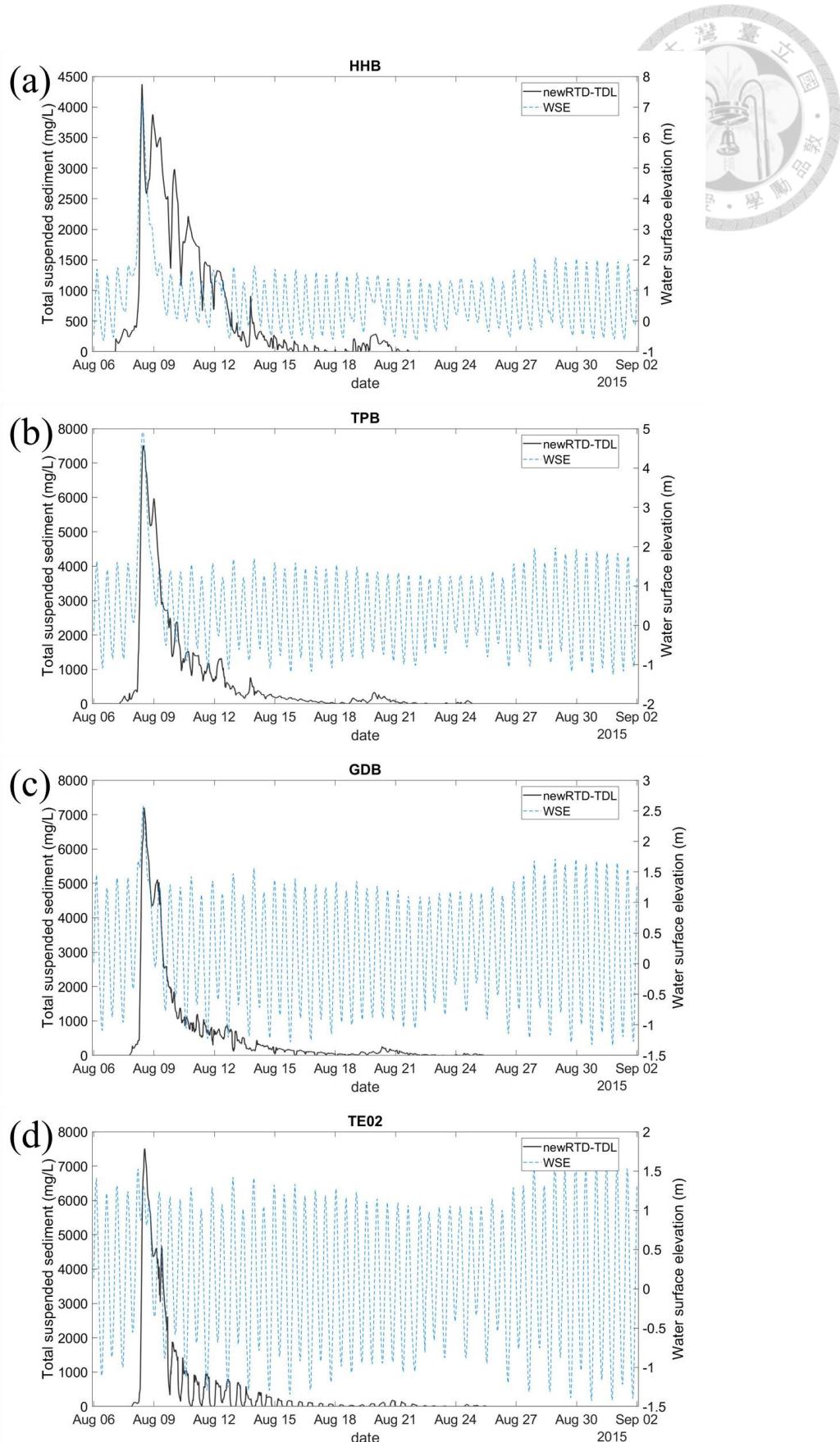


圖 5.2-3、篩除門檻值後去除潮汐回流泥砂影響之新濃度歷線和水位高程變化

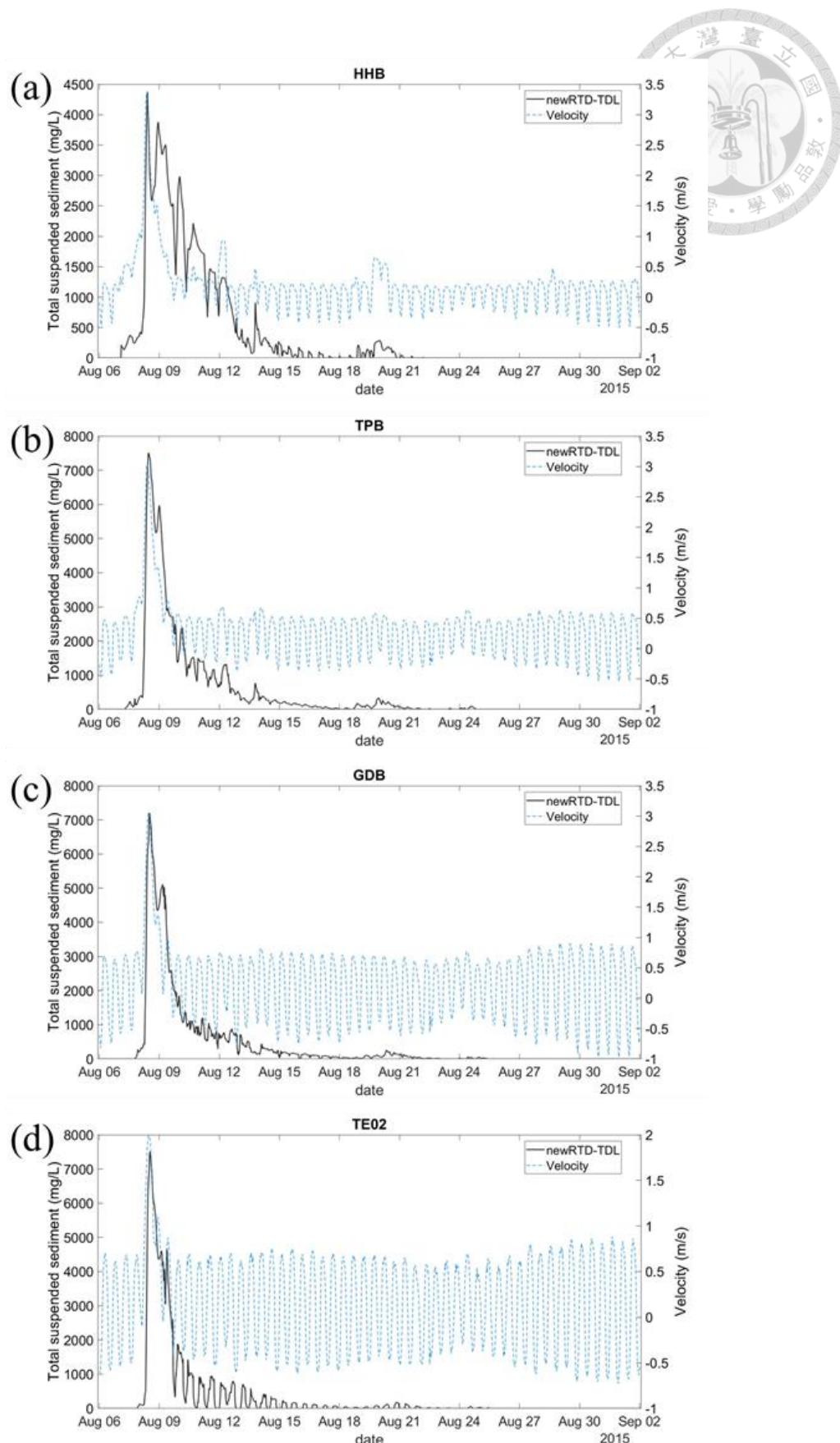


圖 5.2-4、篩除門檻值後去除潮汐回流泥砂影響之新濃度歷線和流速變化

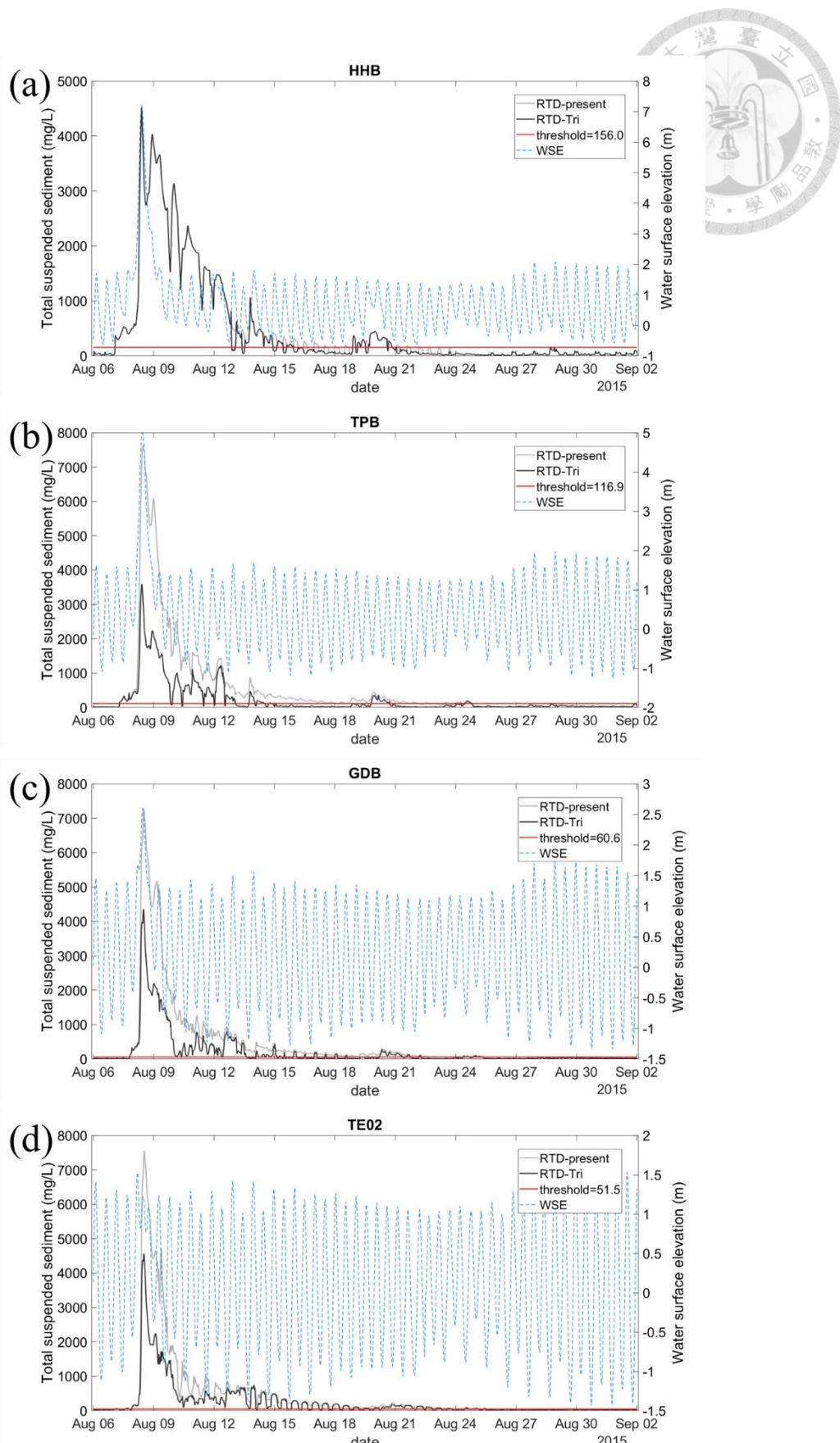


圖 5.2-5、去除支流(新店溪)泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化

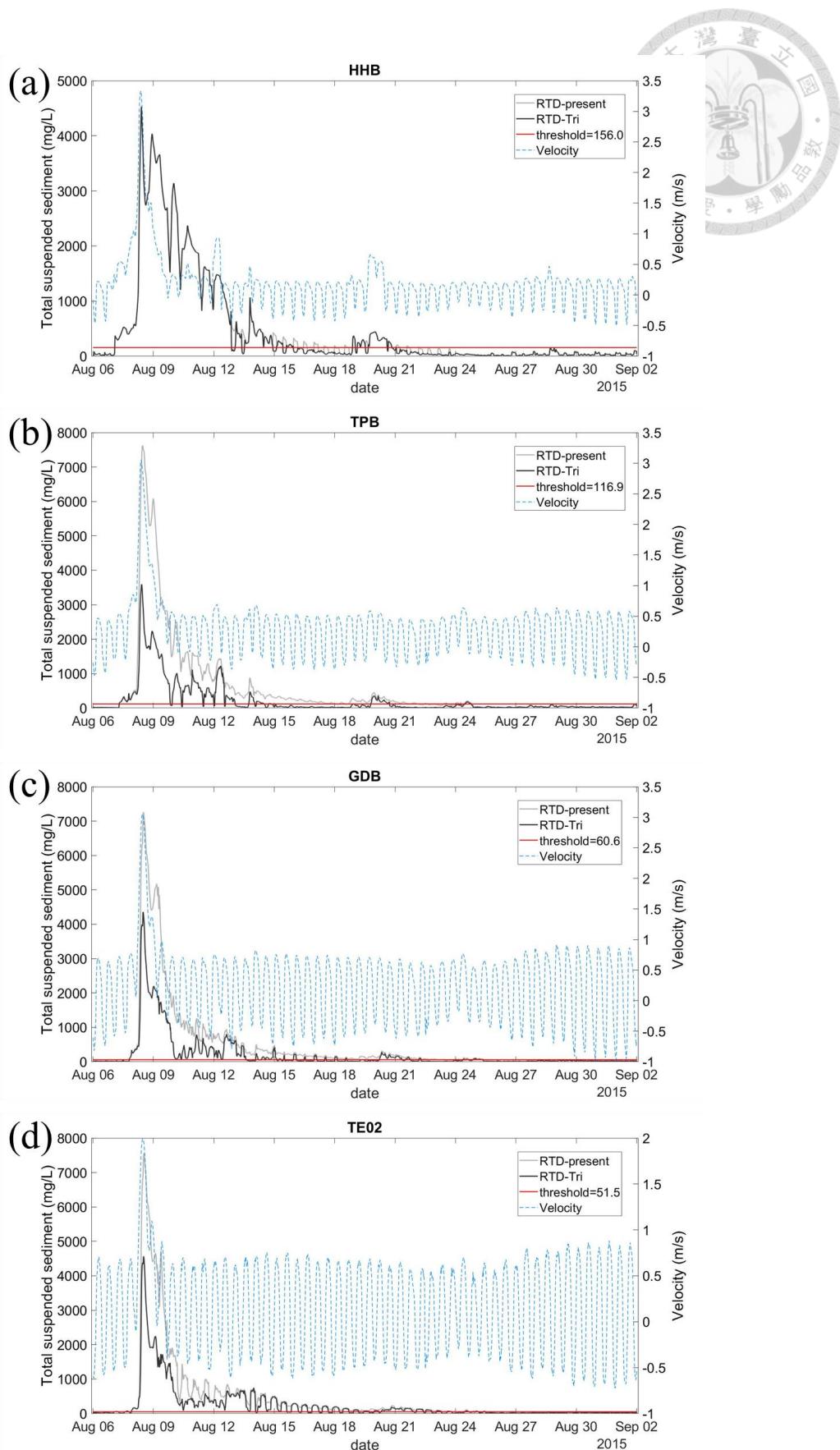


圖 5.2-6、去除支流(新店溪)泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化

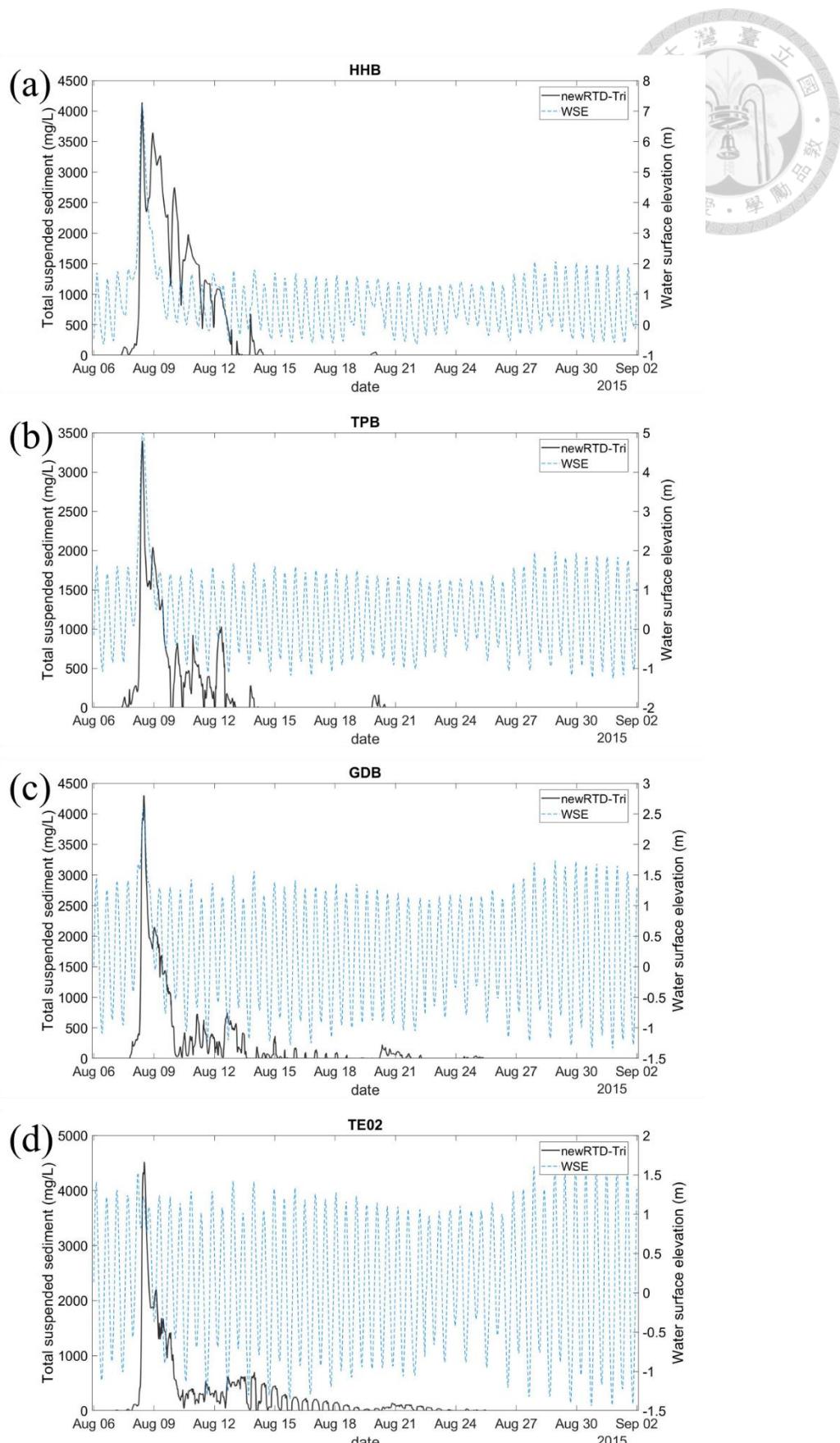


圖 5.2-7、篩除門檻值後去除支流(新店溪)泥砂影響之新濃度歷線和水位高程變化

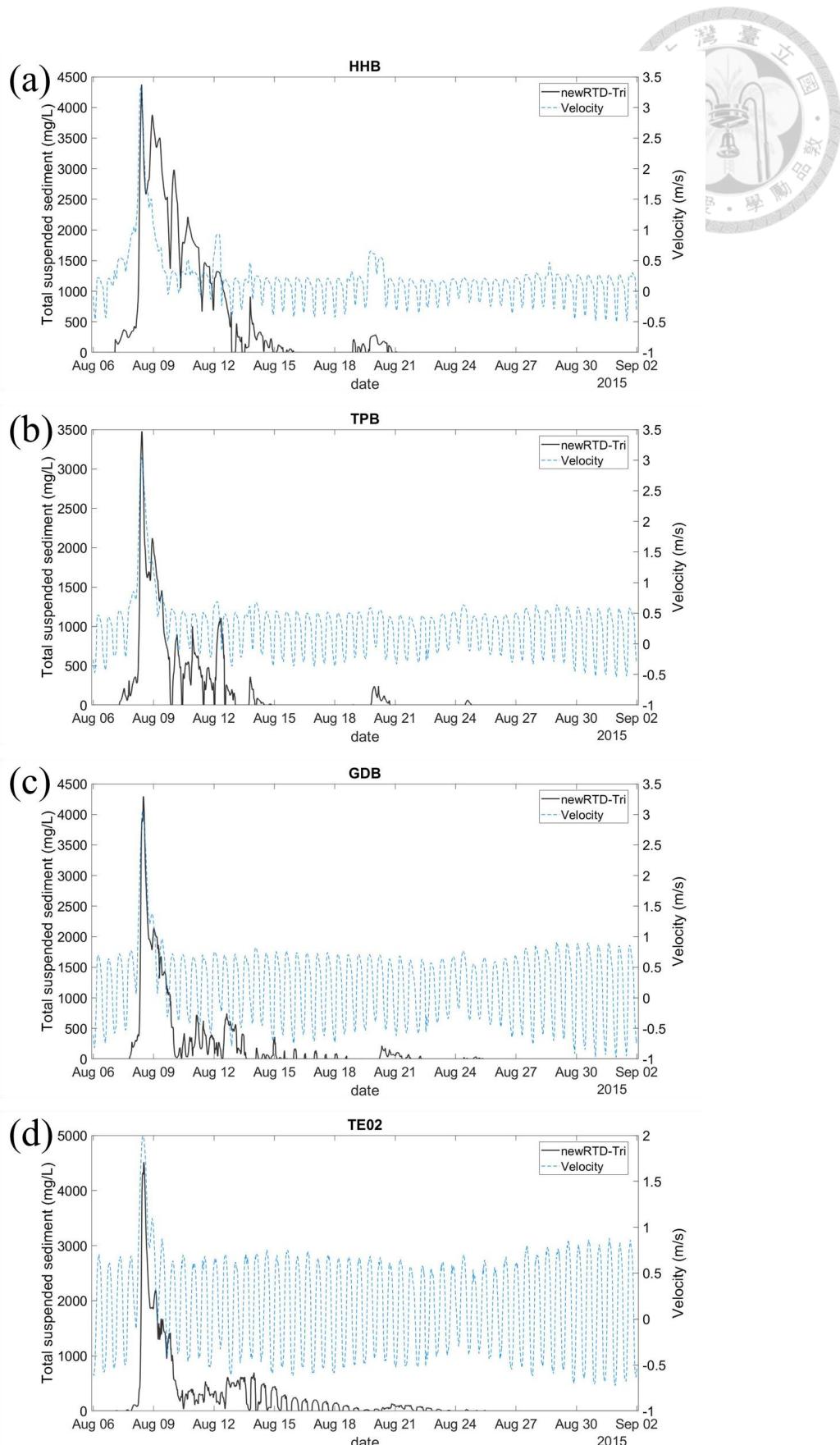


圖 5.2-8、篩除門檻值後去除支流(新店溪)泥砂影響之新濃度歷線和流速變化

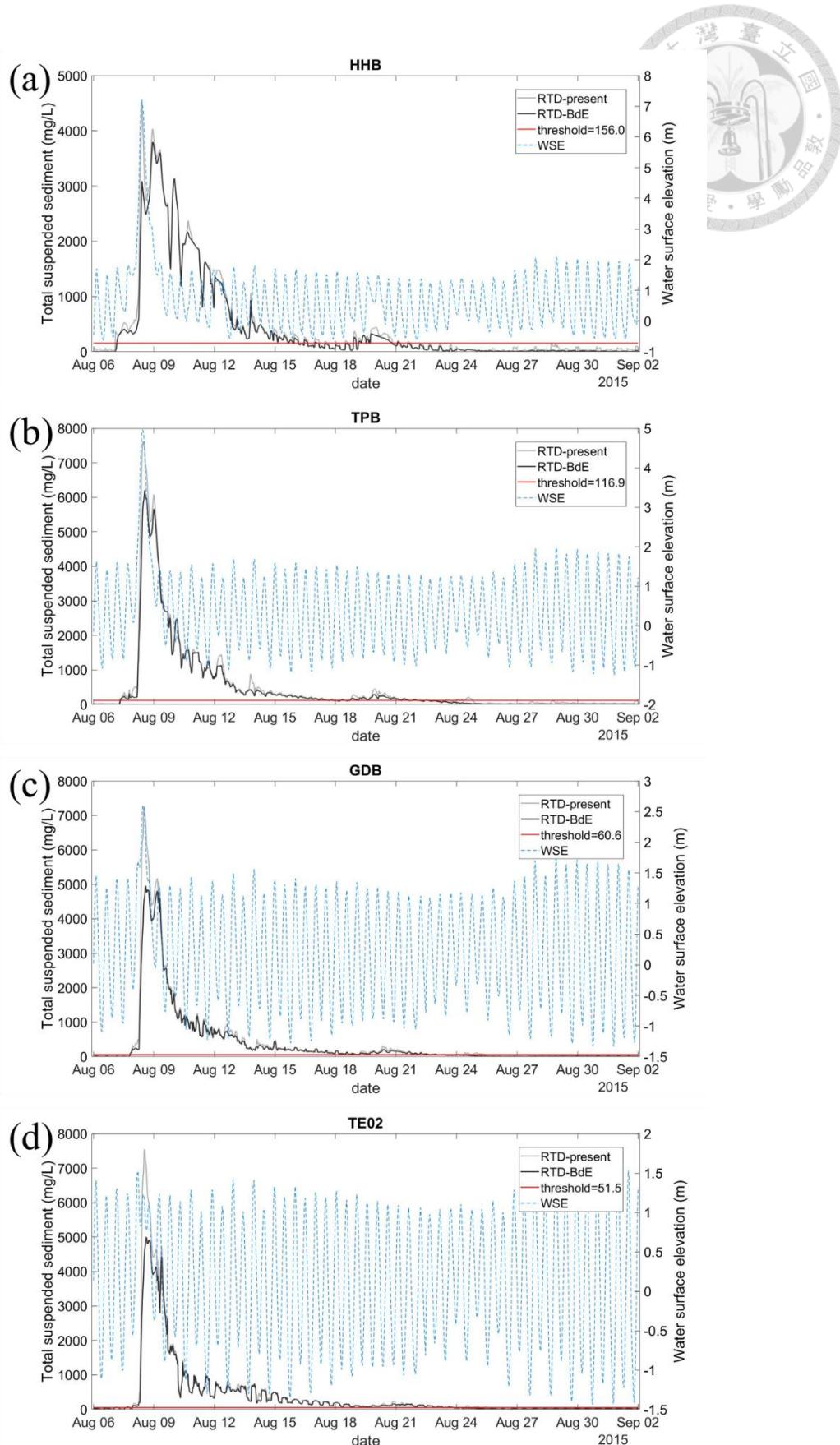


圖 5.2-9、去除底床沖刷泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化

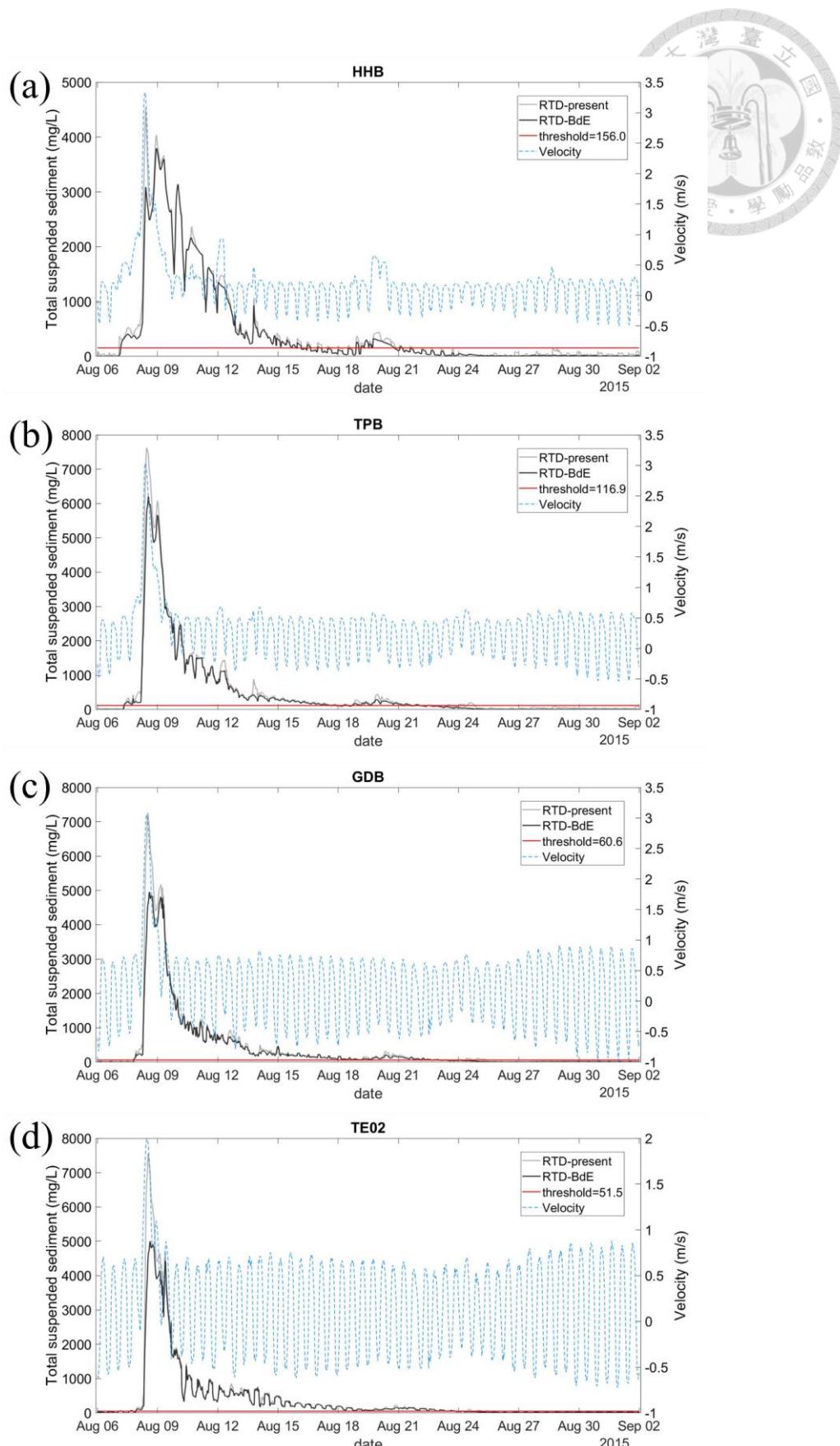


圖 5.2-10、去除底床沖刷泥砂影響與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化

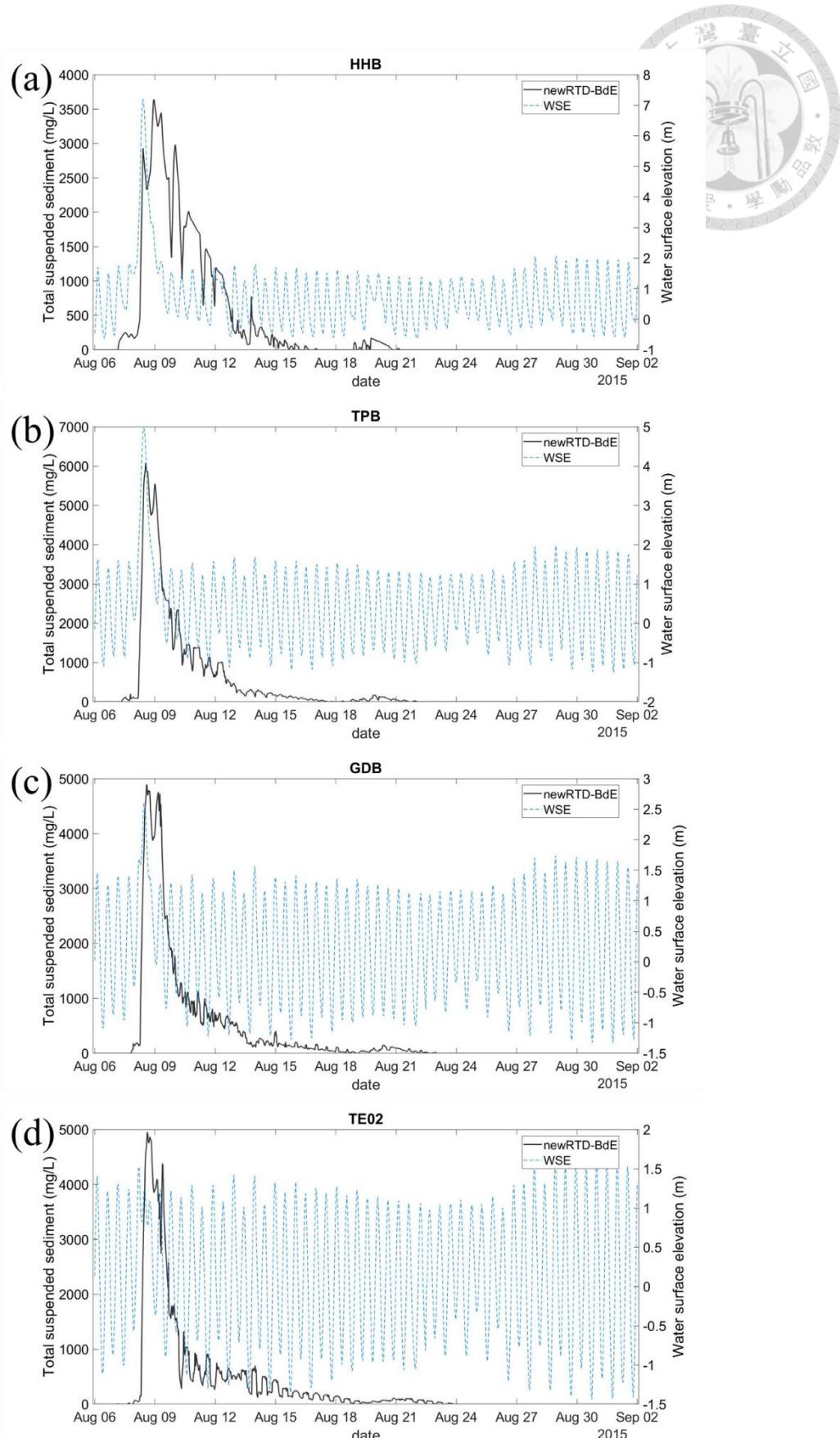


圖 5.2-11、篩除門檻值後去除底床沖刷泥砂影響之新濃度歷線和水位高程變化

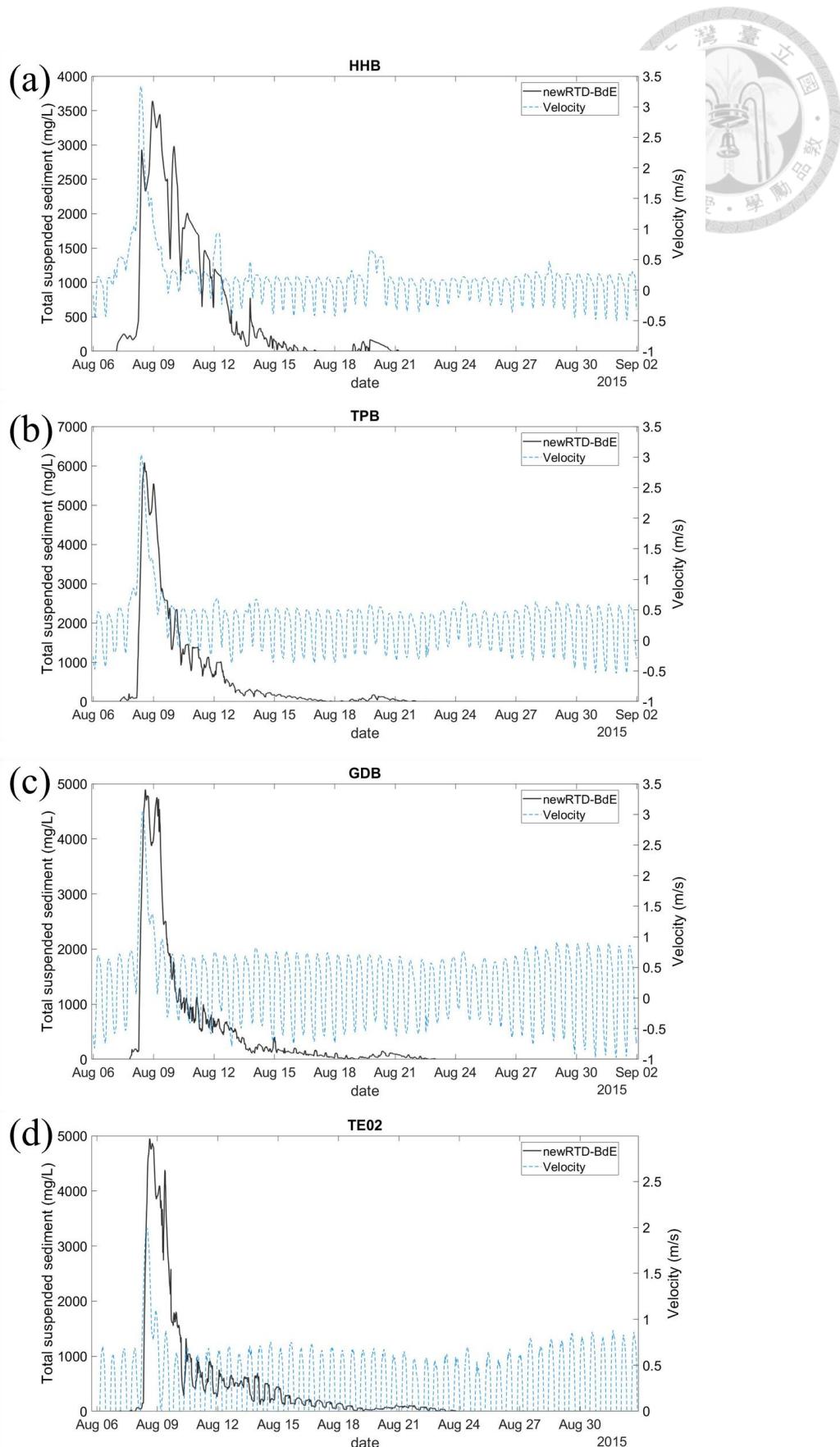


圖 5.2-12、篩除門檻值後去除底床沖刷泥砂影響之新濃度歷線和流速變化

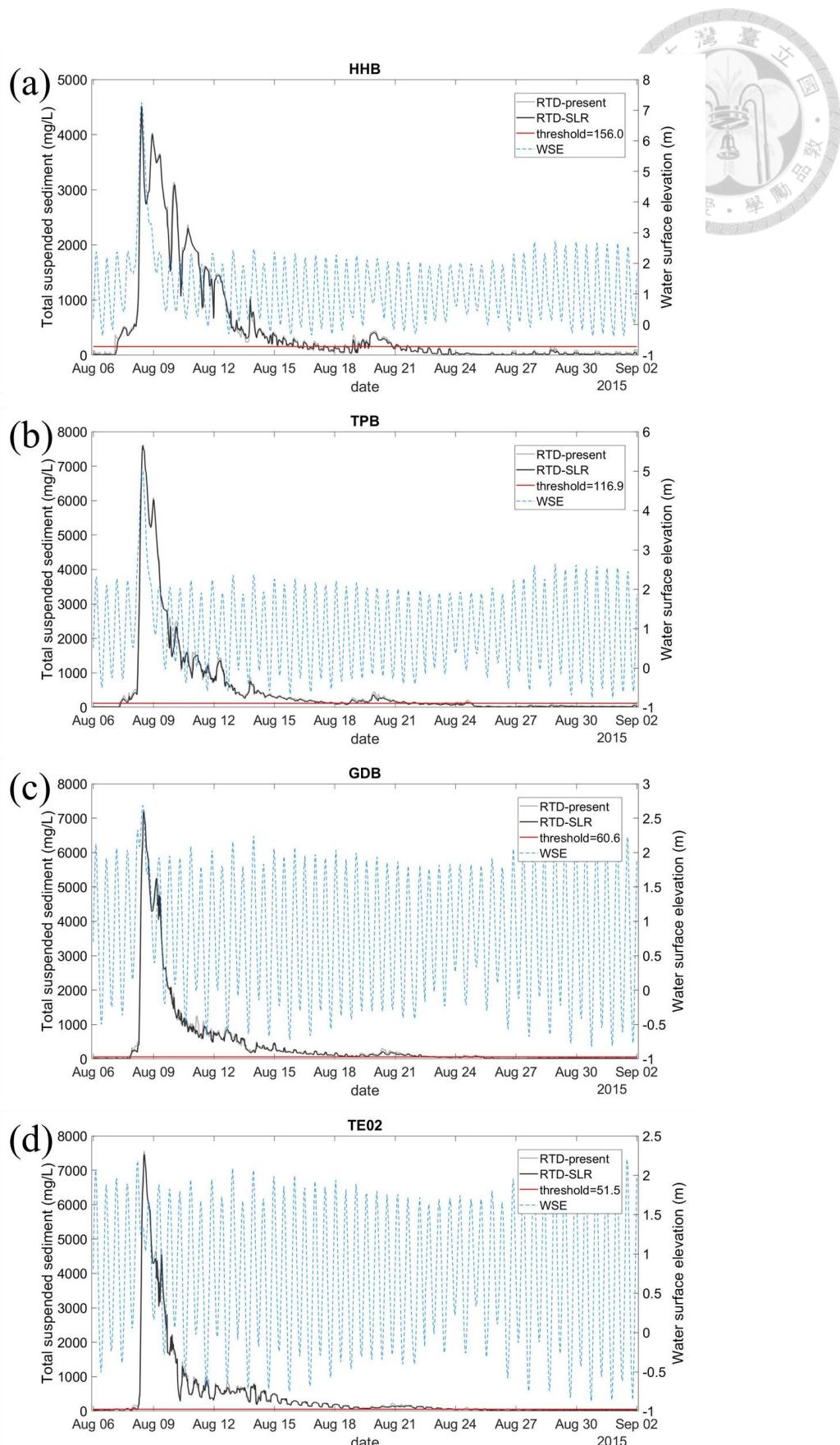


圖 5.2-13、海平面上升與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化

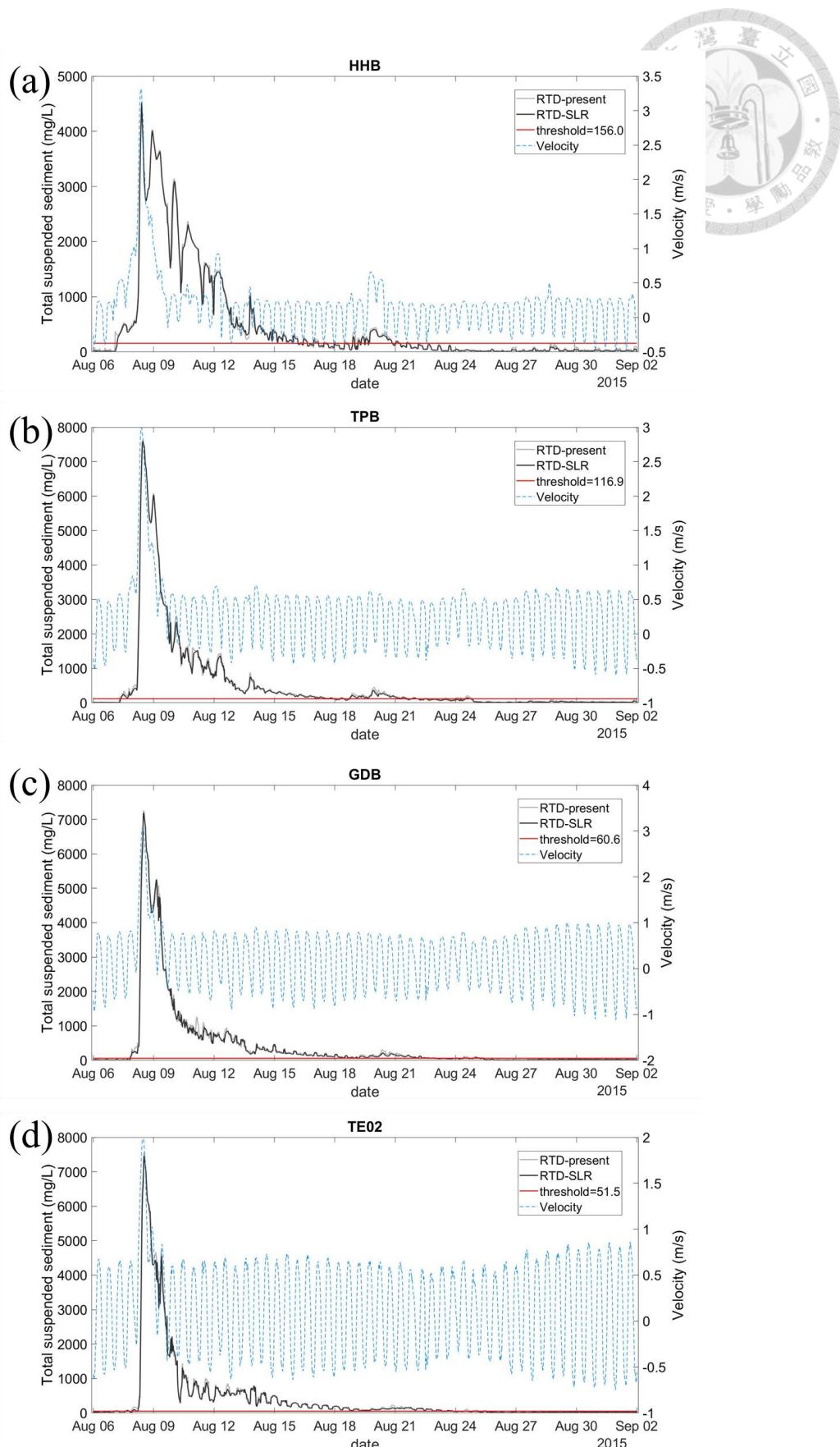


圖 5.2-14、海平面上升與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化

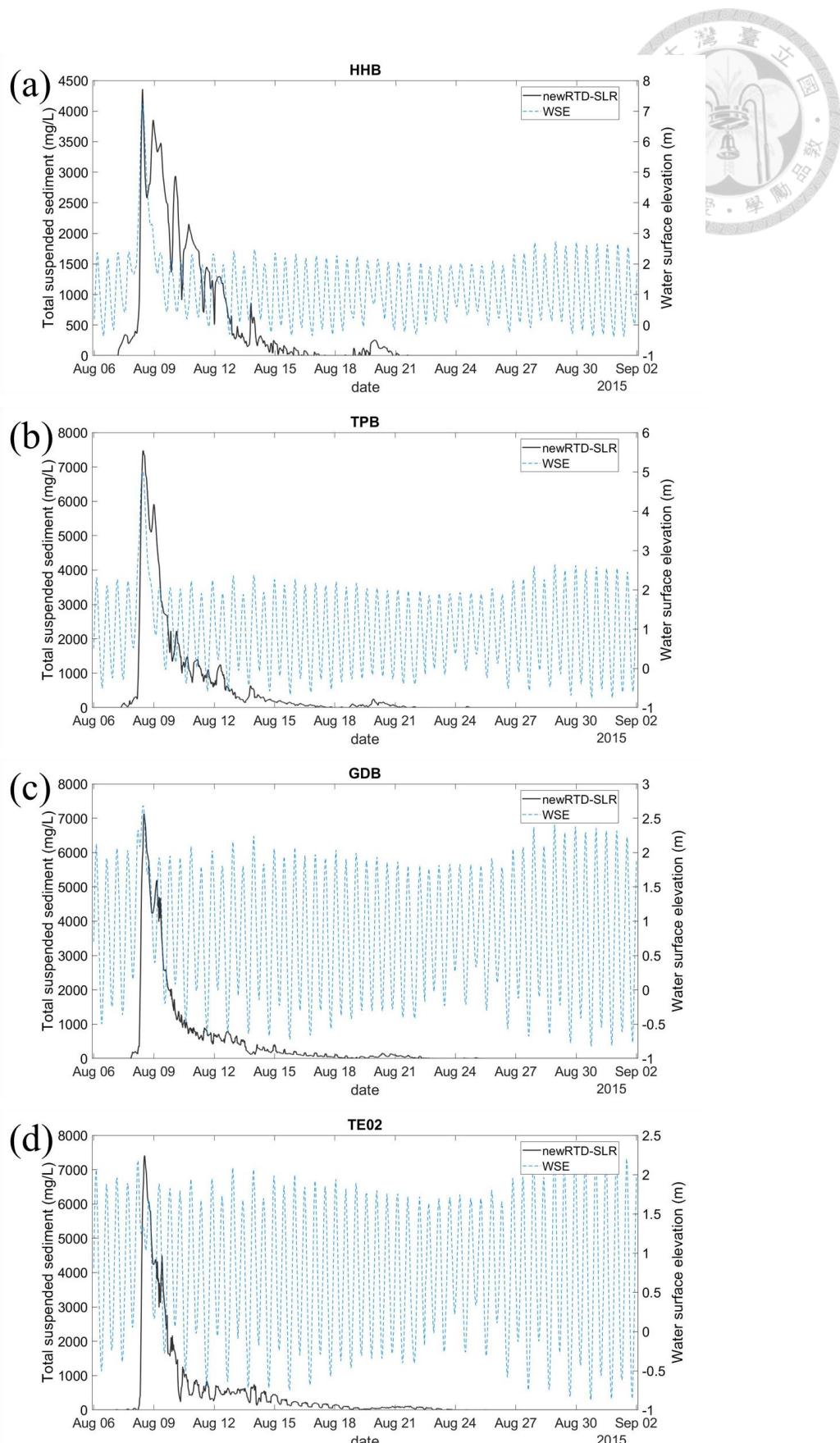


圖 5.2-15、篩除門檻值後海平面上升之新濃度歷線和水位高程變化

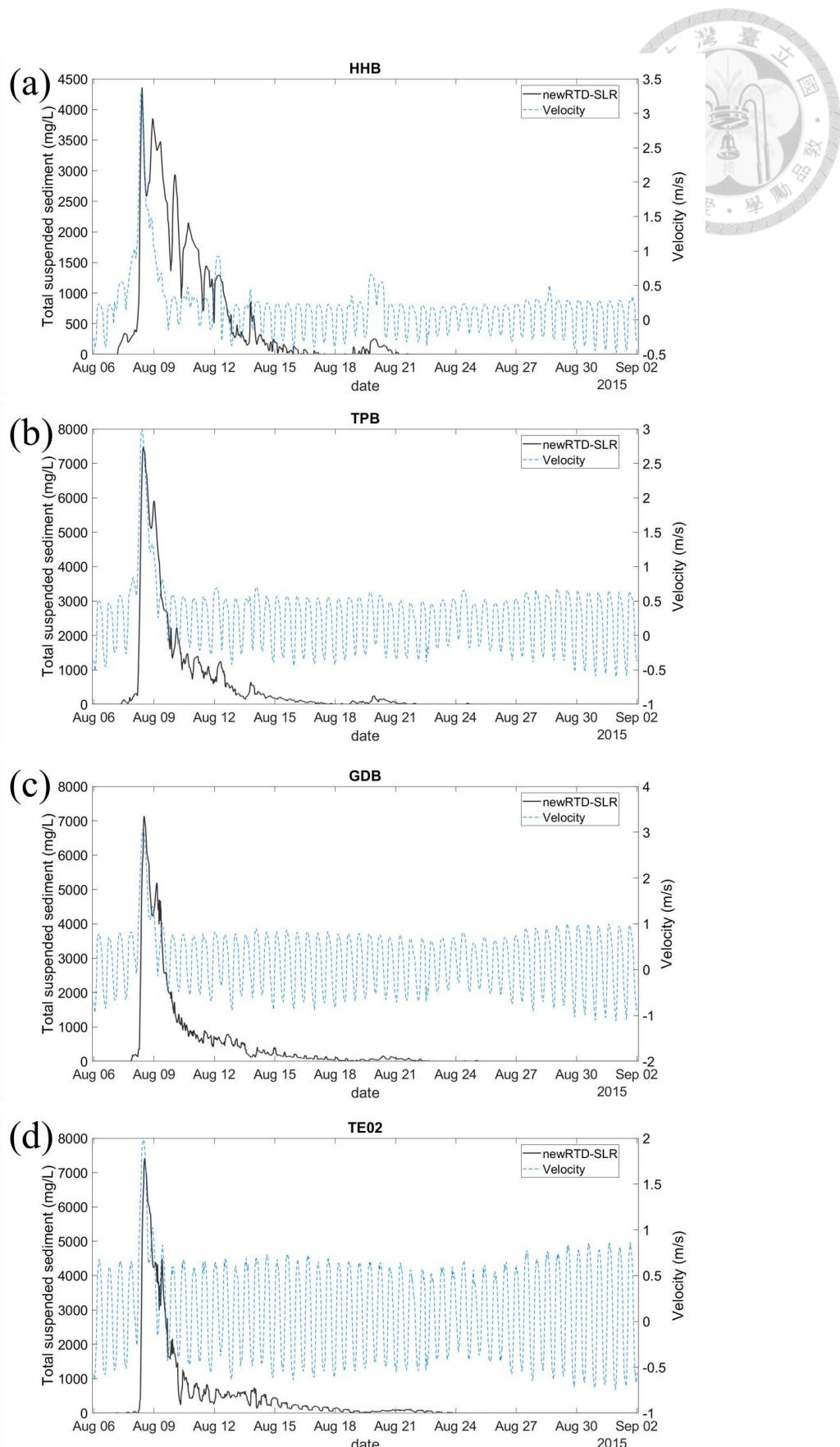


圖 5.2-16、篩除門檻值後海平面上升之新濃度歷線和流速變化

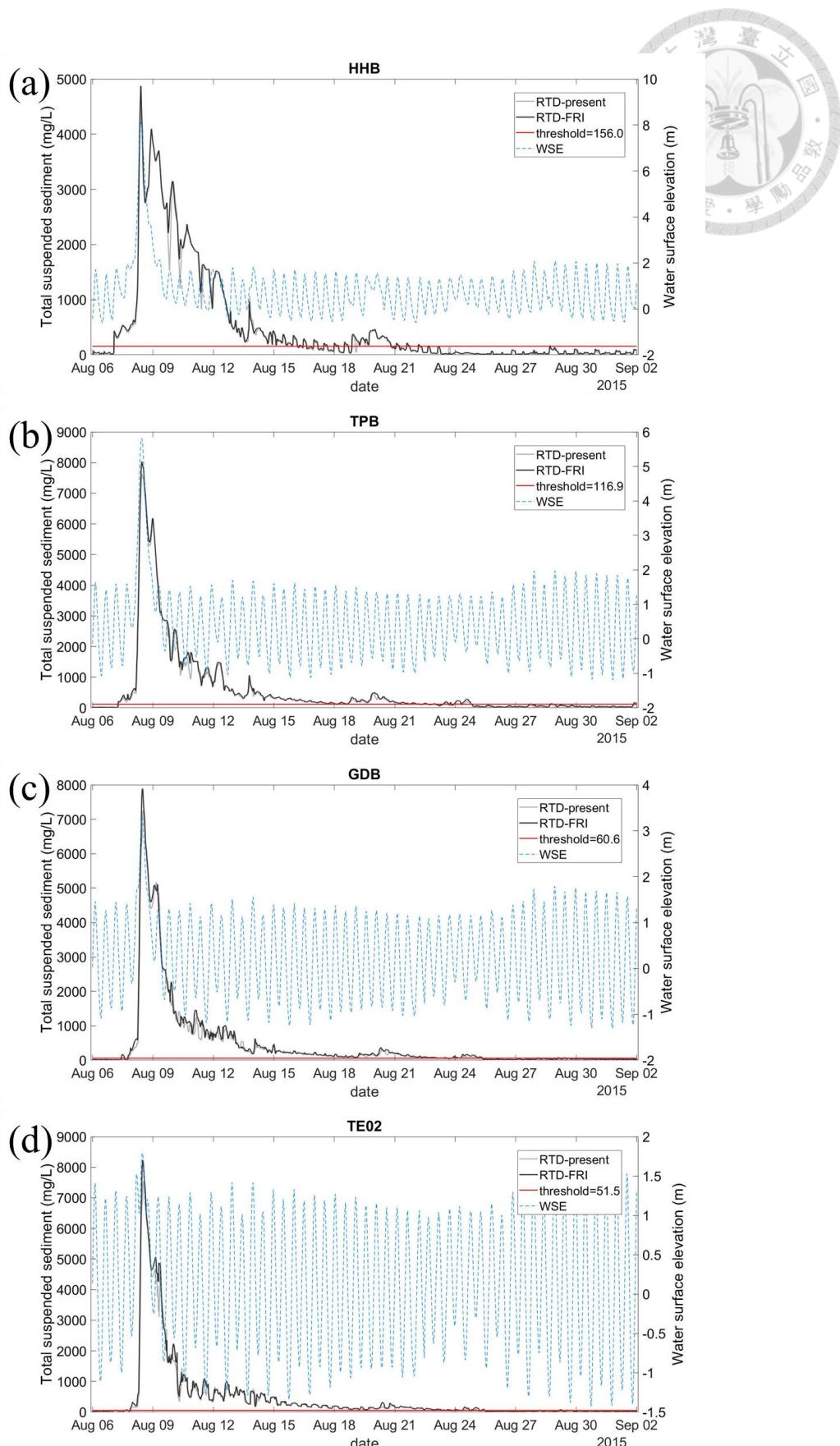


圖 5.2-17、上游入流量增加與現況之濃度歷線、門檻值和水位高程變化

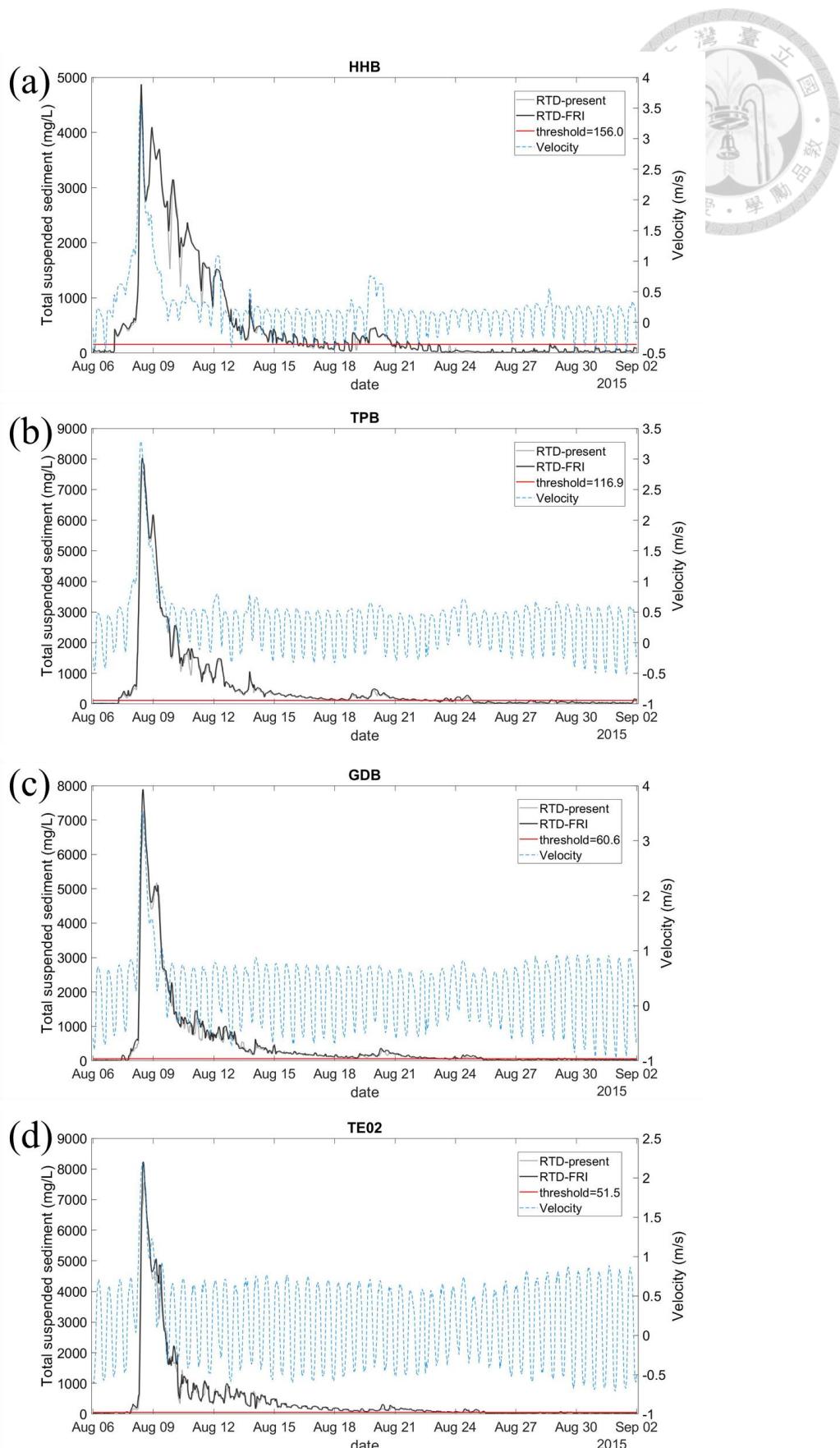


圖 5.2-18、上游入流量增加與現況之濃度歷線、門檻值和流速變化

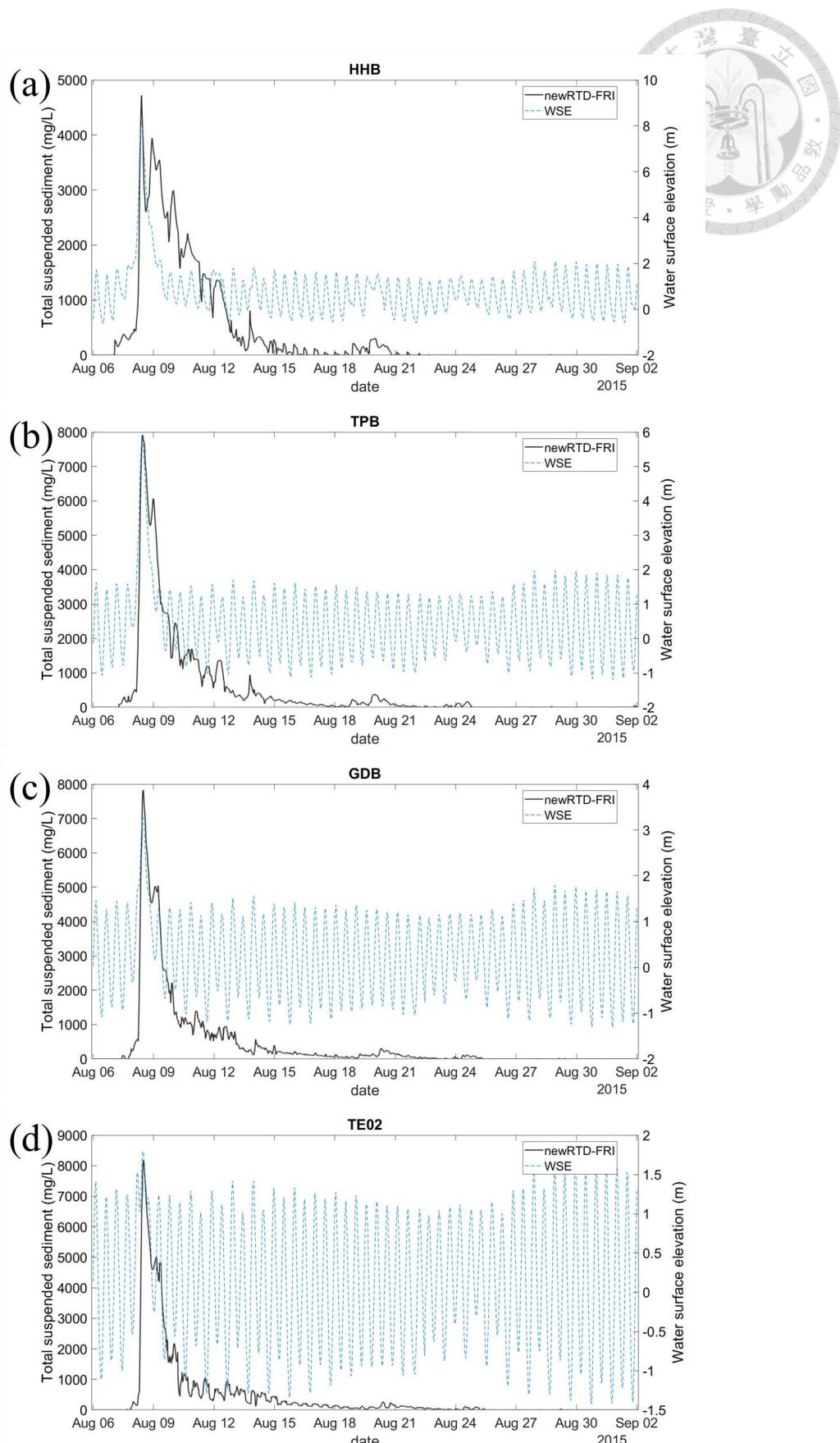


圖 5.2-19、篩除門檻值後上游入流量增加之新濃度歷線和水位高程變化

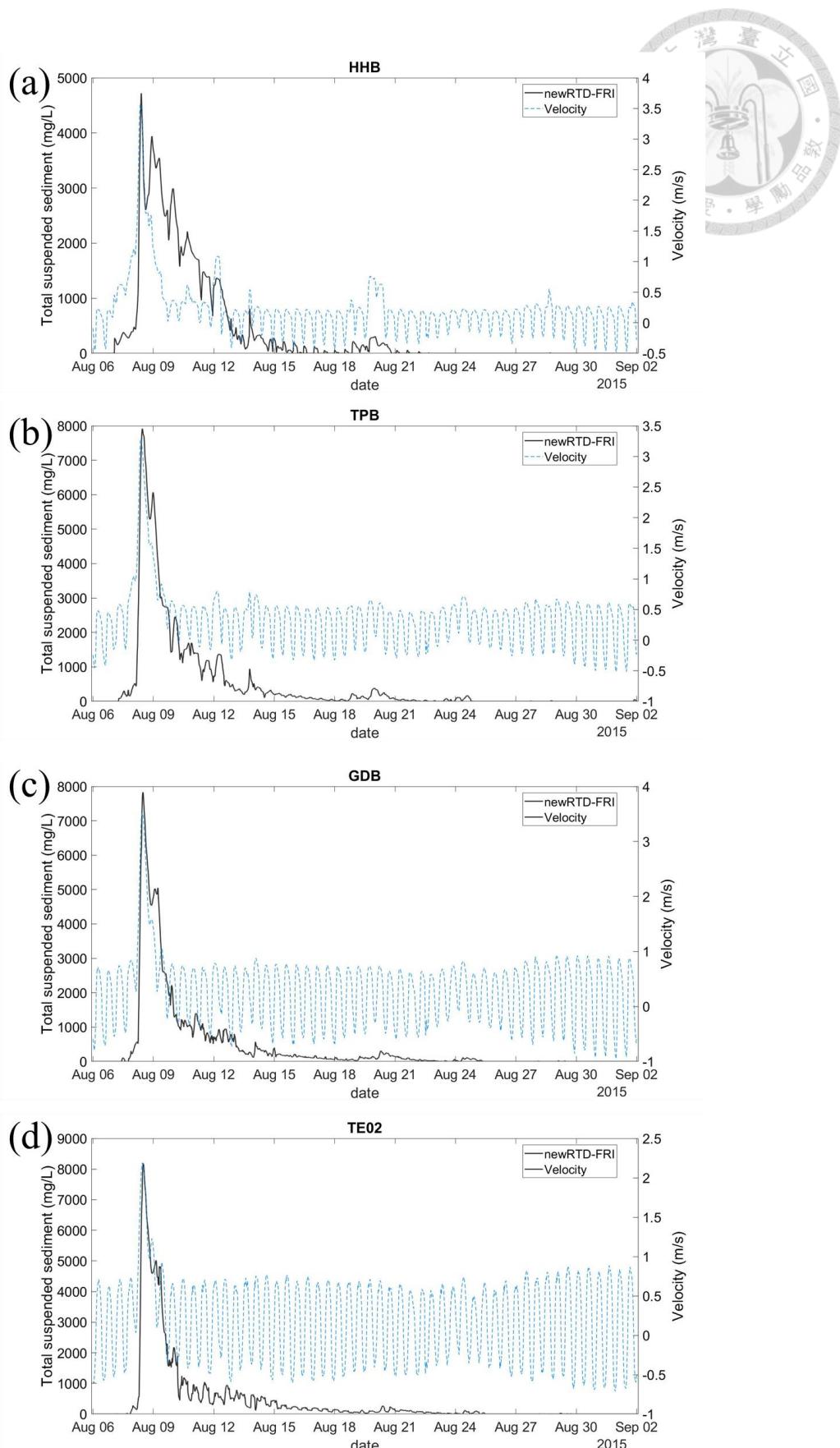


圖 5.2-20、篩除門檻值後上游入流量增加之新濃度歷線和流速變化



5.3 小結

