

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文



潮汐對地下水中污染物傳輸之影響
**Contaminant Transport in
Groundwater under Tidal Influence**

研究生：方麒洵

指導教授：單信瑜博士

中華民國一〇三年七月

潮汐對地下水中污染物傳輸之影響

**Contaminant Transport in Groundwater under Tidal
Influence**

研究生：方麒洵

Graduate Student : Chyi-Yuh Fang

指導教授：單信瑜博士

Advisor : Dr. Hsin-Yu Shan

國立交通大學

土木工程學系

碩士論文

A Thesis

Submitted to Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

in

Civil Engineering

July, 2014

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇三年七月

潮汐對地下水中污染物傳輸之影響

研究生：方麒洵

指導教授：單信瑜博士

國立交通大學土木工程學系

摘要

台灣近數十年來經濟快速發展，公民營工業區林立，其中部分工業區因為廠商的管理不夠完善，導致造成工業區的土壤與地下水污染。自從民國 89 年土壤與地下水污染整治法通過之後，環保署與工業區的主管單位逐步針對工業區的地下水進行有系統的監測，以期早期偵測污染、即時控制或加以整治。這些工業區中，部分位於沿海地區，而根據監測資料發現，可能因為沿海地區的潮汐作用導致地下水流向不易掌握。為了進一步瞭解潮汐作用之影響，以便在地下水監測井規劃時可以更為妥善，本研究以數值模擬來探討在潮汐作用下對沿海工業區地下水中污染物之傳輸。

本研究以台中港加工出口區作為研究對象，接著考慮到沿海區地下水受到海岸線之潮汐作用的影響，在不同的位置下放置污染源，最後針對潮汐作用對於污染物質影響進行討論。主要以數值軟體 Modflow 進行模擬，潮汐設定除了在海岸線進行設定，同時也考慮到兩岸河川面受潮汐作用的影響，接著在各個九個不同的位置上設定污染源，藉此分析出污染源的擴散情況。

研究結果顯示出污染物的確會受到潮汐的影響產生出不同的變化，但是在不同的導水度時將會有不同的模擬結果；導水度較小的情況中，污染物受潮汐影響後的擴散範圍較沒有潮汐時廣；導水度較大時，污染物受潮汐影響後的擴散範圍較沒有潮汐作用時小。由前述研究結果可知，在潮汐作用因污染團的形狀與大小會改變，因此在設置地下水監測井應該考慮潮汐之影響。

關鍵詞：潮汐變化、地下水、污染物傳輸

Contaminant Transport in Groundwater under Tidal Influence

Graduate Student : Chyi-Yuh Fang

Advisor : Dr. Hsin-Yu Shan

Department of Civil Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

Due to rapid growth of economy, the amount of government owned or privately owned industrial zone had increased dramatically. In some of those industrial zones, faulty managements may lead to soil and water pollution. From 2000, the regulation of soil and water pollution had passed. EPA and authorities began to monitor, detect pollution, control and remediate groundwater. Among those industrial zones, some of them locate at shoreline. The flow path of groundwater was not easy to predict probably because of tidal influence. In order to understand tidal influence further and to design better groundwater monitoring system, in this research, groundwater transportation with tidal influence in industrial zones in shoreline is discussed with numerical simulation.

The Taichung Export Processing Zone was chosen to be the target of case study in this research. Sources of pollutants are set in different locations, and then the influence of tidal change to pollutants is discussed. The groundwater flow simulation code and contaminant transport code selected for this study were MODFLOW and MT3DMS, respectively. Besides being set up along the shoreline, tide was also set up in two drainage channels along the sides of the Taichung Export Processing Zone at the same time. The sources of pollutions are set in nine locations. The expansion of the plume is analyzed.

The results show that the degree of effect of tide on the transport of contaminant varied with the distance between the plume and the tidal boundaries. Furthermore, with low hydraulic conductivity, the degree of plume expansion is larger than that without considering the tidal effect. With higher hydraulic conductivity, the extent of plume expansion is smaller than the condition with no tide change. According to the results, the shape and size of the plume were affected by the tidal action. As a result, tidal influence should be considered when designing the system groundwater monitoring wells.

Keyword: Tide, Groundwater, Contaminant Transport

誌謝

在研究所的過程中遇到的挫折比想像中多很多，一道一道巨牆不斷的擋在面前，但其中的收穫卻是無法言喻的。單老師真的非常感謝您對於學生的耐心指導，從小因為成績不良被無數老師放棄過，也讓我對於師長都存有些許的排斥感，但老師卻不曾放棄我唾棄我，在困境中一次又一次和我一起找尋出口，老師真的非常的感激您。非常謝謝口委張良正老師、劉志忠老師、王智澤老師給予研究上寶貴的意見和建議，讓我發現到自己沒有觀察到的地方，其中還要特別感謝王智澤老師所提供工業區的資料使我能夠更詳細的進行研究。

效丞學長你在課業上、研究上、生活上給予我的意見真的相當的有用，當我受挫時你也不斷的鼓勵我，每次和你聊天都讓我收穫很多，很感謝你。

書銘真的很感謝你，當我遇到問題找你討論時你都很樂意的幫助我，當我受到挫折時，你也會義無反顧地幫我說話給我鼓勵，沒有你我的研究過程一定更加艱難，謝謝你。慶祐謝謝你時常來我們研究室中串門子，讓我在研究過程中不會過於枯燥乏味。在研究所中能夠交到你們兩個知己讓我感受到相當的幸運。政信和彥博、禹豪學弟實驗室因為有你們存在因此充滿了歡樂和喜悅，讓我每天在煩悶的研究中感到歡樂，謝謝你們。

媽咪，謝謝您讓我能夠任性的做我想做的事情，也謝謝您給予我無慮的生活以及對我栽培，辛苦您了。

最後要感謝的人是妳，在我身邊陪伴我的妳，在我煩悶時陪我去旅遊的妳，在我鑽牛角尖時罵醒我的妳，在我徬徨無助時給我擁抱的妳，因為有妳我的生活變得更有意義更加的充實，庭瑋，我真的很幸運我身邊有妳，我的公主。

目錄

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
誌謝.....	III
目錄.....	VI
圖目錄.....	VII
表目錄.....	XVI
第一章緒論.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 研究流程.....	1
第二章文獻回顧.....	3
2.1 國內工業區土壤與地下水污染概況.....	3
2.2 沿海區域之潮汐作用.....	10
2.2.1 潮汐的原理.....	10
2.2.2 臨海區域內陸地下水位的變化.....	12
2.2.3 潮汐對流場流速的影響.....	21
2.2.4 潮汐對流場傳輸的影響.....	21
2.2.5 海岸區域邊界條件的設定.....	25
第三章研究方法.....	27
3.1 使用模式的簡介.....	27
3.1.1 地下水流數值模式.....	27

3.1.2 污染傳輸模式	28
3.2 地理位置及地形	29
3.3 園區資料蒐集及建立	30
3.4 模型的設定	34
3.4.1 網格的設定	34
3.4.2 水文地質相關參數	34
3.4.3 潮汐的設定	37
3.4.4 潮汐和沒有潮汐時之模型建立	39
3.4.5 污染源的設定	40
3.5 敏感度分析	40
第四章研究結果	41
4.1 Case 1 基本潮汐設定	42
4.1.1 潮汐對於(E-1)、(E-2)、(E-3)影響比較	44
4.1.2 潮汐對於(M-1)、(M-2)、(M-3)影響比較	59
4.1.3 潮汐對於(C-1)、(C-2)、(C-3)影響比較	73
4.2 Case 2 將導水度放大五倍	87
4.2.1 潮汐對於(E-1)、(E-2)、(E-3)影響比較	89
4.2.2 潮汐對於(M-1)、(M-2)、(M-3)影響比較	104
4.2.3 潮汐對於(C-1)、(C-2)、(C-3)影響比較	118
4.3 Case 3 將導水度縮小五倍	132
4.3.1 潮汐對於(E-1)、(E-2)、(E-3)影響比較	134
4.3.2 潮汐對於(M-1)、(M-2)、(M-3)影響比較	142

4.3.3 潮汐對於(C-1)、(C-2)、(C-3)影響比較.....	149
4.4 綜和討論.....	156
第五章結論與建議.....	159
5.1 結論.....	159
5.2 建議.....	160
參考文獻.....	161



圖目錄

圖 1.3-1 研究流程圖	2
圖 2-1 觀音工業園區之地下水流向	6
圖 2-2 臨海工業園區之地下水流向	7
圖 2-3 觀音工業園區單井的異常流向	8
圖 2-4 臨海工業園區單井的異常流向	9
圖 2.2.1-1 以 1997 年 6 月 23 日台灣沿岸當天高潮發生之時間	11
圖 2.2.2-1 桃園大園鄉	14
圖 2.2.2-2 桃園大園鄉地下水位變化	14
圖 2.2.2-3 高雄小港區	15
圖 2.2.2-4 高雄小港區地下水位變化	15
圖 2.2.2-5 台中梧區區	16
圖 2.2.2-6 台中梧區區地下水位變化	16
圖 2.2.2-7 東石站地下水位變化與潮汐變化關係歷線圖	17
圖 2.2.2-8 不同水平距離處地下水位隨時間的變化	17
圖 2.2.2-9 最低潮地下水位及水流趨勢	18
圖 2.2.2-10 最高潮地下水位及水流趨勢	18
圖 2.2.2-11 間高潮地下水位及水流趨勢	19
圖 2.2.2-12 不同含水層水位受潮汐影響之比較	19
圖 2.2.2-13 不同傾角(0~3)時受潮汐影響之水位變化(T=0)	20
圖 2.2.4-1 沒有潮汐時的污染濃度變化	22
圖 2.2.4-2 有潮汐變化時的濃度變化	22
圖 2.2.4-3 不同含水層的位置污染濃度之變化	23
圖 2.2.4-4 污染物質在不同儲水係數下的空間變化	23
圖 2.2.4-5 污染物質在不同平均水力梯度的情境下變化情況	24

圖 3.2-1 台中港加工出口區示意圖	29
圖 3.4.3-1 潮汐變化圖	37
圖 3.4.3-2 中港園區周邊排水系統	38
圖 3.4.4-1 模型邊界的設定	39
圖 4-1 編號和污染位置之座標	42
圖 4.1-1 無潮汐作用下污染團	43
圖 4.1-2 潮汐作用下污染團	43
圖 4.1.1-1 高潮位時之等水位線	45
圖 4.1.1-2 低潮位時之等水位線	46
圖 4.1.1-3 E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	47
圖 4.1.1-4 E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	47
圖 4.1.1-5 E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	48
圖 4.1.1-6 E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	48
圖 4.1.1-7 E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	49
圖 4.1.1-8 E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	49
圖 4.1.1-9 E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	50
圖 4.1.1-10 E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	50
圖 4.1.1-11 E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	51
圖 4.1.1-12 E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	51
圖 4.1.1-13 E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	52
圖 4.1.1-14 E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	52
圖 4.1.1-15 E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	53
圖 4.1.1-16 E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	53
圖 4.1.1-17 E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	54
圖 4.1.1-18 E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	54

圖 4.1.1-19	E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	55
圖 4.1.1-20	E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	55
圖 4.1.1-21	E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	56
圖 4.1.1-22	E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	56
圖 4.1.1-23	E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	57
圖 4.1.1-24	E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	57
圖 4.1.1-25	E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	58
圖 4.1.1-26	E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	58
圖 4.1.2-1	M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	61
圖 4.1.2-2	M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	61
圖 4.1.2-3	M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	62
圖 4.1.2-4	M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	62
圖 4.1.2-5	M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	63
圖 4.1.2-6	M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	63
圖 4.1.2-7	M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	64
圖 4.1.2-8	M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	64
圖 4.1.2-9	M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	65
圖 4.1.2-10	M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	65
圖 4.1.2-11	M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	66
圖 4.1.2-12	M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	66
圖 4.1.2-13	M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	67
圖 4.1.2-14	M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	67
圖 4.1.2-15	M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	68
圖 4.1.2-16	M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	68
圖 4.1.2-17	M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	69

圖 4.1.2-18	M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	69
圖 4.1.2-19	M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	70
圖 4.1.2-20	M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	70
圖 4.1.2-21	M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	71
圖 4.1.2-22	M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	71
圖 4.1.2-23	M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	72
圖 4.1.2-24	M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	72
圖 4.1.3-1	C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	75
圖 4.1.3-2	C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	75
圖 4.1.3-3	C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	76
圖 4.1.3-4	C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	76
圖 4.1.3-5	C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	77
圖 4.1.3-6	C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	77
圖 4.1.3-7	C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	78
圖 4.1.3-8	C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	78
圖 4.1.3-9	C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	79
圖 4.1.3-10	C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	79
圖 4.1.3-11	C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	80
圖 4.1.3-12	C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	80
圖 4.1.3-13	C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	81
圖 4.1.3-14	C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	81
圖 4.1.3-15	C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	82
圖 4.1.3-16	C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	82
圖 4.1.3-17	C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	83
圖 4.1.3-18	C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	83

圖 4.1.3-19	C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	84
圖 4.1.3-20	C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	84
圖 4.1.3-21	C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	85
圖 4.1.3-22	C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	85
圖 4.1.3-23	C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	86
圖 4.1.3-24	C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	86
圖 4.2-1	無潮汐作用下污染團	88
圖 4.2-2	潮汐作用下污染團	88
圖 4.2.1-1	高潮位時之等水位線	91
圖 4.2.1-2	E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	92
圖 4.2.1-3	E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	92
圖 4.2.1-4	E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	93
圖 4.2.1-5	E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	93
圖 4.2.1-6	E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	94
圖 4.2.1-7	E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	94
圖 4.2.1-8	E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	95
圖 4.2.1-9	E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	95
圖 4.2.1-10	E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	96
圖 4.2.1-11	E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	96
圖 4.2.1-12	E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	97
圖 4.2.1-13	E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	97
圖 4.2.1-14	E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	98
圖 4.2.1-15	E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	98
圖 4.2.1-16	E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	99
圖 4.2.1-17	E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	99

圖 4.2.1-18	E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	100
圖 4.2.1-19	E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	100
圖 4.2.1-20	E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	101
圖 4.2.1-21	E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	101
圖 4.2.1-22	E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	102
圖 4.2.1-23	E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	102
圖 4.2.1-24	E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	103
圖 4.2.1-25	E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	103
圖 4.2.2-1	M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	106
圖 4.2.2-2	M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	106
圖 4.2.2-3	M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	107
圖 4.2.2-4	M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	107
圖 4.2.2-5	M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	108
圖 4.2.2-6	M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	108
圖 4.2.2-7	M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	109
圖 4.2.2-8	M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	109
圖 4.2.2-9	M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	110
圖 4.2.2-10	M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	110
圖 4.2.2-11	M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	111
圖 4.2.2-12	M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	111
圖 4.2.2-13	M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	112
圖 4.2.2-14	M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	112
圖 4.2.2-15	M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	113
圖 4.2.2-16	M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	113
圖 4.2.2-17	M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	114

圖 4.2.2-18	M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	114
圖 4.2.2-19	M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	115
圖 4.2.2-20	M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	115
圖 4.2.2-21	M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	116
圖 4.2.2-22	M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	116
圖 4.2.2-23	M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	117
圖 4.2.2-24	M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	117
圖 4.2.3-1	C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	120
圖 4.2.3-2	C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	120
圖 4.2.3-3	C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	121
圖 4.2.3-4	C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	121
圖 4.2.3-5	C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	122
圖 4.2.3-6	C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	122
圖 4.2.3-7	C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	123
圖 4.2.3-8	C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	123
圖 4.2.3-9	C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	124
圖 4.2.3-10	C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	124
圖 4.2.3-11	C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	125
圖 4.2.3-12	C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	125
圖 4.2.3-13	C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	126
圖 4.2.3-14	C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	126
圖 4.2.3-15	C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	127
圖 4.2.3-16	C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	127
圖 4.2.3-17	C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	128
圖 4.2.3-18	C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	128

圖 4.2.3-19	C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	129
圖 4.2.3-20	C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	129
圖 4.2.3-21	C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	130
圖 4.2.3-22	C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	130
圖 4.2.3-23	C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	131
圖 4.2.3-24	C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	131
圖 4.3-1	無潮汐作用下污染團	133
圖 4.3-2	潮汐作用下污染團	133
圖 4.3.1-1	高潮位時之等水位線	135
圖 4.3.1-2	E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	136
圖 4.3.1-3	E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	136
圖 4.3.1-4	E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	137
圖 4.3.1-5	E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	137
圖 4.3.1-6	E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	138
圖 4.3.1-7	E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	138
圖 4.3.1-8	E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	139
圖 4.3.1-9	E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	139
圖 4.3.1-10	E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	140
圖 4.3.1-11	E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	140
圖 4.3.1-12	E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	141
圖 4.3.1-13	E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	141
圖 4.3.2-1	M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	143
圖 4.3.2-2	M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	143
圖 4.3.2-3	M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	144
圖 4.3.2-4	M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	144

圖 4.3.2-5	M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	145
圖 4.3.2-6	M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	145
圖 4.3.2-7	M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	146
圖 4.3.2-8	M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	146
圖 4.3.2-9	M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	147
圖 4.3.2-10	M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	147
圖 4.3.2-11	M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	148
圖 4.3.2-12	M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	148
圖 4.3.3-1	C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	150
圖 4.3.3-2	C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	150
圖 4.3.3-3	C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	151
圖 4.3.3-4	C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	151
圖 4.3.3-5	C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	152
圖 4.3.3-6	C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	152
圖 4.3.3-7	C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	153
圖 4.3.3-8	C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	153
圖 4.3.3-9	C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團	154
圖 4.3.3-10	C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團	154
圖 4.3.3-11	C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團	155
圖 4.3.3-12	C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團	155
圖 4.4-1	高潮位時之等水位線	158

表目錄

表 2-1 污染管制區的概況	4
表 2.2.2-1 地下水超高試驗主要參數及結果	20
表 2.2.5-1 潮汐邊界設定的比較結果	26
表 3.3-1 中港園區廠商類別統計表	31
表 3.3-2 可能造成園區內土壤重金屬及其他土水污染衝擊之業別工廠	32
表 3.3-3 可能造成園區內土壤重金屬及其他土水污染衝擊之業別工廠	33
表 3.4.2-1 現地土層分佈	35
表 3.4.2-2 使用之相關參數	36
表 3.5-1 三種情境之比較	40
表 4-1 編號和污染位置之座標	41
表 4.1.1-1 污染團面積之比較結果	45
表 4.1.2-1 污染團面積之比較結果	60
表 4.1.3-1 污染團面積之比較結果	74
表 4.2.1-1 污染團面積之比較結果	91
表 4.2.2-1 污染團面積之比較結果	105
表 4.2.3-1 污染團面積之比較結果	119
表 4.3.1-1 污染團面積之比較結果	135
表 4.3.2-1 污染團面積之比較結果	142
表 4.3.3-1 污染團面積之比較結果	149
表 4.4-1 污染團面積之比較結果	157
表 4.4-2 台中港特定區(中棲路以南)地下水調查統計表	158

第一章 緒論

1.1 研究動機

沿海地區的地下水水質污染已經慢慢成為全球日益嚴重的環境問題，台灣區域四面環海，在海岸區域中可能因為工、商、農、漁業的廢棄物、廢水的惡意排放導致污染物質流入土壤，進而影響到海岸區的地下水質。雖然已有環保團體開始對於沿岸區進行監測、分析、整治，但鮮少去考慮到潮汐作用對於地下水以及污染物質傳輸的影響，如果能夠詳細的去了解污染物質在沿岸地下水的傳輸過程，那對於之後從事沿海區域的監測、整治等將會有莫大的幫助。

1.2 研究目的

本研究以台中市中港加工出口區作為模擬對象，利用數值軟體模擬出區域場址受到潮汐影響的變化以及沒有潮汐時的情況，對照討論這兩種情境下的模擬結果。

1.3 研究流程

本研究流程上主要先蒐集相關文獻以及相關潮汐資料，接著提出合理的數值參數輸入 Modflow 程式中進行模擬，接著進行不同情境下之分析，最後進行分析及討論，研究的流程圖如圖 1.3-1 所示。



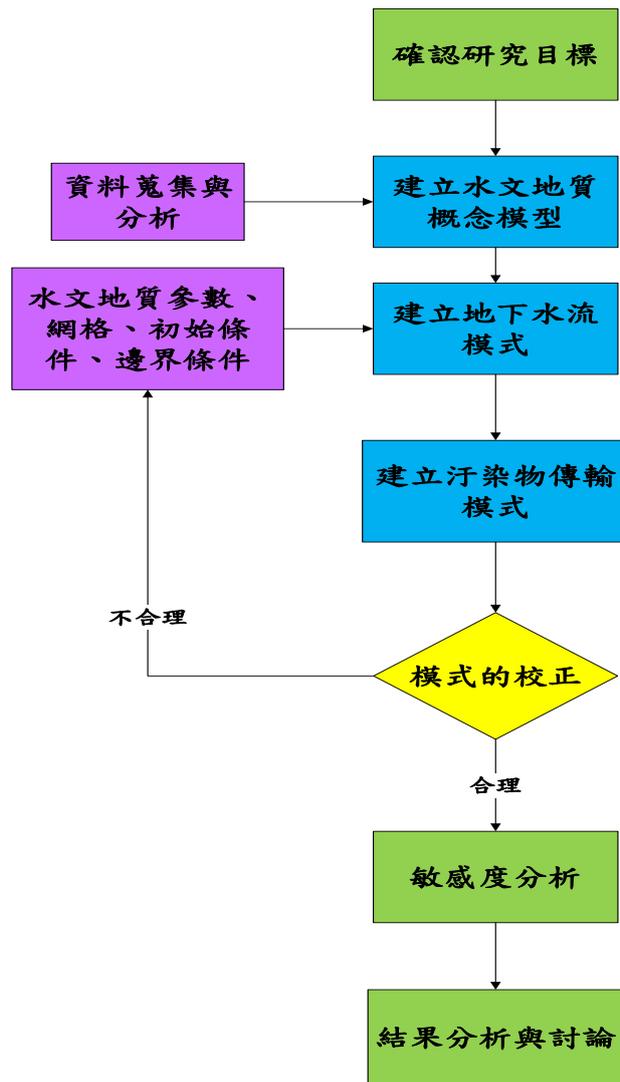


圖 1.3-1 研究流程圖

第二章 文獻回顧

2.1 國內工業區土壤與地下水污染概況

在這節中將針對台灣工業園區與其污染的概況作扼要的說明，同時也針對本研究的主題，亦即位於沿海的工業園區之地下水流所呈現出的特有現象做一簡介。

我國自民國 70 年代起，陸續發現工業發展過程中，由於廢棄物、空氣、廢水等未妥善處理所帶來的土壤及地下水污染問題，並產生多起社會注目之主要工業污染事件，例如：中石化廠、高銀化工、基力化工、台灣美國無線電桃園廠(RCA)等，因而促使我國加速環保法令與制度之建置，而我國環保法令之發展，是以飲水衛生、水污染、空氣污染、廢棄物及毒化物管理等優先發展管理法令，主要針對污染源進行管制，然而一旦污染來源未妥善管制，或是有違法情形發生，常會導致土壤或地下水的污染。(行政院環保署，2011)

目前我國共計設有 61 處公辦工業區，其中包括：南港軟體工業區園區、鳳山工業區、樹林工業區等等。民間自辦的工業區共有 52 處，包括：中興工業區、龍港工業園區、龍潭工業園區等等。科學園工業園區共有 13 處，包括：新竹園區、南港園區。加工出口區共有 9 處，包括：高雄園區、台中園區、楠梓園區等等。

為了強化對這些工業區的土壤與地下水品質管理和污染預防，環保署依據「土壤及地下水污染整治法」(以下簡稱土污法)的授權，自 100 年度起陸續執行「全國工業區土壤及地下水品質管理計畫(上位政策計畫，負責訂定燈號管理及各單位分工應變制度並統籌分配資源)」、「全國高污染潛勢工業區地下水質預警監測井網規劃建置計畫(負責區外預警監測井網建置)」及「高污染潛勢工業區污染源調查及管制計畫(負責區內污染源調查及管制)」等 3 項專案計畫，期透過上述法規實施結合專案計畫之推動，增加政府各單位投入工業區之監測資源，並提供監測資訊整合運用機制與資訊交流平台，以利污染預警及行政決策，改善工業區污染問題及保障民眾健康。(環保署，2012)

自此台灣工業區已經有不少被列為控制或整治場址，其中包括：大園工業區內有順倉、全鋒、大園聯合水處理工廠為控制場址，觀音工業園區有慶泉金屬工廠為控制場址，大甲幼獅工業園區內有永日化學工廠為控制場址等等，各污染場址的概況如下表 2-1。

表 2-1 污染管制區的概況（環保署，2013）

	順昌	全鋒	大元聯合	慶泉金屬	永日化學
公告日期	2013/10/8	2013/05/27	2013/06/06	2013/01/24	2013/12/06
污染情形	地下水中污染物苯項目含量達第二類地下水污染管制標準：0.4 毫克/公升。	地下水總酚項目最高檢出濃度為 149 毫克/公升，地下水 1,1,2-三氯乙烷項目最高檢出濃度為 2.03 毫克/公升，地下水 TPH-d 項目最高檢出濃度為 160 毫克/公升，地下水乙苯項目最高檢出濃度為 7.23 毫克/公升。	地下水中污染物三氯乙烯項目含量達第二類地下水污染管制標準：0.05 毫克/公升。	地下水中污染物三氯乙烯項目含量達第二類地下水污染管制標準：0.05 毫克/公升。	場址地下水污染物總酚濃度達 0.366 毫克/公升。
場址現況概述	順倉從事廢棄物清除處理行業之含銅蝕刻廢液回收處理、含氯有機廢溶液回收處理及非氯有機溶劑回收處理等製程，現況營業中。	運作中。	原由大園聯合水處理公司大園廠從事電鍍表面處理相關行業之廢水，並以管線收集電鍍專區內之廢汙水並集中處理，現已辦理歇業。	運作中。	場址目前由永日化學股份有限公司設廠使用中。
改善整治進度	無	執行控制計畫中。	無	審查控制計畫中。	無

環保署推動的「全國高污染潛勢工業區地下水質預警監測井網規劃建置計畫」(第二期)主要是對於具有高污染潛能之工業區規劃出整體性的地下水質預警監測井網，希望可以有效控制污染源的擴散，藉此保護工業區內外還未受污染的地下水水質。(環保署，2013)

該計畫中背景資料蒐集裡，其工業園區之地下水位定期監測結果如下：

- (1) 觀音工業區位於桃園縣觀音鄉沿岸地區，開發總面積 632.12 公頃，工業區離海岸線約 500 m，目前工業區內廠商總數約為 336 家。由鑽探資料得到，地表為紅土層，地表下 2~20 m 為紅土礫石層，下方 20~30 m 則以灰色細砂與泥互層為主，地表下 30~34 m 為黏土層，34 m 以下則為灰色砂泥互層。工業區地下水水位約為地表下 3.02 m，由監測井微水試驗結果含水層水力傳導係數範圍約 0.0024~11.491 m/day，平均為 2.63 m/day。地下水流向隨季節之變化不大，大致是由東南往西北流(如圖 2-1)。
- (2) 臨海工業區位於高雄市小港區緊鄰高雄港，總面積為 1,560 公頃，目前工業區內廠商總數約為 444 家。由鑽探資料得到，地表下 6~16 m 左右為坩土質細砂含水層，16~20 m 為黏土層，20~24 m 仍為坩土質細砂含水層，24 m 以下則為砂泥互層。本工業區地下水水位約為地表下 4.53 m，由監測井微水試驗結果含水層水力傳導係數範圍約 0.017~24.062 m/day，平均為 5.397 m/day。地下水流向隨季節之變化不大，大致是由東南往西北流(如圖 2-2)。

由圖 2-1 和圖 2-2 中可以了解到臨海工業區的區域流向，水由地勢較高的內陸往海岸流，這樣的情況是一般所認知的，但在這其中是否忽略掉了沿岸區域中其他影響因素。

在下面的幾張工業區圖(圖 2-3 和圖 2-4)裡可以發現到除了原有的區域流速外，另外還包含了新設監測井時利用單井地下水流向流速測定儀量測，量測出某個時間點中，單井附近小區域的流速、流向。從單井流向來看可以發現到有些水流的方向和依據工業區內外既設監測井水位資料所得之等水位線推估之區域流向有明顯不同，由圖 2-3 中桃園縣觀音工業區裡的#2、#3 以及圖 2-4 高雄市臨海工業區裡的#1、#3、#6、#7、#8、#9、#10 的單井流向可以觀察到此現象。

前述單井量測之地下水流向與推估之區域地下水流向不盡相同，雖然不能直接證明出潮汐所產生的影響，但間接證明出海岸區域中的異常情況發生。因為這些工業區緊鄰海岸，因此工業區內外靠海岸側的監測井水流方向與距離海岸較遠的地下水方向不一致，是否有可能是因為潮汐作用造成，值得探討。在 2.2.2 節中將會仔細的說明海岸區域地下水流的現象。