綜合性平均停留時間、平均停留時間的計算結果，均顯示潮汐作用對懸浮泥砂的濃度及傳遞的確有相當程度的影響，因此，使其停留在感潮河口帶的時間增長，可能衍伸產生危害的可能性，舉例來說，在上游支流不斷有泥砂入流的狀況下，可能加劇了濃度累積的現象，或是增加泥砂沉積於下游河道的機率。由本次事件 TE02 斷面平均停留時間模擬顯示，短時間的水庫排砂平均不會在淡水河口停留超過 2 天（從城林橋開始起算），因此颱風事件後連續多源泥砂入流，應是導致淡水河口濃度持續高於平常的主因。總結來說，潮汐效應和上游泥砂持續入流的綜合作用，必延長淡水河感潮帶受高濃度懸浮泥砂影響的時間，因此，也增加水生生物的暴露時間、造成棲地條件的改變，可能進而使生物遭受亞致死壓力。然若能適當進行單一或聯合水庫排水操作，使漲潮流量低於河川流量，應能大幅減少高濃度泥砂的停留時間，但仍需注意水理條件的改變，除此之外，對其他泥砂來源的管控也相當重要。經由本次事件模擬後認為，在往後的水庫排砂颱風事件中，需要將水庫排洪排砂天數、其他支流條件等資料進一步彙整，才能真實評估影響。

Pak et al. (2015) 認為強降雨事件時因泥砂沖刷行為，水體懸浮泥砂濃度會提升許多。本研究的「現況」和「情境」分析中，可發現在一場水庫排砂的颱風事件中，下游河道懸浮泥砂的來源並不單純只包含水庫淤泥，因為強降雨發生時，往往導致河道過度沖刷，甚至會產生土石崩塌的現象，驗證了 Ji et al. (2002) 在模擬暴雨事件下所發現到的，無論是點源、非點源或是底床懸浮泥砂，都不可忽略的負載 (loading)。然而，水土流失可能導致生態系統產生嚴重破壞，若上游河段能做完善水土保持，如增加植被覆蓋率，就能減少降雨對泥砂的沖刷量 (Pan and Shangguan, 2006)，在未來的颱風事件也能降低支流泥砂對下游河道產生的衝擊。另外，下游感潮河口段的有機淤泥再起懸，可能使水中溶氧遭到消耗或釋放有害物質，造成河道水質惡化、危害生態環境，因此，研究認為在進行水庫排洪排砂操作時，不僅需對本身的排放量做估計，應也要考量流速過快引起的底床沖刷。

SLR 情境的綜合性平均停留時間和總停留時間模擬結果，打破了原先預期會因潮汐推動力較強造成平均時間增加的想法，因為根據過去研究指出，在海平面上升的情況下，常因河口水體變多，物質的停留時間也會變長 (Hong et al, 2012 ; Hong et al, 2020 ; Feizabadi et al., 2022)。然而，因綜合性平均停留時間和總停留時間均為考量模擬期間高於門檻之懸浮泥砂，推測若改以脈衝投入的方法測試，海平面上升可能會使平均停留時間增加，但我們從影響河口濃度的角度來看也發現，即使整體懸浮泥砂或是溶解物質的平均停留時間會增加，但實際上因為稀釋、沉積，對感潮河段水體的污染程度可能反而會減小。另外，在 FRI 情境模擬中表明了未來氣候變遷發生強降雨的情況下，會使現況中平時的懸浮泥砂濃度也有所變化，這也表示說，如果未來河口水體體積持續不變，注意河口濃度、泥砂沉積情形是否會有長期的變化，或改變感潮河段水生生物的居住環境，也是一個值得投入的議題。

第六章 結論與建議



6.1 結論

1. 淡水河系 EFDC 模式水位率定驗證結果顯示其水理模式具備相當的可信度。主要模擬誤差發生於高、低潮位處和 TDKB 測站率定颱風期間高水位處。
2. 泥砂傳輸模式率定和驗證之統計指標結果顯示，觀測資料與模式模擬之懸浮泥砂濃度大致吻合，然而因高流量期間的實測值不確定性較高且受量測位置影響，某些情況下模式無法模擬出該離群值。另可能因歷經蘇迪勒颱風，淡水河系底泥已被大量沖刷，使杜鵑颱風事件中濃度峰值之模擬較實測來的大。
3. 以蘇迪勒颱風事件作為現況分析，透過綜合性平均停留時間 (t_{cm}) 和總停留時間 (T_b) 對模擬期間產生高濃度懸浮泥砂的影響進行評估，主要以超越濃度時間的角度，選擇採用後段時間篩選門檻作為評估高濃度懸浮泥砂的方法。由大漢溪-淡水河各斷面計算 t_{cm} 為 3 天 7.10 小時至 3 天 15.19 小時，且上游至下游大致由小至大，代表越下游以上河段受到高濃度懸浮泥砂影響的 t_{cm} 較長，其中 HHB 斷面計算之 t_{cm} 因濃度分布略大於下游斷面；各斷面 T_b 為 15 天 2.50 小時至 18 天 9.33 小時，意指模擬期間高濃度泥砂實際影響時間長於兩周。藉兩時間指標指出高濃度影響平均時間雖較短，然河道懸浮泥砂濃度持續高於平時許久。