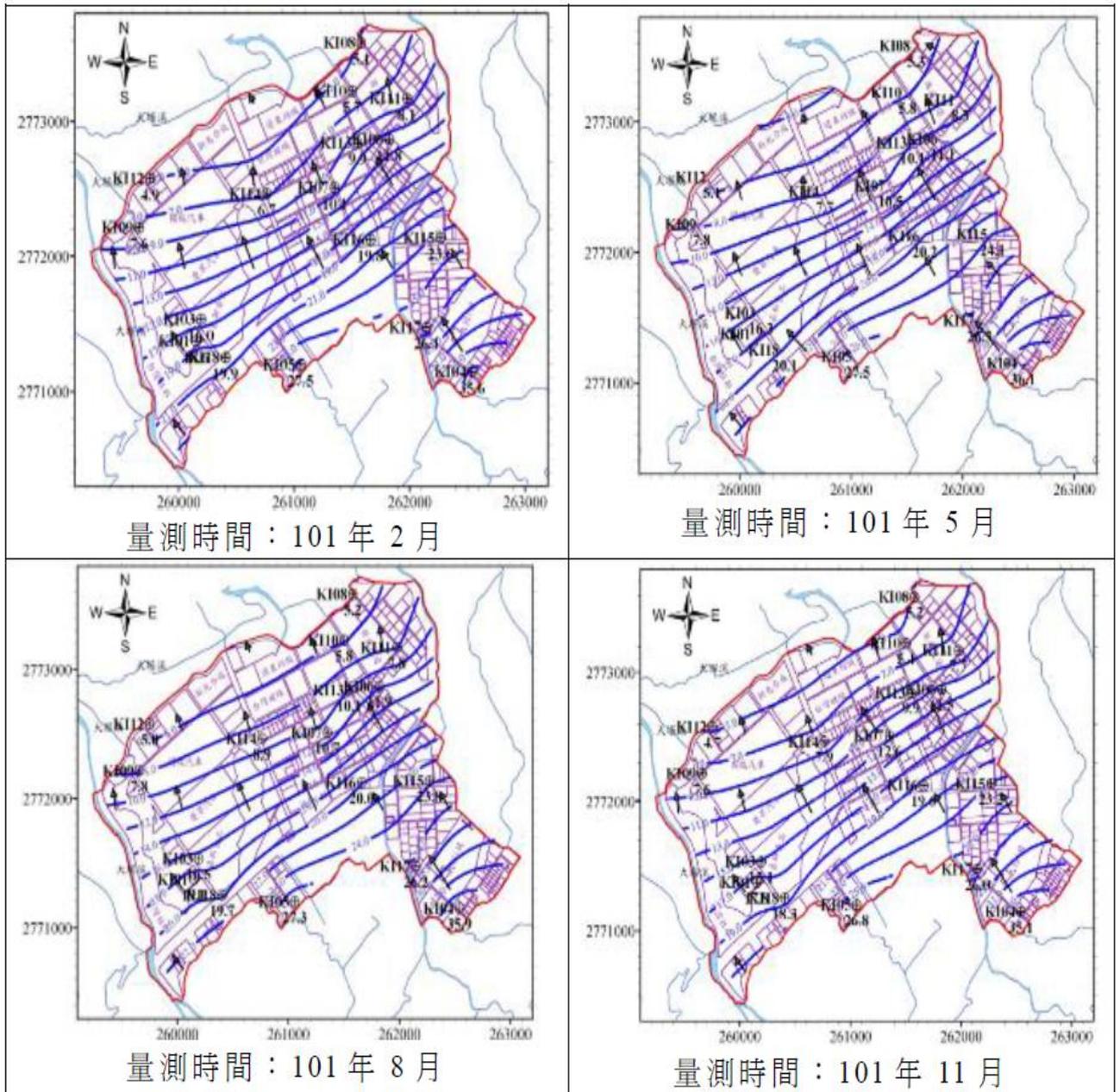


圖 2-1 觀音工業園區之地下水流向

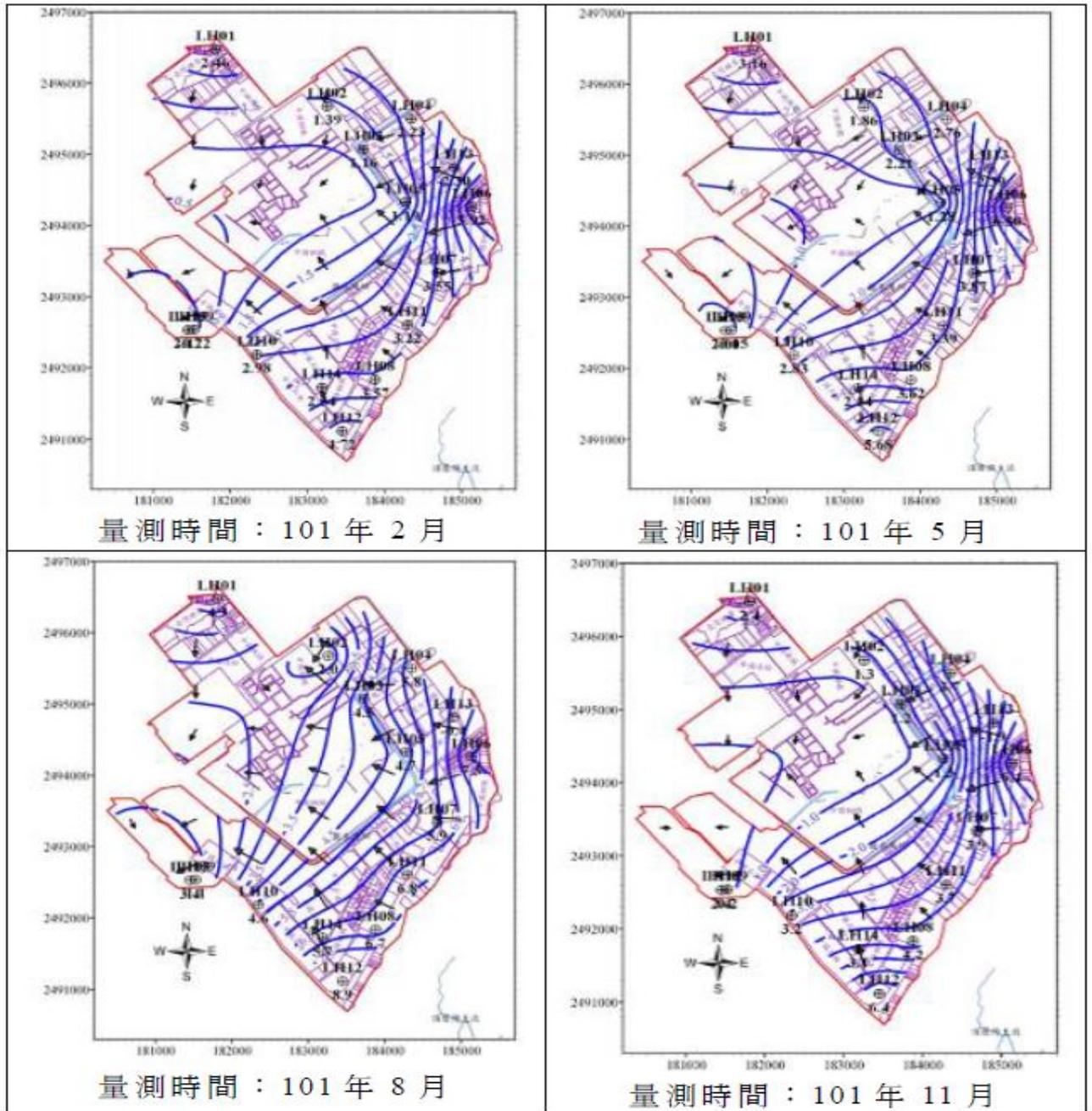


圖 2-2 臨海工業園區之地下水流向

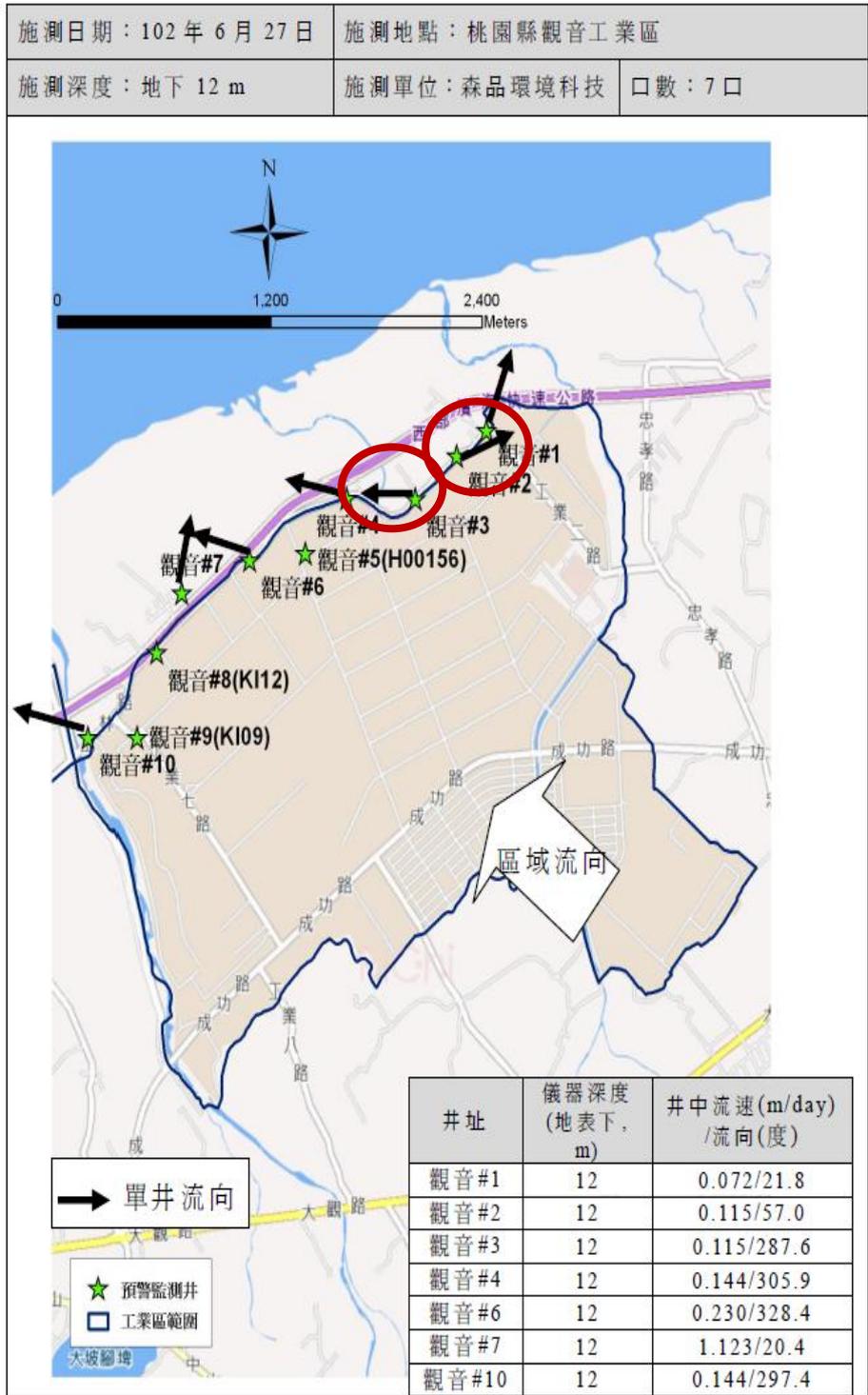


圖 2-3 觀音工業園區單井的異常流向

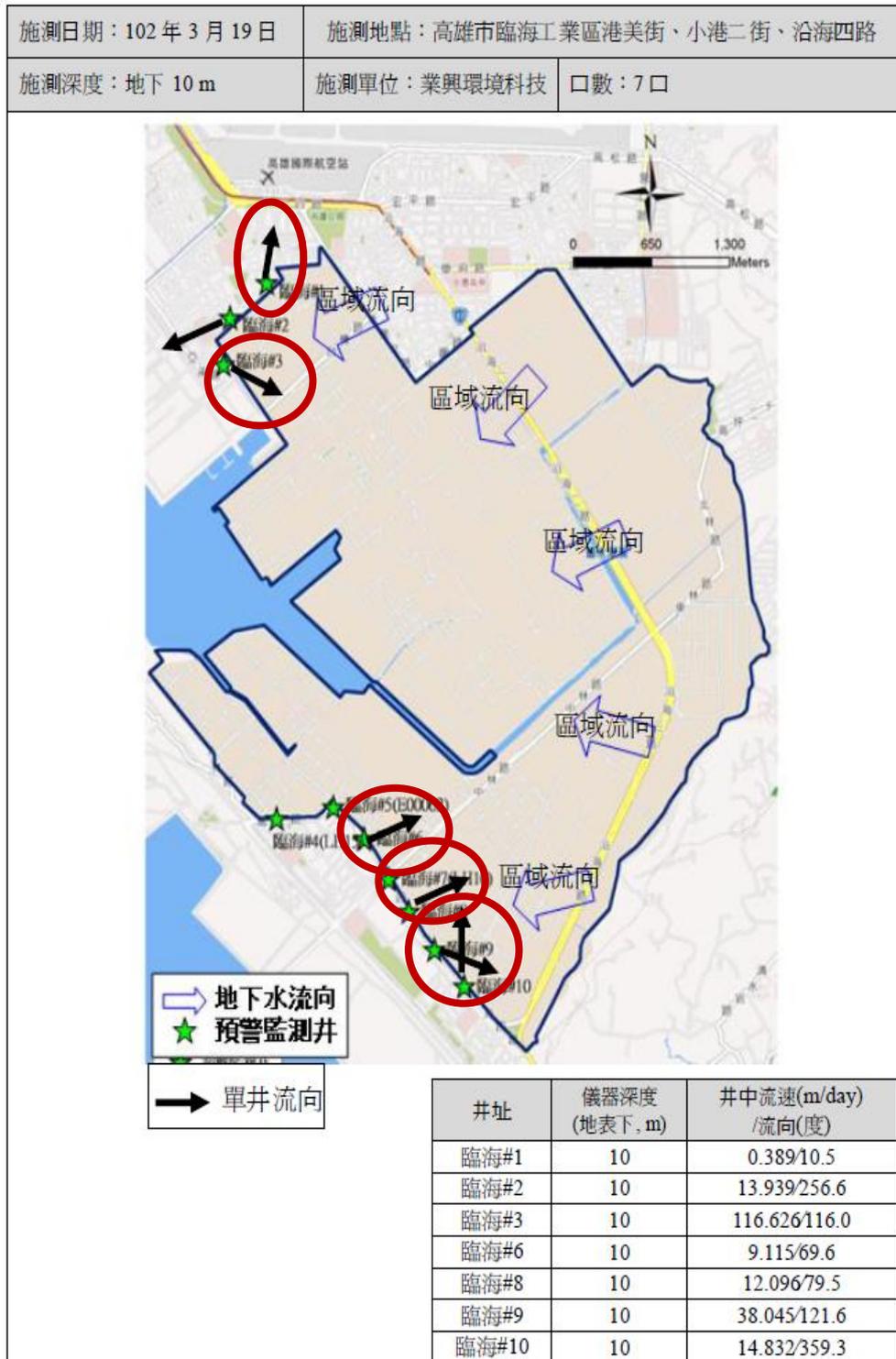


圖 2-4 臨海工業園區單井的異常流向

2.2 沿海區域之潮汐作用

2.2.1 潮汐的原理

(1) 潮汐的特性

潮汐的主要特性有三種：潮差、週期和大小潮的現象。天體對於地球上的海水都有引潮力，在不同的地方其潮差也不相同，其中以月球和太陽的引潮力最大。太陽的質量雖大，但因與地球的距離較遠，引潮力只有月球的一半。理論上月球引起的潮差約 53 cm，太陽引起的約 24 cm，兩者相加不超過 77 cm，因此外海的潮差最大不會超過一公尺，但在海岸或河口因為受地形的影響，潮差可以達到數公尺，全球潮差最大的地方在加拿大的芬地灣(Fundy Bay)，達到 15 m。一個地方的潮差每天都不一樣，甚至一天內的兩次漲落也不同，一般在陰曆初一、初二(新月)及十五、十六(滿月)前、後潮差最大稱為高潮；陰曆初七、初八(上弦)及二十二、二十三(下弦)前、後潮差最小稱為低潮。(范光龍，2008)

(2) 台灣的潮汐現象

台灣的分潮振幅的變化趨勢中，主太陽、主太陰之半日潮在台灣西部區域及金門地區明顯較大，而在東北部及西南部區域則較小；日月合成、主太陰之日週期僅有金門地區明顯較大。在潮形因子方面，東北部及西南部雖屬於混合潮，但全日潮的成分略為明顯；新竹與台中測港站的潮形明顯屬於半日潮，而淡水、竹圍、箔子寮及料羅灣測站的半日潮形的成分也較明顯。其他的測站則為混合潮型，但半日潮成份較為明顯。(邱啟敏，2007)

高雄港外海台灣西南海域高屏峽谷內之潮流流動現象皆沿著峽谷方向流動，其與表面潮流沿著海岸線流動有明顯差異，地形效應、洋流與潮流交互作用造成西南海域海流流動現象複雜之因素。而在基隆港海域海流特性方面，退潮時段基隆港外海受到野柳龜頭山阻擋退潮流，在萬里一帶海域形成順時針渦流，而基隆港港外位於渦流邊緣恰好與外海東南退潮流向相反，呈西南走向，此外於海岸突出之基隆嶼亦形成此處海流偏東北一西南走向之主要原因。於台灣東部花蓮與蘇澳港海域海流特性方面，近岸處海流速度明顯偏小，甚至在宜蘭至花蓮一帶海岸呈現一返流區，綜合資料分析，此處海域應於大潮之漲潮時段流速向南退潮向北，而小潮時段由於潮流成分較小。台中港海域海流特性方面，夏季台中港外海流速強勁，黑潮分支繞過雲彰隆起向北流動，於台中海域再度接近近岸處，不論漲退潮段皆持續向北。而冬季海面流速明顯變小，於小潮時段時若東北季風強勁，導致近岸處有沿著海岸線向南流動之明顯現象，且由於台中港北防坡堤之阻擋影響，導致堤頭附近海域流速偏向西南西。(廖等，2012)

另外，以 1997 年 6 月 23 日台灣沿岸當天高潮發生之時間如圖(圖 2.2.1-1)，圖中顯示出若以蘇澳為一天最早發生高潮時，北部端之鼻頭角與最南端之南灣潮汐，二者相距蘇澳差別很大但發生高潮之卻有相近。從鼻頭角至淡水僅約 30 分鐘度差(約 50 km)，潮汐高潮到達時間卻走了 4 小時 45 分鐘(如果以牛頓半日潮

理論經度相差 180 度即時間 12 小時發生潮汐漲退，初估經度差 1 度高潮發生時間才差 40 分左右)。(莊與江，2000)

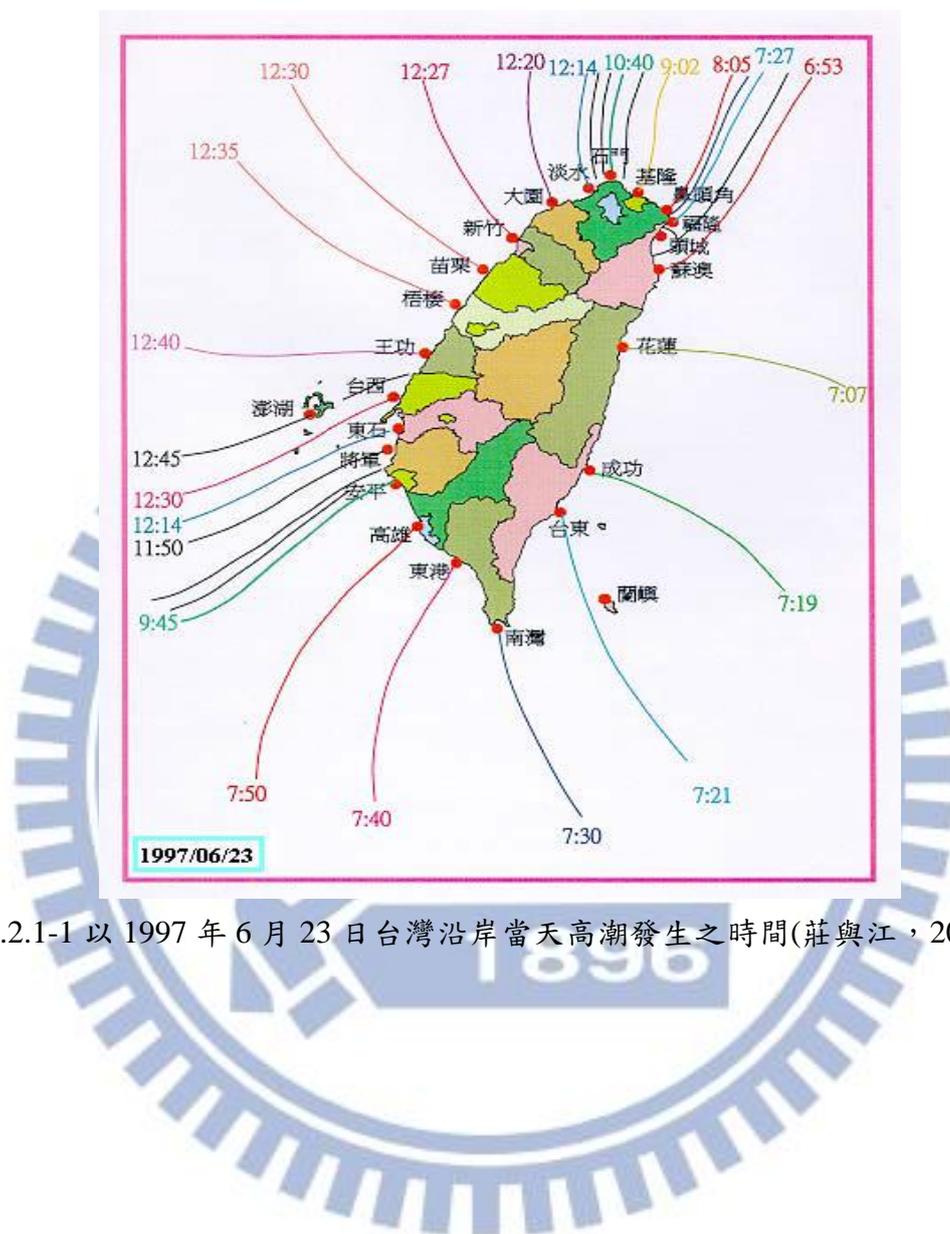


圖 2.2.1-1 以 1997 年 6 月 23 日台灣沿岸當天高潮發生之時間(莊與江，2000)

2.2.2 臨海區域內陸地下水位的變化

以下將探討出潮汐對於內陸地下水位的影響，除了說明由水利署所搜尋資料以外，也會說明其他學者作出的相關研究。

由水利署觀測井網中可以找尋到各個區域地下水位的資料，以沿海區域作為搜尋的對象，觀察的結果發現到其中某些位置的地下水位會隨著時間變化，其中位於桃園大園工業區附近的潮音路上(圖 2.2.2-1、圖 2.2.2-2)，離海岸線約 500 m，潮型為半日潮型，平均海平面為 2.27 m，振幅約 0.02 m，其中在 12 月 13 日至 20 日期間振幅不穩定，平均海平面增加，推斷其間雨量特別大或其他因素影響；而位於高雄臨海工業區內的翠亨南路上(圖 2.2.2-3、圖 2.2.2-4)，離海岸線約 600 m，潮型為全日潮型，平均海平面約 0.8 m，振幅約 0.15 m；台中港加工出口區附近的港埠路上(圖 2.2.2-5、圖 2.2.2-6)，離海岸線約 2000 m，潮型為半日潮型，平均海平面為 0.3 m，振幅約 0.05 m，其中因為離海岸線已經有一段距離，因此振幅相對較不明顯。

林宛蓉等人(1998)藉由濁水溪南緣地區之地下水位觀測井水位資料分析，發現到潮汐變化與地下水位之關係大致為越往內陸，延遲時間逐漸增加，延遲的時間受地質條件與地理位置所控制。在研究的統整中，由圖 2.2.2.7 可以發現東石(3)、(4)兩站呈現週期性的規律變化，週期大約 12 小時左右，與氣象局東石潮位站之時潮位資料比對，可以發現兩者週期幾乎一致，地下水位之高峰植大約落後高潮時段一小時；但是在東石(1)、(2)兩站則看不到此規律相似之週期，推測可能受到其他因素干擾所致，如抽水、降雨等。

陳娟等人(2006)利用 Boussinesq 方程式建立一維的地下水流模型，潮汐利用正弦波，模擬出沿海區域地下水流隨潮汐波動的情況。再研究結果顯示出地下水的波動對於潮汐的波動來說具有不對稱性、振幅衰退、遲滯現象發生，如圖 2.2.2.8 所示，當其與正弦潮汐海平面相比，它不是對稱的，上升時相對急速，下降時比較緩慢，這種不對稱性隨著往內陸的移動慢慢減小，同一時刻，在不同的水平距離外，波動存在的相對位移，後一個位置的地下水位波動都比前一個位置延遲了一些，並且隨著潮汐往內陸傳遞，地下水位的波動幅度隨著往內陸的推進漸漸減為零。透過比較受潮汐影響的地下水位與不考慮潮汐影響的地下水位相比較發現，實際地下水位的平均高度高於沒有潮汐影響時的地下水位。

吳龍華等人(2009)自行研製開發潮汐模擬的自動控制系統，藉此模擬出近岸地下水位的波動。在此研究中將高低潮與海岸處交界點處地下水週期平均水位超過平均海岸面水位的值稱為水位超高，記為 H_{over} ，組成潮汐訊號的 2 組信號，振幅分別為 A_1 和 A_2 ，頻率分別為 ω_1 、 ω_2 ，含水層厚度 H_0 ，最後共進行 10 組試驗(呈現結果如表 2.2.2-1)。由表中可以發現，潮汐的振幅和頻率對沿岸地下水水位的超高有重要的影響，在相同的條件下，頻率對地下水水位超高的影響較振幅大，潮汐對地下水水位超高的影響還與近岸的淺水層的厚度有關。從表中還可以看出潮汐引起的地下水水位超高十分明顯，達振幅(A_1+A_2)的 39.62%~49.32%，佔近岸

的淺水層厚度的6.65 %~9.49 %。

施清芳等人(2012)在「建立核能電廠場區地下水傳出基準版概念模式」計畫中，在監測地下水位結果裡呈現出三種不同的潮汐階段，深部受壓含水層地下水位，分別為最低潮、最高潮、與間高潮(intermediate high tide，為潮汐之大週期中，中等程度之高潮期)如圖2.2.2-9、圖2.2.2-10、圖2.2.2-11所示。圖2.2.2-12為潮汐與多口井中的水位變化圖，其中L號井的井篩位置於深部，水位受到潮汐影響顯著，而W與M號井井篩位於淺部非受壓含水層，水位並未受到潮汐顯著影響；而由圖中所呈現的並不是相對的高程，只是要示意在L號井的水位變化和外海潮汐的變化幅度一致，以此來驗證出場址內的水位變化是由潮汐所引起的。

徐筱婷等人(2013)利用提出了一種解決非線性Boussinesq方程式線性化的方法，係對於一維潮汐及降雨造成非拘限傾斜含水層的地下水流變動進行研究，研究結果由圖2.2.2-13可以發現，當傾角越大時，潮汐對水位變動也會越激烈，角度越小時則會越平緩，原因為傾角越大會造成水力梯度隨著X方向逐漸升高，促進水在含水層的移動，使得水位的變動較為顯著，而傾角為負值時亦也如此。



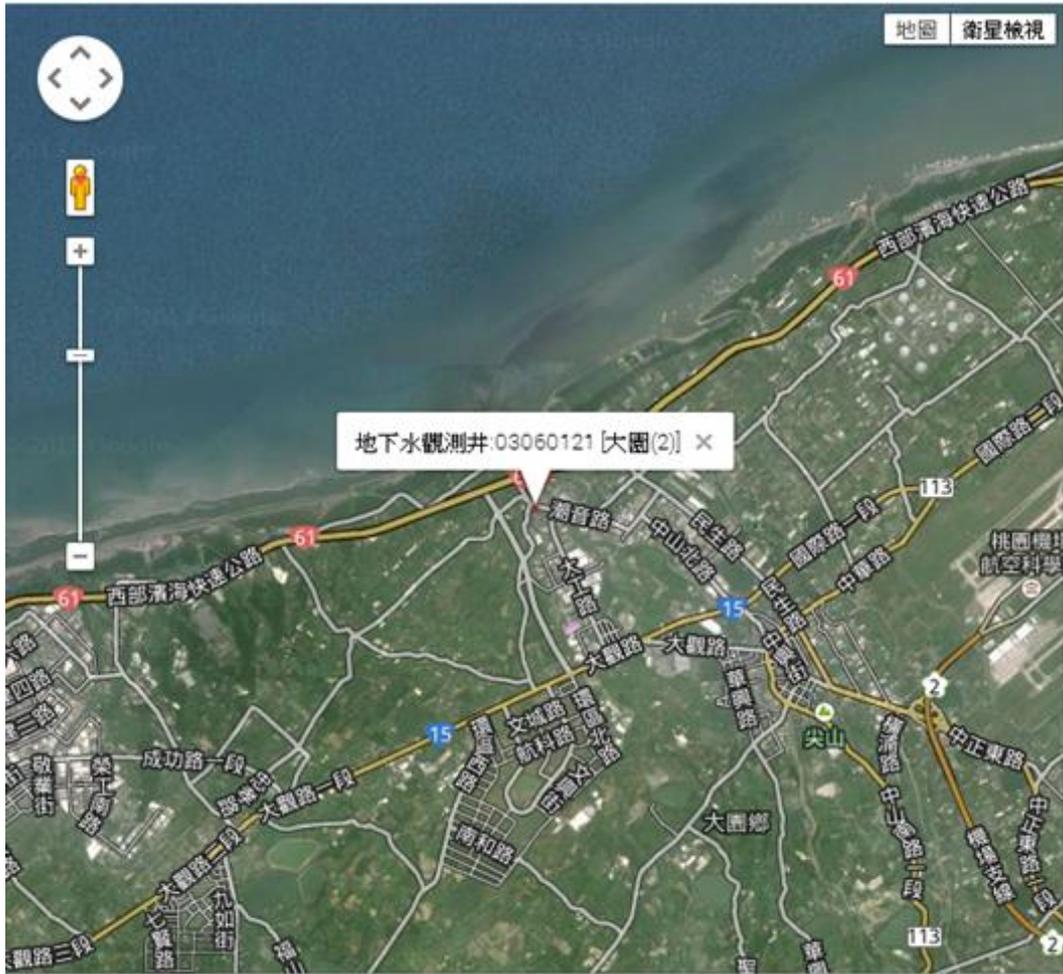


圖 2.2.2-1 桃園大園鄉



圖 2.2.2-2 桃園大園鄉地下水位變化

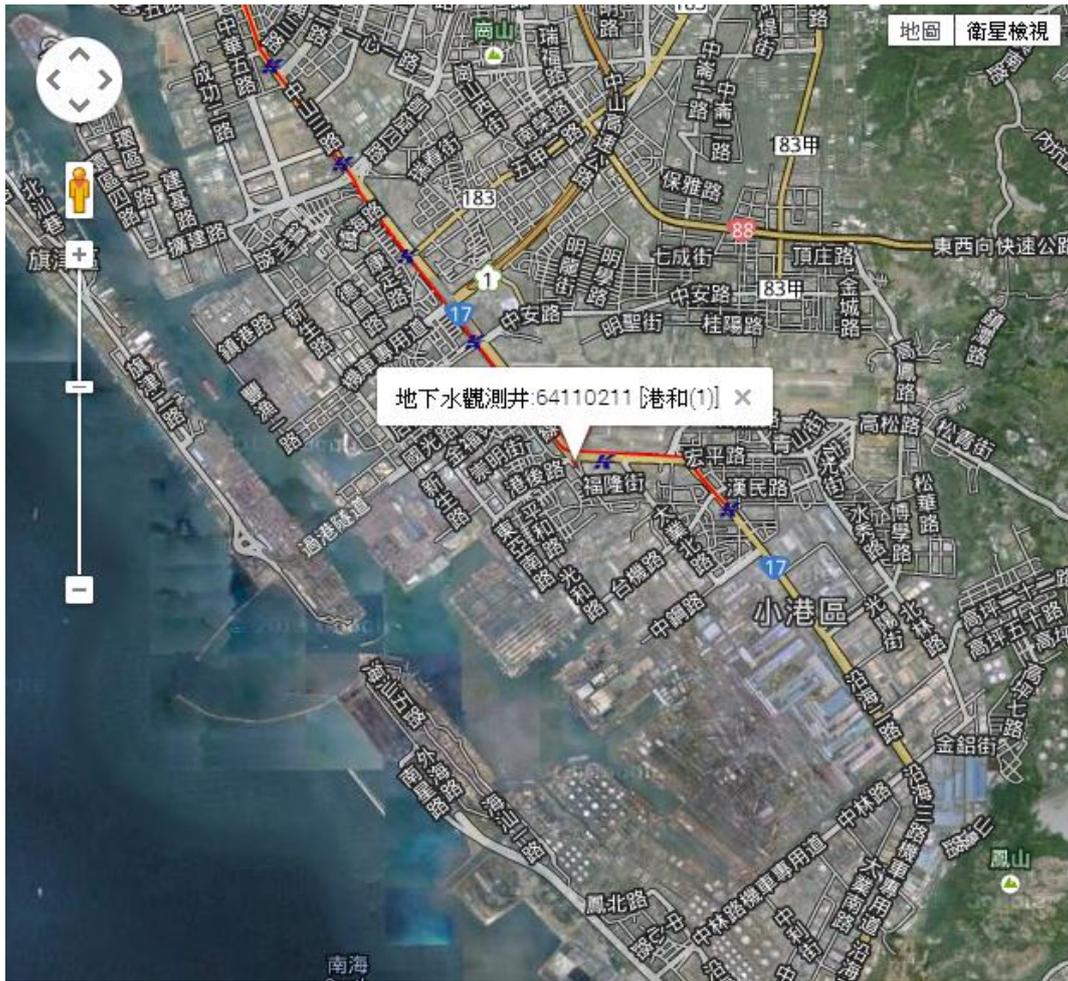


圖 2.2.2-3 高雄小港區

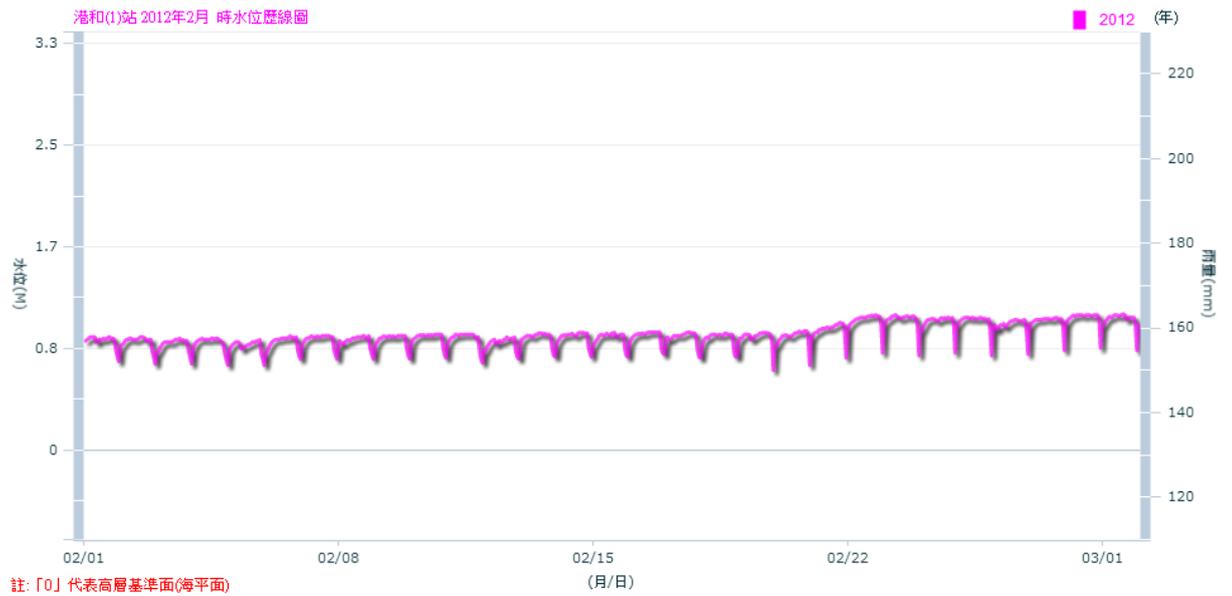


圖 2.2.2-4 高雄小港區地下水位



圖 2.2.2-5 台中梧棲區

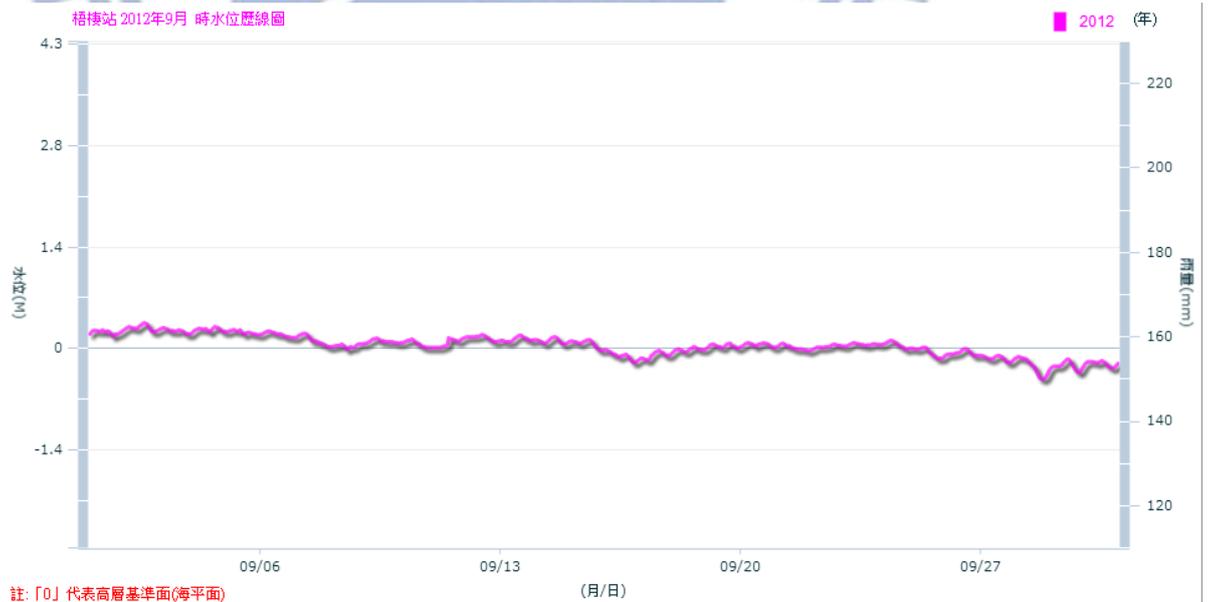


圖 2.2.2-6 台中梧棲區地下水位變化

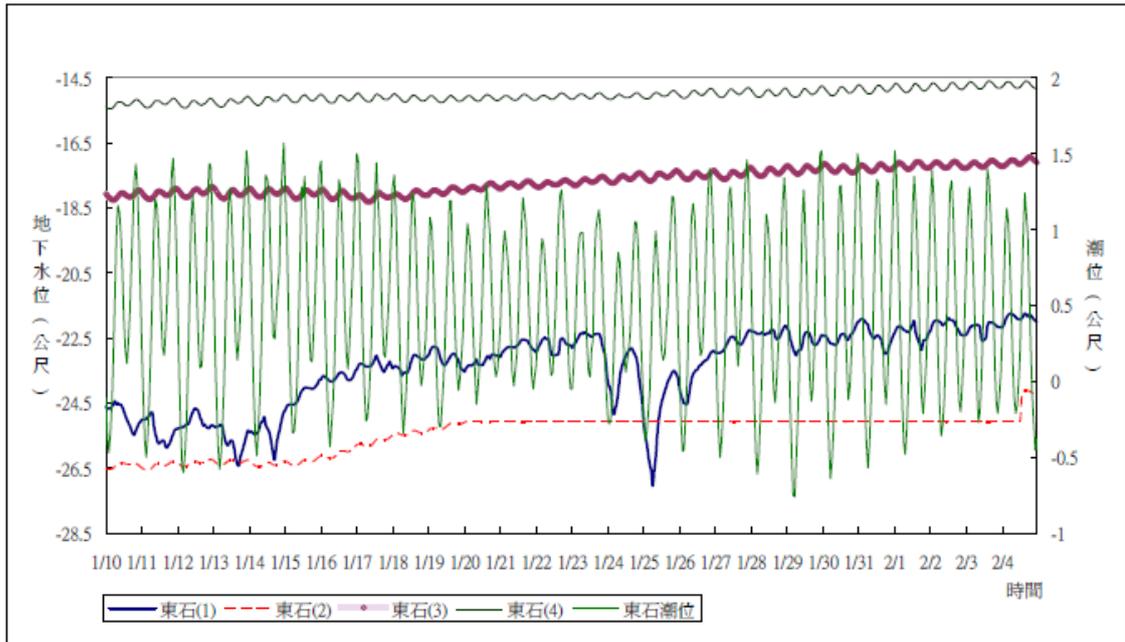


圖2.2.2-7 東石站地下水位變化與潮汐變化關係歷線圖
(林宛蓉等人(1988))

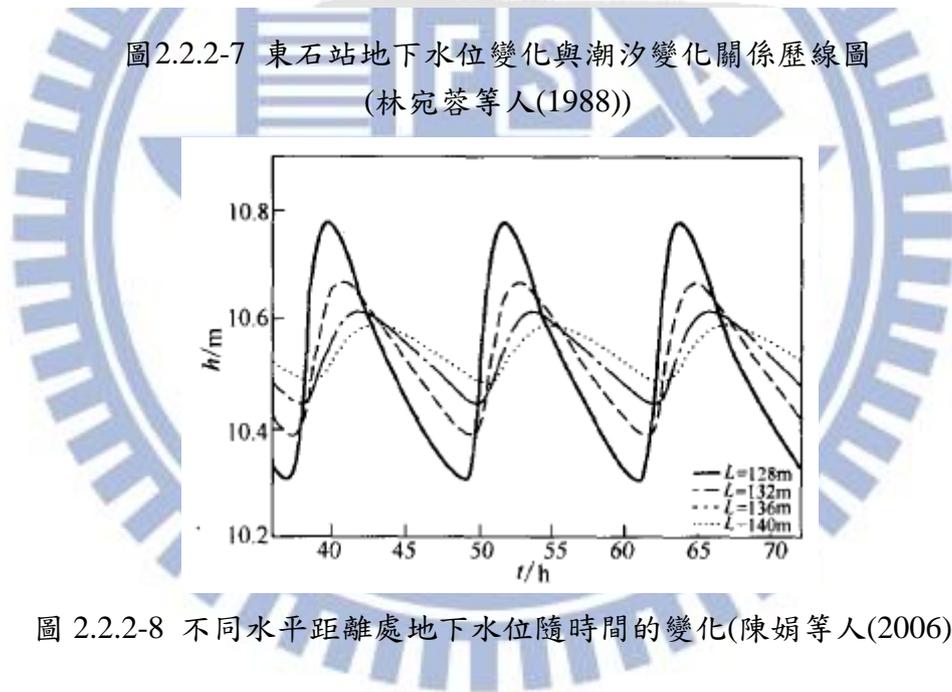


圖 2.2.2-8 不同水平距離處地下水位隨時間的變化(陳娟等人(2006))



圖2.2.2-9 最低潮地下水位及水流趨勢(施清芳等人(2012))

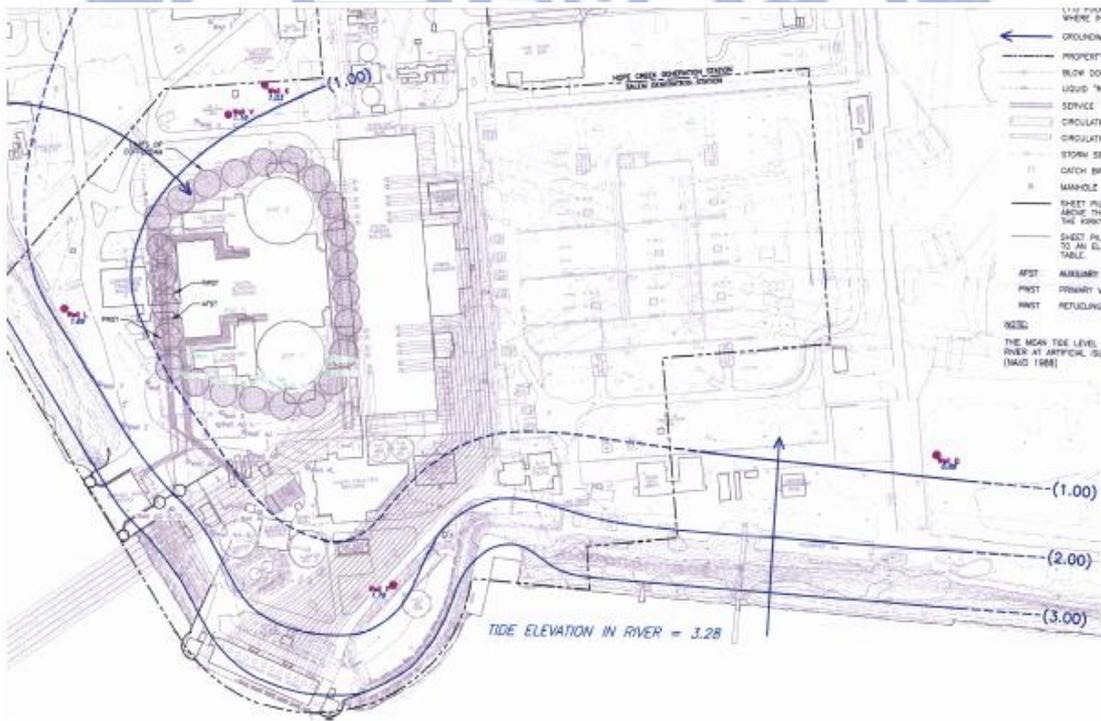


圖2.2.2-10 最高潮地下水位及水流趨勢(施清芳等人(2012))



圖2.2.2-11 間高潮地下水位及水流趨勢(施清芳等人(2012))

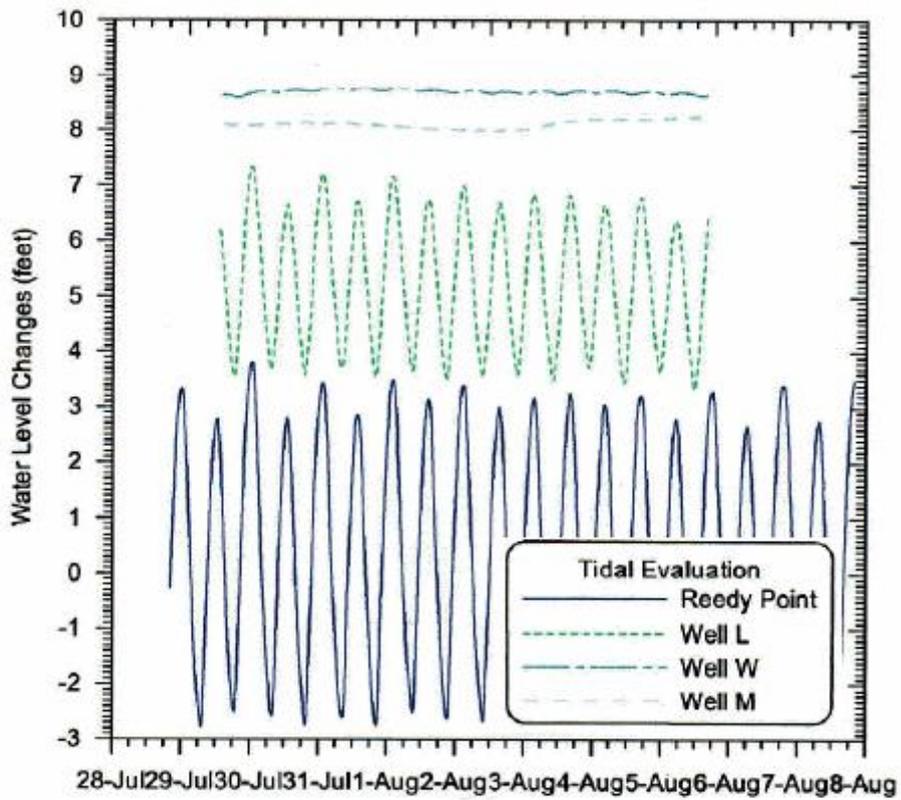


圖2.2.2-12 不同含水層水位受潮汐影響之比較(施清芳等人(2012))

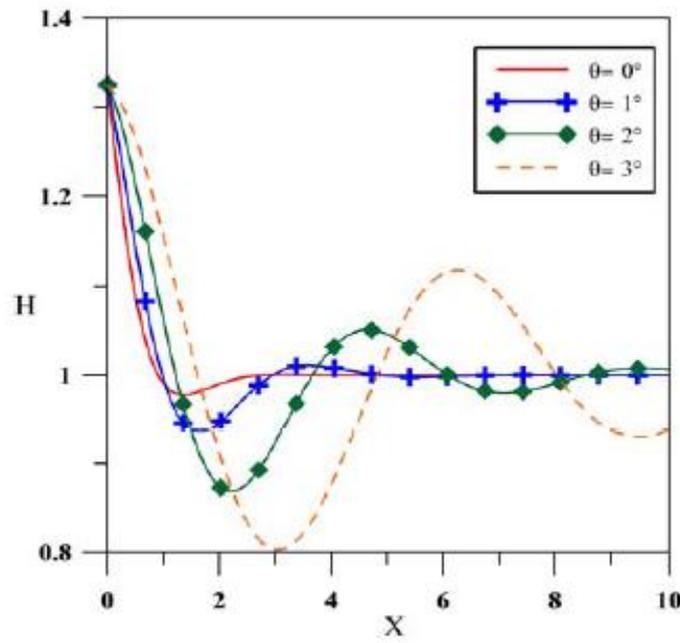


圖2.2.2-13不同傾角($0^{\circ}\sim 3^{\circ}$)時受潮汐影響之水位變化($T=0$)
(徐筱婷等人(2013))

表 2.2.2-1 地下水超高試驗主要參數及結果(吳龍華等人(2009))

組次	潮汐振幅/cm		潮汐頻率/($\text{rad}\cdot\text{min}^{-1}$)		H_0/cm	H_{max}/cm	H_{max}/H_0	$H_{\text{max}}/(A_1 + A_2)$
	A_1	A_2	ω_1	ω_2				
1	5.0	10.0	0.1396	0.1047	85.0	5.967	7.02	39.78
2	6.0	9.0	0.1396	0.1047	85.0	6.020	7.08	40.13
3	7.5	7.5	0.1396	0.1047	85.0	5.996	7.05	39.97
4	10.0	5.0	0.1396	0.1047	85.0	5.955	7.01	39.70
5	11.0	5.5	0.1396	0.1047	93.5	6.747	7.22	40.89
6	9.0	4.5	0.1396	0.1047	76.5	6.118	8.00	45.32
7	8.0	4.0	0.1396	0.1047	68.0	4.786	7.04	39.88
8	8.5	4.3	0.2094	0.1571	77.2	6.313	8.18	49.32
9	9.5	4.7	0.1396	0.1047	75.8	7.194	9.49	47.33
10	10.5	5.3	0.1396	0.1047	94.2	6.260	6.65	39.62

2.2.3 潮汐對流場流速的影響

潮汐對於地下水區域流場的影響大致可以分為受壓和非受壓含水層來進行討論。在受壓含水層的情況時 Smith(1994)以現地監測資料進行分析，研究結果發現在受壓含水層時，潮汐的影響下讓含水層中的地下水位產生類似推力(高潮時)和拉力(低潮時)的現象，以此把受壓含水層視為彈性自由體。而 Pecchioli and Ding(2009)利用一維的數值軟體研究出潮汐對於水力坡降會有明顯的影響效果，影響範圍大約為 200-300 m，影響範圍比非受壓含水層時還要廣。

而在非受壓含水層的情況時，Smith(1994)認為潮汐作用時水位的高低變動會因為水在孔隙中的排出以及再回飽和導致水位上升時產生遲滯現象。潮汐變動的作用下會使得地下水位變動，特別是靠近海岸面時，但是它沒有辦法有效地去影響地下水流方向。Pecchioli and Ding(2009)認為非受壓含水層時影響範圍約在 40-60 m，潮汐的幅度越高其影響的效應也會隨之加深。

Licata(2008)認為考慮到潮汐變化的沿岸區域不只相當複雜也相當耗費時間，因此利用二維方程式去模擬出暫態的模型的流速結果，去推估並率定表面延散度，最後利用率定完成的結果建構出穩態模型，藉此去取代複雜且耗時間的潮汐模擬。但是這種觀念會被限制在二維的情況，當程式發展到三維時，邏輯上，下一步應該要應用暫態延散的概念建立模型。

2.2.4 潮汐對流場傳輸的影響

Ataie-Ashtiani et al.(2002)利用二維數值軟體模擬出污染物在潮汐的作用下其影響範圍大約為 100 m，分析出污染物在上游（離海岸線約 150 m）的時候不會有太大的變化，但在海岸出口處時潮汐對於污染物的變化影響很大，其影響範圍大約為 100 m。此外潮汐對於污染物的稀釋效果非常小，有潮汐變化時的結果比起沒有潮汐變化時濃度少了 2%。

而 Pecchioli and Yuan Ding(2009)使用一維的數值軟體，針對海岸區域做研究，研究出當含水層為非受壓含水層時，潛在的影響範圍大約在 60 m，而在受壓含水層時中其污染物質受到的影響遠小於非受壓含水層的情況。此外在非受壓含水層時，如果其中還結合了低水流速、適當範圍的潮汐幅度以及吸附因子，這時潮汐作用將有顯著的效果。

Yim and Mohsen(1992)則是利用一維的數值軟體模擬，在敏感度分析中證明出當潮汐在相對較高的平流和延散度時會使得污染物質移動速度加快。如果污染物質不在潮汐和地下水交界面時，潮汐的變動將不會影響到污染物質的傳輸，直到當下的區域水流將它帶到潮汐的影響範圍中。此外不論有沒有潮汐的存在，當水力坡降較大時污染物質移動速度將會加快，當水力坡降增加到一定程度時，潮汐的影響效果將大幅減弱。此外由圖 2.2.4-1 和圖 2.2.4-2 的出口面來看，當有潮汐變化時其污染物質濃度明顯比沒有潮汐時來的低，這也反映出當有潮汐的情況時稀釋的效果將會明顯增加。在研究中也指出潮汐對於深層的影響明顯高於淺層中的

影響(如圖 2.2.4-3)可以觀察出隨著含水層的深度(B)增加讓污染物的濃度逐漸的減少。

Elfeki(2006)以二維的數值模擬和分析結果反映出儲水係數、輸水率、潮汐的變動週期(period of fluctuations)都是影響因子，潮汐的振幅較大時對於污染物質傳輸能夠產生有效的影響，相對幅度較小時整體較接近於穩定狀態；如圖 2.2.4-4 可以看到當儲水係數較小的時，污染物質在穩態趨勢上變化，當儲水係數較大時污染質會因為遲滯的現象而產生較慢的地下水流速；圖 2.2.4-5 為在不同的平均水力梯度下(三種不同的變動週期 ± 1 m， ± 3 m， ± 20 m)縱向以及橫向延散係數之變化狀況。

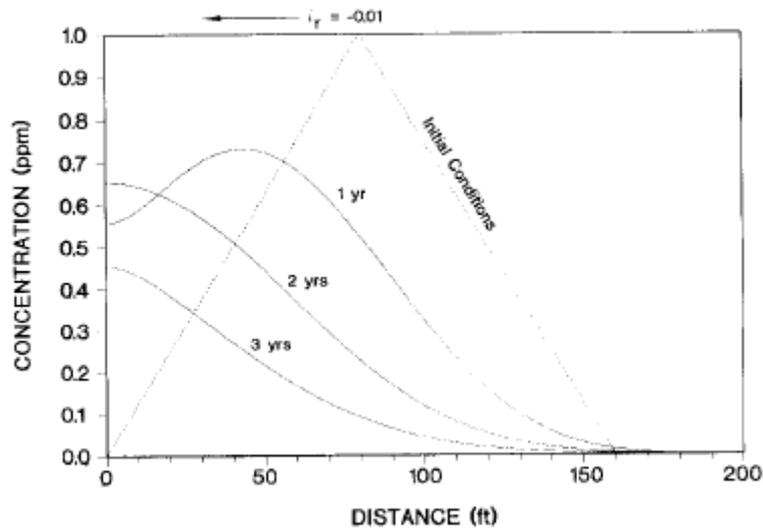


圖 2.2.4-1 沒有潮汐時的污染濃度變化(Yim and Mohsen(1992))

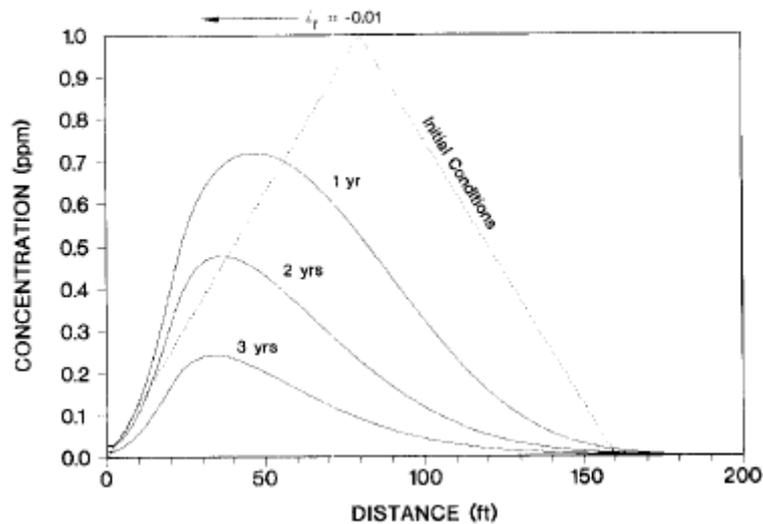


圖 2.2.4-2 有潮汐變化時的濃度變化(Yim and Mohsen(1992))

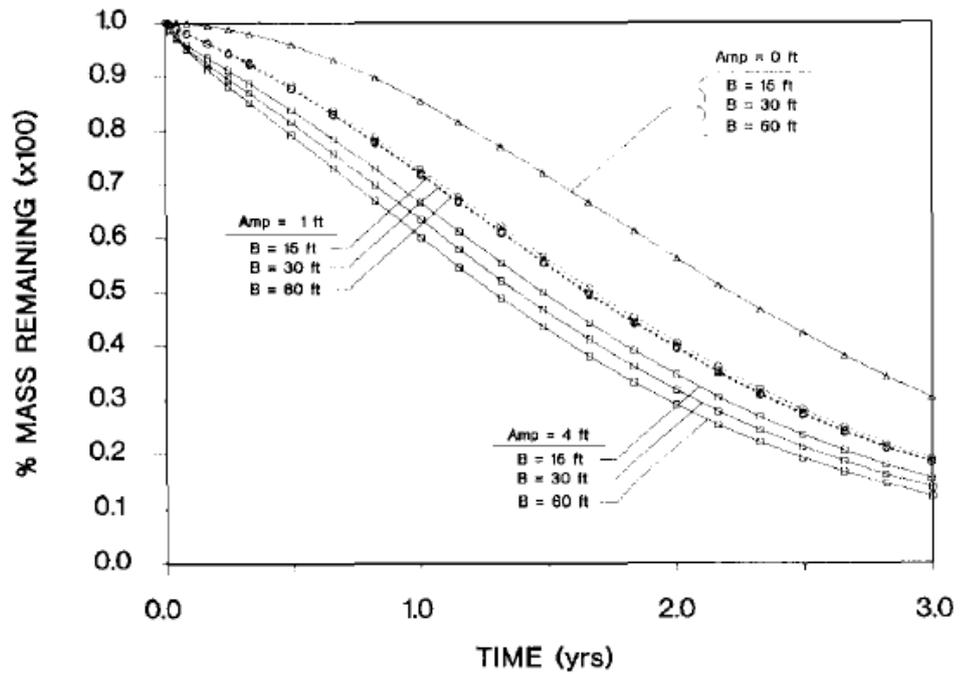


圖 2.2.4-3 不同的含水層的位置污染濃度的變化(Yim and Mohsen(1992))

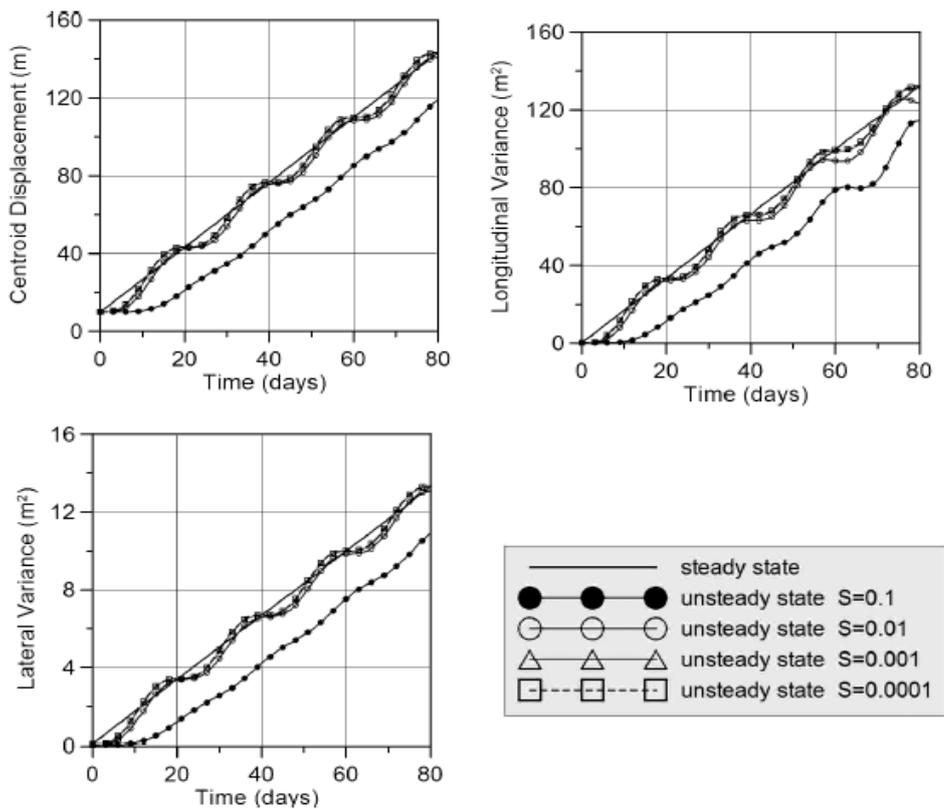


圖 2.2.4-4 污染物質在不同儲水係數下的空間變化(Elfeki(2006))

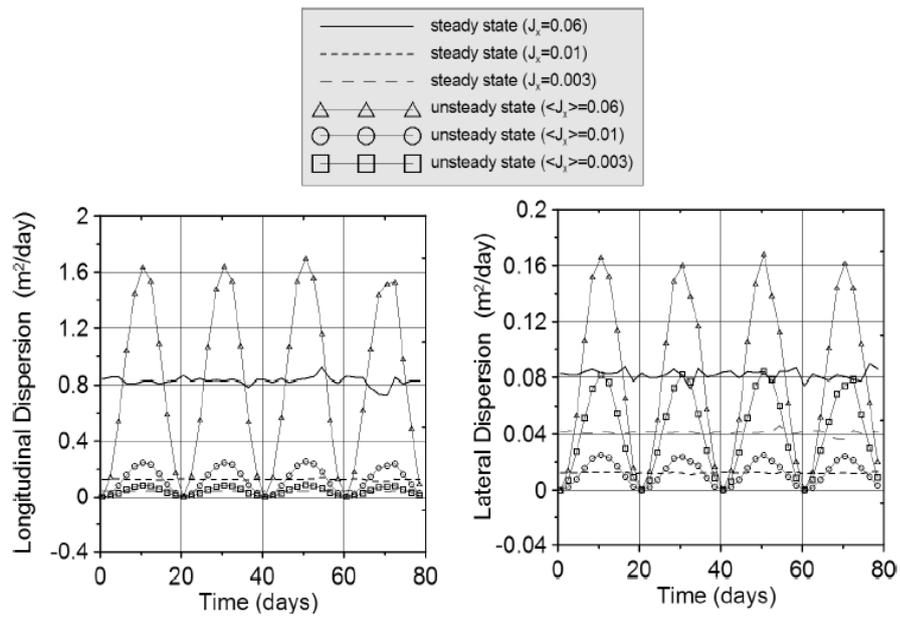


圖 2.2.4-5 污染物質在不同平均水力梯度的情境下變化情況(Elfeki(2006))



2.2.5 海岸區域邊界條件之設定

沿岸區域邊界條件的設定有很多種的方式，但是該如何呈現出符合現地情況的設定卻並非易事。以下為各個學者所提出相關研究之原理及特性，而表 2.2.5-1 為各研究設定條件的比較結果。

Yim and Mohsen(1992)利用一維的方程式以及均質、等向的受壓含水層進行模擬，在研究中主要希望模擬結果能夠類似於真實的情境，所以在邊界的設定上除了考慮到含水層的物理性質外，還包含了儲水係數(storativity)、流通係數(transmissivity)等等。其中在邊界條件裡所給定的 h_0 必須小於飽和含水層厚度，當受壓含水層改變為非受壓含水層時，儲水係數將變為比出水量(specific yield)。

潮汐的邊界條件：

$$h_t = h_0 e^{-x\beta} \sin \left[\frac{2\pi t}{t} - x\beta \right] \quad (2.1)$$

$$\beta = \sqrt{(\pi S)/(tT)} \quad (2.2)$$

$$T = KB \quad (2.3)$$

h_0 ：潮汐變動的幅度

x ：平均水位面上升或下降之距離

t ：潮汐的全週期

β ：含水層的物理性質

S ：儲水係數

T ：流通係數

K ：傳導係數

B ：含水層厚度

Ataie-Ashtiani et al.(2002)認為在沿海區域情境裡要考慮到的因素過於複雜，因此在模型上以較簡易的場址條件進行模擬，而在潮汐設定上也以規律的正弦波來進行設定，藉此能夠不被其它因素所干擾，單純的探討污染物和潮汐之間的關係。

潮汐邊界的設定：

$$h_t = h_0 \sin(0.5t) \quad (2.4)$$

Elfeki(2006)利用二維方程式進行模擬，在模型上的設定是利用均質、等向的受壓含水層作為模擬，模型的設定上較簡易，主要是因為希望可以藉由單純的水頭變化，而再去考量到不同的儲水係數、潮汐的變動週期(period of fluctuations)等等因素下，能夠更清楚判別模擬中的情況。

潮汐邊界的設定：

$$h_t = h_0 \cos(\omega t) \quad (2.5)$$

Licata(2008)利用二維方程式以穩態水流模型配合不同的縱向和橫向之延散度來呈現出潮汐水流變化，希望可以藉此減少程式輸出的時間；而在模擬的過程中先建立出暫態的潮汐水流模型當參考模型，因此在潮汐的邊界設定上是以較簡單規律的方式來進行，不再考慮其他因素。

潮汐邊界的設定：

$$h_t = h_0 \sin \omega t \quad (2.6)$$

Pecchioli and Ding(2009)認為海岸區域中要考慮到降雨、流速、潮汐、海水入侵、波浪等等的因素，如果要將全部都一起納入考量則問題過於龐大，超過當時所能理解的範圍；因此在研究中將大部份的因素都忽略掉，只關注於潮汐的變動，希望可以單純的探討污染物質在潮汐下變化情況。

潮汐邊界的設定：

$$h_t = h_0 \sin \omega t \quad (2.7)$$

表 2.2.5-1 潮汐邊界設定的比較結果

學者	優點	限制	備註
Yim and Mohsen(1992)	利用正弦波的週期進行變化，週期波動不會被侷限在某一範圍變化內，而且其中也考慮到了含水層的物理性質、儲水係數、流通係數等等，更貼近現地的真實情況。	不論在程式模擬計算時間上，以及分析的過程中都需要去考慮到很多不同的因素，對於時間耗費上會因為考慮的因素更多更複雜而相對的越久。	深處的含水層受潮汐影響較淺層的大；若導水度設定太小則潮汐影響不大，但如果導水度相對設定太大將導致潮汐的效果不明顯。
Ataie-Ashtiani et al.(2002)	在程式的模擬計算上簡單、直接，因此模擬的時間較短；而在頻率上因為是使用正、餘弦波的方式，因此呈現出波動週期較為規律，當需要加入其他的影響因素時，分析過程中不會太過於複雜。	在現地的情況下因為季節、雨量等等因素影響下，潮汐變化會隨著時間不同而產生波動增減；如果直接將正弦波、餘弦波的週期直接進行設定，將無法和現地的情況相吻合。	假設受潮汐影響的地下水水位為不受污染的新鮮水，具有相同的密度。
Elfeki(2006)			
Licata(2008)			
Pecchioli and Ding(2009)			潮汐在低水流速、適當範圍的潮汐幅度以及吸附因子時將有顯著的效果。

第三章 研究方法

本研究以經濟部中港加工出口區作為模擬對象，模擬主要分為有潮汐以及沒有潮汐的變化，而污染源的位置設定在九個位置不同的位置，藉此觀察再潮汐影響下各個位置的濃度變化。最後以敏感度分析分別放大和縮小導水度，藉此了解潮汐與水文地質參數彼此之間對污染物傳輸的影響。

3.1 使用模式的簡介

本研究使用 Visual MODFLOW 軟體，涵蓋了地下水流模式 MODFLOW 和 MODPATH，污染傳輸模式 MOC3D、MT3D、MT3DMS、RT3D 的功能，可模擬現場的水流狀況與污染物傳輸現象。Visual MODFLOW 係以圖形界面作為資料之輸出、輸入及轉移，並提供了完善之介面工具，親和力極高，並可完全配合 PC Window 操作，且可以二維和三維之方式呈現結果。

3.1.1 地下水流數值模式

本研究選定以美國地質調查所(USGS)所研發之MODFLOW為地下水流模擬程式(McDonald and Harbaugh, 1988)，MODFLOW該程式可解二維及三維之飽和層地下水流問題，含水層之種類可為自由、受壓、半受壓含水層，依地質特性分類可為均質、非均質及等向性、非等向性含水層。並可搭配RT3D、MT3D、MT3DMS 及MOC3D 等水質模式，進行水質傳輸模擬。MODFLOW 核心所考量之，三維飽和地下水流可以下列之偏微分方程式來表示：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

式中： K_{xx} 、 K_{yy} 、 K_{zz} ：沿主軸X、Y、Z方向的導水度

h ：壓力水頭

W ：單位體積的體積流率(Volumetric Flux)，代表源匯項(Sources/Sinks)

S_s ：孔隙介質的比儲水量

t ：時間

MODFLOW 程式乃利用有限差分法(Finite Difference Approach)解水流控制方程式，並採用格塊中心法的方式(Block Centered)。上述控制方程式公式，經有限差分法作離散化後求得其數值方程式，再結合含水層系統之邊界條件及起始條件等資訊，則可解此一地下水流場問題。研究流程為建立一穩態地下水流數值模式，以模擬假設場址及周圍之地下水流況，並在此穩態地下水流況條件下，模擬溶質之傳輸。