4. 透過分析現況各斷面濃度歷線結果有幾點發現：(1) 從 HHB 斷面之濃度歷線變化能看出潮汐作用對水中懸浮泥砂推移的影響；(2) 淡水河上斷面同時受到大漢溪和新店溪泥砂的影響，其濃度曲線變化與 HHB 相當不同，因此可推測新店溪泥砂影響顯著；(3) 模擬期間懸浮泥砂濃度並非持續降低，在上游支流泥砂通量較大或有底泥沖刷時，就可能偵測到超越門檻值的濃度。
5. 由平均停留時間計算結果顯示，各脈衝時間點後一小時流入的石門水庫排放泥砂和大漢溪泥砂，隨不同的流量和潮汐作用大約花費 5.25 至 35.95 小時流

出淡水河 TE02 斷面。藉此結果判斷，模擬期間河口懸浮泥砂濃度持續偏高，主因可能是上游支流泥砂持續流入，且潮汐回復後，新店溪流量仍高於平常，應是使泥砂平均停留時間較短的原因。此外，因變量流流場的複雜特性，僅能從 HHB 斷面看出不同潮位排放泥砂的停留時間差異。

6. 比較現況和去除潮汐回流泥砂影響情境的結果表示，若漲潮動量無法將已傳遞至出海口的泥砂往上游回推，因為水庫、支流產生之高濃度懸浮泥砂對下游河道的影響會降低許多，且在蘇迪勒颱風事件模擬中，潮汐推移泥砂距離上限約至台北橋，然因上游泥砂源持續輸入，總停留時間無太大差異。
7. 去除支流泥砂影響之情境模擬中，無論從其濃度歷線的分布、綜合性平均停留時間或是總停留時間的角度，都能發現蘇迪勒颱風造成的新店溪集水區崩塌，強烈影響淡水河下游河道的懸浮泥砂變化，並提高各河段受高濃度懸浮泥砂影響的時間指標。
8. 去除底床沖刷影響情境結果顯示，相對於現況的綜合性平均停留時間和總停留時間均減少，代表各支流入流泥砂，因流量較大造成的底泥沖刷，也是重要的泥砂來源之一。
9. 透過兩攸關氣候變遷下的情境分別發現，海平面上升會因水體積增加而稀釋濃度或流速減小而增加沉積，造成綜合性平均停留時間和總停留時間大致較短、受高濃度懸浮泥砂影響減少；上游入流量增加則因入流泥砂通量增加或底床沖刷量增加，導致綜合性平均停留時間和總停留時間大致較長、受到高濃度懸浮泥砂影響增加。



6.2 建議

1. 研究在進行數值模式參數率定時，邊界流量條件採上游水位站透過率定公式進行轉換，且底床條件多為假設，若未來能以實測流量和更為詳細的床層數據做為模擬條件，應當能使水理和泥砂傳輸的過程更貼近實際情況。
2. 因無實測風場資料，本研究僅以水流作為泥砂傳輸的驅動力，然而在颱風期間風速較大，應當在河口中較淺的河段產生作用，若後續能將風力納入模式模擬，即能針對風速、風向對河口懸浮泥砂濃度場造成的影响作為討論分析。
3. 雖在颱洪期間應以水庫排砂以及上游河川入流的泥砂量為主要來源，但因淡水河水系流經大台北都會區，有相當多污、雨水下水道會排入河道中，然模式目前並無將其列入考慮，如之後能估計其排放泥砂量，也能評估各處下水道對淡水河系懸浮泥砂濃度變遷之影響。
4. 因應各處上游支流泥砂、底質泥砂種類和流況的不同，沉降速度、臨界應力等泥砂參數理論上也會有所不同，若能有實驗資料佐證，就能分別給定各支流和底床泥砂不同的參數條件做為模擬，應能使整體模式更具真實性。
5. 目前模式設計之出流位置離出海口距離較近，因此研究過程中可能會受到其邊界位置及條件的干擾和限制，若能向外延伸應能降低其影響，在沒有實測數據的情況下，也較容易給定懸浮泥砂濃度條件。
6. 研究模擬發現，部分河段在非颱風期間有明顯沖刷行為，然而因無現場觀測資料，並無法確定其底質沖刷過程的正確性，是否可能為受到底床設定條件或是地形較為複雜、網格不夠細緻導致的模式誤差，往後若能有更密集的濃度調查資料應能對此部分進行確認。
7. 鹽度分布是影響河口水動力重要的因素，因此未來應要對鹽度進行率定驗證的工作，藉此提升本模式之可靠度。另外，根據 Liu et al. (2002) 認為河口產生鹽分入侵時，底層水體鹽度較高的情況下會產生往上游的殘餘流速，尤其水深較



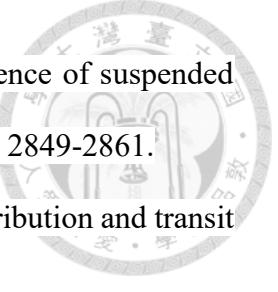
深處可能因出現鹽度分層引起的密度環流，然本研究僅模擬垂直平均二維模型，無法隨深度變化作分析，若之後能建立三維模式應能對垂直分層進一步探討。

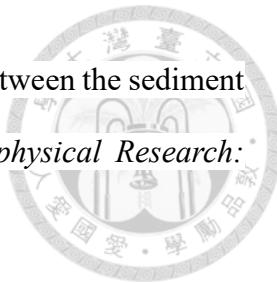
8. 過去淡水河系研究調查和模擬中發現，因為水體中懸浮泥砂來源主要為各河川上游，使淡水河口越下游之河道懸浮泥砂濃度越低，往後研究亦能以縱向分析進行此結果之正確性的驗證。