3.1.2 污染傳輸模式

MT3DMS 污染傳輸模式 (Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model, 簡稱 MT3DMS) 為接續 MODFLOW 地下水流模式, 而發展而出的三維污染傳輸模式 (Zhang, 1991), 用來模擬污染物質在地下水流系統的移動。其基本假設乃基於污染濃度變化, 並不影響地下水流場。在地下水流模式模擬結果輸出後, 配合污染傳輸控制方程式之對流、擴散、簡單的化學衰變項和不同邊界條件等, 進而求解出污染空間濃度分佈值。

MT3DMS 污染傳輸模式其採取的資料輸入架構類似於 MODFLOW 模式, 更將使熟悉 MODFLOW 的模式架構的易於操作, 此模式之污染傳輸控制方程式如下式。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s + \sum_{k=1}^N R_k$$

式中: C: 污染濃度 (Concentration)

T: 時間 (time)

D_{ij} : 延散係數 (Dispersion Coefficient)

v_i : 地下水流速度 (Seepage Velocity)

q_s : 流通量 (Volumetric Flux per unit Volume)

θ : 孔隙率 (Porosity)

C_s : 源匯流之濃度 (Concentration of Sources)

$\sum_{k=1}^N R_k$: 化學衰變項 (Chemical Reaction Term)

3.3 園區資料蒐集及建立

中港園區總開發面積為 177 公頃，至 102 年 11 月止，其中廠房用地約為 123.77 公頃，目的事業機構用地為 0.5 公頃。由於中港園區是屬於綜合型形式，因此區內可以容納的產業類別相當的多（表 3.3-1），產業分別包含食品製造業、飲料製造業、成衣及服飾品製造業、木竹製品製造業、紙漿(紙)及紙製品製造業、刷及資料儲存媒體複製業、化學材料製造業、化學製品製造業、藥品製造業、橡膠製品製造業、塑膠製品製造業、非金屬礦物製品製造業、基本金屬製造業、金屬製品製造業、電子零組件製造業、電腦與電子產品及光學製品製造業、電力設備製造業、機械設備製造業、產業用機械設備維修及安裝業、汽車及其零件製造業、其他運輸工具製造業、批發業、陸上運輸業、倉儲業等相關產業。(經濟部，2013)

經濟部執行之 101~102 年度中港加工出口區土壤及地下水品質監測暨地下環境特徵概念模型建立計畫中，運用環保署「毒性化學物質許可管理系統」(簡稱毒管系統或毒管資料庫)及「空水廢毒管理資訊系統」(簡稱 EMS)等資料庫，查詢可能造成園區內土壤重金屬及其他土水污染衝擊之業別工廠、工廠業別、原物料及添加關切物質、主要產品或副產品及可能關切污染物(包含毒化物與土水污染管制項目)之製程運作基本資料，中港園區內營運中且 EMS 或毒管資料庫中可查詢到相關資料之工廠，故本計畫共進行 16 間廠商之現勘訪談作業，其製程運作基本資料彙整如表 3.3-2 和表 3.3-3 所示，具有高污染潛工廠類型說明如下：(經濟部，2013)

1. 含氯有機溶劑污染類型工廠：今國光學工業主要從事玻璃鏡片加工製程使用三氯乙烯、二氯甲烷清洗光學鏡片表面，三氯乙烯已於 100 年 9 月全停止使用。
2. 重金屬及有機物污染類型工廠：有三櫻企業、元亨泰水轉印及友達晶材等。三櫻企業主要製造軟性基層包裝膠膜紙，其製程包括電鍍印刷、塗膠、裁切及製袋，其中電鍍印刷製程使用三氧化鉻、銅合金、硫酸鎳及甲苯等原料，具重金屬及揮發性有機物污染潛勢。元亨泰水轉印為從事凹版印作業，使用大量有機溶劑，其製程區及原物料堆放區具有污染潛勢。友達晶材為太陽能矽晶片工廠，製程流程包括長晶、切片及清洗，其中切片及清洗製程會產生高濃度有機廢液。
3. 重金屬及油品污染類型工廠：有宇隆科技主要從事光學鏡筒及汽車五金零件製造，原物料使用鐵、鋁及黃銅等重金屬，並使用多項油品，不排除清洗物件時可能不慎外溢，具重金屬及油品類污染潛勢。佶鑫瑛瑯主要製程為金屬噴砂處理，除重金屬污染潛勢外，廠內使用重油作為鍋爐燃料，重油儲槽區及鍋爐區為油品污染潛勢之重點區域。華新麗華公司主要為生產不銹鋼捲，除了可能於製程部分造成重金屬污染外，使用之冷軋油、酸儲槽區、污泥存放區及廢水處理設施亦為高污染潛勢區域。

表 3.3-1 中港園區廠商類別統計表(經濟部，2013)

產業類別	家數	所佔比例
食品製造業	3	4.23 %
飲料製造業	1	1.41 %
成衣及服飾品製造業	1	1.41 %
木竹製品製造業	2	2.82 %
印刷及資料儲存媒體複製業	3	4.23 %
化學材料製造業	9	12.68 %
化學製品製造業	1	1.41 %
藥品製造業	1	1.41 %
橡膠製品製造業	2	2.82 %
塑膠製品製造業	7	9.86 %
非金屬礦物製品製造業	4	5.63 %
金屬製品製造業	8	11.27 %
電子零組件製造業	8	11.27 %
電腦、電子產品及光學製品製造業	2	2.82 %
機械設備製造業	6	8.45 %
汽車及其零件製造業	1	1.41 %
其他製造業	3	4.23 %
批發業	5	7.04 %
倉儲業	2	2.82 %
關連性產業服務業	2	2.82 %

表 3.3-2 可能造成園區內土壤重金屬及其他土水污染衝擊之業別工廠、污染物(經濟部，2013)

項次	工廠名稱	行業別	原物料	可能污染物
1	三櫻企業股份有限公司中港分公司	塑膠製品製造業化學材料製造業印刷及資料儲存媒體複製業	甲苯、異丙醇、丁酮、甲醇、乙酸乙酯、三氧化鉻、硫酸鎳、顯影液(含硝酸銀)、銅球、氫氧化鈉、亞硫酸鈉、聚氯化鋁、潤滑油、硫酸、鹽酸、木材、鐵合金、塑膠材、油墨、硬化劑、接著劑	三氧化鉻(鉻酸)、銅、硫酸鎳、甲苯及油品
2	宇隆科技股份有限公司	機械設備製造業金屬製品製造業	水性切削液、錠子油、軌道潤滑油、防銹油、去漆劑、不銹鋼錠、鋁合金錠、黃銅、鐵合金	銅、鐵、油品
3	今國光學工業股份有限公司中港分公司	電子零件組件製造業	苯、乙二醇乙醚、二氯甲烷、三氯乙烯、異丙醇、潤滑油、氯氣、聚酯粒、研磨液、洗淨劑、硫酸、氫氧化鈉	二氯甲烷、三氯乙烯(已停用)
4	元亨泰水轉印公司	印刷及資料儲存媒體複製業	聚乙烯醇、聚酯粒、有色油性塗料、非有害有機廢液或廢溶劑再利用	有機溶劑
5	維勝特企業股份有限公司	金屬製品製造業	向上劑、淬火油、防銹油、甲醇、粉體塗料(漆料)、皮膜劑、脫脂劑、有色油性塗料、香蕉水、花園五金工具、氫氧化鈉、高分子聚合物、聚氯化鋁	油品、香蕉水(含甲苯)
6	佶鑫瑛瑯股份有限公司	金屬製品製造業	4~6號重油、濃硫酸、硫酸鎳、碳酸鈉、亞硝酸鈉、脫脂劑、釉料、鑄鐵、鋼珠、鐵板、氫氧化鈉、高分子聚合物、聚氯化鋁	鎳、鐵及油品
7	友達晶材股份有限公司中港廠	電子零件組件製造業	二氧化矽、氫氟酸、冰醋酸、氫氧化鉀、鹽酸	有機溶劑
8	大發管材工業股份有限公司中港分公司	塑膠製品製造業	塑膠粒、氯化聚氯乙烯、聚氯乙烯、塑膠粉	--

表 3.3-3 可能造成園區內土壤重金屬及其他土水污染衝擊之業別工廠、污染物(經濟部，2013)

項次	工廠名稱	行業別	原物料	可能污染物
9	理盛精密科技股份有限公司	化學材料製造業	碘甲烷、鎂、異戊醚、鎂礦、乙醚、丙酮、氧氣、磷、硝酸、過氧化氫、硫化氫、矽藻土料、氫氧化鈉	毒化物碘甲烷
10	群億彩藝股份有限公司	塑膠製品製造業 印刷及資料儲存媒體複製業	AL 鋁箔膜、PET 聚酯膜、LDPE 聚乙烯膜、BOPP 聚丙烯膜、CPP 聚丙烯膜、NY 尼龍膜、油墨、油壓稀釋劑、黏著劑-接著劑	有機溶劑
11	台灣特格股份有限公司	金屬製品製造業 電子零件組件製造業	酸化銻、二氧化錫、接著劑	銻
12	台灣精美科技股份有限公司	電子零件組件製造業	矽砂礦、鋁礦、丙酮、濺鍍用靶材、靶材用銅電極、接合材	銻
13	聯友科技股份有限公司	化學材料製造業其他製造業	三氟化硼	三氟化硼
14	盟鑫工業股份有限公司	紡織業	鄰苯二甲酸二異壬酯	鄰苯二甲酸二異壬酯
15	銀琪塑膠股份有限公司中港分公司	塑膠製品製造業	塑膠粒、氯化聚氯乙烯、聚氯乙烯、塑膠粉	廢溶劑
16	華新麗華股份有限公司	金屬表面處理業	鋼球、鋼珠、軋延油、硫酸鈉、濃硫酸、氫氟酸	重金屬、油品

3.4 模型的設定

3.4.1 網格的設定

台中港加工出口區面積大小約長 950 m，寬 1900 m，地下深度為 70 m。由現場監測井資料中能夠發現到場址附近有些微的水位變化，為了避免在設定內陸定水頭時會影響到場址內部的水流變化，因此加長場址的長度為 1900 m。

主要將場址切割成 X 軸 50 個網格、Y 軸 50 個網格，土層分為四層。此後依據污染物的入滲面積進行切割，呈現出 2.375 m×2.375 m 的網格，以此做為污染物入滲面。

3.4.2 水文地質相關參數

依據「101~102 年度中港加工出口區土壤及地下水品質監測暨地下環境特徵概念模型建立計畫」中在地下水監測井設置之工作項目時，針對鑽孔土壤進行採樣與質地分析，並於完井後進行微水試驗藉此測得導水度，鑽孔深度約 10 m，而由土壤分析結果顯示，監測井設置位置土壤組成大致為砂土（64.14%）、粉土（29.54%）、黏土（6.28%）及礫石（0.004%），完整的分析結果如下表 3.4.2-1。模擬情況中考量到的模擬參數分別在表 3.4.2-2 中呈現。（經濟部，2013）

表 3.4.2-1 現地土層分布

土層	土壤種類	深度	厚度	水平向導水度 m/day(m/s)	垂直向導水度 m/day(m/s) ⁽¹⁾
1	灰色沉泥質細砂，偶夾薄層黏土質砂	地表下 5.0~7.7 m	5~7.7 m	2.73(3.16×10 ⁻⁵)	0.546(6.32×10 ⁻⁶)
2	灰色砂質沉泥夾沉泥質砂層及薄層黏土	第一層底下至地表下 14.3~19.4 m	8.9~14.4 m	0.0273(3.16×10 ⁻⁷)	0.00546(6.32×10 ⁻⁸)
3	灰色沉泥質細砂、中細砂、偶夾薄層黏土及沉泥	第二層底下至地表下 45.8~49.0 m	30~31.5 m	0.273(3.16×10 ⁻⁶)	0.0546(6.32×10 ⁻⁷)
4	灰色黏土質沉泥，偶夾薄層砂質沉泥	第三層底下至地表下 51.05~51.15 m	2.1~5.4 m	0.00273(3.16×10 ⁻⁸)	0.000546(6.32×10 ⁻⁹)

註(1)：一般垂直方向的導水度約為水平方向的導水度約 1/5~1/100 間。垂直方向的導水度以上述資訊採用各層的 1/5 的值。(Noonan and Curtis(1990);Testa and Winegardner(1991);Nyer(1993);Domenico and Schwartz(1998))

表 3.4.2-2 使用之相關參數

水文地質參數	參考的相關文獻
縱向延散度(α_L)=5 m (本研究在一開始時先模擬較簡略的情境，然後以此推估大約的污染濃度最終的擴散範圍 x=50 m)	$\alpha_L=0.1x$ x：污染物模擬最終的擴散範圍 (Lallemand-Barres and Peaudecerf(1978))
橫向延散度(α_T)=1 m	α_L/α_T ：6~20 (Anderson (1979) , Klotz ea al.(1980))
比出水量(S_y)=0.2	Sand(fine)：0.28~0.1 (Johnson(1967))
比儲水率(S_s)= 10^{-5}	一般為 3.3×10^{-4} 或更小 (Jacob(1940) ; Cooper(1966))
總孔隙率(n_i)=0.3	Sand(fine)：0.25~0.53 (McWorter and Sunada(1977))
有效孔隙率(n_e)=0.15	Sand(fine)：0.01~0.46 (McWorter and Sunada(1977))

3.4.3 潮汐的設定

本研究中的潮汐資料由台中港務局中所取的，監測位置位於台中港北方坡堤堤頭150 m外，而資料取樣方式為每一小時中取出前6分鐘之水位變化，取樣頻率為1 Hz，然後加以平均得出該小時之平均水位值，經轉換後輸入電腦中，最後資料呈現為每小時輸出一筆水位資料，一年約呈現出八千多筆資料，潮汐變化的結果中隨著季節的改變影響不大。

再進行水頭輸入時，因為水位資料過於龐大(八千多筆)使得程式在讀取資料的過程中相當耗費時間，因此將潮汐資料進行縮減，將一天中的兩次的最高、最低潮分別取出，總共約 1410 筆資料，最後以平均海平面 70 m 作為基準面進行加減，下圖 3.4.3-1 為此加減後的呈現結果。

由上述的地理位置中能夠發現到中港園區的南、北側都有河川面，分別為梧棲大排和安良港大排，而兩側的河川面都會受到潮汐影響產生水位面的變化，如圖 3.4.3-2 所示，因此在模擬的設定上需要去加以考量到，其中因為潮汐向內陸的延伸會有水位變化的削減現象，所以在左右兩邊的邊界上除了考慮到原有內陸向海岸線的水力梯度之外，再疊加上潮汐由海岸線向內陸遞減的水位變化直到約 950 m 的位置時因渠低不透水而停止。設定的方式為先計算出潮汐由海岸線至內陸 950 m 中每一公尺潮汐大約的衰減值，接著和各個網格的大小作結合再依序進行水頭設定，其中還需要疊加上內陸至海岸線的水力梯度。

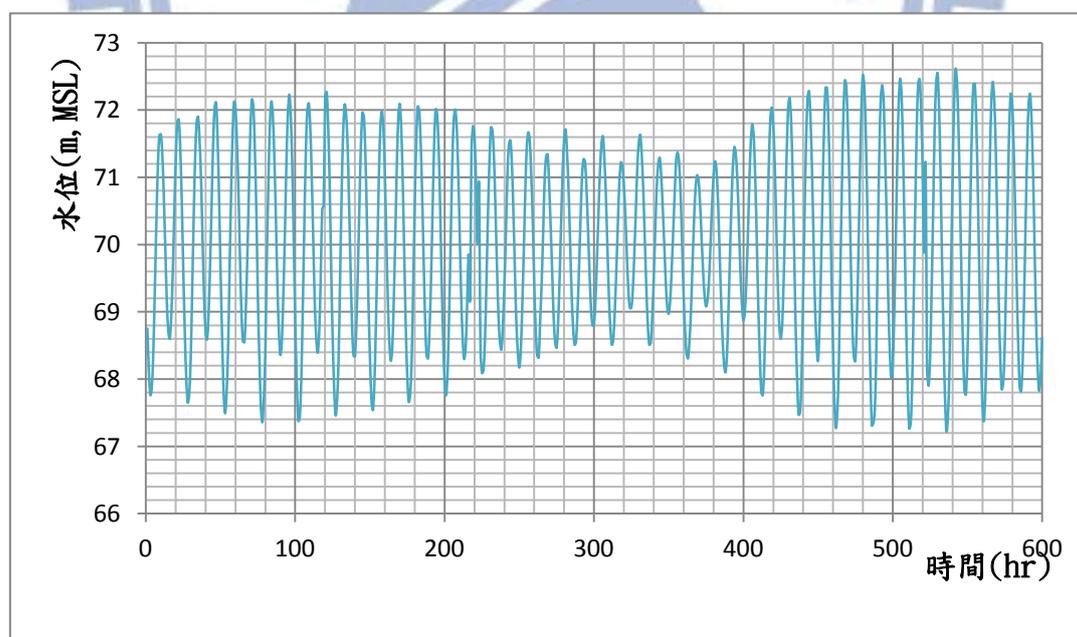


圖 3.4.3-1 潮汐變化圖

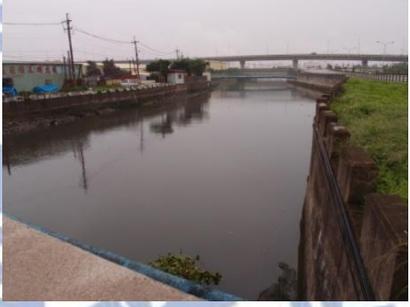
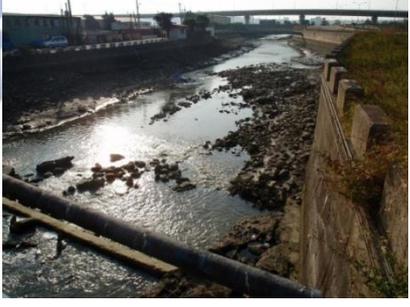
	
<p>梧棲大排 2013/3/15 16:05(平潮階段)</p>	<p>安良港大排 2013/3/15 15:58(平潮階段)</p>
	
<p>2013/5/3 15:50(平潮→高潮階段)</p>	<p>2013/5/3 15:44(平潮→高潮階段)</p>
	
<p>2013/8/9 16:02(平潮階段)</p>	<p>2013/8/9 15:48(平潮階段)</p>
	
<p>2013/10/31 15:19(低潮→平潮階段)</p>	<p>2013/10/31 15:26(低潮→平潮階段)</p>

圖 3.4.3-2 中港園區周邊排水系統(臨港路上拍攝)

3.4.4 潮汐和沒有潮汐時之模型建立

(1)沒有潮汐時的模型建立：地下水流梯度設定為 1.84×10^{-3} ，場址中海岸線邊界的設定(左端)為 70 m，內陸邊界設定(右端)為 73.5 m，上下河川面則不進行設定。地下水流方向由左向右。地下水流時間從一開始 0 至 18,736 小時(約 780 天)(參考圖 3.4.4-1)。

註：因為 Modflow 無法模擬非飽和層，所以將場址設定為全飽和的狀態，以此來模擬出污染物的分佈變化。

(2)有潮汐時之模型建立：初始邊界條件建立和上述穩定地下水流相同模擬至 10,000 小時(約 417 天)後，接著將海岸線邊界上(左端)輸入上述潮汐變化的設定。因為在現地中左右兩邊都有河川面，河川面也會受到潮汐影響而產生水位變化，因此在河川面也進行上述河川面的水頭設定直到 950 m 因渠底不透水而停止，海岸線和河岸面的潮汐變動時間由 10,000 小時至 18,736 小時(約 365 天)(參考圖 3.4.4-1)。

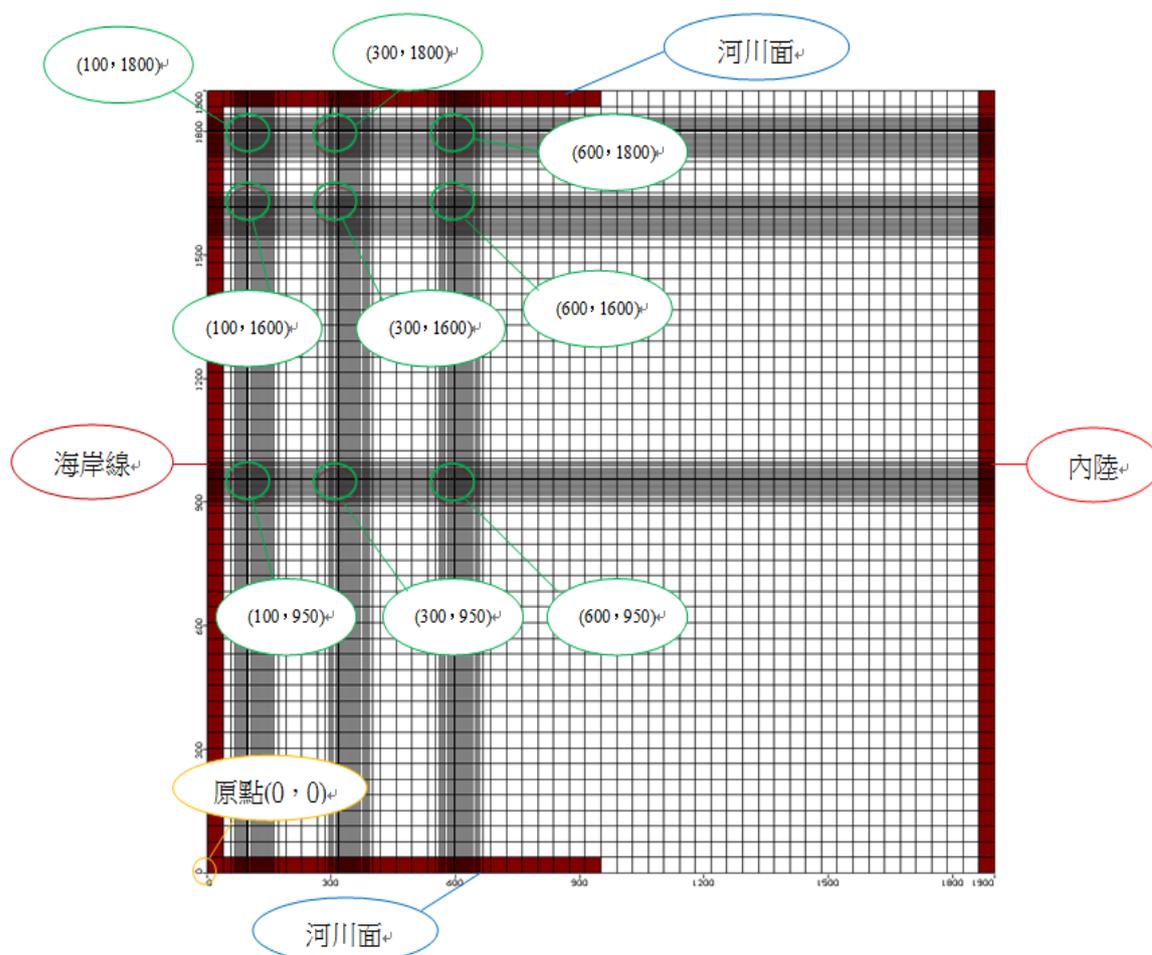


圖 3.4.4-1 模型邊界的設定

3.4.5 污染源的設定

在本研究中主要是要探討污染物受到潮汐作用下分佈的情形，沒有去指定污染物的性質。而在污染的設定上是假設污染源已經到達了地下水水位面以下，污染面積約為 2.375 m x 2.375 m，原點(0, 0) m 位置為最左下方，污染源位置如圖 3.4.4-1 分別在(100, 950) m、(300, 950) m、(600, 950) m、(100, 1600) m、(300, 1600) m、(600, 1600) m、(100, 1800) m、(300, 1800) m、(600, 1600) m，濃度設定為 5 ppm，傳輸時間從 10,000 小時開始直到 18,736 小時(365 天)；在模擬的過程中發現因為潮汐資料數據資料甚多，因此在以 MODFLOW 模擬時，程式讀取資料時會消耗非常久的時間，因此，直接一個檔案中設定九個不同位置的放入污染物質，以此來節省其他模擬時間。

3.5 敏感度分析

主要分為三種情境

Case 1 情境為基本設定的情況。

Case 2 情境是將導水度都放大五倍(變化後的數值如下表 3.5-1)，其他值不變。

Case 3 情境是將導水度都縮小五倍(變化後的數值如下表 3.5-1)，其他值不變。

表 3.5-1 三種情境之比較

土層(Case 1)	水平向導水度 m/day(m/s)	垂直向導水度 m/day(m/s)
1	2.73(3.16×10 ⁻⁵)	0.546(6.32×10 ⁻⁶)
2	0.0273(3.16×10 ⁻⁷)	0.00546(6.32×10 ⁻⁸)
3	0.273(3.16×10 ⁻⁶)	0.0546(6.32×10 ⁻⁷)
4	0.00273(3.16×10 ⁻⁸)	0.000546(6.32×10 ⁻⁹)
土層(Case 2)	水平向導水度 m/day(m/s)	垂直向導水度 m/day(m/s)
1	13.66(1.58×10 ⁻⁴)	2.73(3.16×10 ⁻⁵)
2	0.1366(1.58×10 ⁻⁶)	0.0273(3.16×10 ⁻⁷)
3	1.366(1.58×10 ⁻⁵)	0.273(3.16×10 ⁻⁶)
4	0.01366(1.58×10 ⁻⁷)	0.00273(3.16×10 ⁻⁸)
土層(Case 3)	水平向導水度 m/day(m/s)	垂直向導水度 m/day(m/s)
1	0.546(6.32×10 ⁻⁶)	0.1092(1.26×10 ⁻⁶)
2	0.00546(6.32×10 ⁻⁸)	0.001092(1.26×10 ⁻⁸)
3	0.0546(6.32×10 ⁻⁷)	0.01092(1.26×10 ⁻⁷)
4	0.000546(6.32×10 ⁻⁹)	0.0001092(1.26×10 ⁻⁹)

第四章 研究成果

依照模擬的結果主要分為三大部分說明，4-1 為原設定的情況模擬之結果；4-2 將導水度放大五倍，其他參數與設定值不變情境下的模擬結果；4-3 將導水度都縮小五倍，其他值不變狀況下的模擬結果。

本研究以編號來做為各個污染位置的座標(如下表 4-1 和圖 4-1)，圖 4-1 左端為海岸線，右端為內陸，上端則為河川面；各情境下的模擬的結果先以一年來呈現，濃度由 5 ppm 至 0.5 ppm 顯示，接著進行比較，將差異性較大的結果拿出來加以討論。進行比較時以半年到一年來呈現，其中包含上視圖和剖面圖。

表 4-1 編號和污染位置之座標

編號	污染源的座標
E-1	(100,1800) m
E-2	(300,1800) m
E-3	(600,1800) m
M-1	(100,1600) m
M-2	(300,1600) m
M-3	(600,1600) m
C-1	(100,950) m
C-2	(300,950) m
C-3	(600,950) m

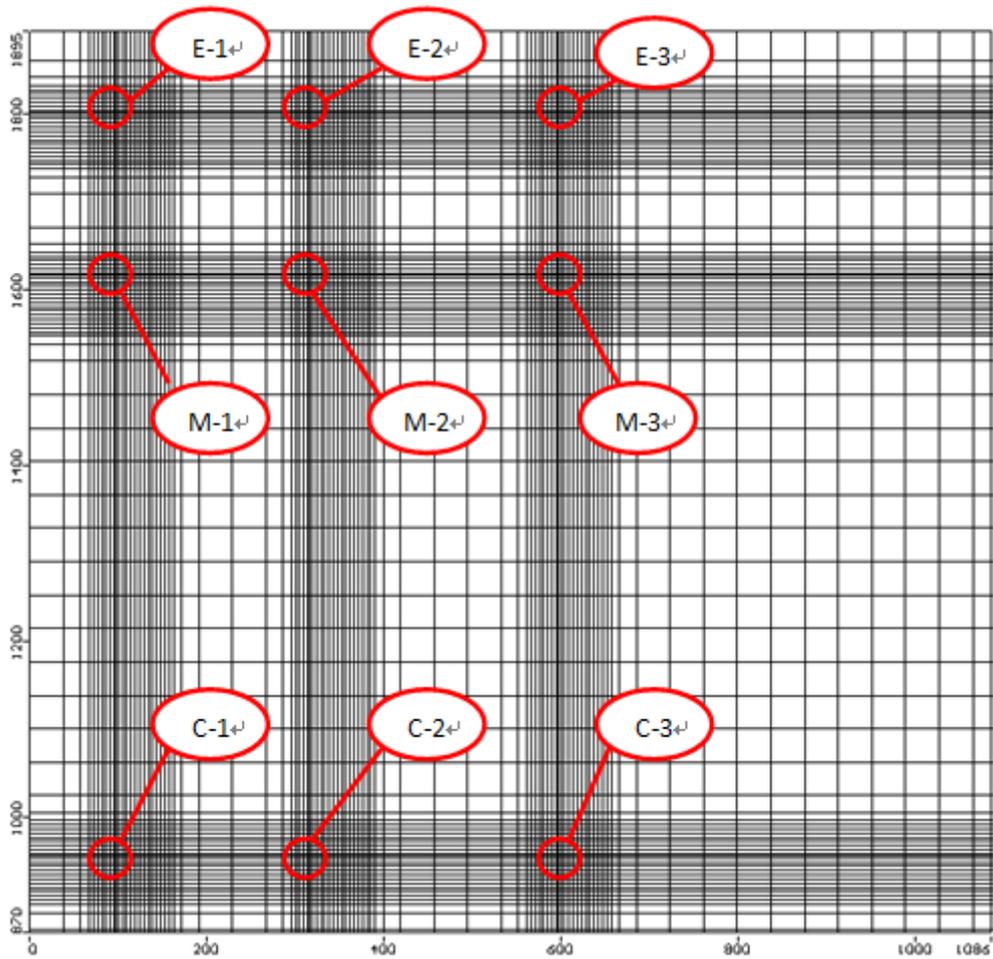


圖 4-1 編號和污染位置之座標

4.1 Case 1 基本潮汐設定

以下的 18 張圖(圖 4.1-1 和圖 4.1-2)為各個位置上一年模擬以後的結果, 污染團範圍以 0.5 ppm 做為最小濃度, 5 ppm 為最大濃度, 中間間隔以 0.5 來做區分, 在場址中因為水力梯度小(1.84×10^{-3})的關係使得流場中的流速相當慢(平均流速約 5.8×10^{-9} m/s), 因此在模擬的呈現中將會把 E-1、E-2、E-3、M-1、M-2、M-3、C-1、C-2、C-3 各個位置的污染分佈情況以半年和一年的模擬結果呈現出來。在各小節中將會以 E、M、C 三個位置分別進行討論, 最後全部綜合再一起進行討論。

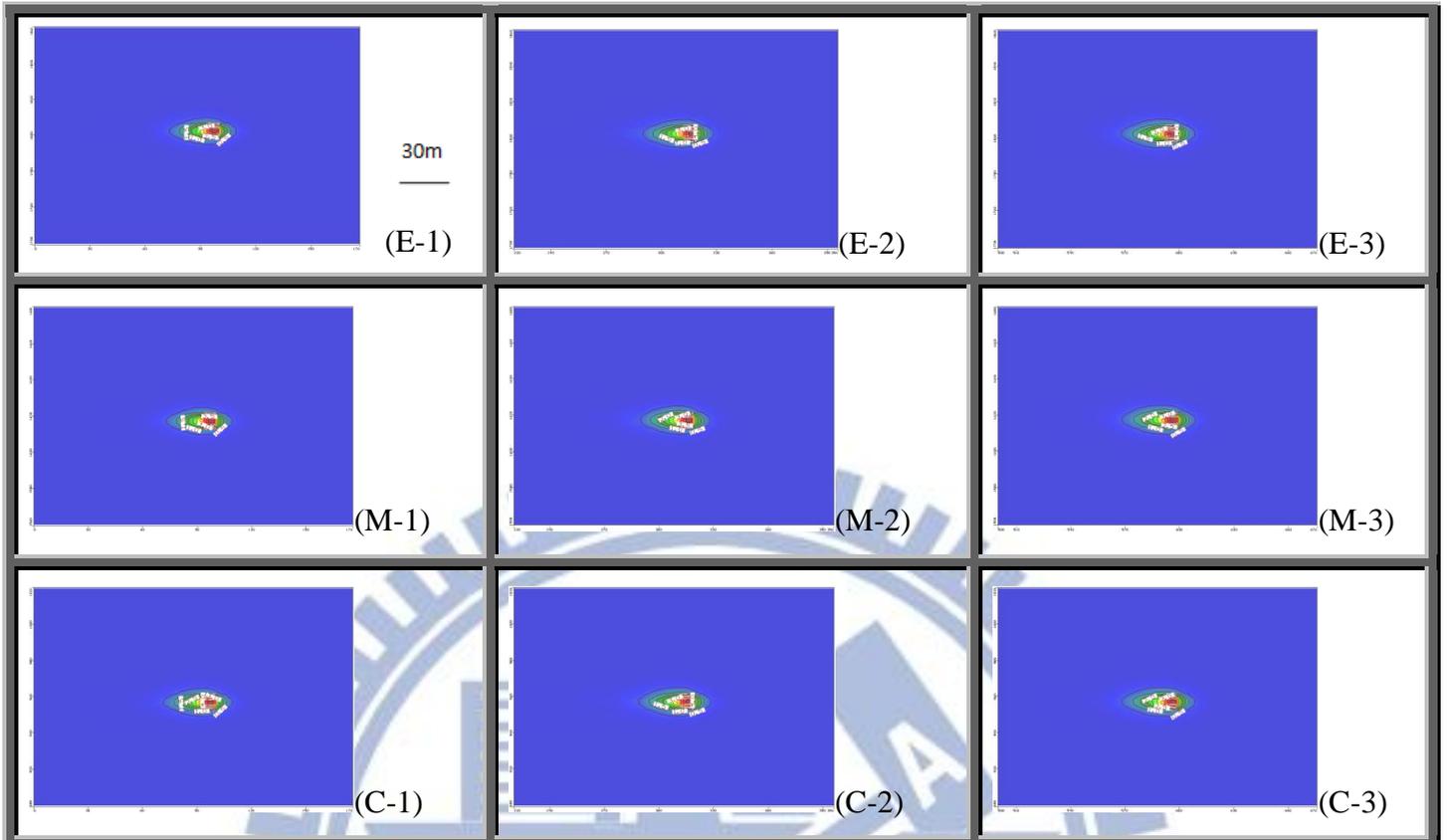


圖 4.1-1 無潮汐作用下污染團

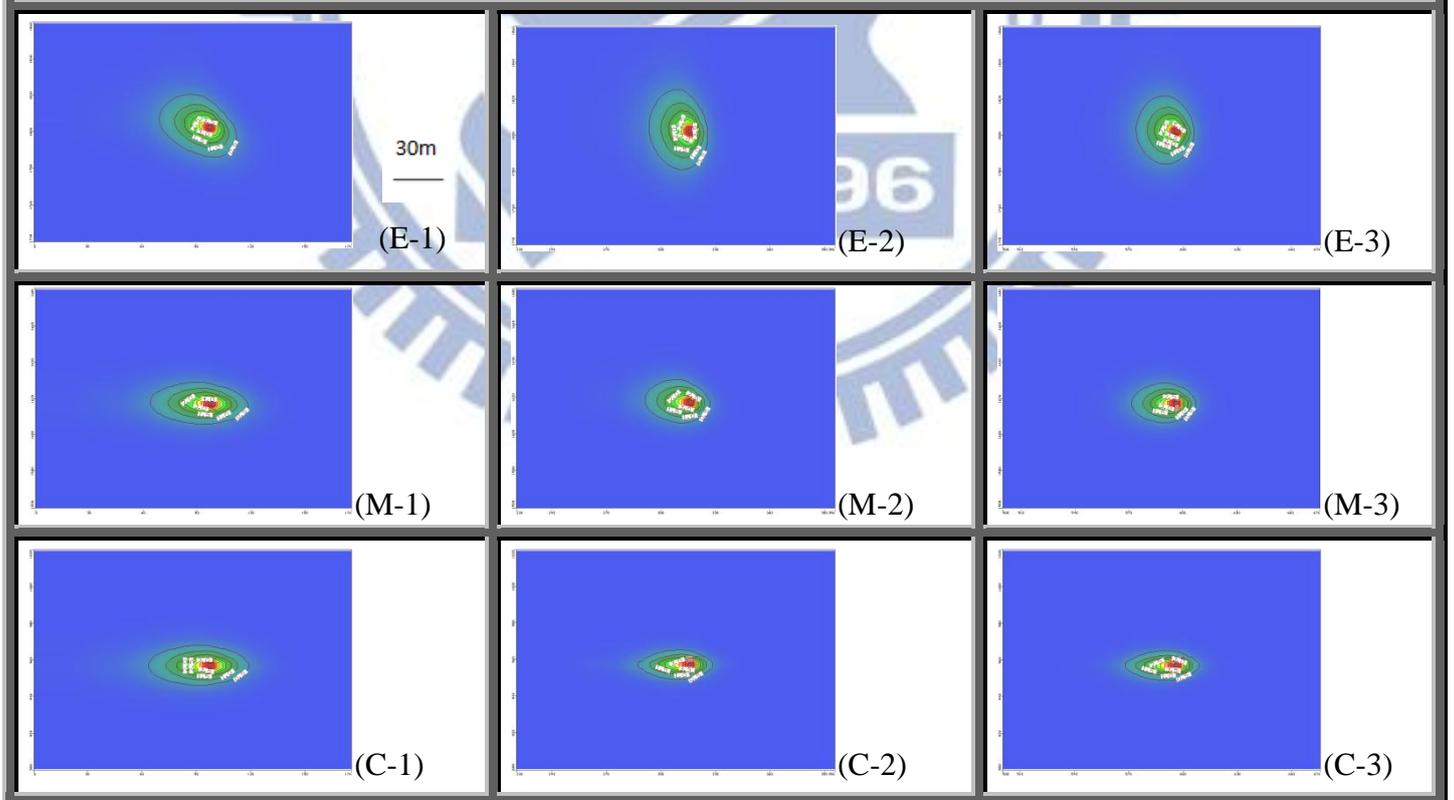


圖 4.1-2 潮汐作用下污染團

4.1.1 潮汐對於(E-1)、(E-2)、(E-3)影響比較

這三個位置都離河川面約 100 m，但離海岸線的距離分別為 100 m、300 m、600 m，由上視圖可以觀察出當無受到潮汐變化時，污染物由上游往下游擴散(左而右)的狀況。在表 4.1.1-1 中可以觀察出有潮汐的影響下只有(E-1)的污染團長度(x 軸)較無潮汐時大。這現象是因為海岸線潮汐變動幅度較河岸面潮汐變動大，所以當污染源離海岸線較近時，海岸線的潮汐影響比河岸面的潮汐影響大上許多，也間接的讓河岸面潮汐影響效果降低。表中(E-2)、(E-3)有潮汐時污染團長度都較無潮汐時小，這是因為離海岸線有一定的距離讓潮汐作用減弱，而讓河川面的潮汐作用影響加大，因此污染團有被河川面拉去的現象。

由表中可以觀察出(E-1)、(E-2)、(E-3)污染團寬度在受潮汐作用時會比無潮汐時大，這是因為有潮汐作用時河川面(上端)有設定變動水頭的緣故，使得流場能夠往河川面移動，因此受潮汐影響時之寬度都較無潮汐時大。而另一個因素為假設初始延散度時，設定數據為 x 方向，並非為水流方向，這樣的情境和真實情況是不同的，因為程式中的水流方向發生轉向，所以在程式中這樣的限制是有問題的，而這樣的假設中，也因為側向的機械延散增加，使得污染團的寬度變大了，這也是污染團寬度變大的影響因素之一。(E-2)和(E-3)因為污染源離海岸線距離遠，讓海岸線的潮汐影響效果降低，污染團也因為海岸線的潮汐影響減弱使得河川面的影響效果增強許多，因此在(E-2)、(E-3)的污染團寬度都較(E-1)大上許多。

在真實的情況下，因為排水路潮汐的變化，導致在高潮位時地下水梯度是由海岸線往內陸側流(如圖 4.1.1-1)，而低潮位時則往排水路徑流(如圖 4.1.1-2)，因此污染團的方向產生轉向的效果。在污染團長軸與 x 軸之夾角中(E-1)位置因為較靠近海岸線，而海岸線的潮汐影響比河川面大，讓污染團有被海岸線拉去的現象，最後呈現出較小的角度(36°)；在(E-2)和(E-3)位置上因為離海岸線都有一定的距離所以潮汐影響減弱不少，間接讓河川面的潮汐影響加大，最後呈現出的較大的角度(70°)(80°)。

表中(E-2)、(E-3)受潮汐作用下之深度和無潮汐時之深度相差不大，但在(E-1)時有潮汐影響和無潮汐時還是有些微的差值(0.6 m)，這可能是因為靠近海岸線，而海岸線顯著的拉推作用讓深度加大，但影響效果不大，因此可以推論出潮汐對於污染團的深度影響有限，這樣的結果也反映在深寬比中，深寬比在有潮汐時比無潮汐時小，主要是因為有潮汐時的寬度相對無潮汐時大很多，而深度相差很小，所以產生出這樣的結果。而在圖 4.1.1-3 至圖 4.1.1-26 中可以觀察出(E-1)、(E-2)、(E-3)之污染團在半年和一年時的擴散趨勢大致相同，因此可以推論出在此情境時，污染團擴散趨勢在半年內已趨於穩定。

表 4.1.1-1 各個位置中污染團面積之比較結果 (一年)

(E-1)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	24	6	8.7	4	1.45
有潮汐	36°	25	12	9.3	2.7	0.775
(E-2)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	24	6.4	8.7	3.75	1.36
有潮汐	80°	21.5	20	9	1.07	0.45
(E-3)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	26.8	6.7	8.8	4	1.31
有潮汐	79°	21	17.8	8.92	1.18	0.5