9. 若應用脈衝觀點之平均停留時間於海平面上升或上游入流量增加的情境中，能評估水理條件改變下，水庫排砂或上游各支流泥砂的傳輸行為，藉此進行較全面的分析。

參考資料

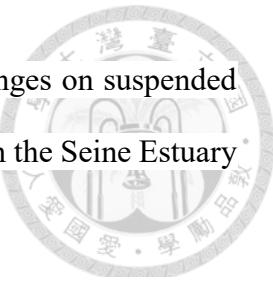


1. Al-Asadi, S. A., Al Hawash, A. B., Alkhliifa, N. H. A., & Ghalib, H. B. (2019). Factors affecting the levels of toxic metals in the Shatt Al-Arab River, Southern Iraq. *Earth Systems and Environment*, 3(2), 313-325.
2. Amoudry, L. O., & Souza, A. J. (2011). Deterministic coastal morphological and sediment transport modeling: A review and discussion. *Reviews of Geophysics*, 49(2).
3. Arambourou, H., Beisel, J. N., Branchu, P., & Debat, V. (2014). Exposure to sediments from polluted rivers has limited phenotypic effects on larvae and adults of Chironomus riparius. *Science of the Total Environment*, 484, 92-101.
4. Ariathurai, R. and Krone, R.B. (1976) Finite element model for cohesive sediment transport. *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, 102, 323–338.
5. ASTM International (2003) D1889-00 Standard test method for turbidity of water. In: ASTM International, Annual Book of ASTM standards, Water and Environmental Technology, V. 11.01, West Conshohocken, Pennsylvania, USA
6. Bae, S., & Seo, D. (2018). Analysis and modeling of algal blooms in the Nakdong River, Korea. *Ecological Modelling*, 372, 53-63.
7. Batiuk, R. A., R. Orth, K. Moore, J. C. Stevenson, W. Dennison, L. Staver, V. Carter, N. B. Rybicki, R. Hickman, S. Kollar and S. Bieber. 1992. Chesapeake Bay submerged aquatic vegetation water quality and habitat-based requirements and restoration targets: A technical synthesis. CBP/TRS 83/92. U.S. EPA Chesapeake Bay Program, Annapolis, Maryland.
8. Berry, W., Rubinstein, N., Melzian, B., & Hill, B. (2003). The biological effects of suspended and bedded sediment (SABS) in aquatic systems: a review. *United States Environmental Protection Agency, Duluth*, 32(1), 54-55.

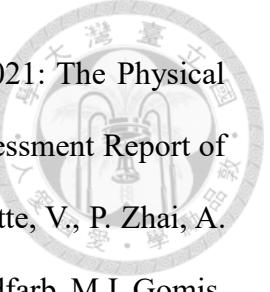
- 
9. Bilotta, G. S., & Brazier, R. E. (2008). Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water research*, 42(12), 2849-2861.
 10. Bolin, B., & Rodhe, H. (1973). A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus*, 25(1), 58-62.
 11. Burban, P. Y., Lick, W., & Lick, J. (1989). The flocculation of fine-grained sediments in estuarine waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 94(C6), 8323-8330.
 12. Chatterjee, M. V. S. F. E., Silva Filho, E. V., Sarkar, S. K., Sella, S. M., Bhattacharya, A., Satpathy, K. K., ... & Bhattacharya, B. D. (2007). Distribution and possible source of trace elements in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological significance. *Environment International*, 33(3), 346-356.
 13. Chen, R. S., & Tsai, C. M. (2017). Development of an evaluation system for sustaining reservoir functions—a case study of Shiwen Reservoir in Taiwan. *Sustainability*, 9(8), 1387.
 14. Chen, W. B., Liu, W. C., Hsu, M. H., & Hwang, C. C. (2015). Modeling investigation of suspended sediment transport in a tidal estuary using a three-dimensional model. *Applied Mathematical Modelling*, 39(9), 2570-2586.
 15. Cho, E., Arhonditsis, G. B., Khim, J., Chung, S., & Heo, T. Y. (2016). Modeling metal-sediment interaction processes: parameter sensitivity assessment and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 80, 159-174.
 16. Cucco, A., & Umgiesser, G. (2006). Modeling the Venice Lagoon residence time. *Ecological modelling*, 193(1-2), 34-51.
 17. Danckwerts, P. V. (1953). Continuous flow systems: distribution of residence times. *Chemical engineering science*, 2(1), 1-13.
 18. Davies-Colley, R. J., & Smith, D. G. (2001). Turbidity suspended sediment, and water clarity: a review 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1085-1101.



19. de la Fuente, A. (2014). Heat and dissolved oxygen exchanges between the sediment and water column in a shallow salty lagoon. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(4), 596-613.
20. DSI LLC. (2020). EFDC+ Theory, Version 10.2. Published by DSI LLC, Edmonds WA.
21. Dyer, K. R. (1973). *Estuaries: a physical introduction*
22. Elçi, Ş., Work, P. A., & Hayter, E. J. (2007). Influence of stratification and shoreline erosion on reservoir sedimentation patterns. *Journal of Hydraulic Engineering*.
23. Etemad-Shahidi, A., Shahkolahi, A., & Liu, W. C. (2010). Modeling of hydrodynamics and cohesive sediment processes in an estuarine system: Study case in Danshui river. *Environmental modeling & assessment*, 15(4), 261-271.
24. Feizabadi, S., Rafati, Y., Ghodsian, M., Akbar Salehi Neyshabouri, A., Abdolahpour, M., & Mazyak, A. R. (2022). Potential sea-level rise effects on the hydrodynamics and transport processes in Hudson–Raritan Estuary, NY–NJ. *Ocean Dynamics*, 72(6), 421-442.
25. Fuente, A. D. L., & Ninóo, Y. (2010). Temporal and spatial features of the thermohydrodynamics of shallow salty lagoons in northern Chile. *Limnology and oceanography*, 55(1), 279-288.
26. Garcia, M. (Ed.). (2008, May). Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice. American Society of Civil Engineers.
27. Gibbs, R. J. (1985). Estuarine flocs: their size, settling velocity and density. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C2), 3249-3251.
28. Gibson, R. N., Barnes, M., & Atkinson, R. J. A. (2002). Impact of changes in flow of freshwater on estuarine and open coastal habitats and the associated organisms. *Oceanography and Marine Biology an Annual Review*, 40, 233.

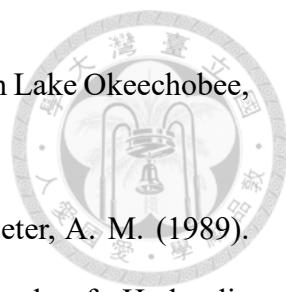


29. Grasso, F., & Le Hir, P. (2019). Influence of morphological changes on suspended sediment dynamics in a macrotidal estuary: diachronic analysis in the Seine Estuary (France) from 1960 to 2010. *Ocean Dynamics*, 69(1), 83-100.
30. Hamrick, J. M. (1992). A three-dimensional environmental fluid dynamics computer code: Theoretical and computational aspects.
31. Hesse, L. W., & Newcomb, B. A. (1982). Effects of flushing Spencer Hydro on water quality, fish, and insect fauna in the Niobrara River, Nebraska. *North American Journal of Fisheries Management*, 2(1), 45-52.
32. Holland, J. F., Martin, J. F., Granata, T., Bouchard, V., Quigley, M., & Brown, L. (2004). Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics. *Ecological Engineering*, 23(3), 189-203.
33. Hong, B., & Shen, J. (2012). Responses of estuarine salinity and transport processes to potential future sea-level rise in the Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 104, 33-45.
34. Hong, B., Liu, Z., Shen, J., Wu, H., Gong, W., Xu, H., & Wang, D. (2020). Potential physical impacts of sea-level rise on the Pearl River Estuary, China. *Journal of Marine Systems*, 201, 103245.
35. Hsieh, T. C., Ding, Y., Yeh, K. C., & Jhong, R. K. (2020). Investigation of morphological changes in the Tamsui River estuary using an integrated coastal and estuarine processes model. *Water*, 12(4), 1084.
36. Hsieh, T. C., Ding, Y., Yeh, K. C., & Jhong, R. K. (2022). Numerical Investigation of Sediment Flushing and Morphological Changes in Tamsui River Estuary through Monsoons and Typhoons. *Water*, 14(11), 1802.
37. Ioannidou, V. G., & Pearson, J. M. (2019). The effects of flow rate variation and vegetation ageing on the longitudinal mixing and residence time distribution (RTD) in a full-scale constructed wetland. *Ecological Engineering*, 138, 248-263.

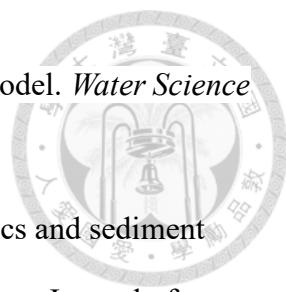
- 
38. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32, doi:10.1017/9781009157896.001.
39. Ji, Z. G. (2017). Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes, and estuaries. John Wiley & Sons.
40. Ji, Z. G., Hamrick, J. H., & Pagenkopf, J. (2002). Sediment and metals modeling in shallow river. *Journal of Environmental Engineering*, 128(2), 105-119.
41. Jones, J. I., Murphy, J. F., Collins, A. L., Sear, D. A., Naden, P. S., & Armitage, P. D. (2012). The impact of fine sediment on macro-invertebrates. *River research and applications*, 28(8), 1055-1071.
42. Julien, P. Y. (2018). *River mechanics*. Cambridge University Press.
43. Kadlec, R. H. (1994). Detention and mixing in free water wetlands. *Ecological Engineering*, 3(4), 345-380.
44. Kaštelan-Macan, M., & Petrović, M. (1995). Competitive sorption of phosphate and marine humic substances on suspended particulate matter. *Water Science and Technology*, 32(9-10), 349-355.
45. Kirk, J. T. (1994). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge university press.
46. Kjelland, M. E., Woodley, C. M., Swannack, T. M., & Smith, D. L. (2015). A review of the potential effects of suspended sediment on fishes: potential dredging-related physiological, behavioral, and transgenerational implications. *Environment Systems*

and Decisions, 35(3), 334-350.

47. Lee, F. Z., Lai, J. S., & Sumi, T. (2022). Reservoir Sediment Management and Downstream River Impacts for Sustainable Water Resources—Case Study of Shihmen Reservoir. *Water*, 14(3), 479.
48. Liu, K. K., Kao, S. J., Wen, L. S., & Chen, K. L. (2007). Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter and biogeochemical processes in the eutrophic Danshuei Estuary in northern Taiwan. *Science of the Total Environment*, 382(1), 103-120.
49. Liu, W. C., Chen, W. B., & Chang, Y. P. (2012). Modeling the transport and distribution of lead in tidal Keelung River estuary. *Environmental Earth Sciences*, 65(1), 39-47.
50. Liu, W. C., Chen, W. B., & Kuo, J. T. (2008). Modeling residence time response to freshwater discharge in a mesotidal estuary, Taiwan. *Journal of Marine Systems*, 74(1-2), 295-314.
51. Liu, W. C., Hsu, M. H., & Kuo, A. Y. (2002). Modelling of hydrodynamics and cohesive sediment transport in Tanshui River estuarine system, Taiwan. *Marine Pollution Bulletin*, 44(10), 1076-1088.
52. Liu, X., & Huang, W. (2009). Modeling sediment resuspension and transport induced by storm wind in Apalachicola Bay, USA. *Environmental Modelling & Software*, 24(11), 1302-1313.
53. Manasrah, R., Raheed, M., & Badran, M. I. (2006). Relationships between water temperature, nutrients and dissolved oxygen in the northern Gulf of Aqaba, Red Sea. *Oceanologia*, 48(2).
54. Mehta, A. J. (1986). Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries. In *Estuarine cohesive sediment dynamics* (pp. 290-325). Springer, New York, NY.

- 
55. Mehta, A. J., & Hwang, K. N. (1989). Fine sediment erodibility in Lake Okeechobee, Florida.
 56. Mehta, A. J., Hayter, E. J., Parker, W. R., Krone, R. B., & Teeter, A. M. (1989). Cohesive sediment transport. I: Process description. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115(8), 1076-1093.
 57. Merten, G. H., Capel, P. D., & Minella, J. P. (2014). Effects of suspended sediment concentration and grain size on three optical turbidity sensors. *Journal of Soils and Sediments*, 14(7), 1235-1241.
 58. Miner, J. G., & Stein, R. A. (1996). Detection of predators and habitat choice by small bluegills: effects of turbidity and alternative prey. *Transactions of the American Fisheries Society*, 125(1), 97-103.
 59. Mitra, A., & Kumar, V. S. (2021). A numerical investigation on the tide-induced residence time and its association with the suspended sediment concentration in Gulf of Khambhat, northern Arabian Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 111947.
 60. Muralidharan, J., Ganesh Kumar, B., & Kunte, P. D. (2015). Sediment transport study along Gulf of Kachchh-a numerical and geospatial approach. *Int J Appl Eng Res*, 10(55), 4291-6.
 61. Novotny, V., & Chesters, G. (1989). Delivery of sediment and pollutants from nonpoint sources: a water quality perspective. *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(6), 568-576.
 62. Officer, C.B., 1976. Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters). Wiley, New York, 465 pp.
 63. Ogata, T., Ishimaru, T., & Kodama, M. (1987). Effect of water temperature and light intensity on growth rate and toxicity change in *Protogonyaulax tamarensis*. *Marine Biology*, 95(2), 217-220.
 64. Pak, G., Mallari, K. J. B., Baek, J., Kim, D., Kim, H., Jung, M., ... & Yoon, J. (2016).

Modelling of suspended sediment in a weir reach using EFDC model. *Water Science and Technology*, 73(7), 1583-1590.

- 
65. Pan, C., & Shangguan, Z. (2006). Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions. *Journal of Hydrology*, 331(1-2), 178-185.
 66. Parsley, M. J., Popoff, N. D., & Romine, J. G. (2011). Short-term response of subadult white sturgeon to hopper dredge disposal operations. *North American Journal of Fisheries Management*, 31(1), 1-11.
 67. Persson, J., Somes, N. L. G., & Wong, T. H. F. (1999). Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water science and technology*, 40(3), 291-300.
 68. Ranåker, L., Jönsson, M., Nilsson, P. A., & Brönmark, C. (2012). Effects of brown and turbid water on piscivore-prey fish interactions along a visibility gradient. *Freshwater biology*, 57(9), 1761-1768.
 69. Ritter, A., & Munoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45.
 70. Robertson, M. J., Scruton, D. A., & Clarke, K. D. (2007). Seasonal effects of suspended sediment on the behavior of juvenile Atlantic salmon. *Transactions of the American Fisheries Society*, 136(3), 822-828.
 71. Sam, S. Y., & Weiming, W. U. (2004). River sedimentation and morphology modeling—the state of the art and future development. In *Proceeding of the Ninth International Symposium on River Sedimentation* (pp. 18-21).
 72. Shih, S. S., & Wang, H. C. (2020). Flow uniformity metrics for quantifying the hydraulic and treatment performance of constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 155, 105942.



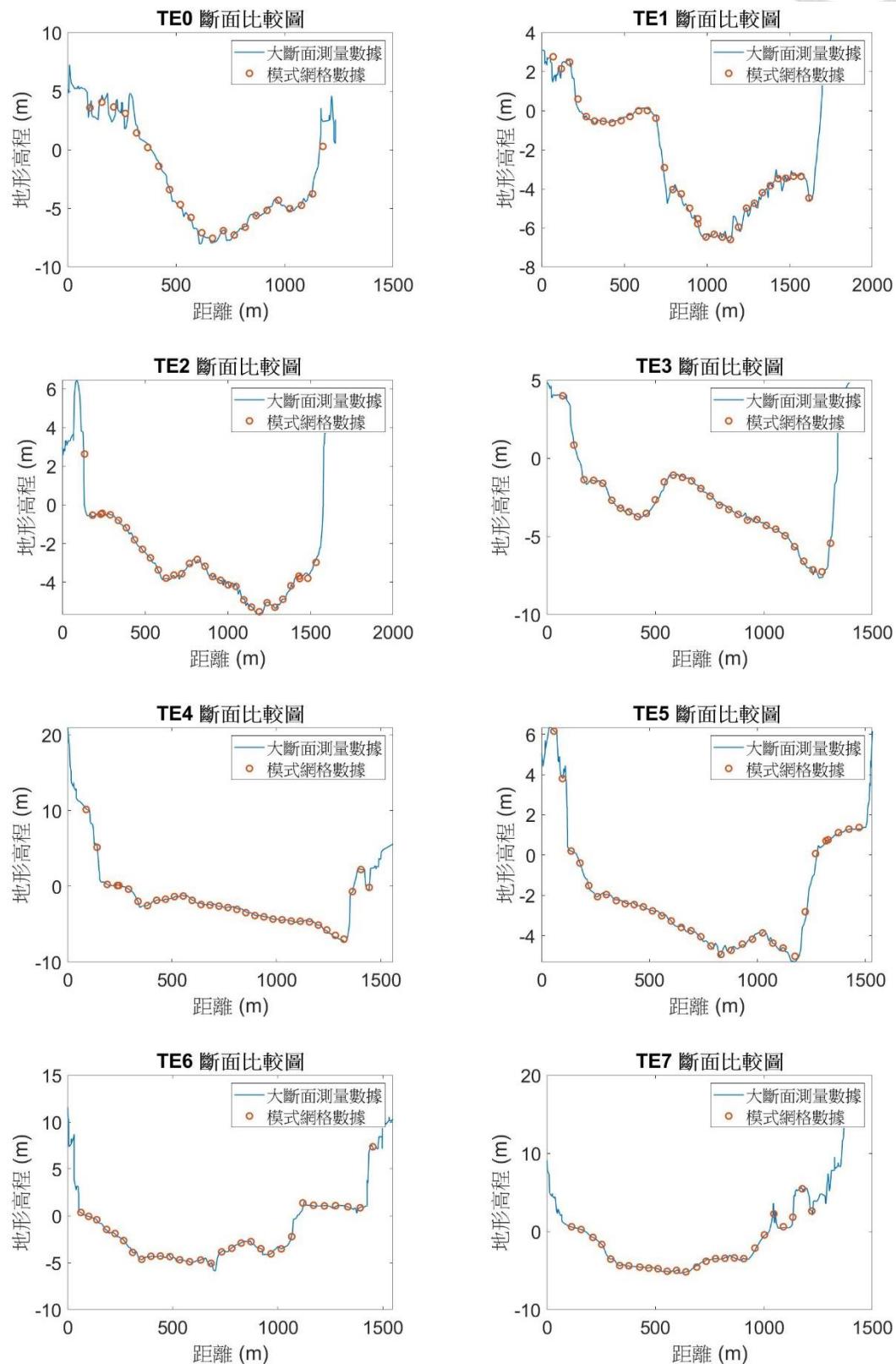
73. Smith, D. G., Croker, G. F., & McFarlane, K. A. Y. (1995). Human perception of water appearance: 1. Clarity and colour for bathing and aesthetics. *New Zealand journal of marine and freshwater research*, 29(1), 29-43.
74. Takeoka, H. (1984). Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*, 3(3), 311-326.
75. Tetra Tech (2002) Theoretical and Computational Aspects of Sediment and Contaminant Transport in the EFDC Model. Technical Report to USEPA, Tetra Tech, Inc., Fairfax, VA.
76. van de Kreeke, J. (1983). Residence time: application to small boat basins. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 109(4), 416-428.
77. Vogel, J. L., & Beauchamp, D. A. (1999). Effects of light, prey size, and turbidity on reaction distances of lake trout (*Salvelinus namaycush*) to salmonid prey. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56(7), 1293-1297.
78. Wang, H. W., Kondolf, M., Tullos, D., & Kuo, W. C. (2018). Sediment management in Taiwan's reservoirs and barriers to implementation. *Water*, 10(8), 1034.
79. Wenger, A. S., Johansen, J. L., & Jones, G. P. (2012). Increasing suspended sediment reduces foraging, growth and condition of a planktivorous damselfish. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 428, 43-48.
80. Wilkens, J. L., Katzenmeyer, A. W., Hahn, N. M., Hoover, J. J., & Suedel, B. C. (2015). Laboratory test of suspended sediment effects on short-term survival and swimming performance of juvenile Atlantic sturgeon (*Acipenser oxyrinchus oxyrinchus*, Mitchell, 1815). *Journal of Applied Ichthyology*, 31(6), 984-990.
81. Yang, Y., Chen, X., Li, Y., Xiong, M., & Shen, Z. (2015). Modeling the effects of extreme drought on pollutant transport processes in the Yangtze River estuary. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(3), 624-629