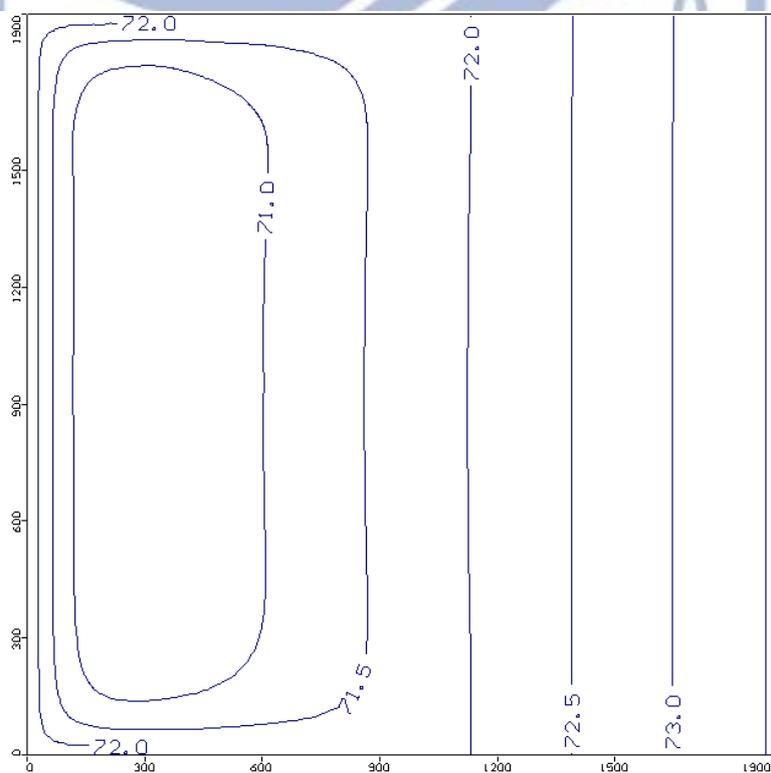


圖 4.1.1-1 高潮位時之等水位線

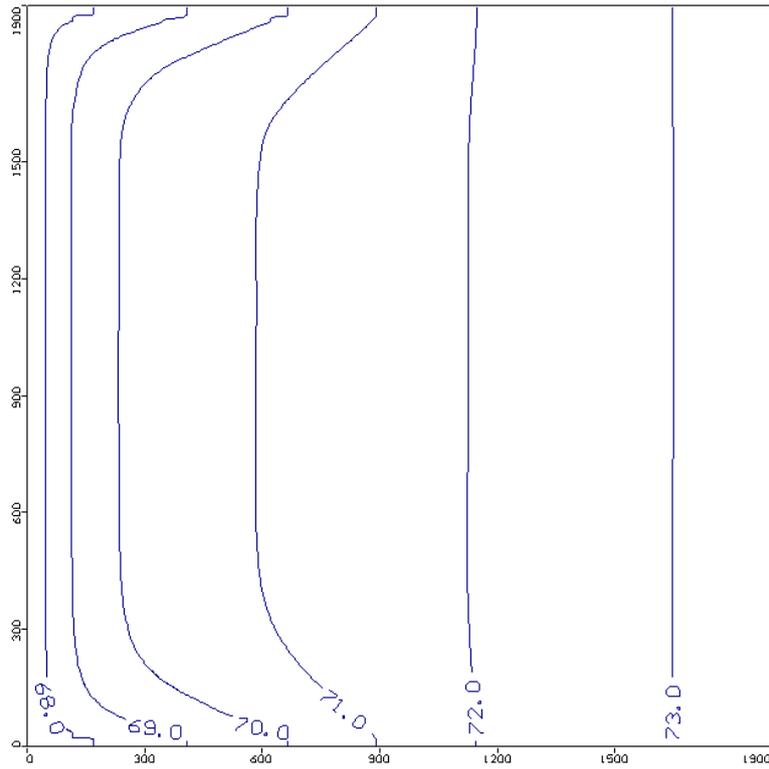


圖 4.1.1-2 低潮位時之等水位線



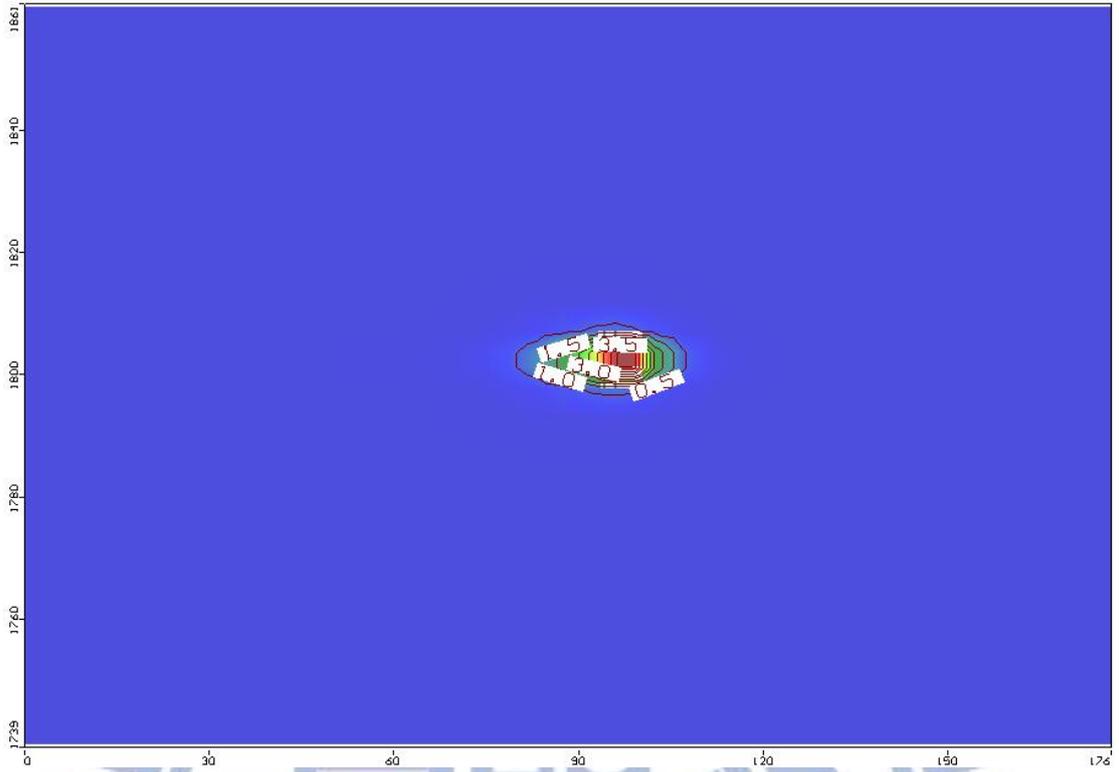


圖 4.1.1-3 E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

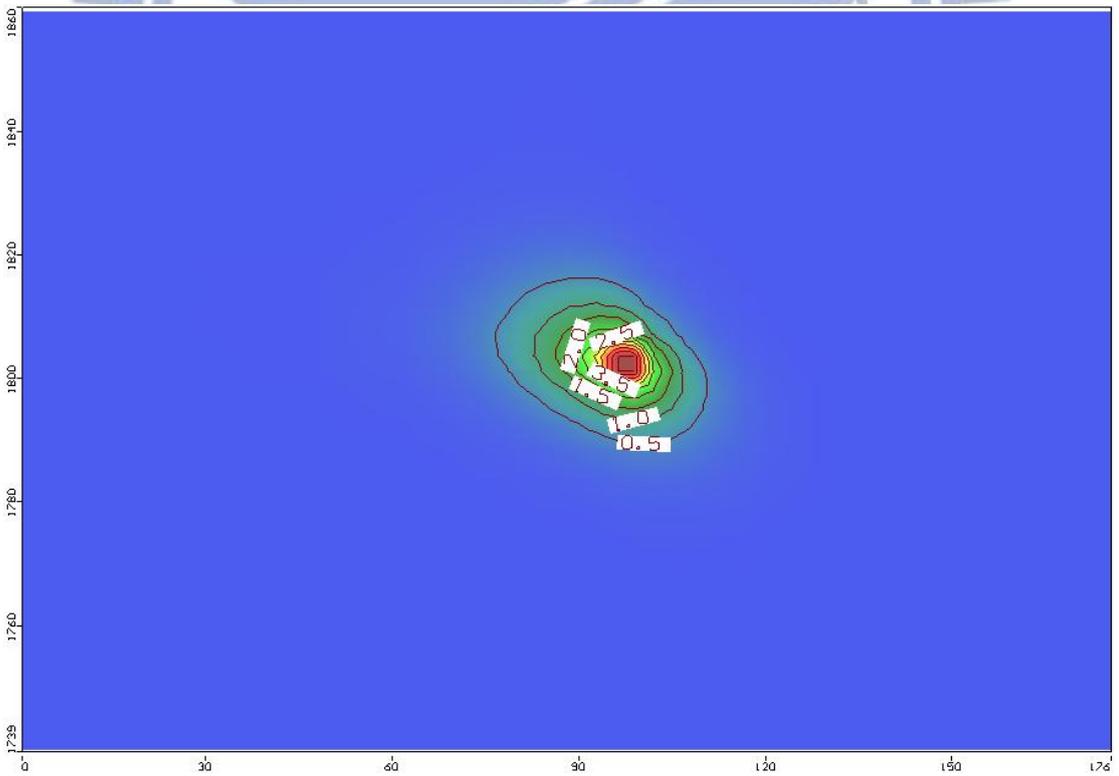


圖 4.1.1-4 E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

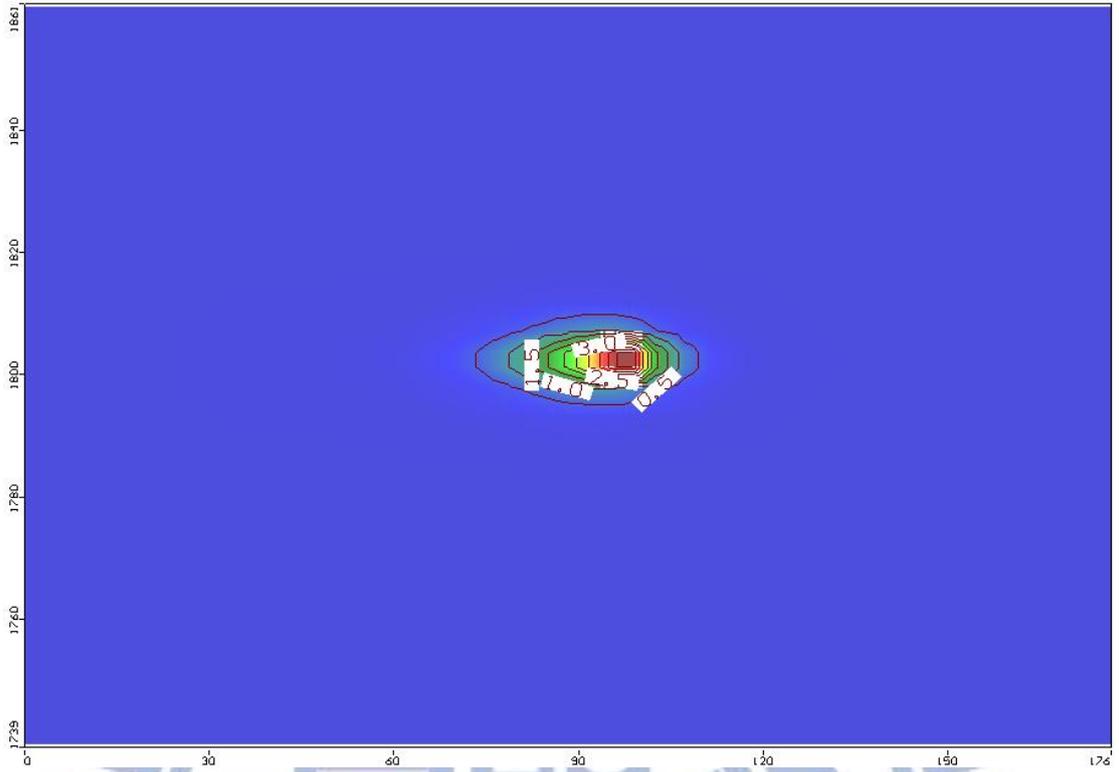


圖 4.1.1-5 E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

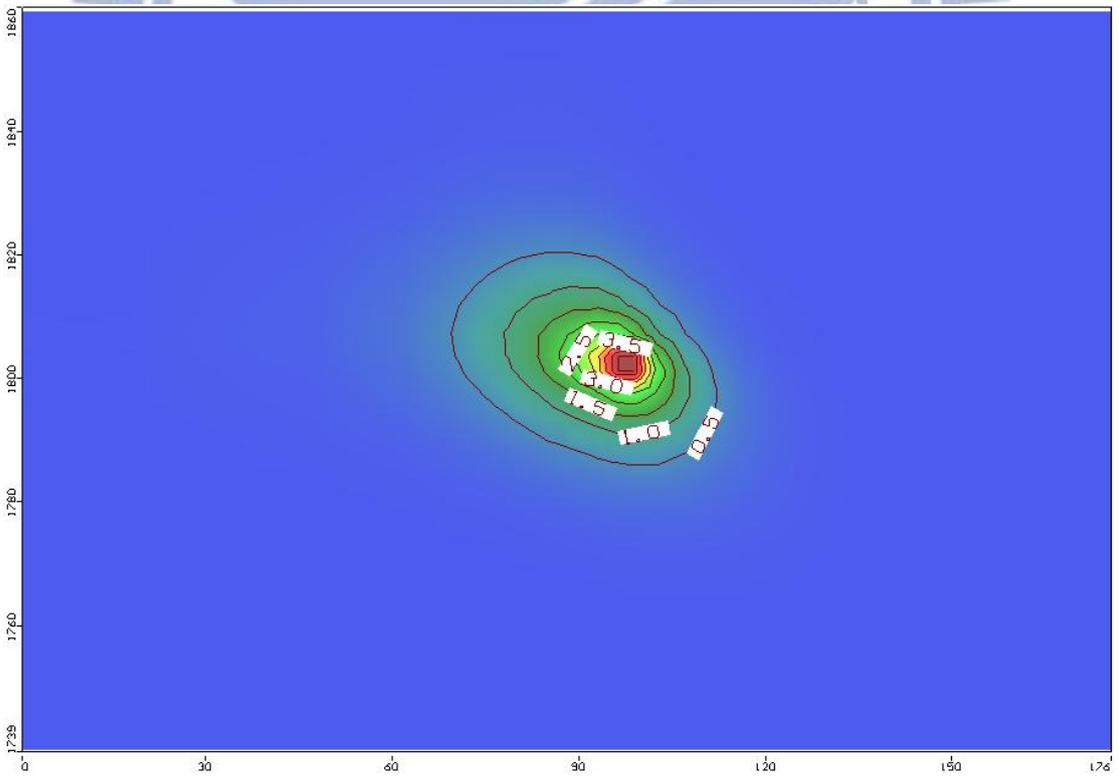


圖 4.1.1-6 E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

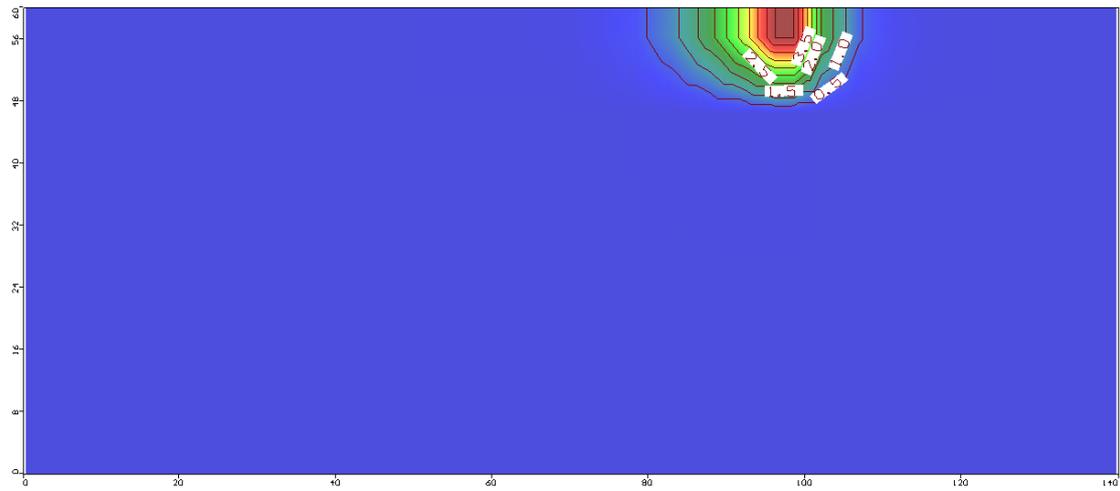


圖 4.1.1-7 E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

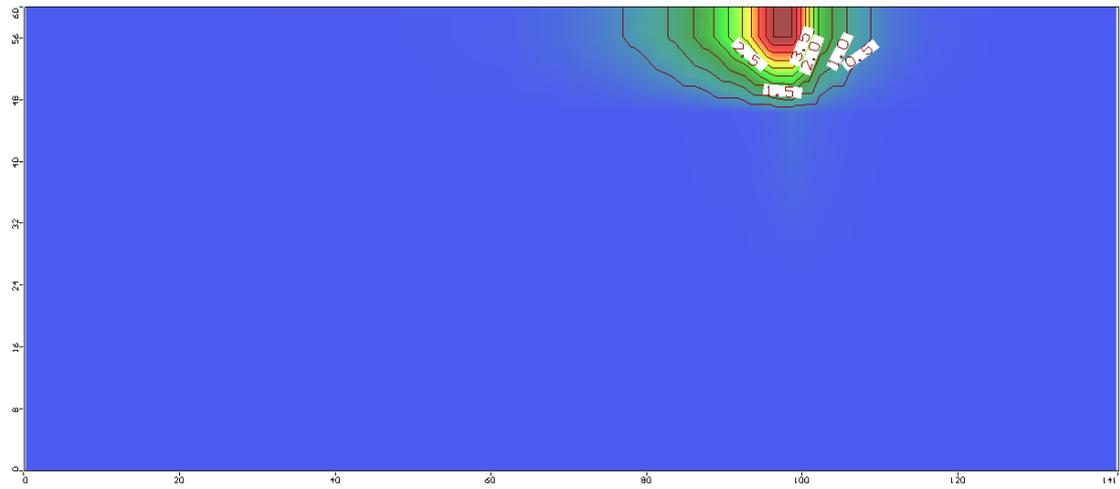


圖 4.1.1-8 E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

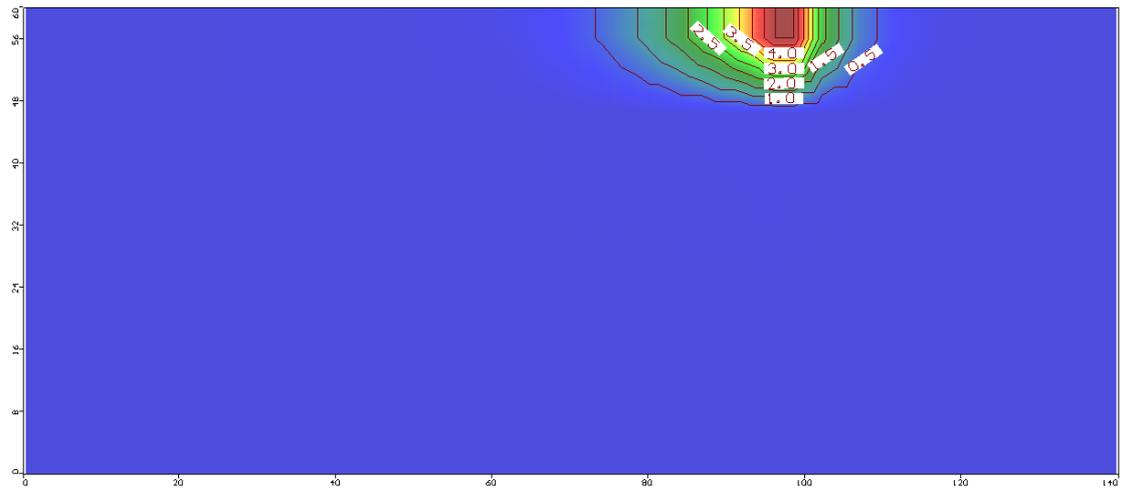


圖 4.1.1-9 E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

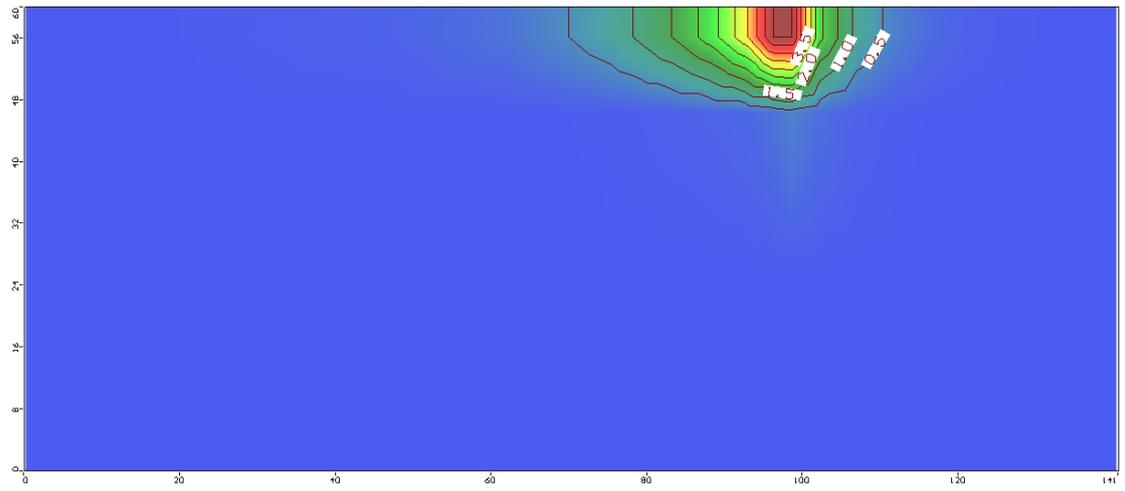


圖 4.1.1-10 E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

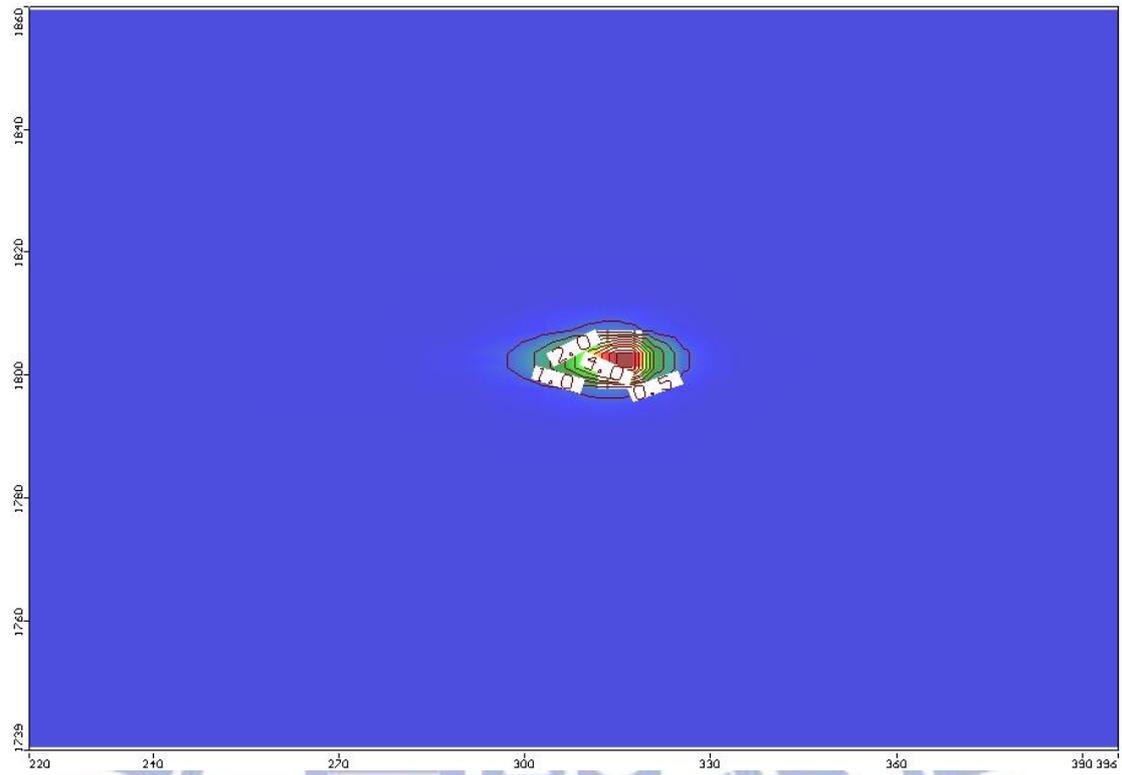


圖 4.1.1-11 E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

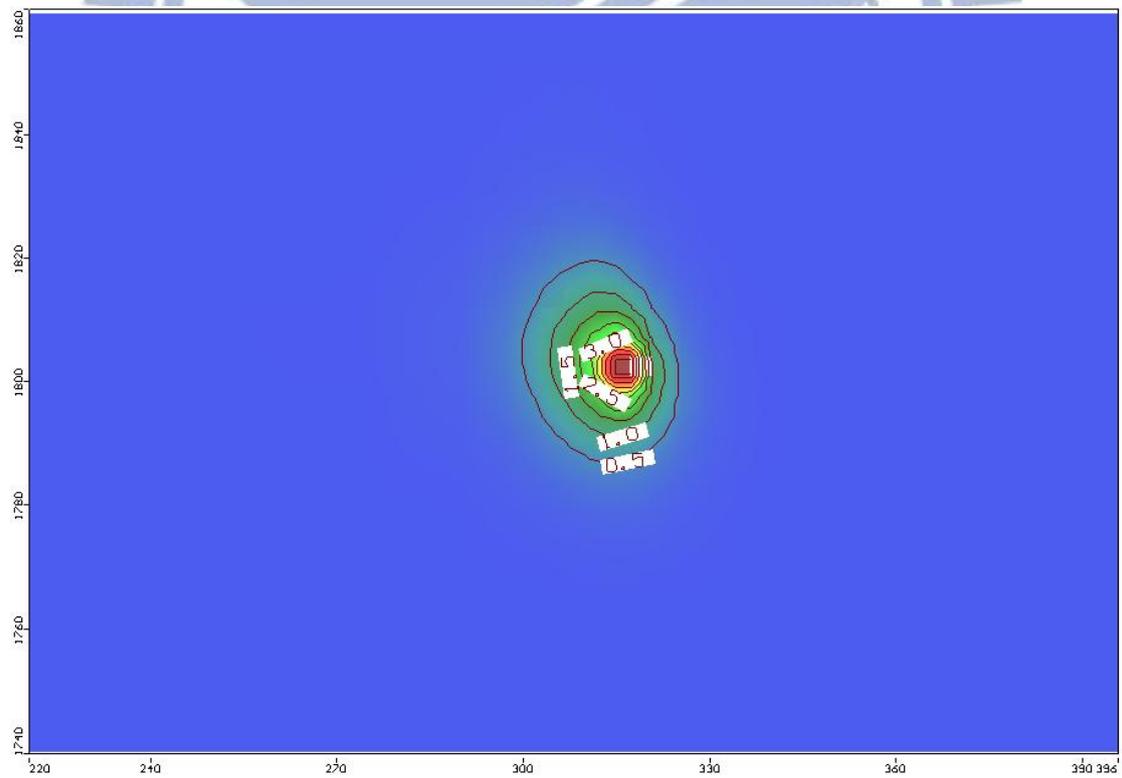


圖 4.1.1-12 E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

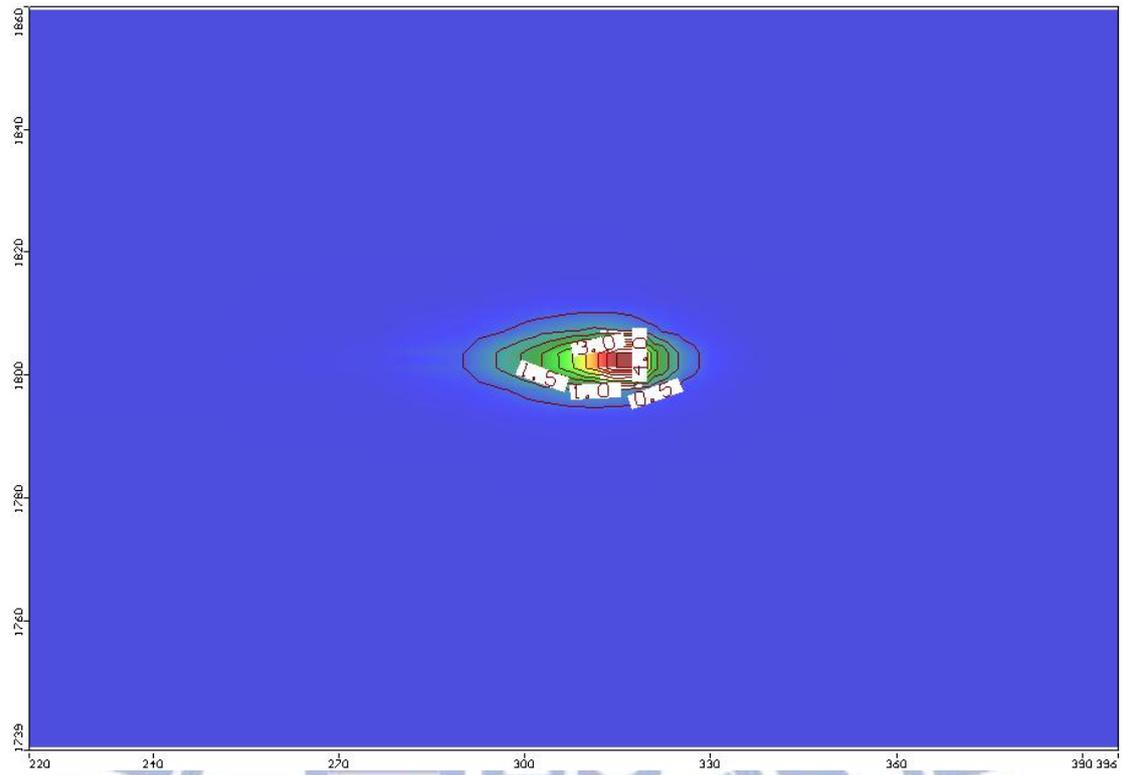


圖 4.1.1-13 E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

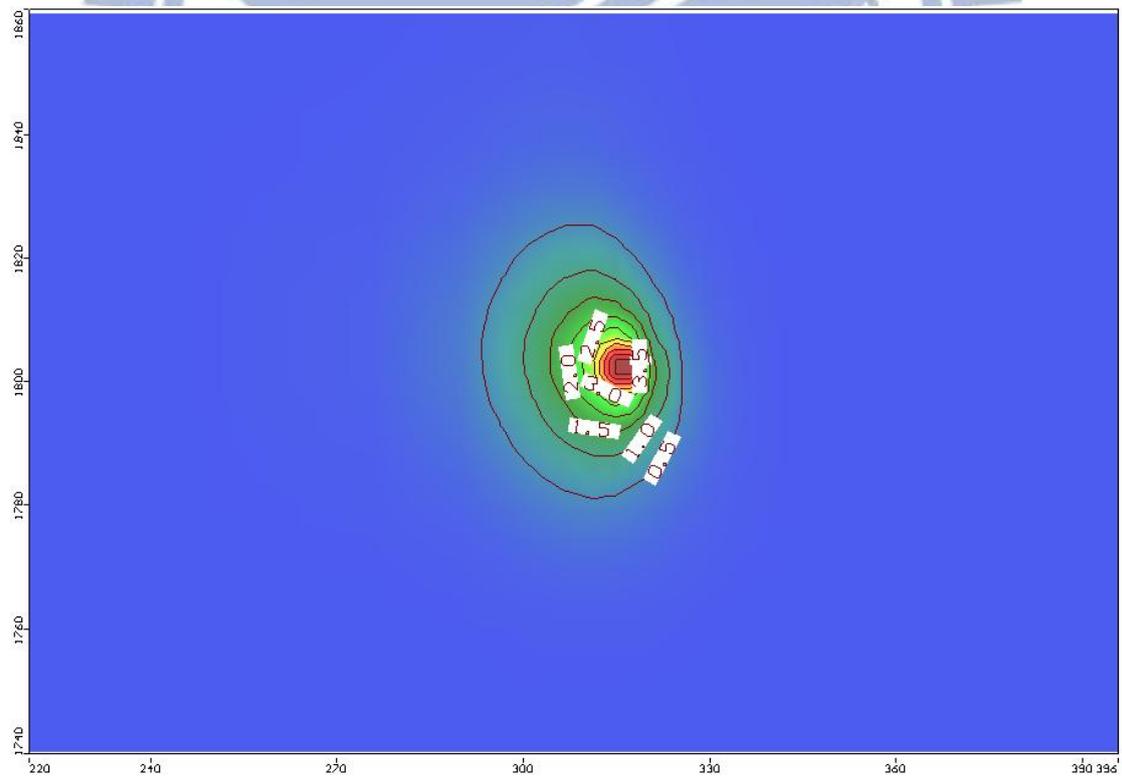


圖 4.1.2-14 E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

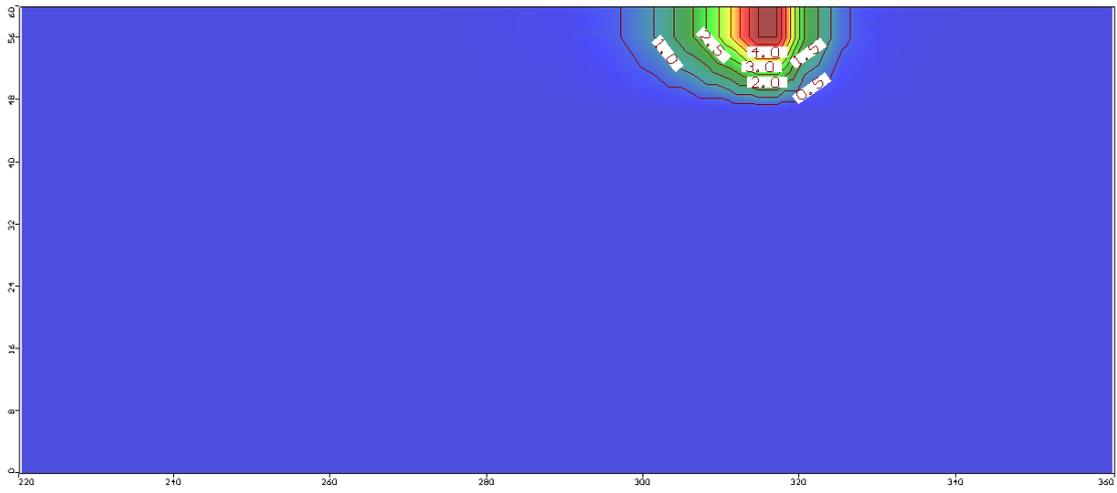


圖 4.1.1-15 E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

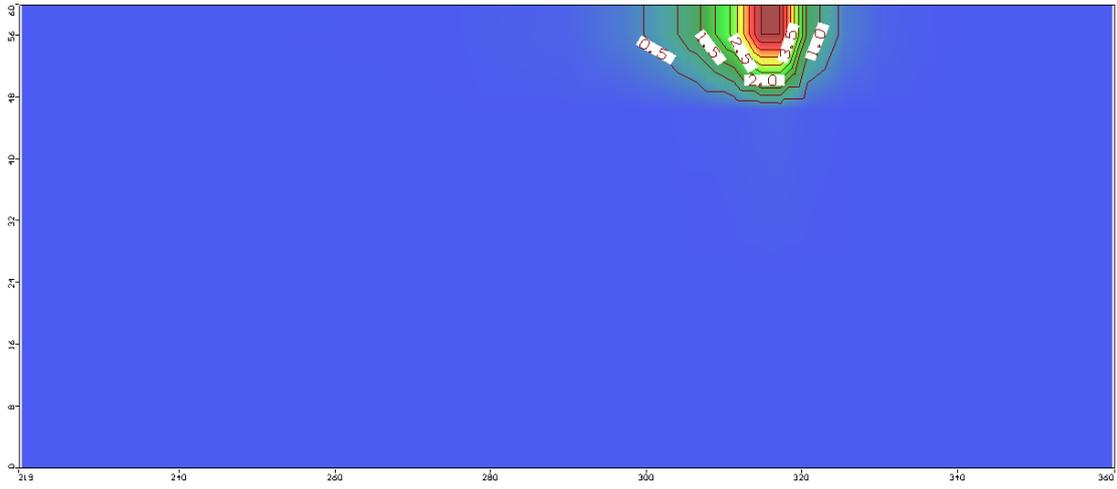


圖 4.1.1-16 E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

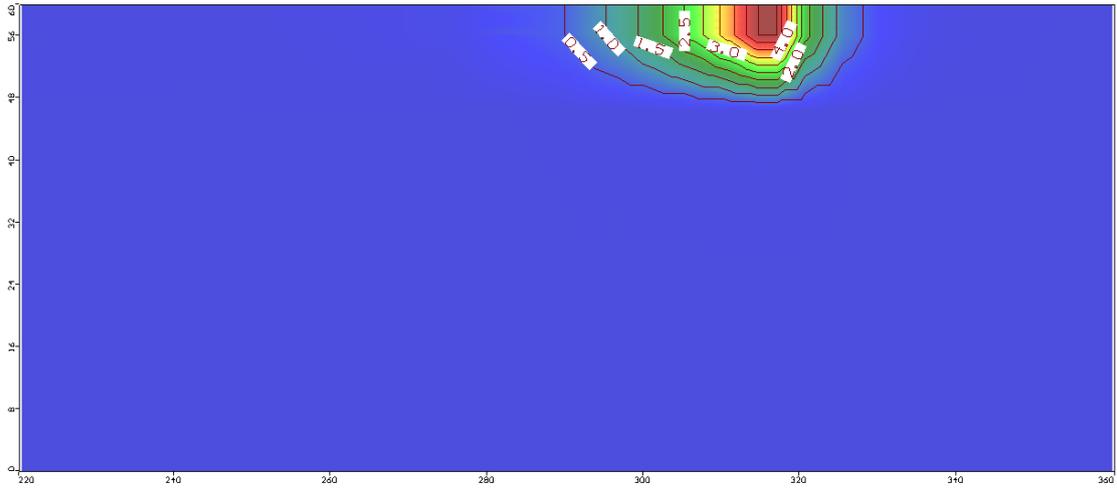


圖 4.1.1-17 E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

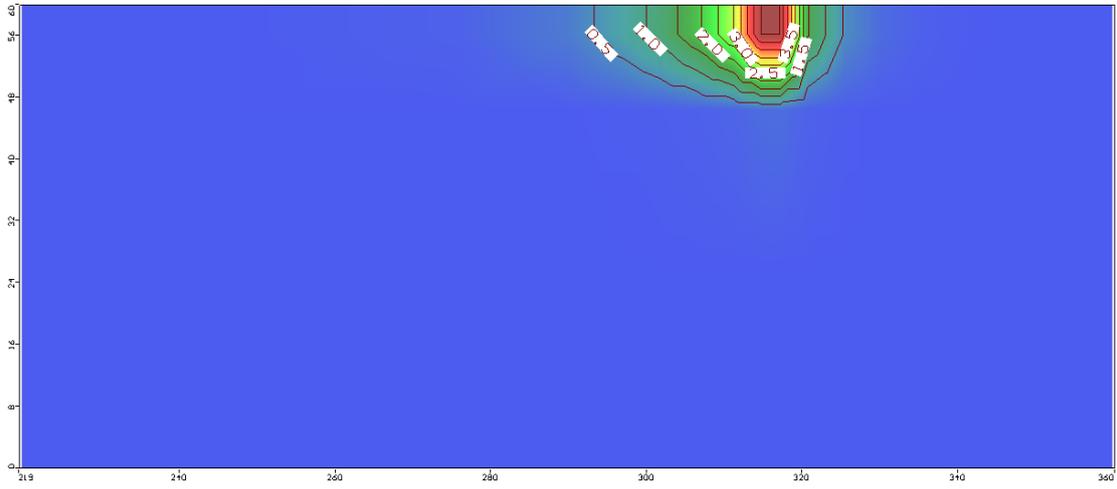


圖 4.1.1-18 E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

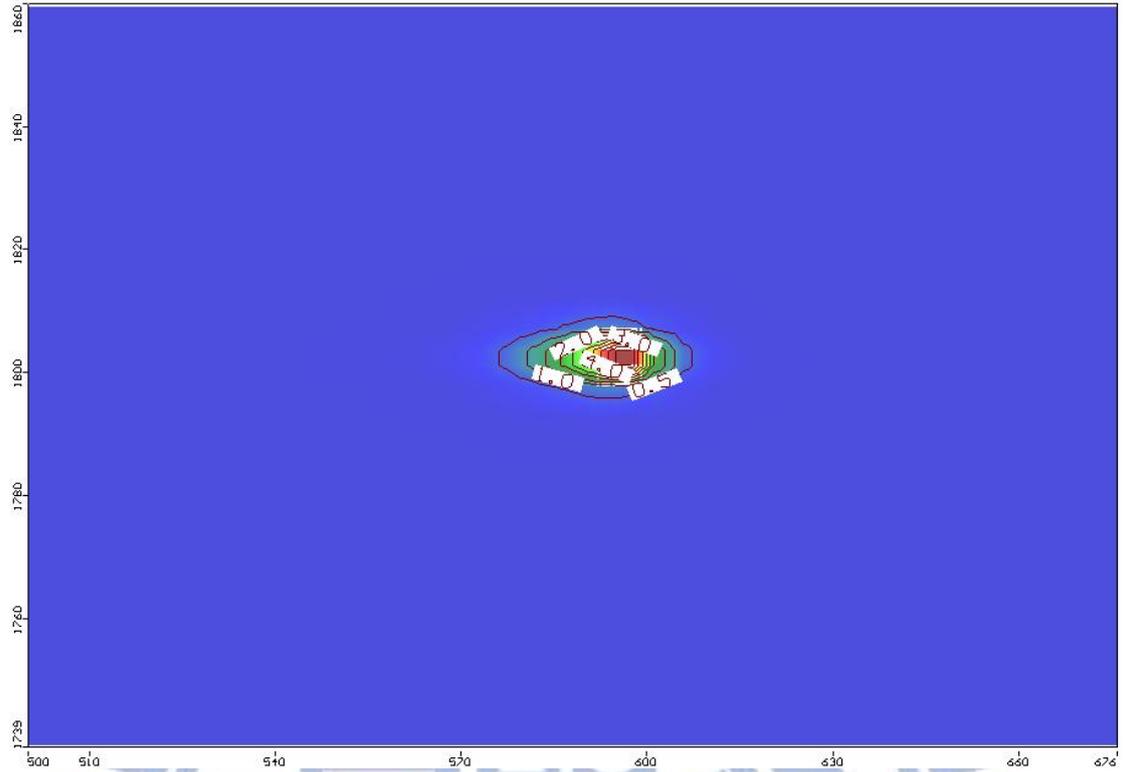


圖 4.1.1-19 E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

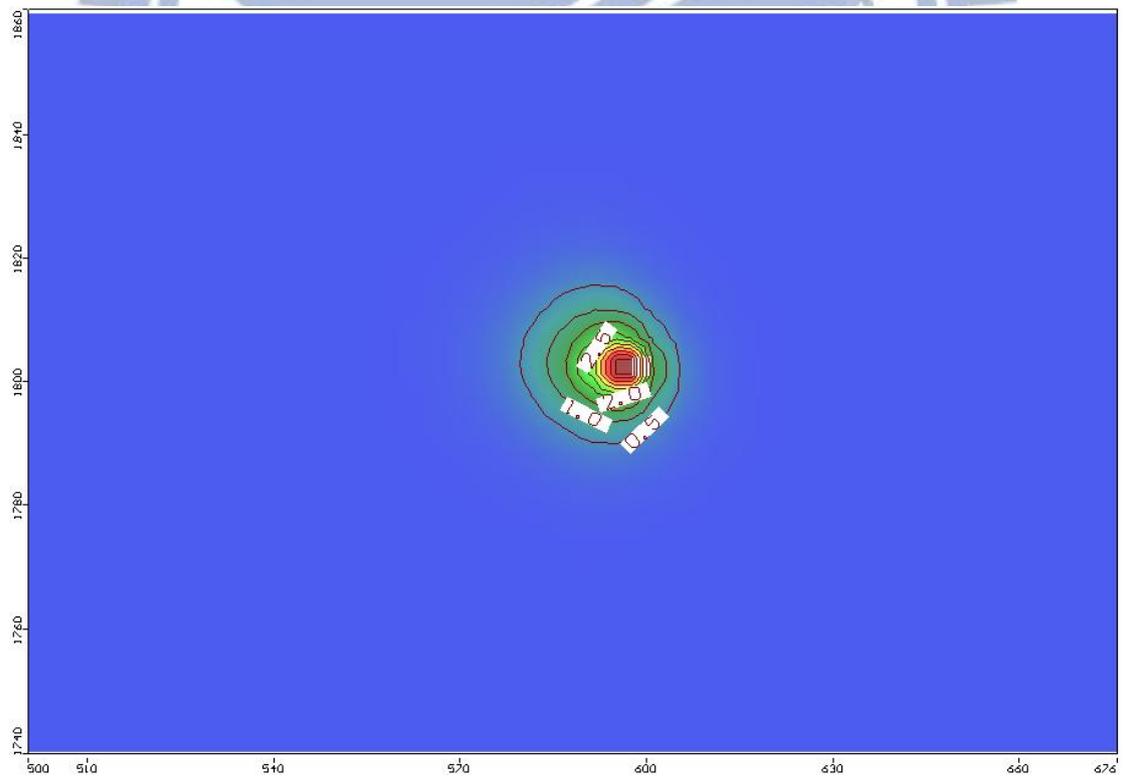


圖 4.1.1-20 E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

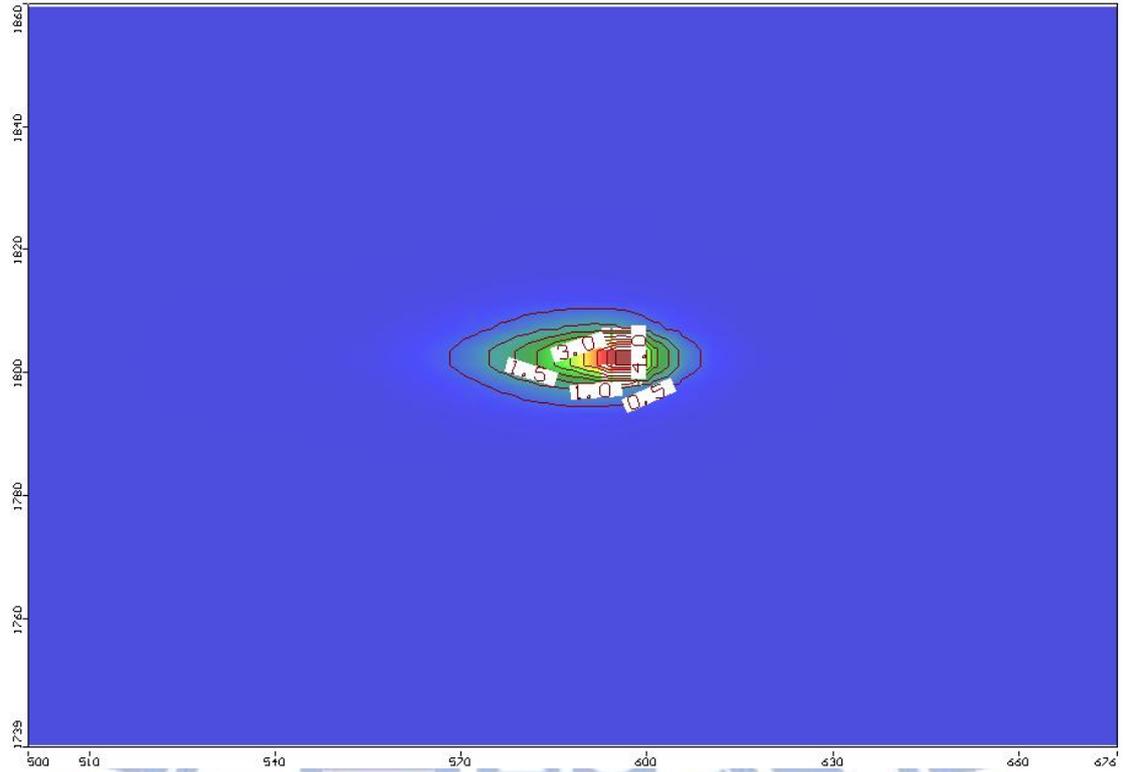


圖 4.1.1-21 E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

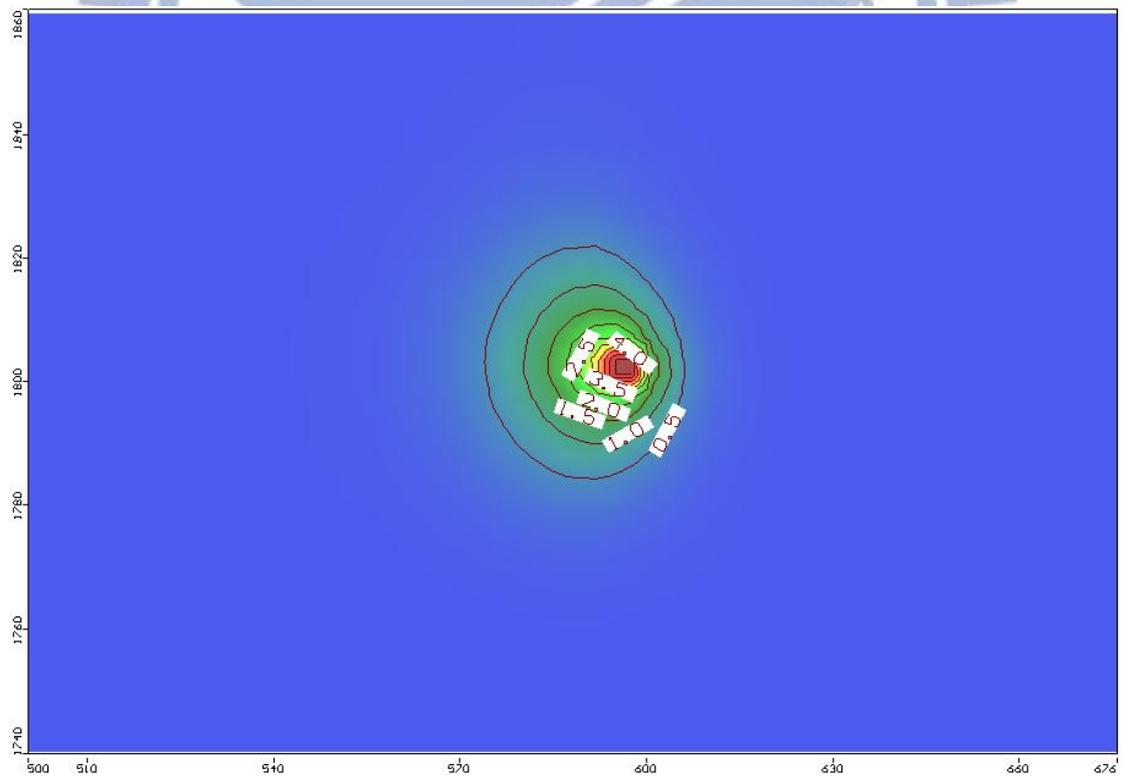


圖 4.1.1-22 E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

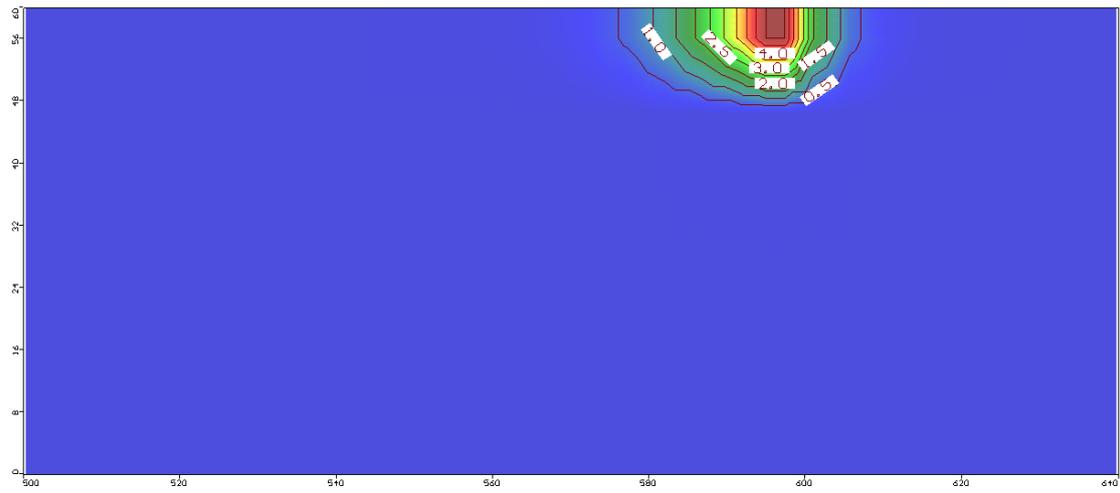


圖 4.1.1-23 E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

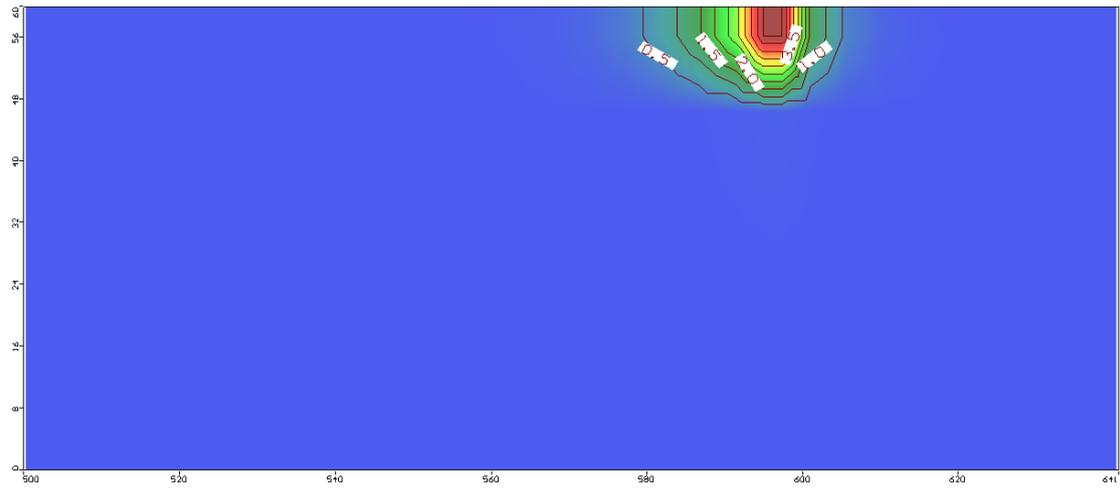


圖 4.1.1-24 E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

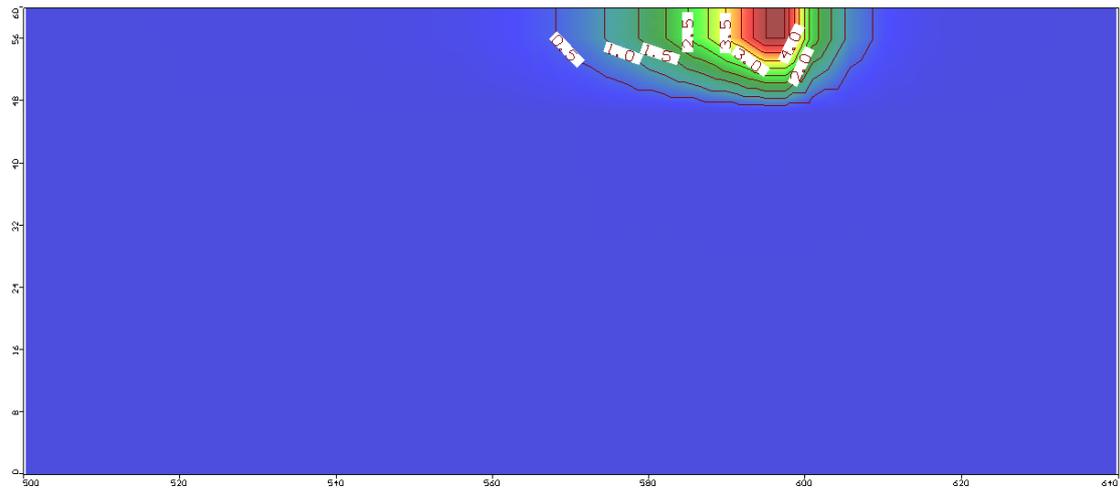


圖 4.1.1-25 E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

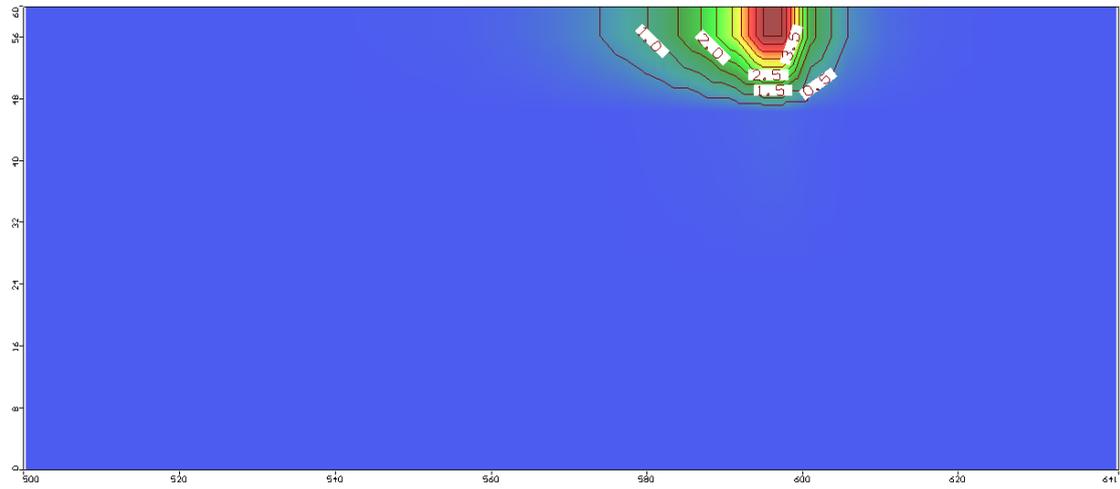


圖 4.1.1-26 E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.1.2 潮汐對於(M-1)、(M-2)、(M-3)影響比較