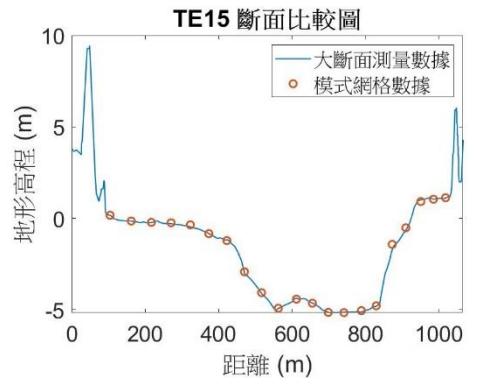
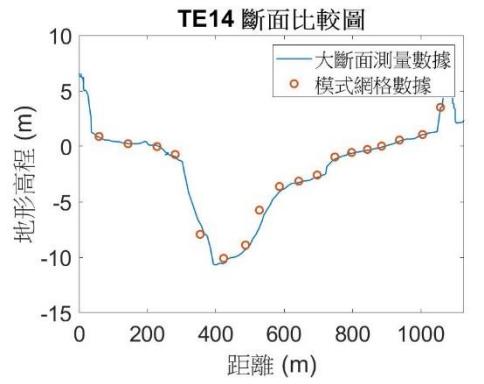
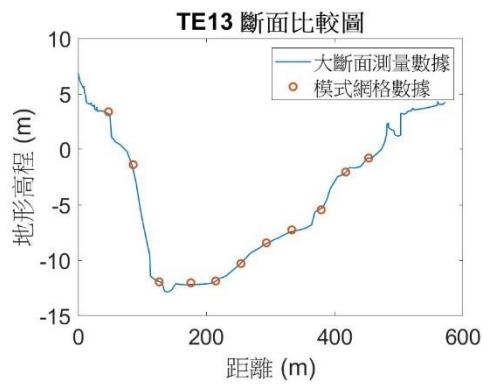
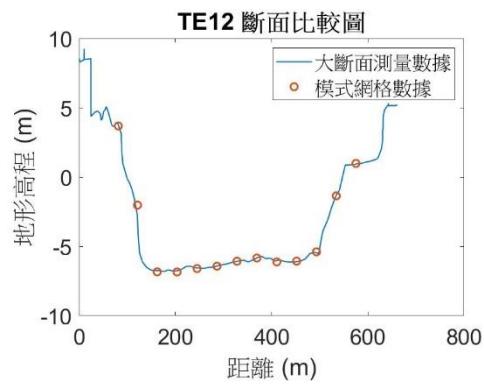
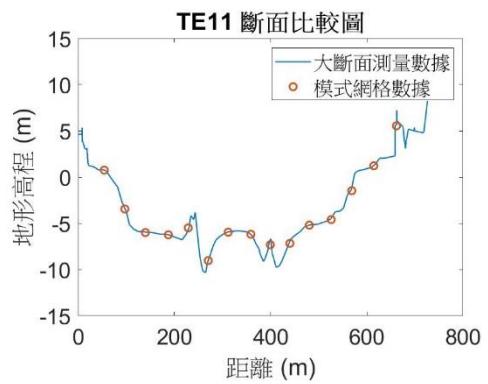
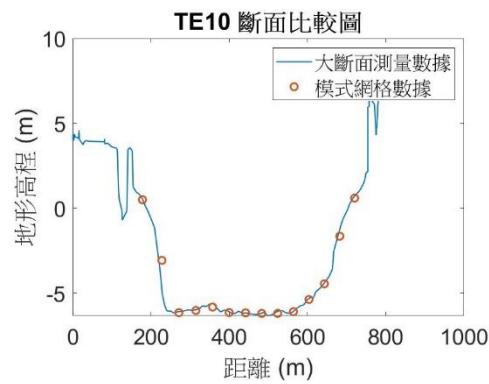
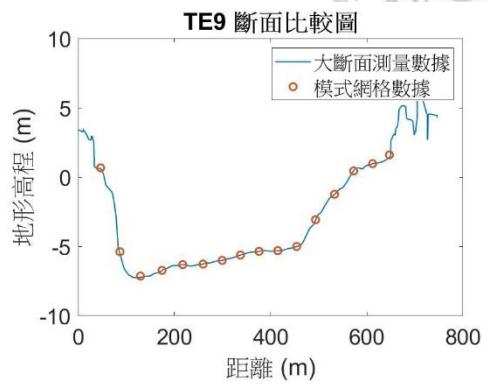
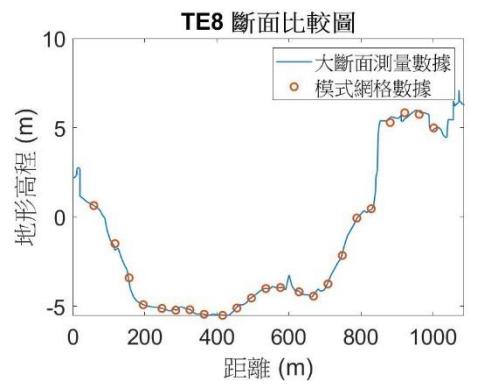
- 
82. Yuan, D., Lin, B., & Falconer, R. A. (2007). A modelling study of residence time in a macro-tidal estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(3-4), 401-411.
 83. Ziegler, C.K. and Nesbitt, B. (1995) Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121, 773–781.
 84. Zimmerman, J. T. F. (1976). Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Netherlands Journal of Sea Research*, 10(2), 149-191
 85. 李俊賢, 2006, 以三維數值模式模擬淡水河河口及感潮段鹽度與懸浮沉積物, 國立中央大學水文科學研究所碩士論文。
 86. 林幸助、施上粟經濟部水利署北區水資源局, 2015, 石門水庫排洪減淤操作對下游河道生態影響及改善方案研究, 經濟部水利署北區水資源局委託研究。
 87. 林秉煜, 2015, 民國 104 年颱風調查報告—第 21 號杜鵑(DUJUAN)颱風(1521), 中央氣象局氣象預報中心。
 88. 施上粟、俞維昇、黃國文經濟部水利署第十河川局, 2008, 淡水河系河底淤泥分佈探討及再利用可行性評估, 經濟部水利署第十河川局委託研究。
 89. 張志新、王俞婷、傅鍊璇、林又青、張駿暉、劉哲欣, 2015, 2015 年蘇迪勒颱風災害調查彙整報告。新北市：國家災害防救科技中心。
 90. 章書璋, 2006, 淡水河重金屬傳輸模式之發展, 國立中央大學水文科學研究所碩士論文。
 91. 陳韻如、林修立、陳正達、陳永明, 2016, 氣候變遷下不同暖化情境差異比較。國家災害防救科技中心災害防救電子報電子報, 第 132 期。
 92. 經濟部水利署北區水資源局, 2006, 石門水庫泥砂運移模擬及排淤方案之研究(2/2)。
 93. 羅雅尹, 2016, 民國 104 年颱風調查報告—第 13 號蘇迪勒(Soudelor)颱風(1513)。氣象學報第 53 卷第 1 期, 61-84。

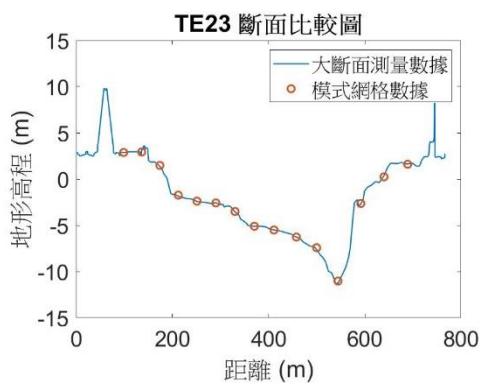
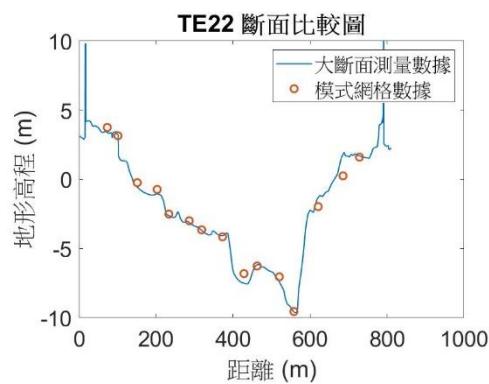
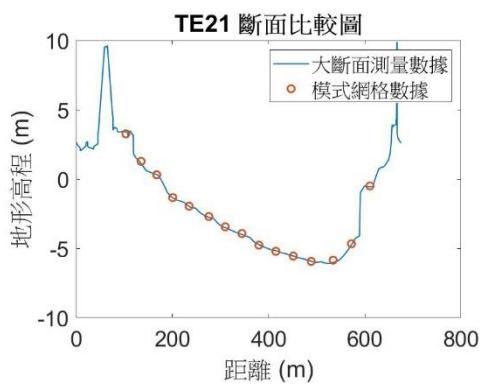
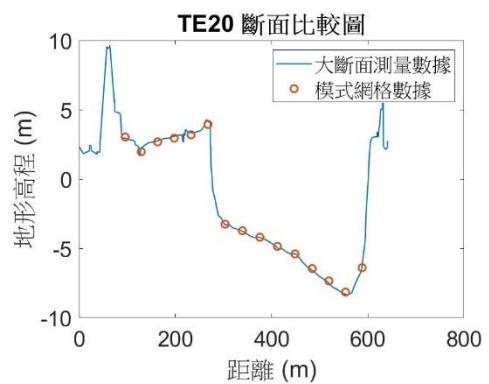
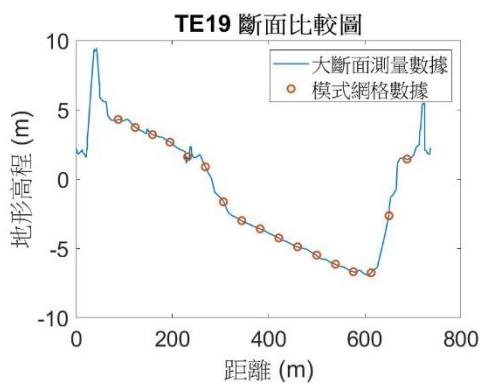
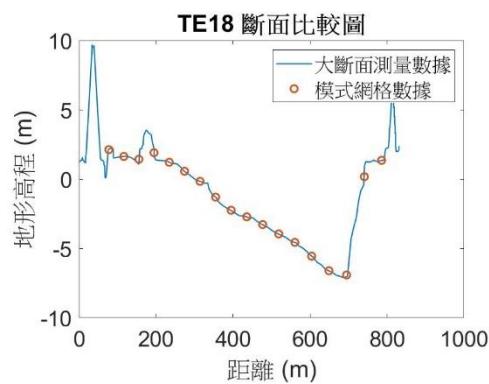
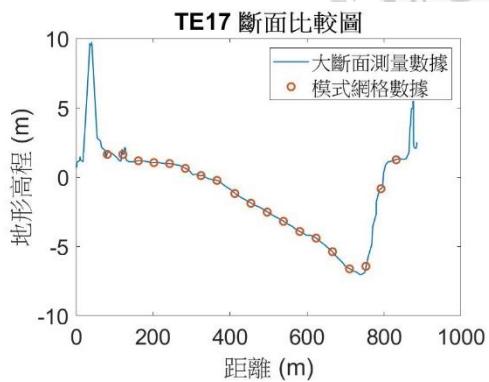
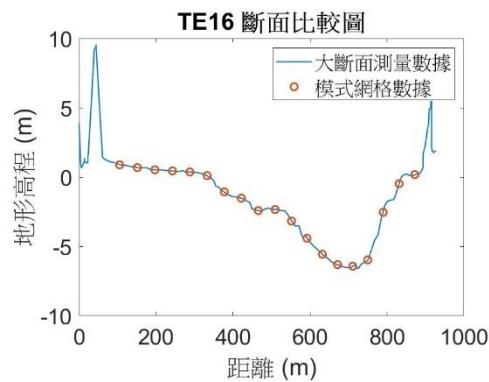
附錄

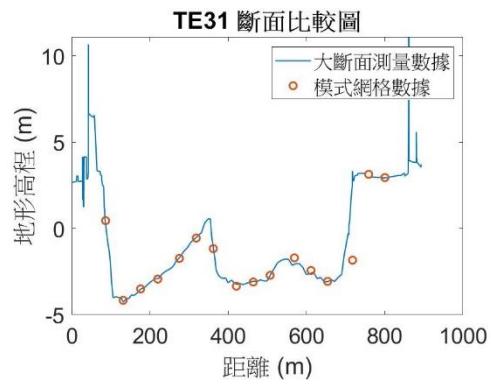
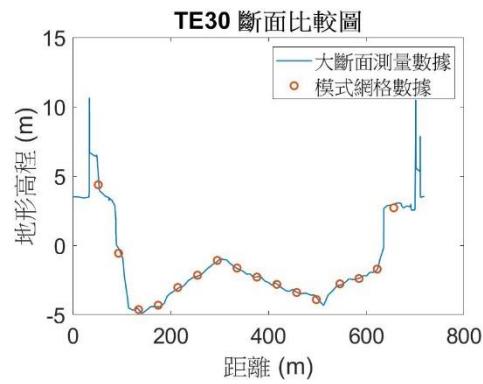
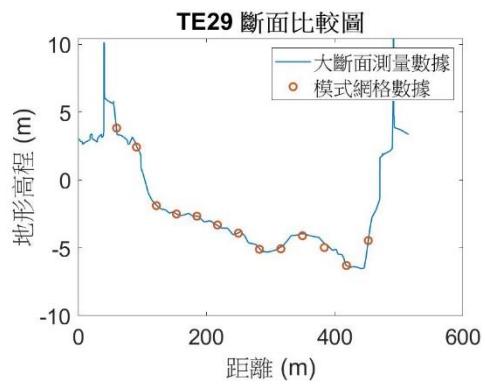
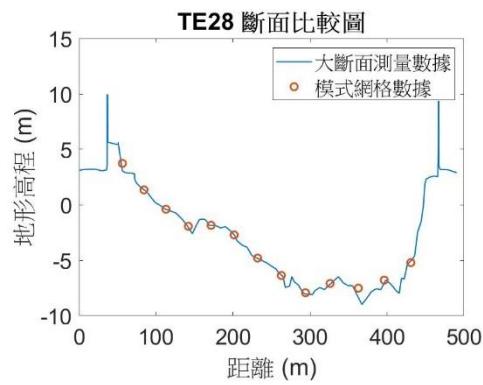
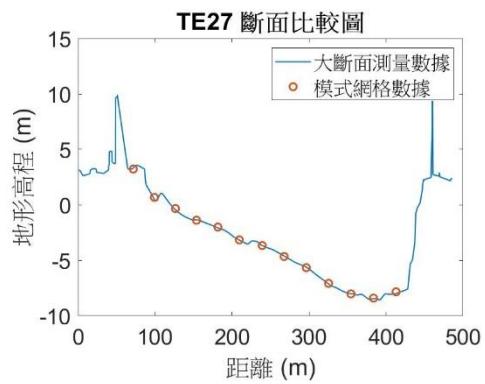
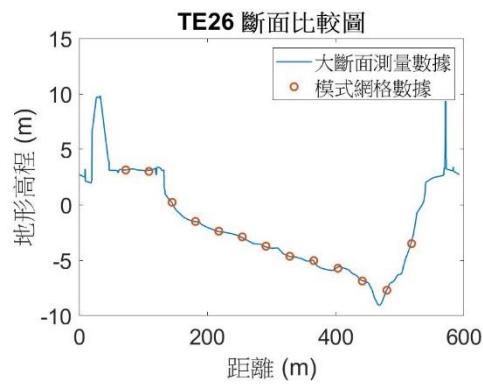
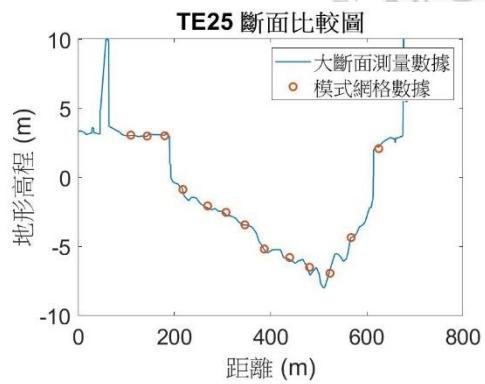
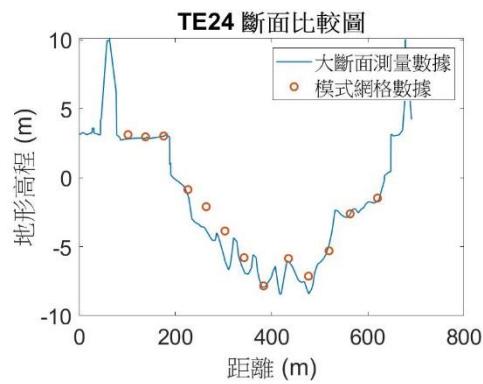


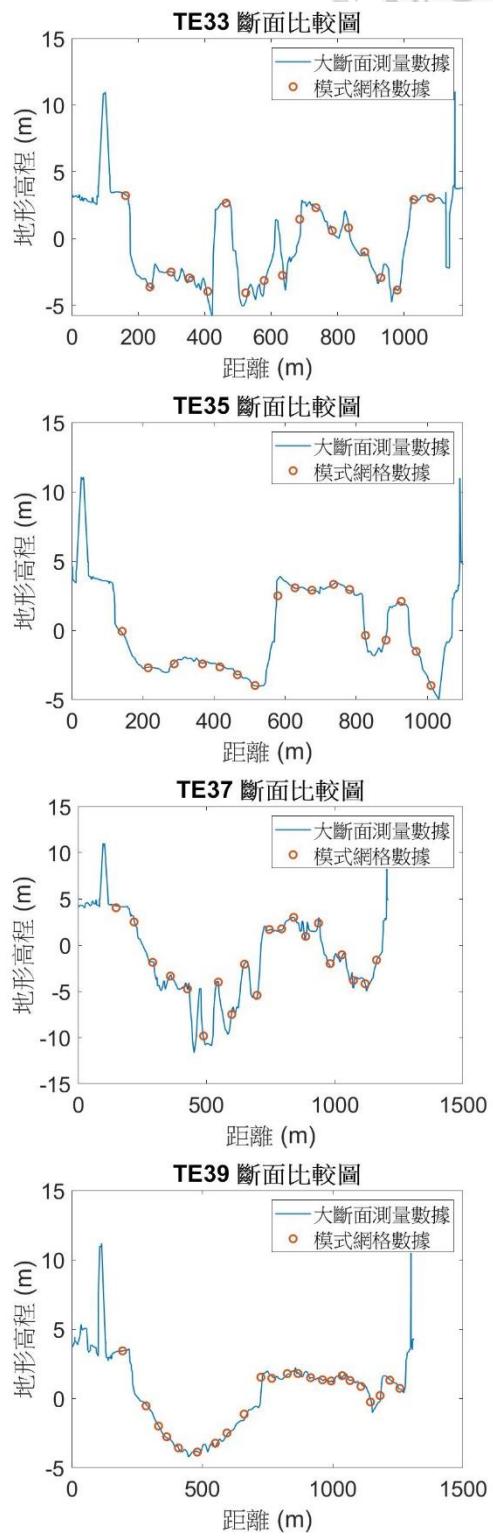
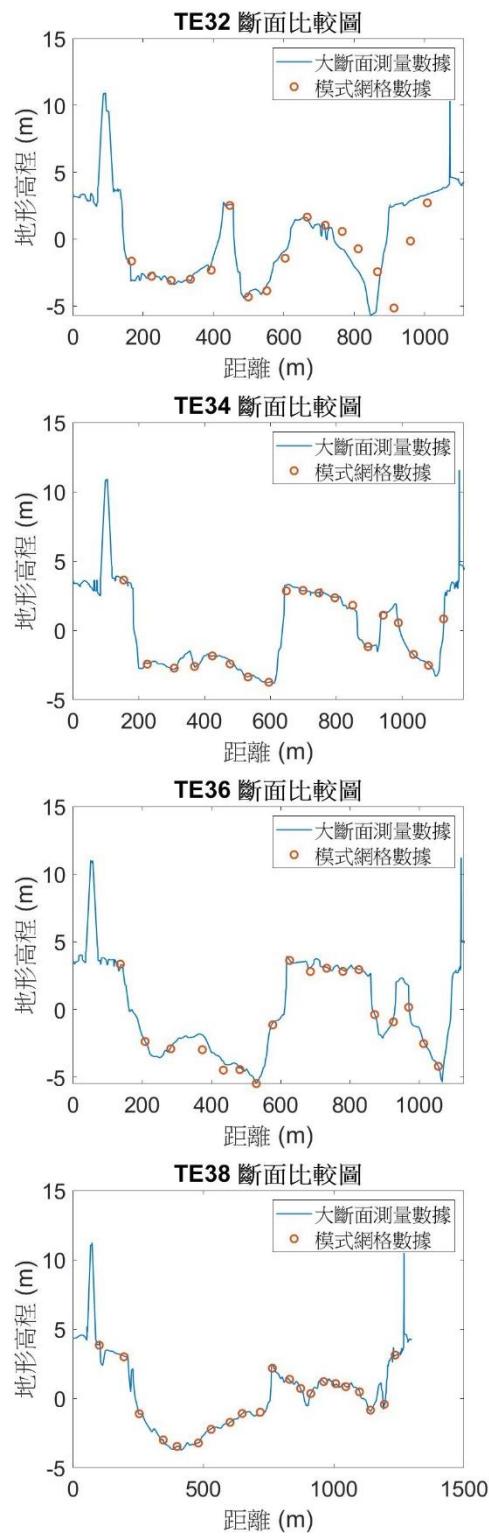
附錄一、淡水河-大漢溪大斷面測量與內插至模式網格地形比較圖

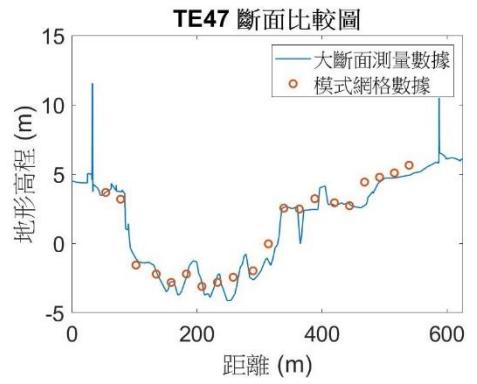
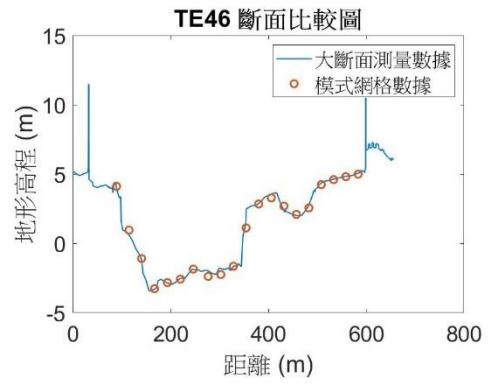
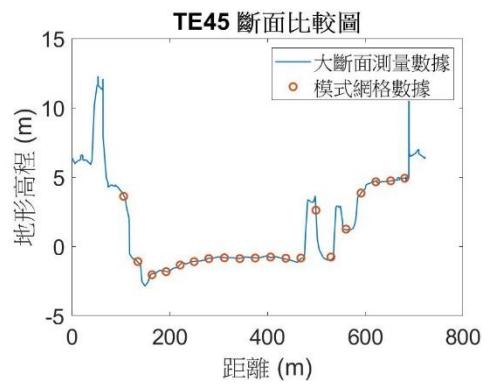
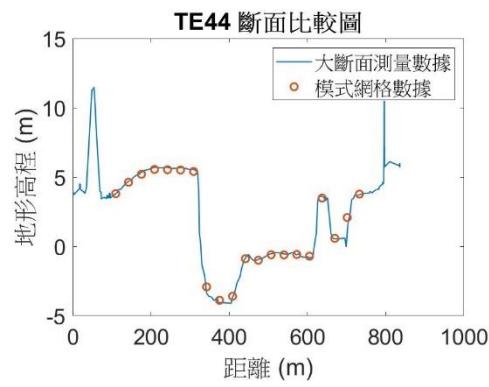
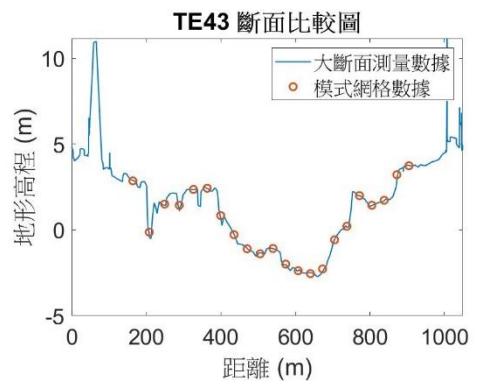
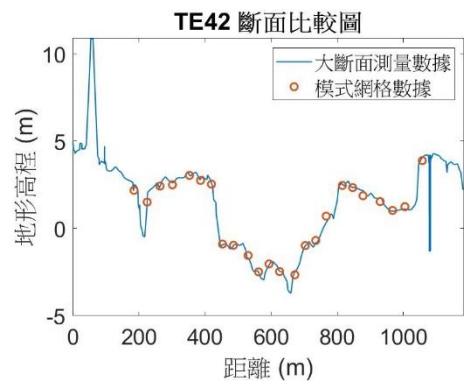
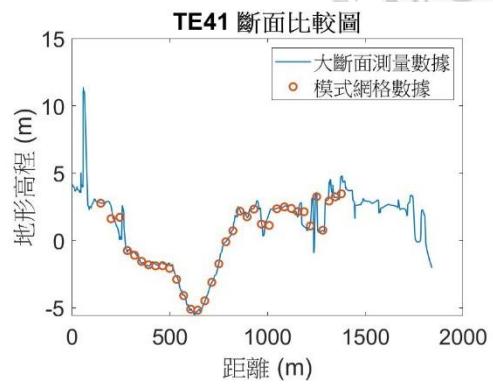
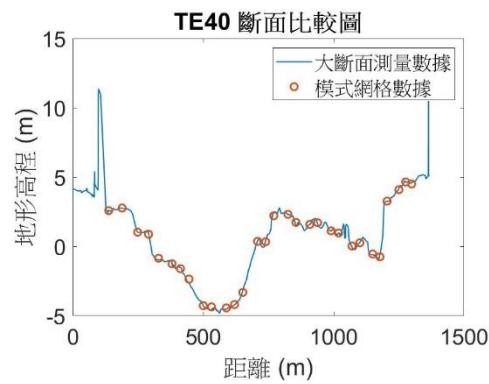


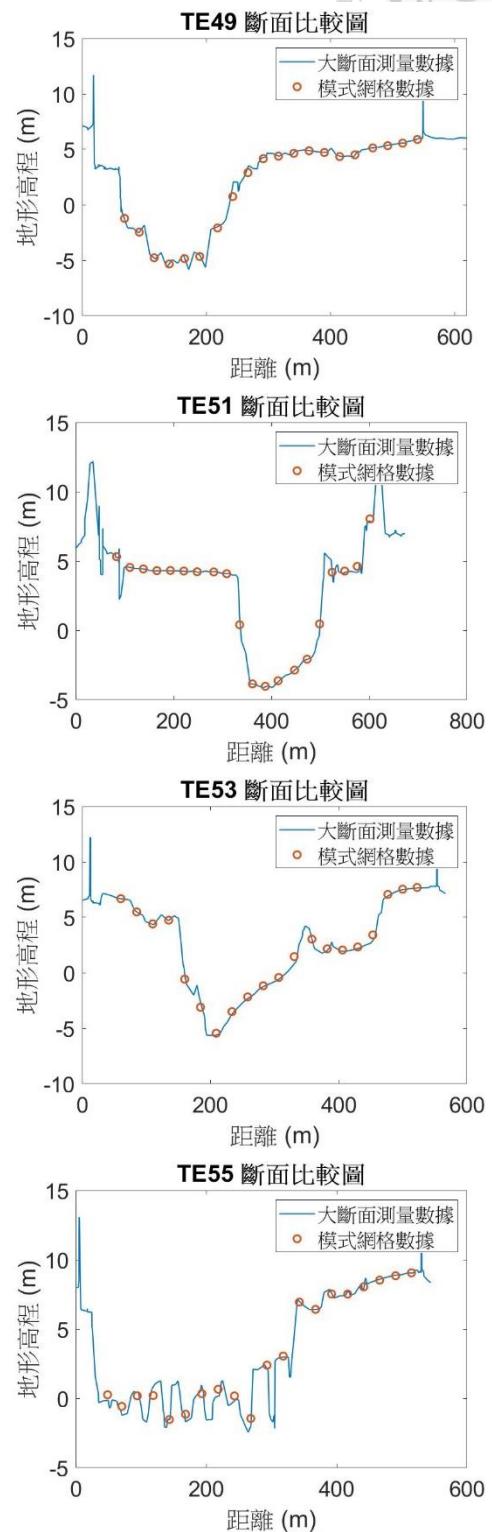
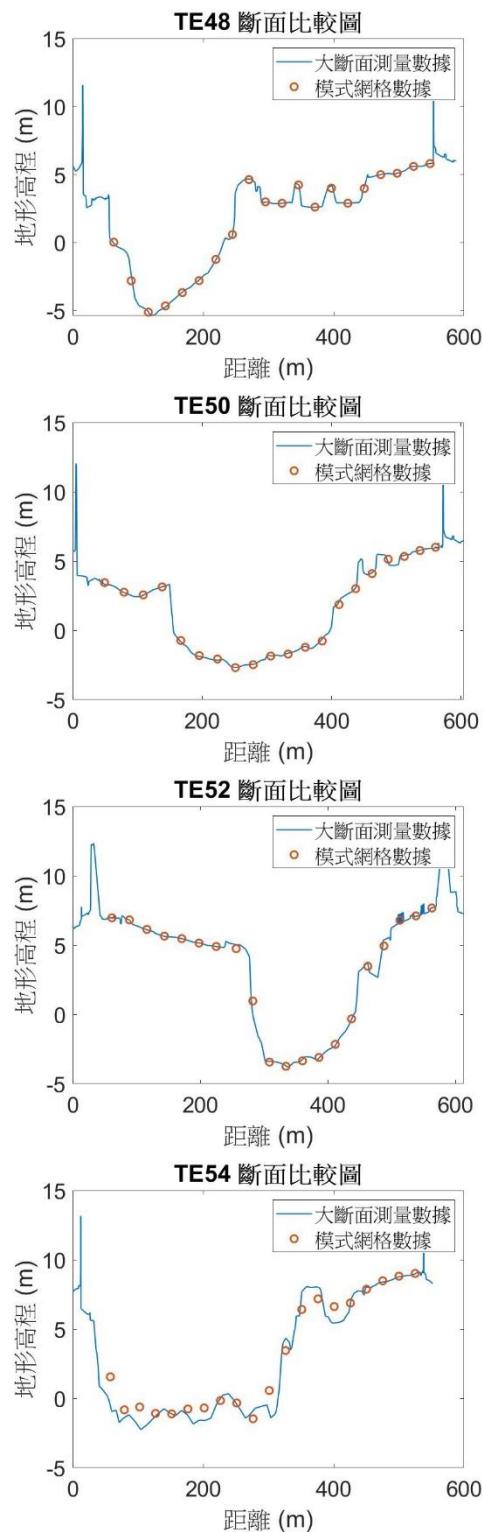


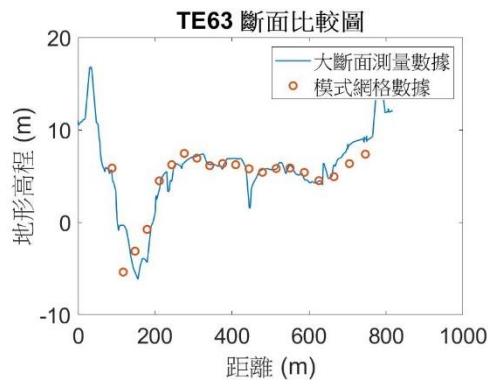
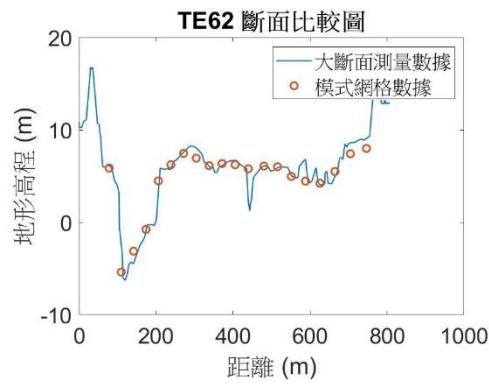
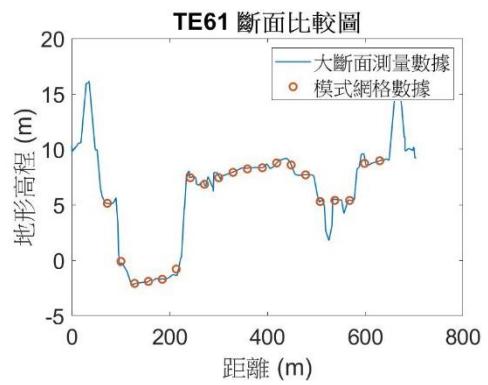
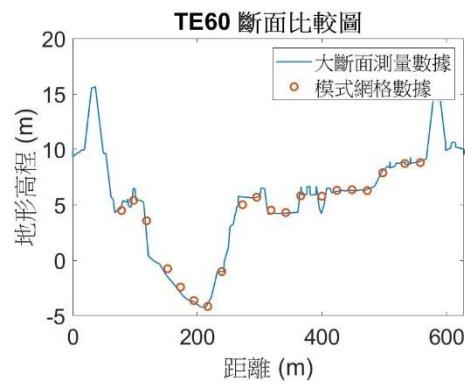
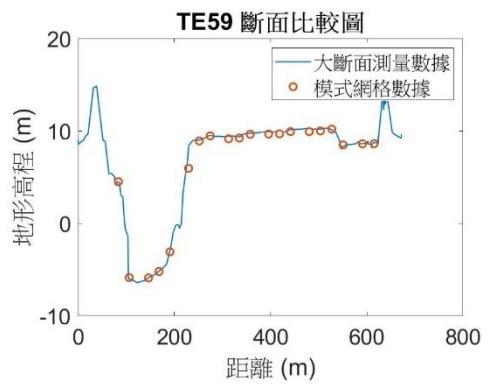
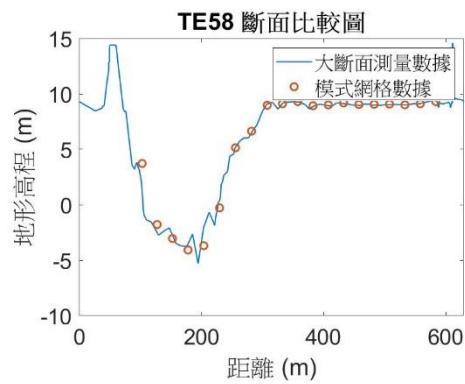
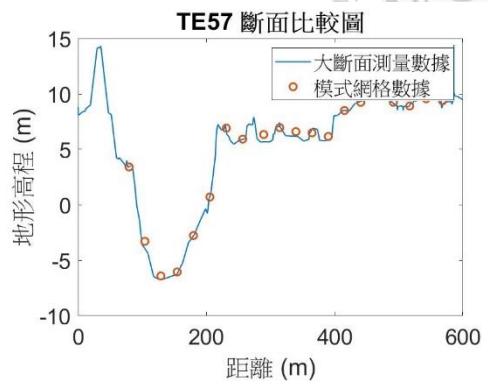
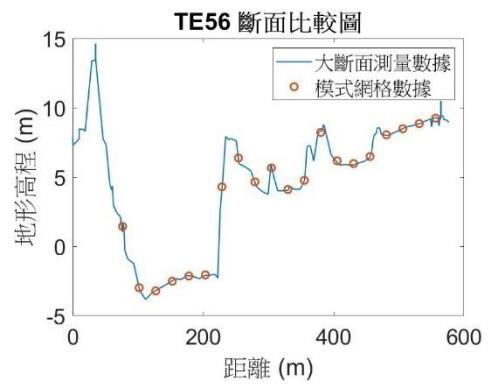