污染團的長度中由表 4.1.2-1 可以觀察到(M-1)為最接近海岸線的污染源，在這位置中因為海岸線的潮汐影響遠比河岸面的潮汐影響大上許多，使得河岸面潮汐影響效果降低，因此污染團被拉長的現象，這現象和(E-1)相同，但是被潮汐作用拉長的效果(M-1)(32.4 m)較(E-1)(25 m)大上許多，主要是因為在(M-1)的位置上離河川面有一段距離，使得河川面的潮汐影響降低，間接讓海岸線的潮汐影響效果加倍，因此(M-1)被拉長的效果較(E-1)大；而(M-2)、(M-3)受潮汐影響時污染團長度反而較無潮汐時小，也就是高潮汐時流速變慢，低潮汐時流速加快，相對前者影響較大，這其中可能是因為離海岸線較遠潮汐影響減弱以及排水路水位變化的影響產生的結果。

在寬度的影響中，因為污染團的方向沒有發生轉向(污染團長軸和 x 軸夾角為零)，因此和 E 位置相比較時能夠發現 Modflow 的延散度設定上並不影響寬度。其可以推論出(M-1)、(M-2)、(M-3)是受到流速的影響，也就是水力梯度受潮汐影響的關係，除了上述的原因外，同時因為距離排水路徑近，所以受到排水路徑水位變化的影響，最後呈現出(M-1)、(M-2)、(M-3)受潮汐作用時寬度(10 m, 10 m, 9.8 m)都比無潮汐時(6.48 m, 6.8 m, 6.8 m)大。長寬比的部分則是因為(M-1)、(M-2)、(M-3)受潮汐影響時之寬度都較無潮汐時大上許多，因此在長寬比的部分有潮汐影響時(3 m, 2.28 m, 2.4 m)較無潮汐時(3.6 m, 3.6 m, 3.94 m)小。

在深度中(M-1)在有潮汐和無潮汐時有些微的不同，和(E-1)相同可能是因為較靠近海岸線的緣故，潮汐明顯的拉推作用下產生深度值較大的緣故，但是差距不大，而(M-2)、(M-3)有無潮汐時深度相當，因此可以知道潮汐對深度影響不大。在深寬比方面，因為有潮汐時的寬度都較無潮汐時大，而深度都相差不多，所以在有潮汐時之深寬比(1.13 m, 0.85 m, 0.89 m)較無潮汐時(1.37 m, 1.3 m, 1.3 m)之深寬比小。

在此情境下半年和一年污染團之擴散趨勢和 E 位置擴散情況相同，污染團之擴散趨勢在半年內已趨於穩定。

表 4.1.2-1 各個位置中污染團面積之比較(一年)

(M-1)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	23.3	6.48	8.87	3.6	1.37
有潮汐	0°	32.4	10	9.48	3	1.13
(M-2)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	24.7	6.8	8.79	3.6	1.3
有潮汐	0°	23.7	10	8.83	2.28	0.85
(M-3)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	26.8	6.8	8.85	3.94	1.3
有潮汐	0°	23.6	9.8	8.75	2.4	0.89