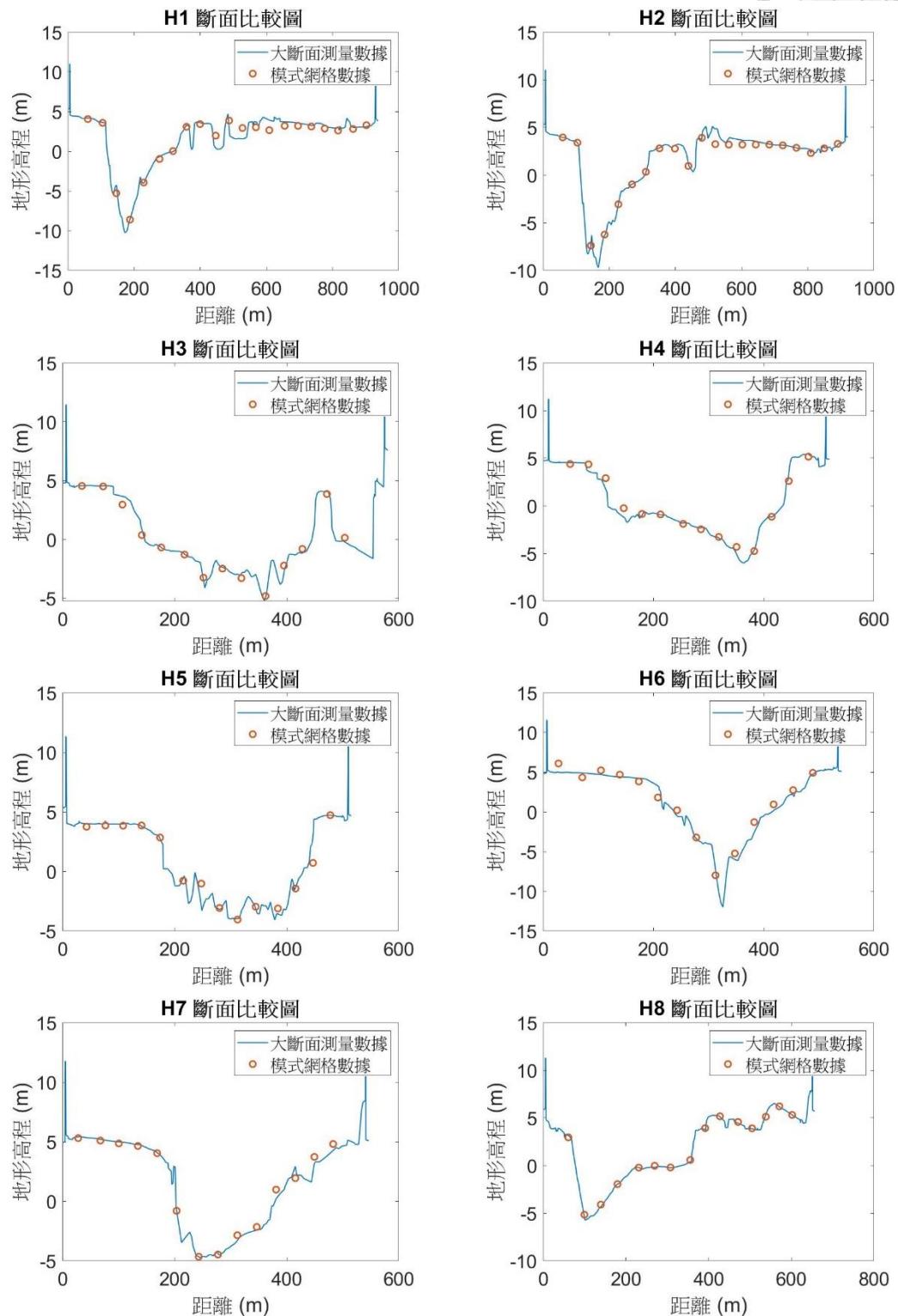


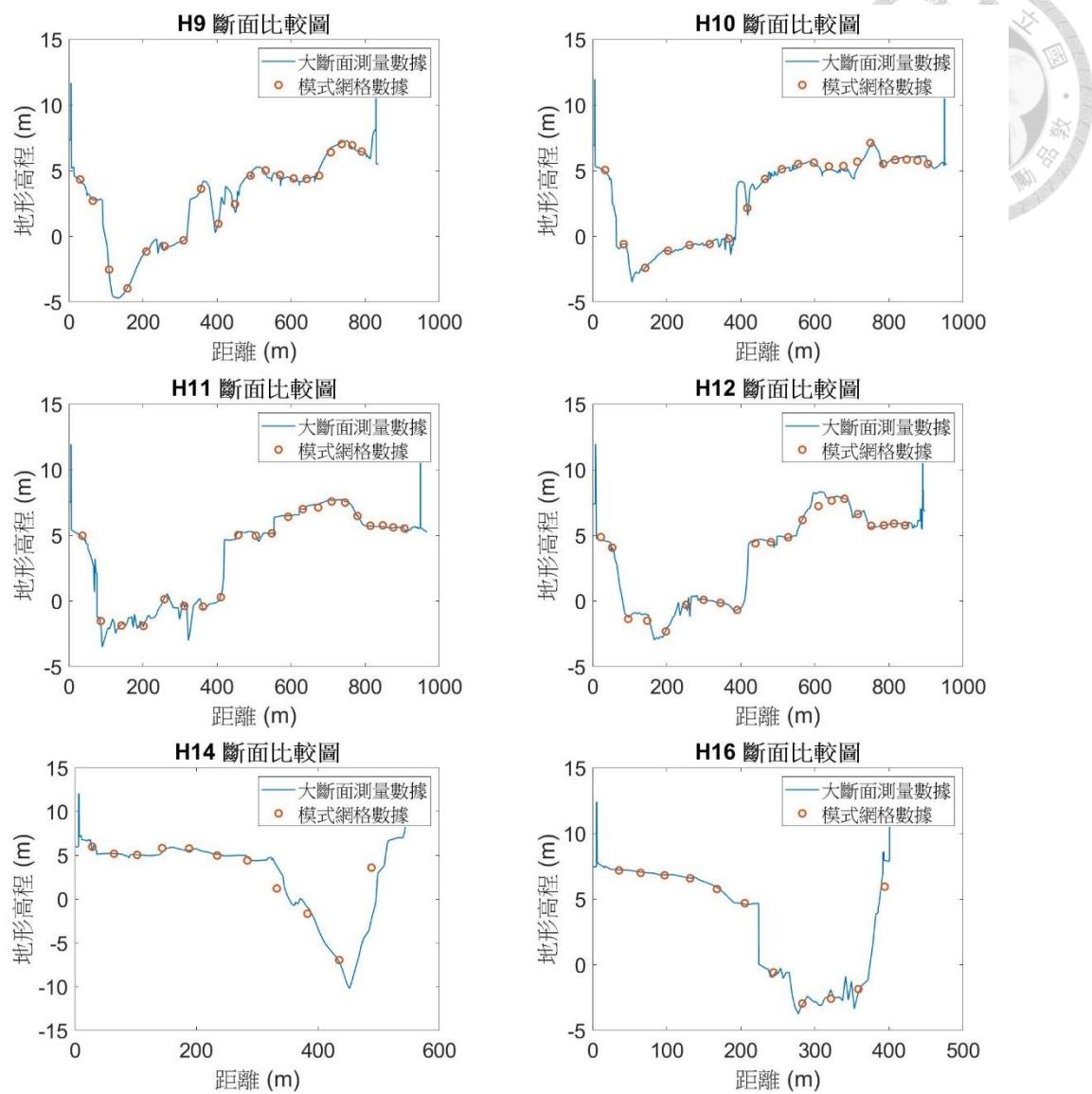




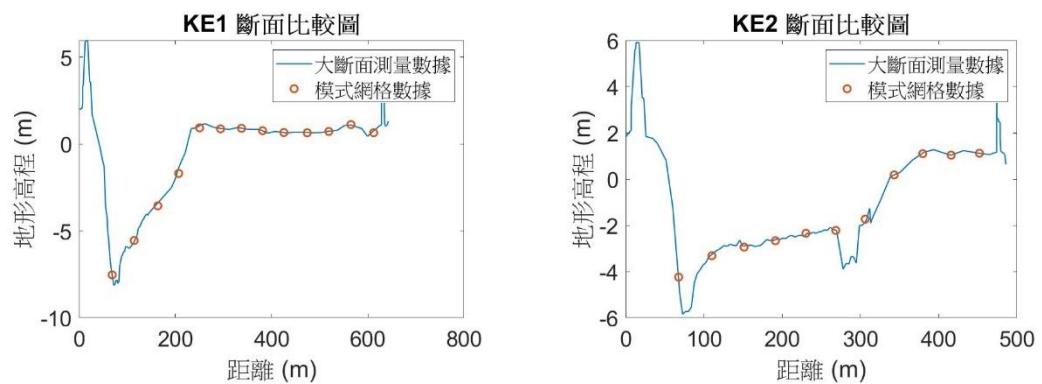


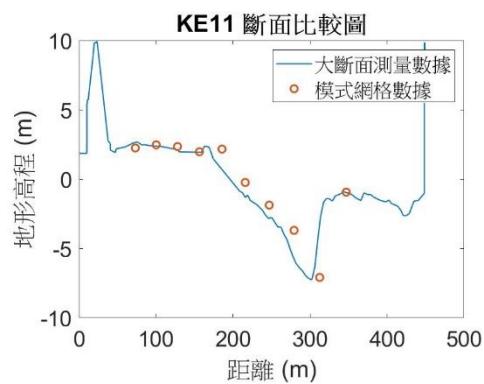
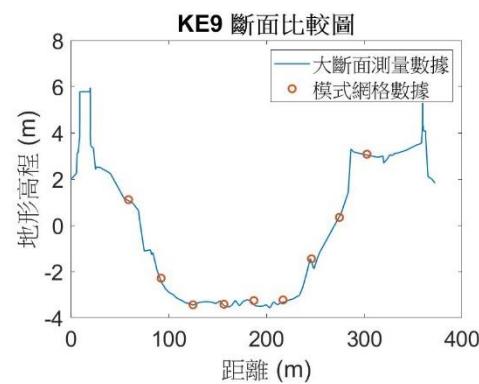
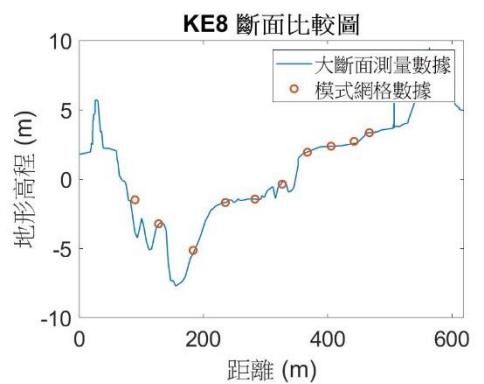
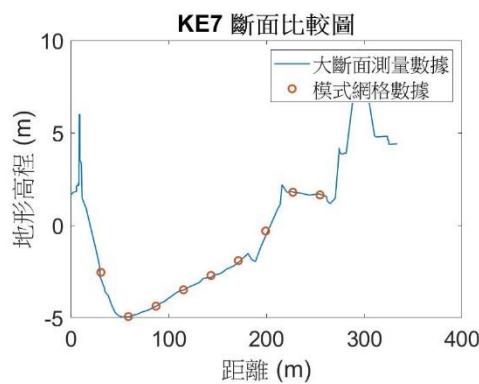
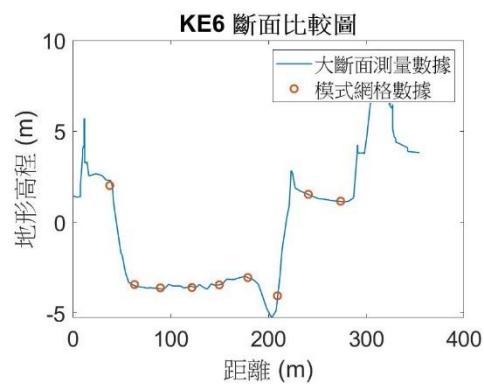
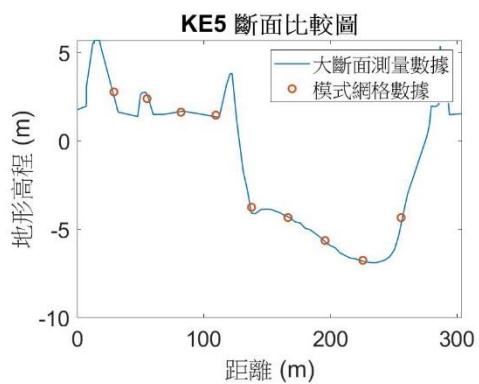
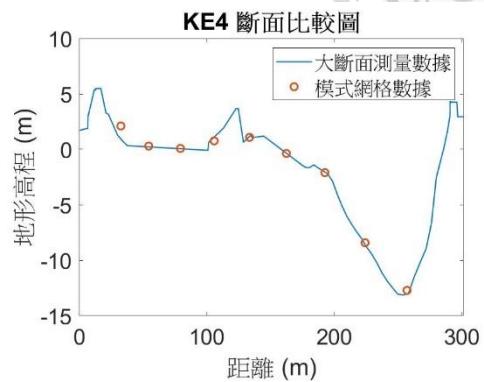
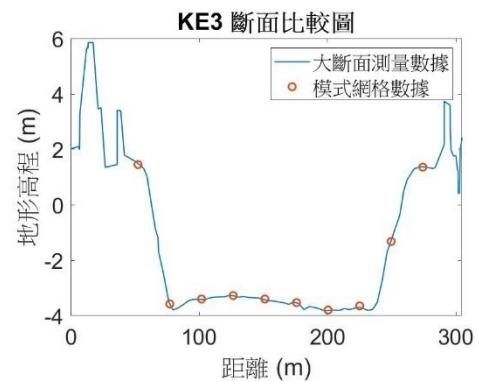
附錄二、新店溪大斷面測量與內插至模式網格地形比較圖

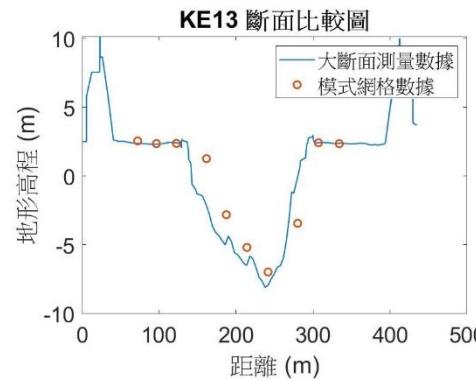
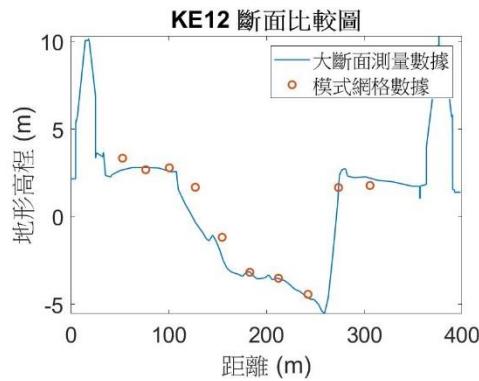




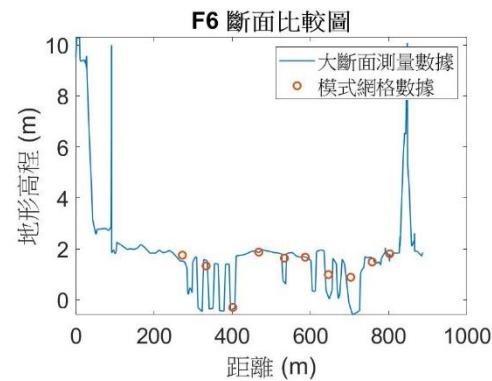
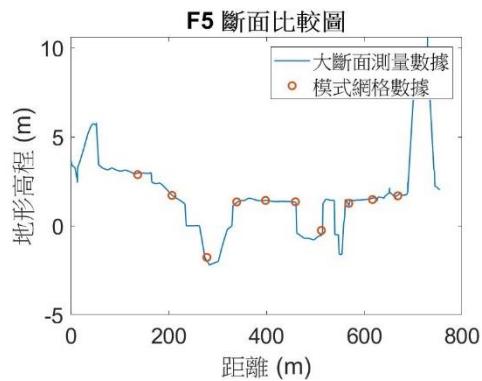
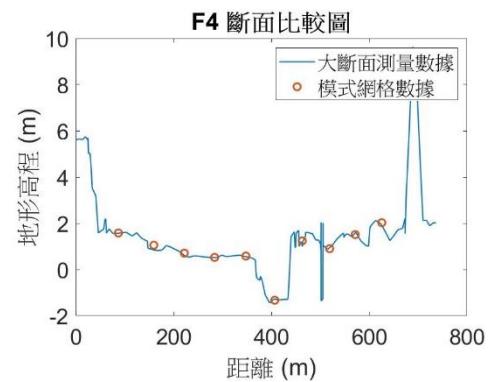
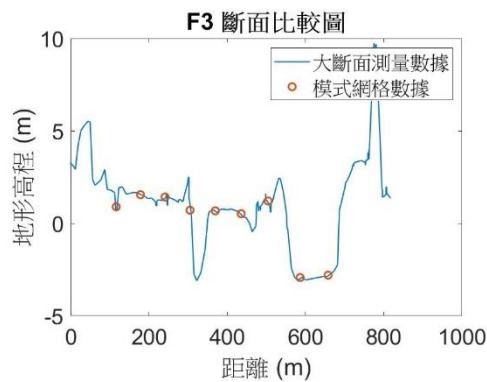
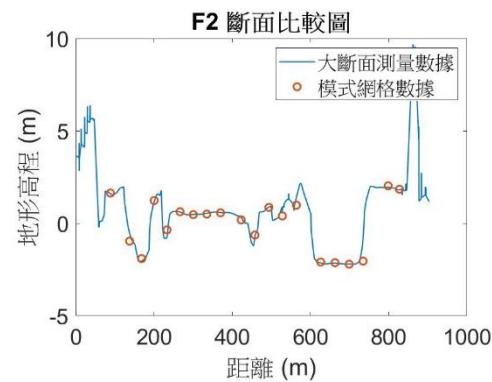
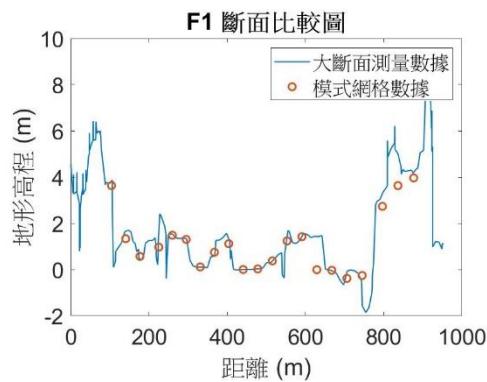
附錄三、基隆河大斷面測量與內插至模式網格地形比較圖





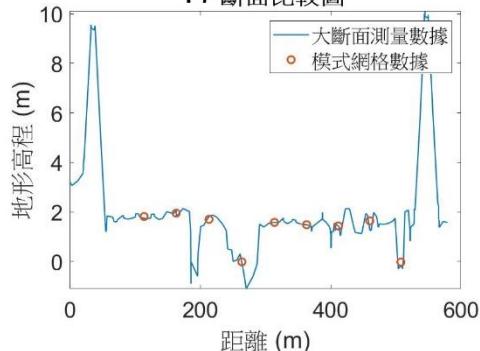


附錄四、疏洪道大斷面測量與內插至模式網格地形比較圖

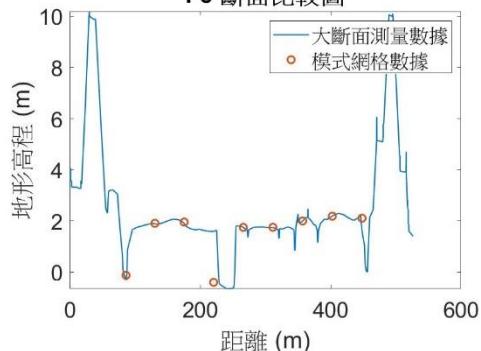




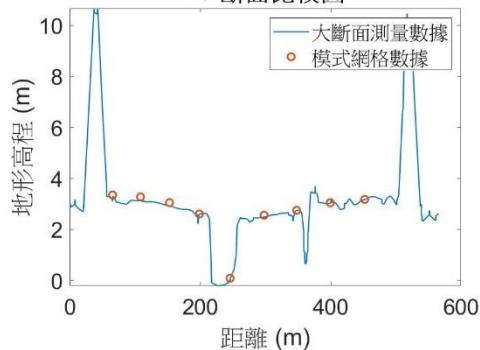
F7 斷面比較圖



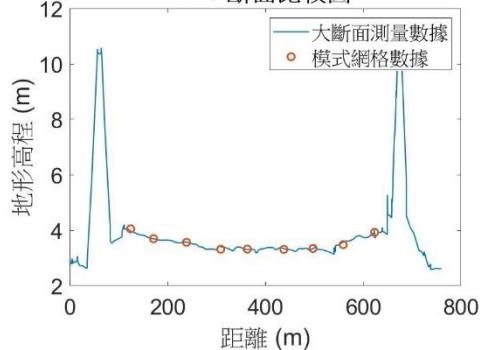
F8 斷面比較圖



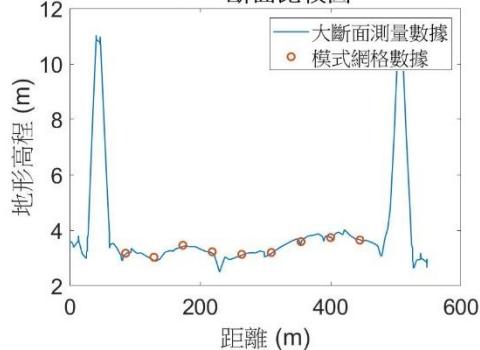
F9 斷面比較圖



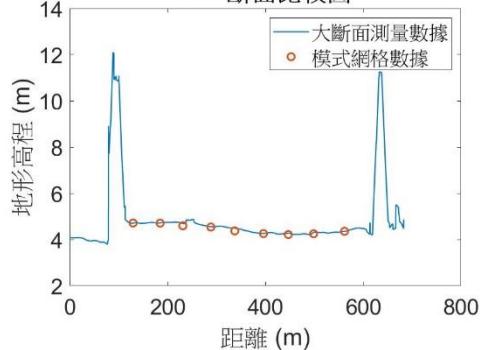
F10 斷面比較圖



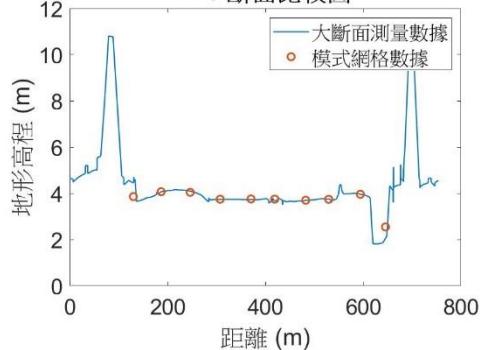
F11 斷面比較圖



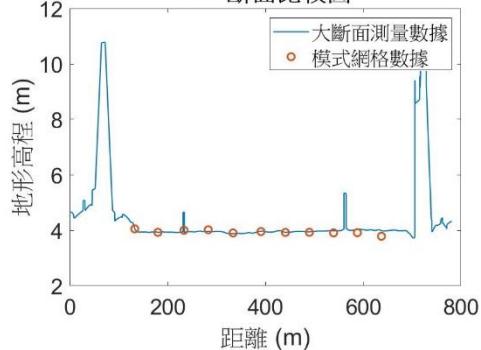
F12 斷面比較圖

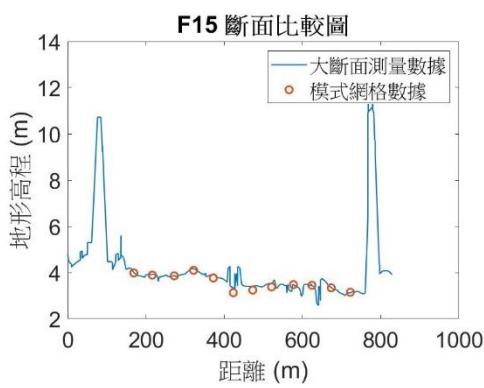


F13 斷面比較圖



F14 斷面比較圖





附錄五、出海口海域大斷面測量與內插至模式網格地形比較圖