圖 4.1.2-1 M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

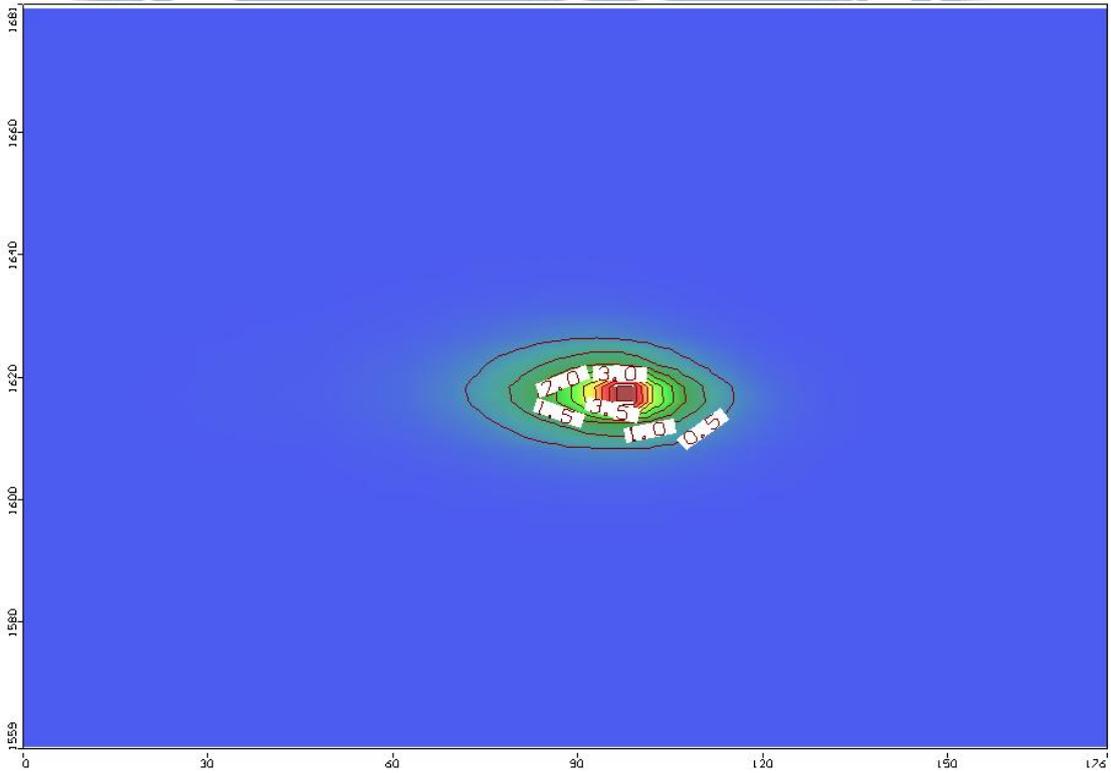


圖 4.1.2-2 M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團



圖 4.1.2-3 M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

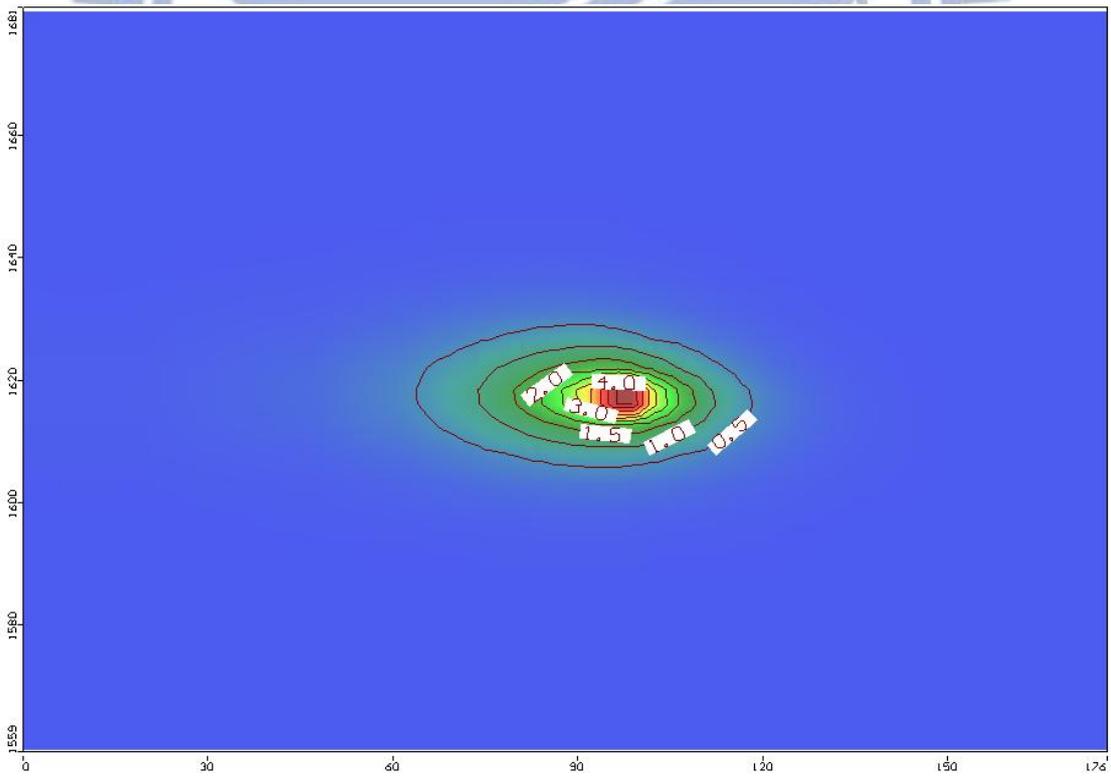


圖 4.1.2-4 M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

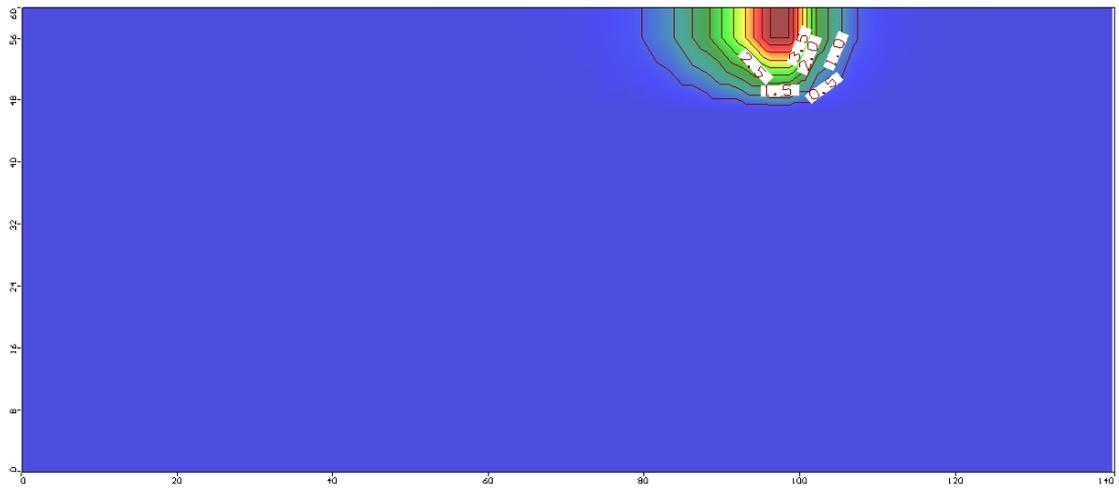


圖 4.1.2-5 M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

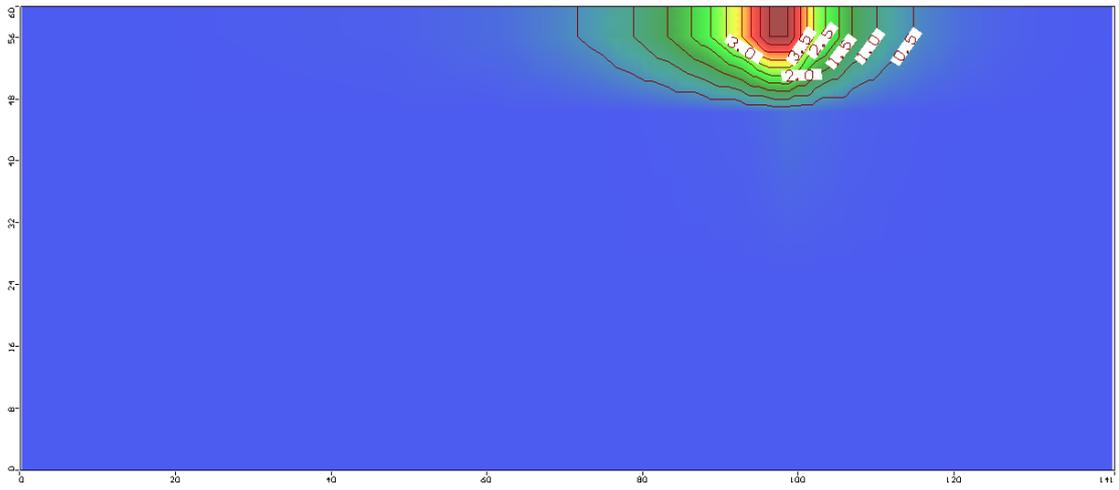


圖 4.1.2-6 M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

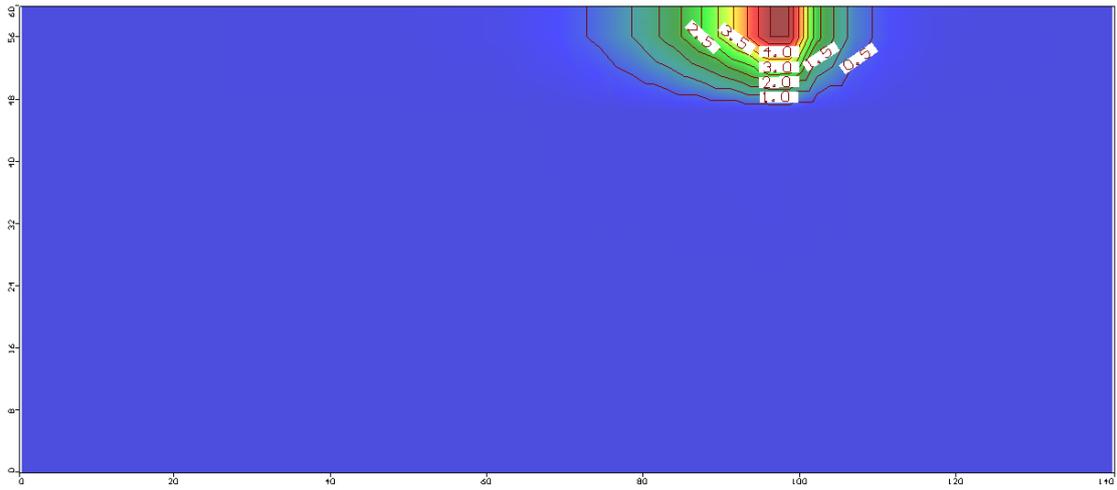


圖 4.1.2-7 M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

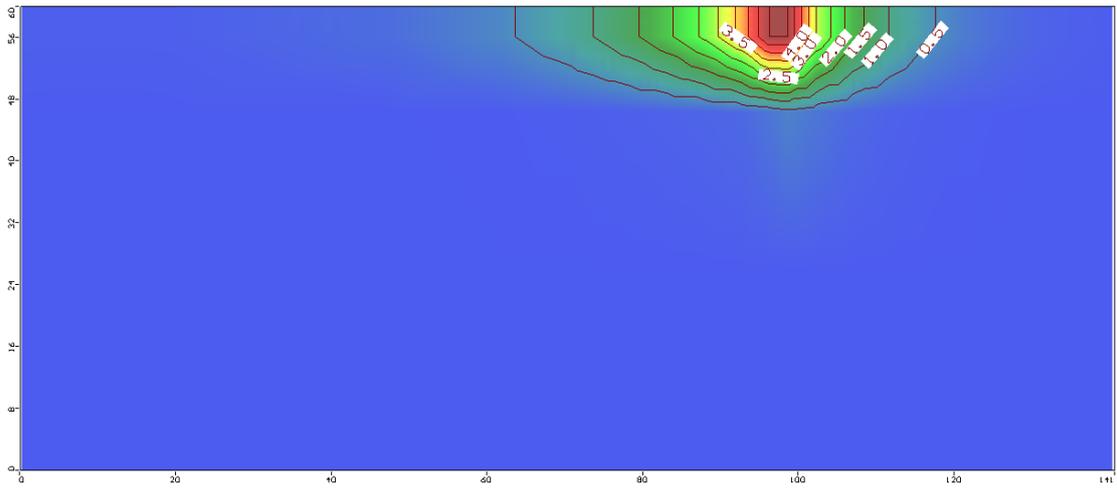


圖 4.1.2-8 M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

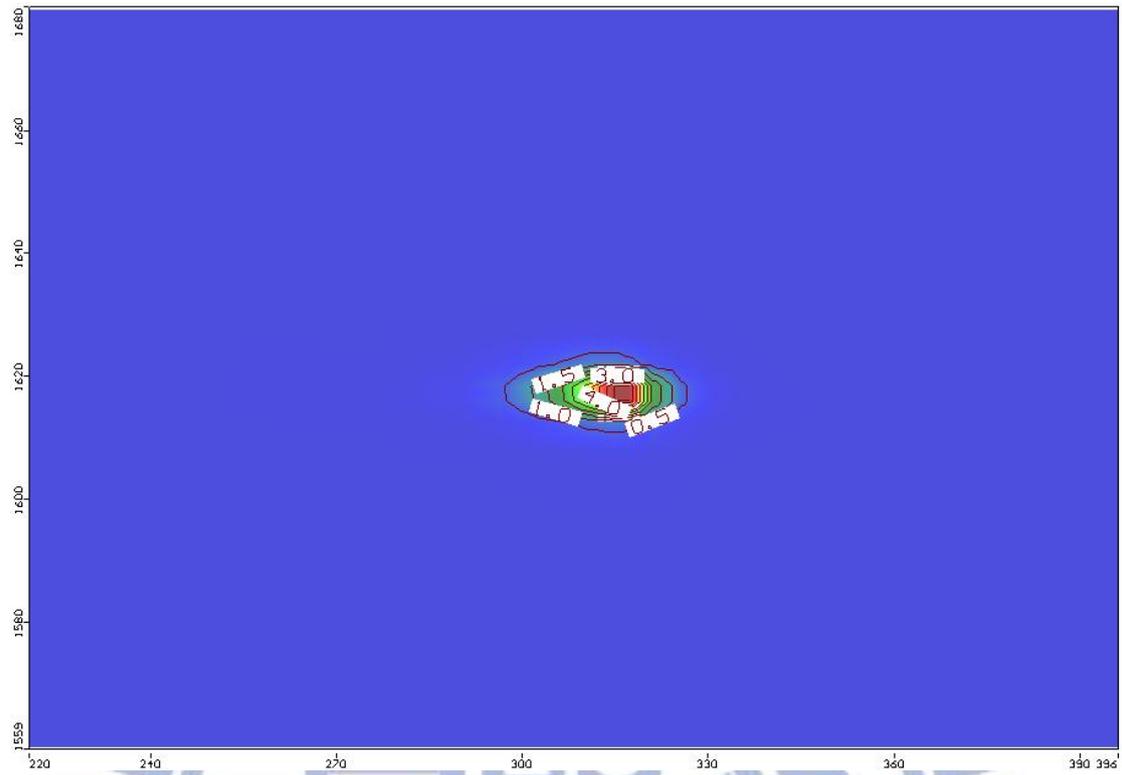


圖 4.1.2-9 M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

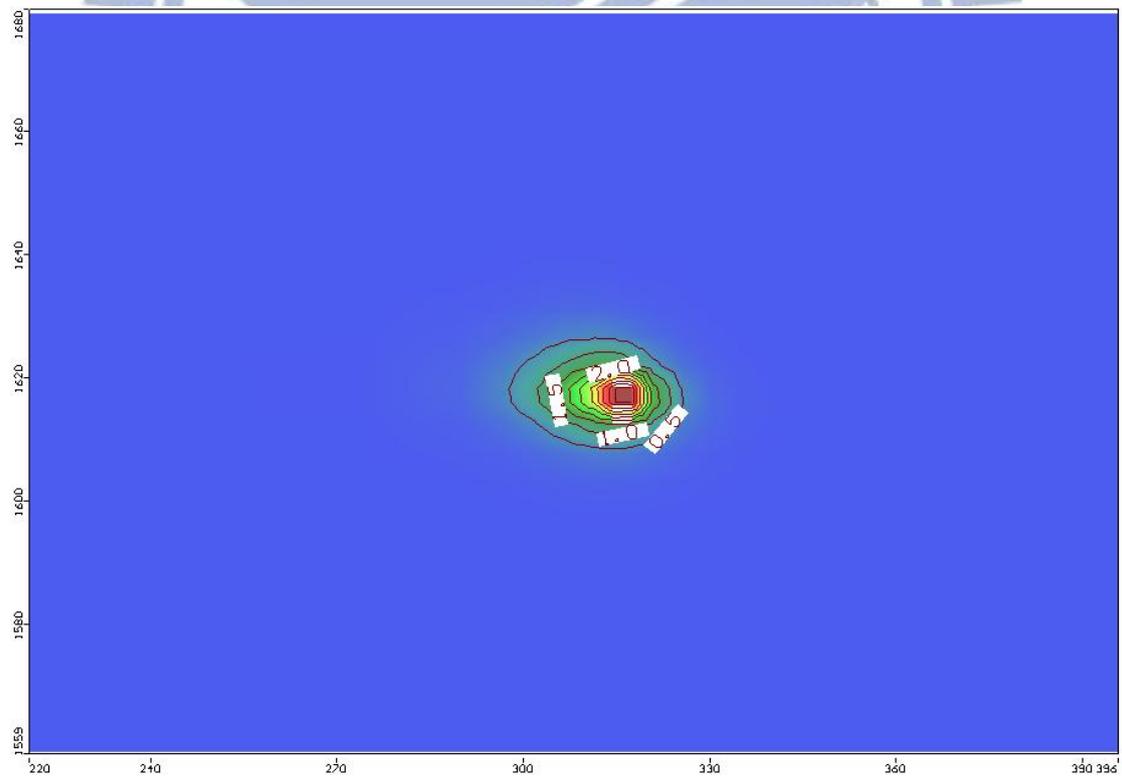


圖 4.1.2-10 M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

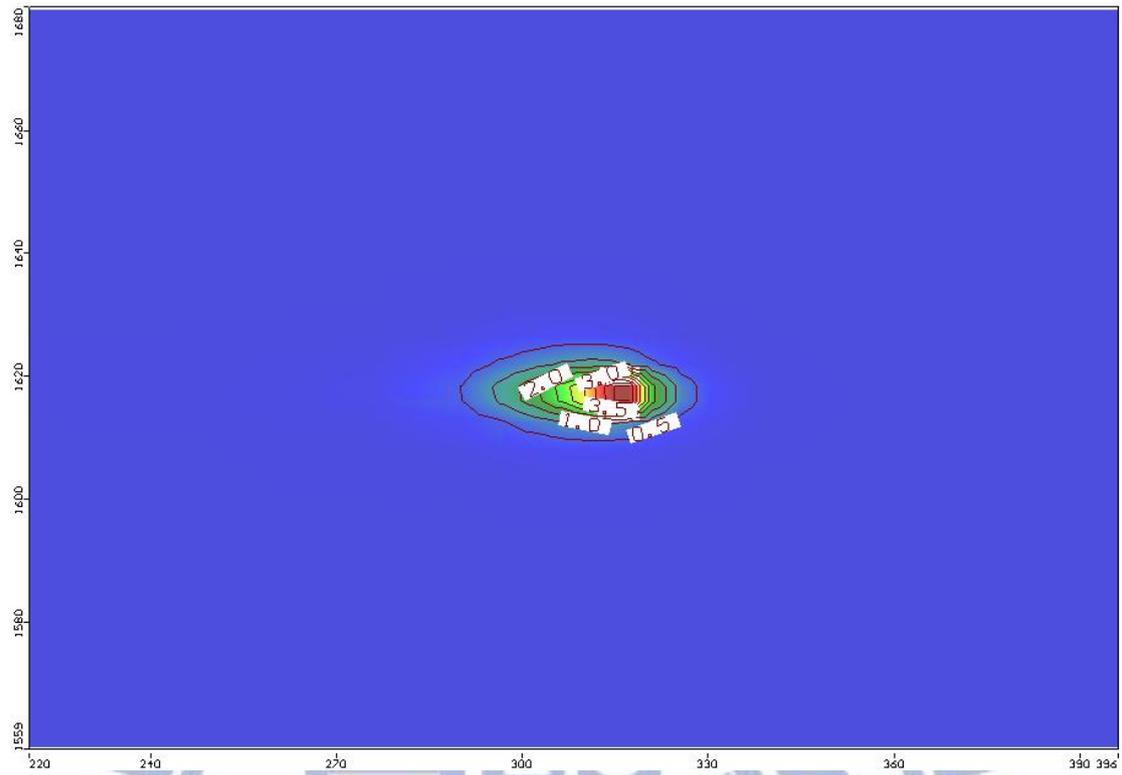


圖 4.1.2-11 M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

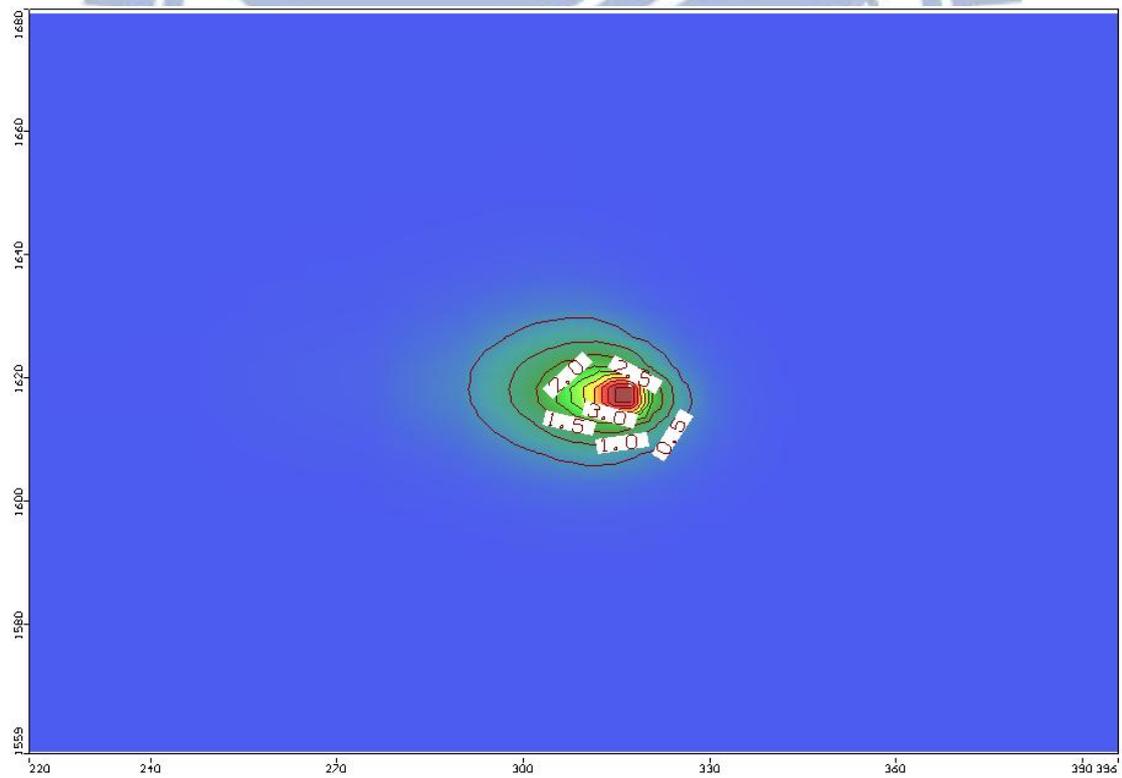


圖 4.1.2-12 M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

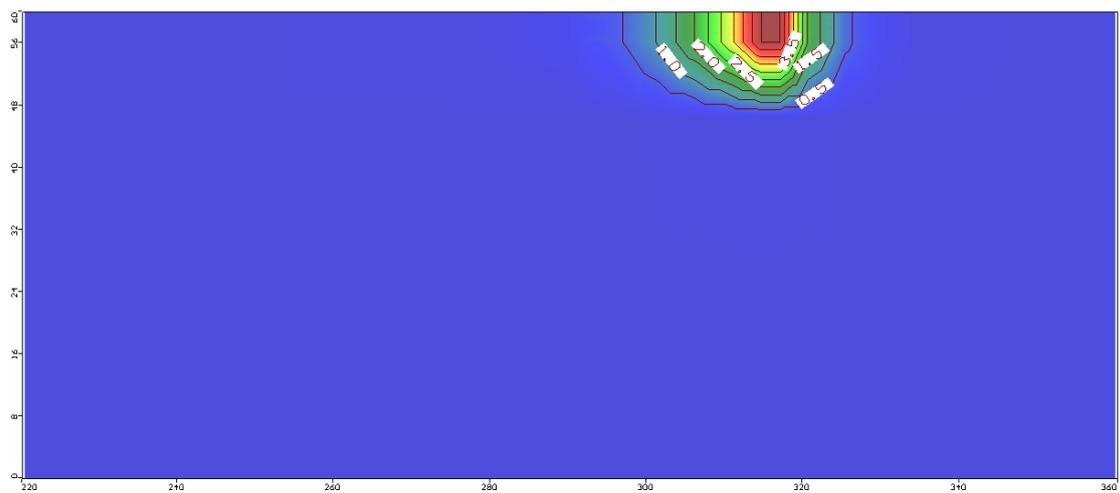


圖 4.1.2-13 M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

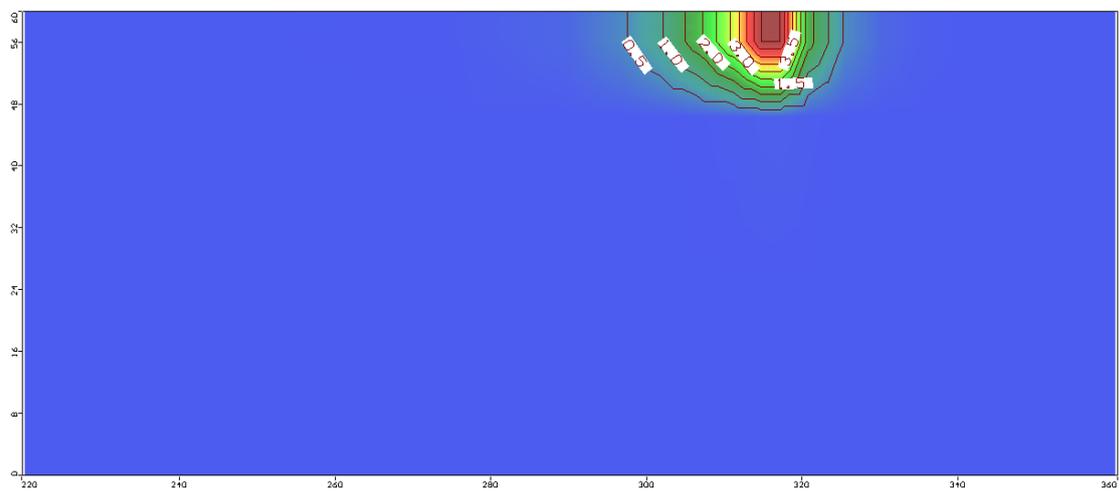


圖 4.1.2-14 M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

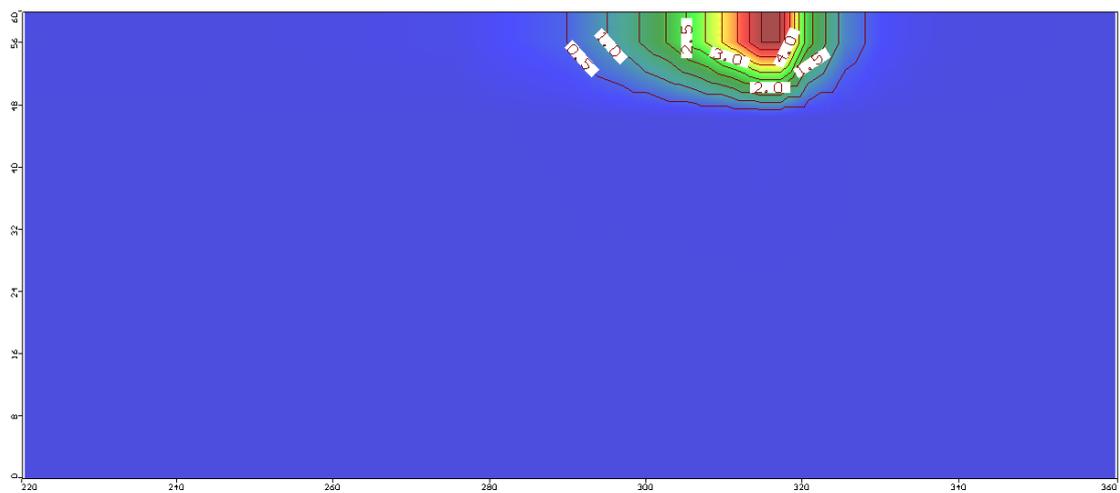


圖 4.1.2-15 M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

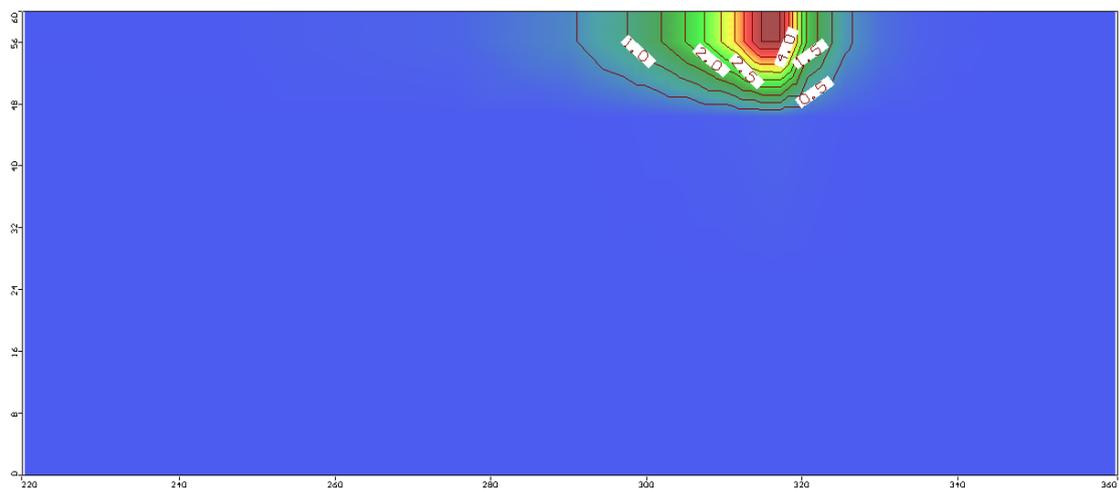


圖 4.1.2-16 M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

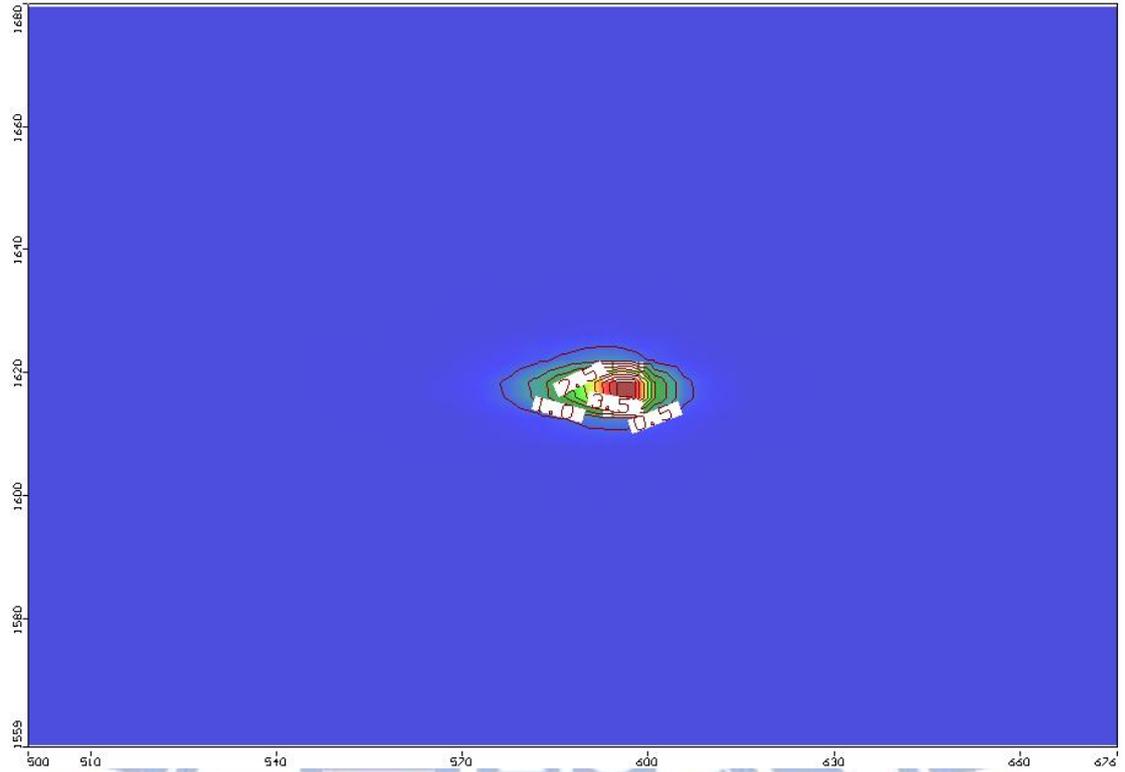


圖 4.1.2-17 M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

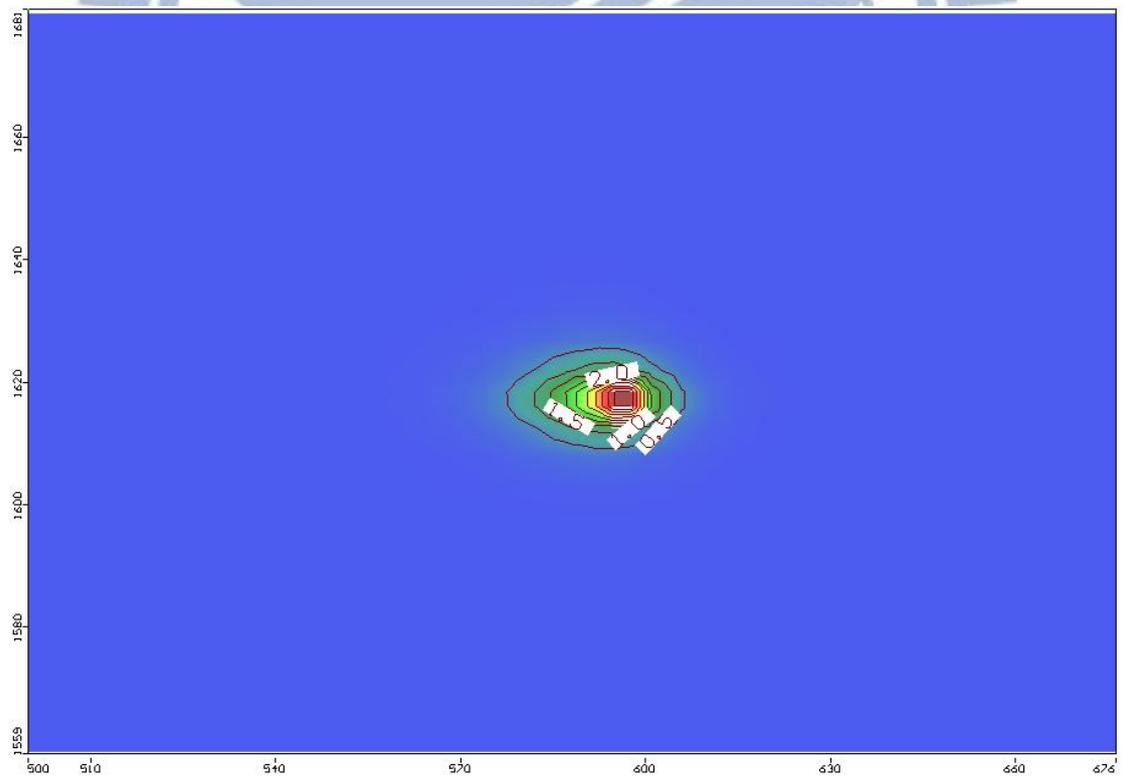


圖 4.1.2-18 M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

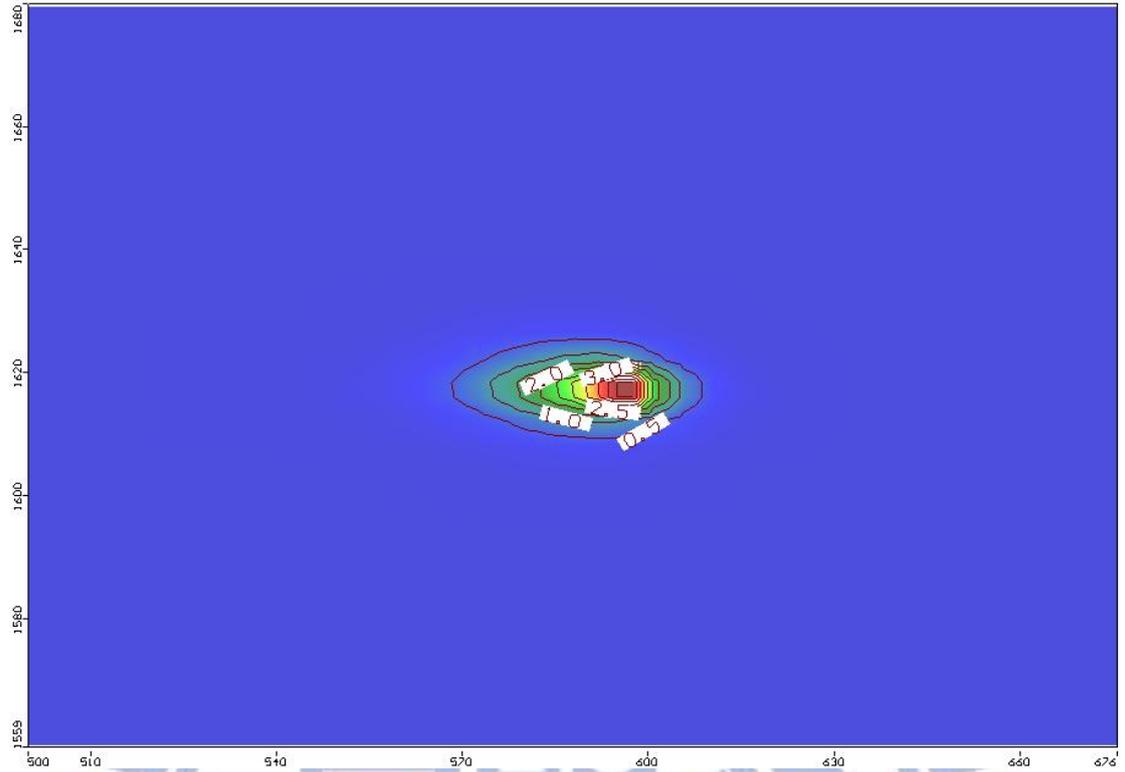


圖 4.1.2-19 M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

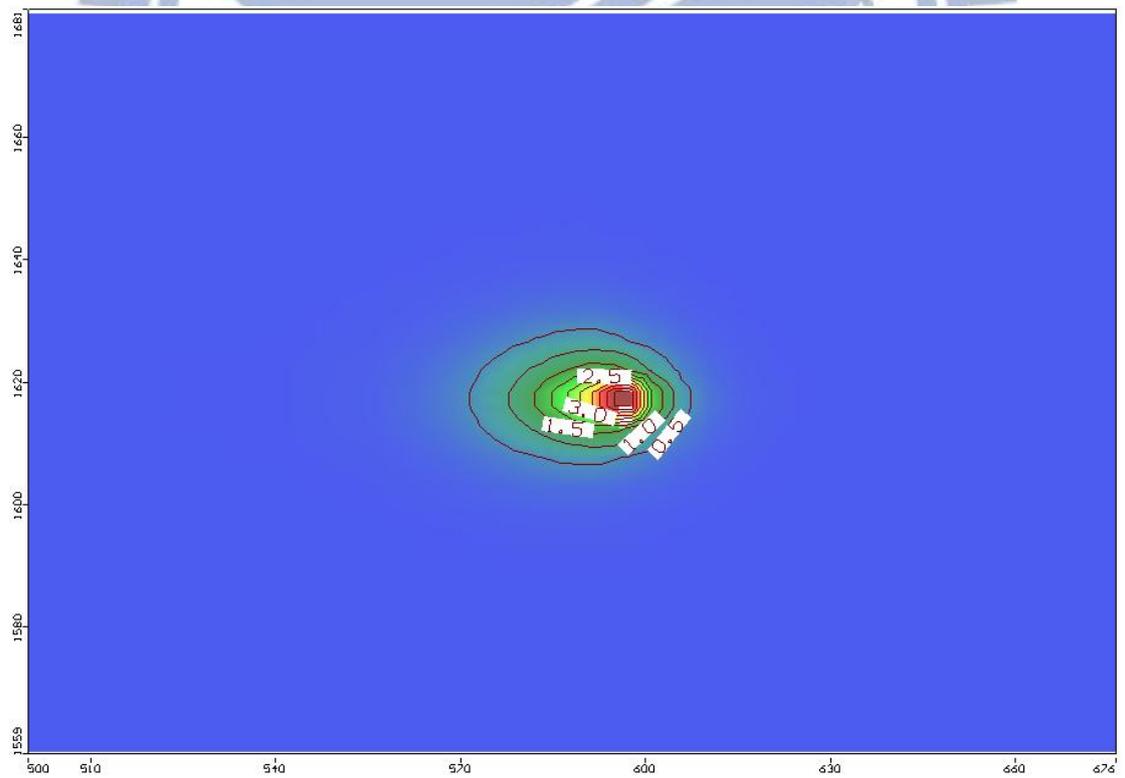


圖 4.1.2-20 M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

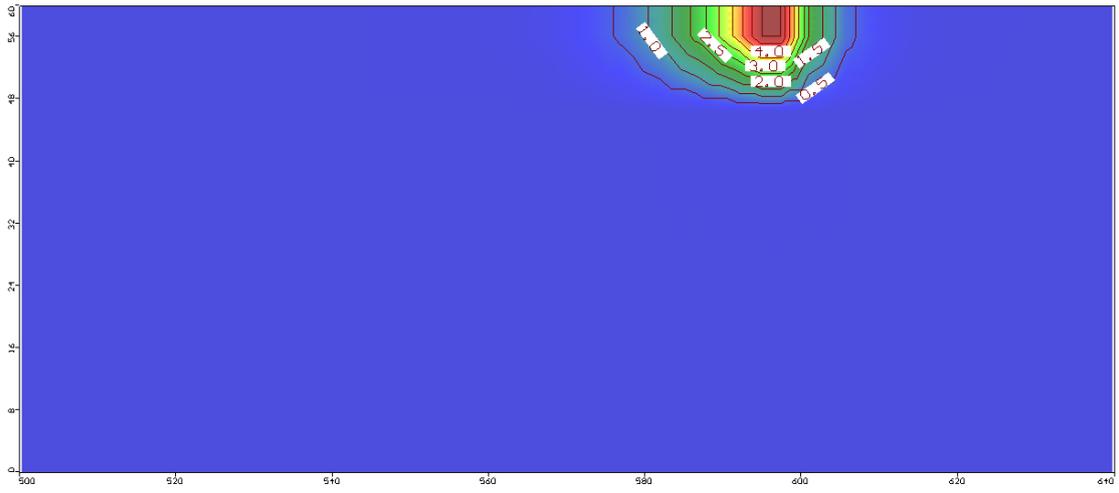


圖 4.1.2-21 M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

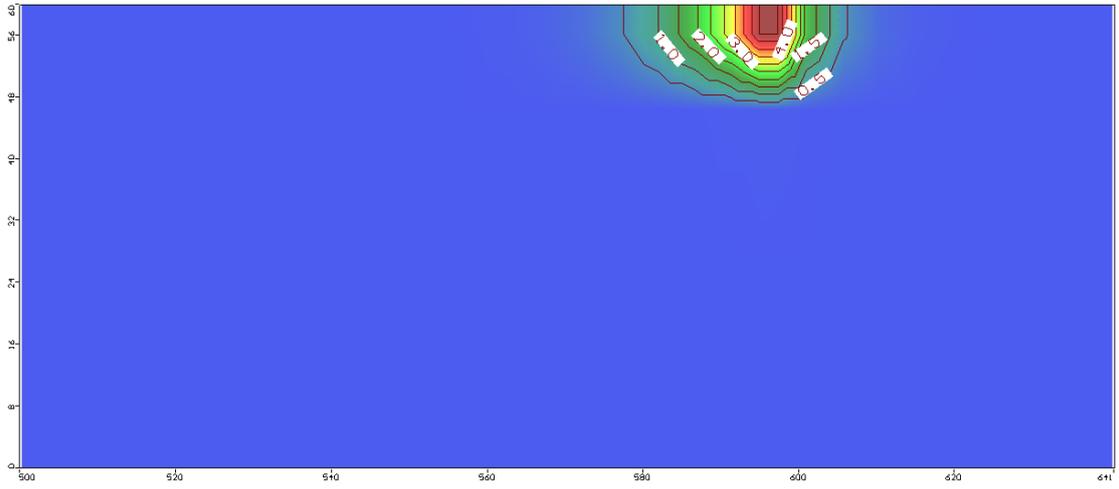


圖 4.1.2-22 M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

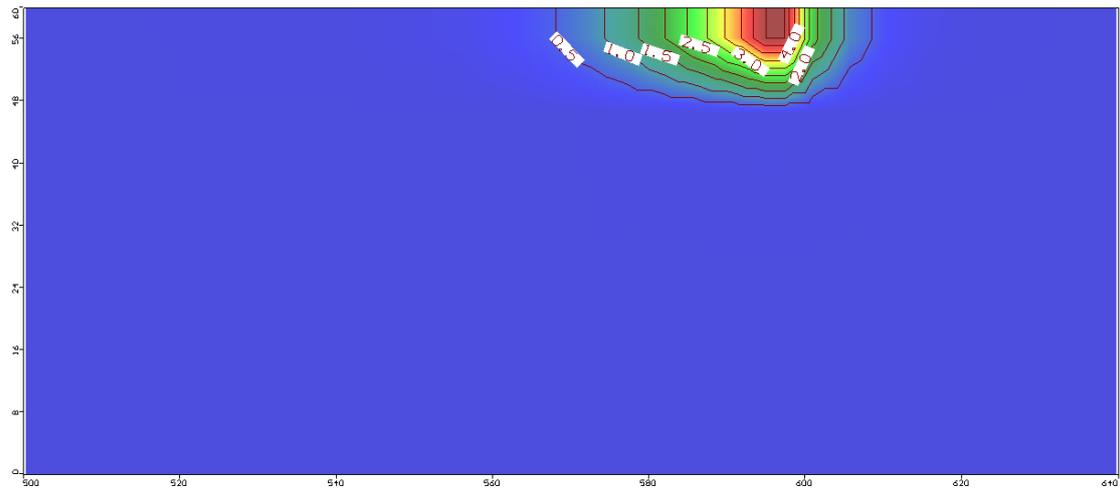


圖 4.1.2-23 M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

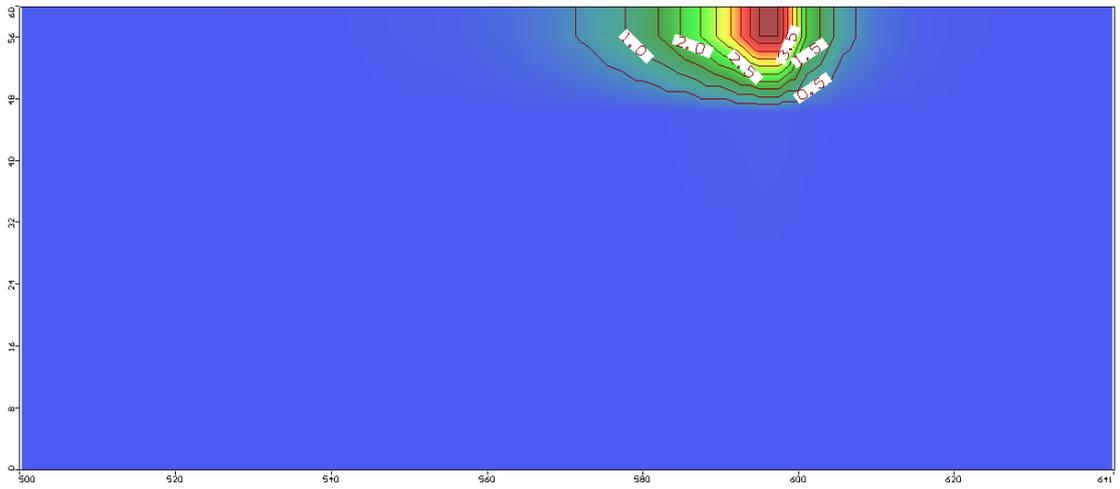


圖 4.1.2-24 M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.1.3 潮汐對於(C-1)、(C-2)、(C-3)影響比較

由表 4.1.3-1 可以觀察出(C-1)受潮汐影響時污染團長度比無潮汐影響時大，這是因為離海岸線較靠近的緣故，當潮汐影響效果顯著，地下水位的上下變動的幅度也會較大，因此污染團長度在潮汐影響下被拉長了；當和(E-1)、(M-1)比較後可以發現到(C-1)和(M-1)被潮汐拉長的效果相似，因為離河川面已有一段距離，河川面的潮汐影響減弱，間接讓海岸線的潮汐影響加大，因此(C-1)、(M-1)被潮汐拉長的效果較離河川面較接近的(E-1)大上許多。而在(C-2)、(C-3)的位置上污染團長度受潮汐影響的情況和(M-2)、(M-3)相同，受潮汐作用時污染團長度較無潮汐時小，也就是高潮汐時流速變慢，低潮汐時流速加快，相對的高潮汐時流速慢的影響較大，這其中可能是因為離海岸線較遠潮汐影響減弱以及排水路水位變化的影響產生的結果。

在寬度的影響中，(C-1)因為較靠近海岸線，因此顯著的地下水位變動讓(C-1)受潮汐作用時其污染團寬度(9.5 m)較無潮汐時(6.33 m)大上許多。(C-2)、(C-3)污染團幾乎已經不受排水路徑影響，因此寬度在有無潮汐時相差不多。長寬比的部分中，在(C-2)、(C-3)位置的污染團受潮汐影響有限，因此在長寬比的部分有無潮汐時近乎相同。而(C-1)長寬比則是因為靠近海岸線的關係，使得污染團的長度和寬度都增加，最後呈現出受潮汐影響時之長寬比(3.44)較無潮汐時(3.87)小。

污染團的深度值中和 E、M 情況相同，(C-1) 因為較靠近海岸線的緣故，潮汐明顯的拉推作用下產生深度較大的緣故，但是差距不大，而(M-2)、(M-3)有無潮汐時深度相當，因此可以知道潮汐對深度影響不大。在深寬比方面，在(C-1)的位置上因為受潮汐的影響使得寬度和深度值都有些許的增加，(C-2)、(C-3)則因為離海岸線和河川面都有一定的距離下，不論寬度和深度值在受潮汐或無潮汐影響時大小都約相同，因此在深寬比方面有潮汐(1 m, 1.27 m, 1.32 m)和無潮汐時(1.39 m, 1.3 m, 1.3 m)約略相同。

半年和一年的擴散趨勢和前述的 E 和 M 位置都相同，污染團之擴散趨勢在半年內已趨於穩定。

表 4.1.3-1 各個位置中污染團面積之比較(一年)

(C-1)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	24.5	6.33	8.8	3.87	1.39
有潮汐	0°	32.7	9.5	9.42	3.44	1
(C-2)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	26	6.7	8.78	3.88	1.3
有潮汐	0°	27.5	7	8.9	3.93	1.27
(C-3)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	26.7	6.7	8.72	3.98	1.3
有潮汐	0°	27.1	6.7	8.82	4	1.32



圖 4.1.3-1 C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

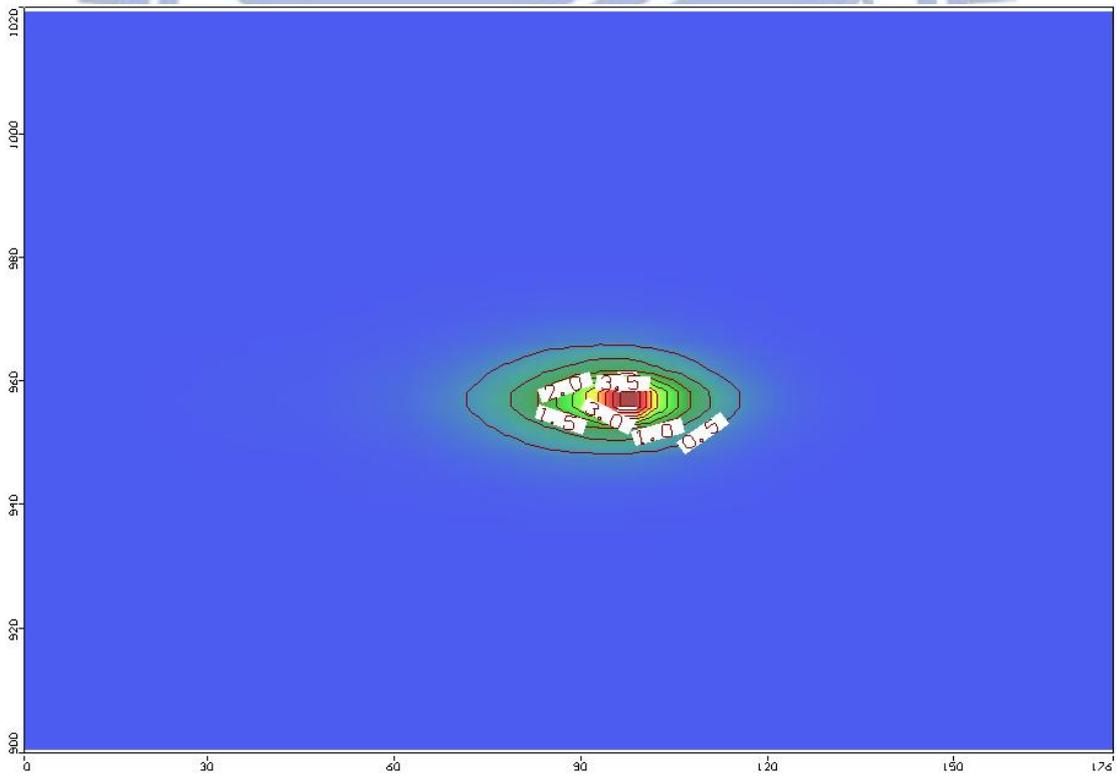


圖 4.1.3-2 C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

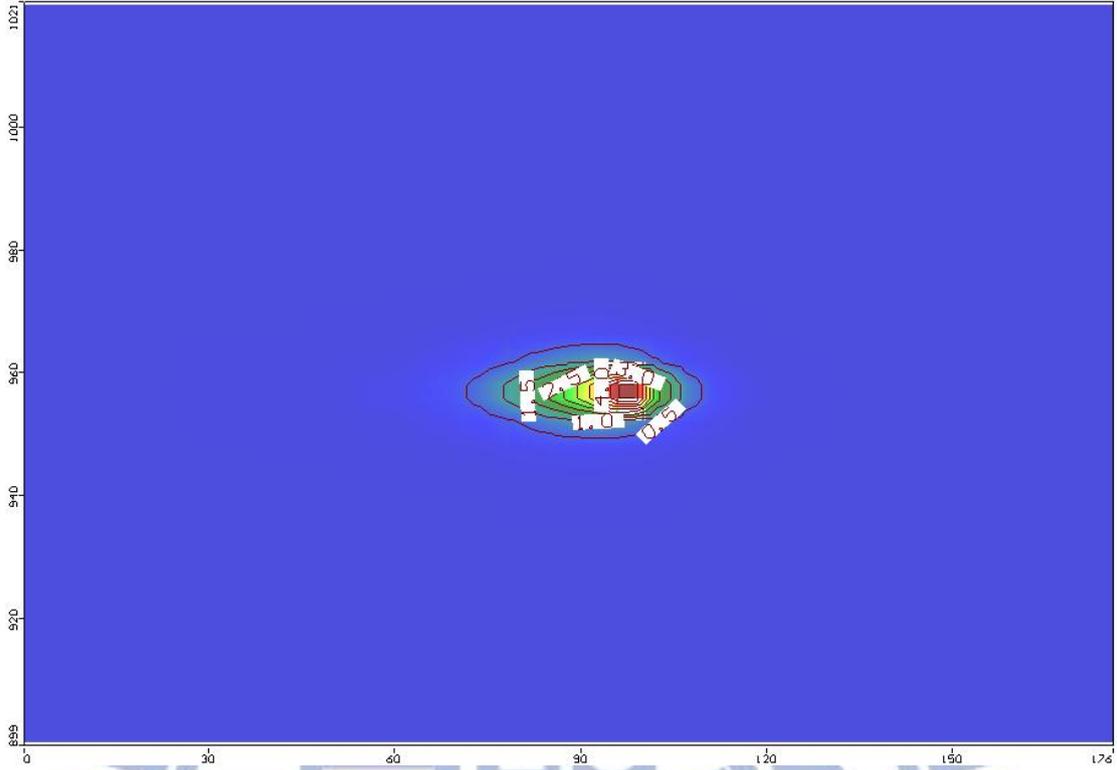


圖 4.1.3-3 C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

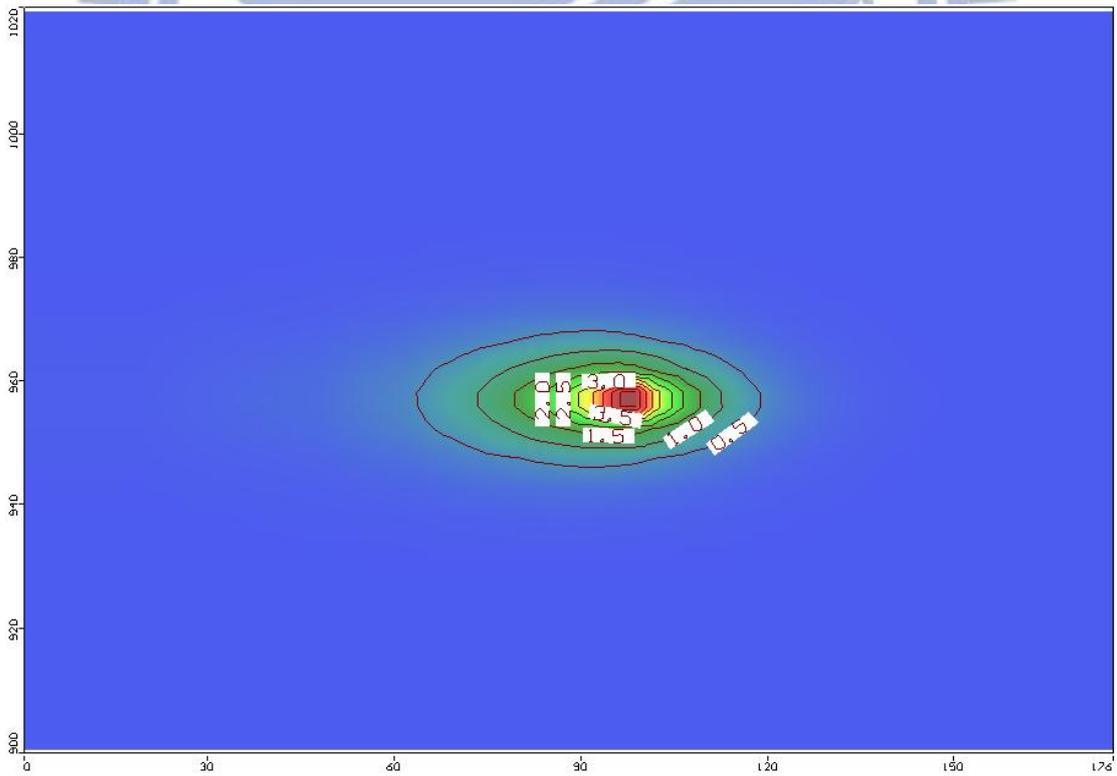


圖 4.1.3-4 C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

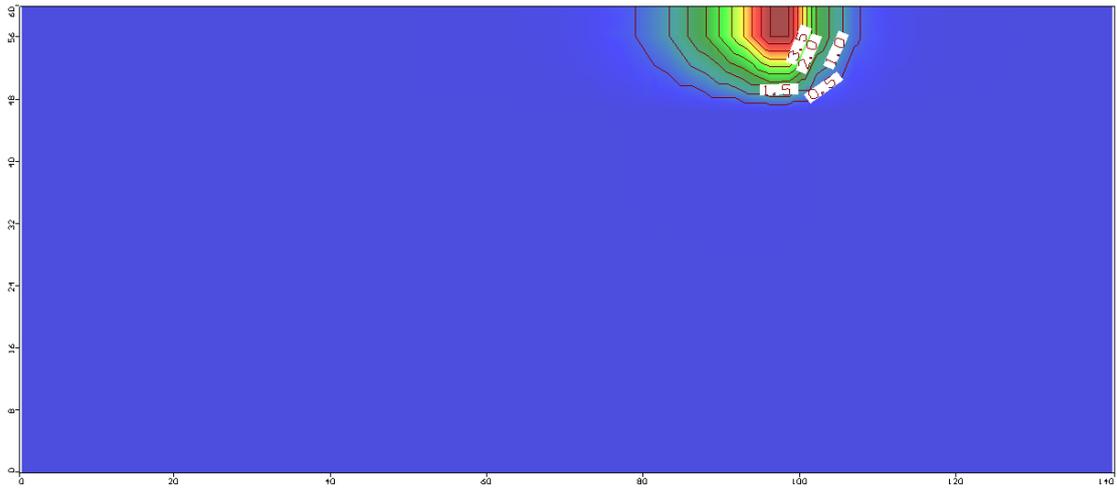


圖 4.1.3-5 C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

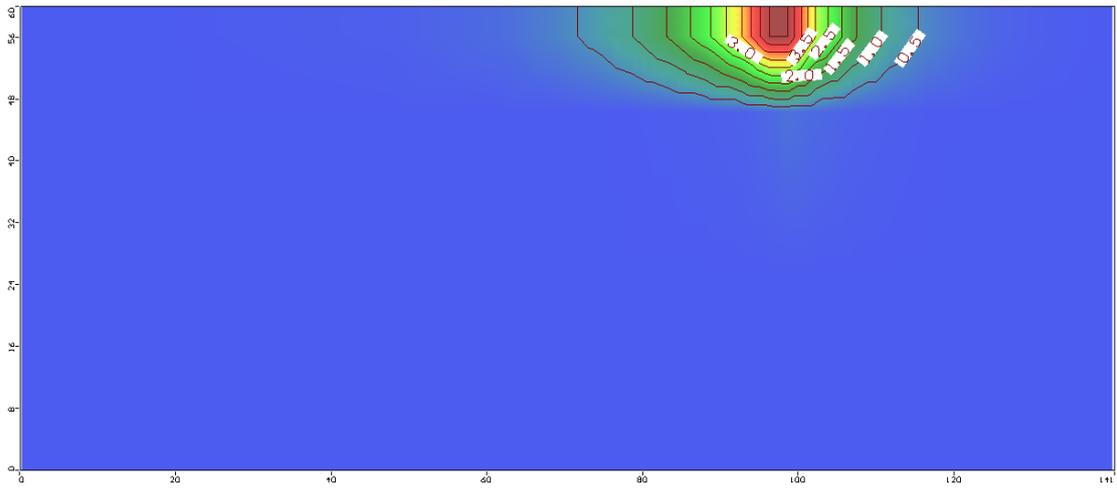


圖 4.1.3-6 C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

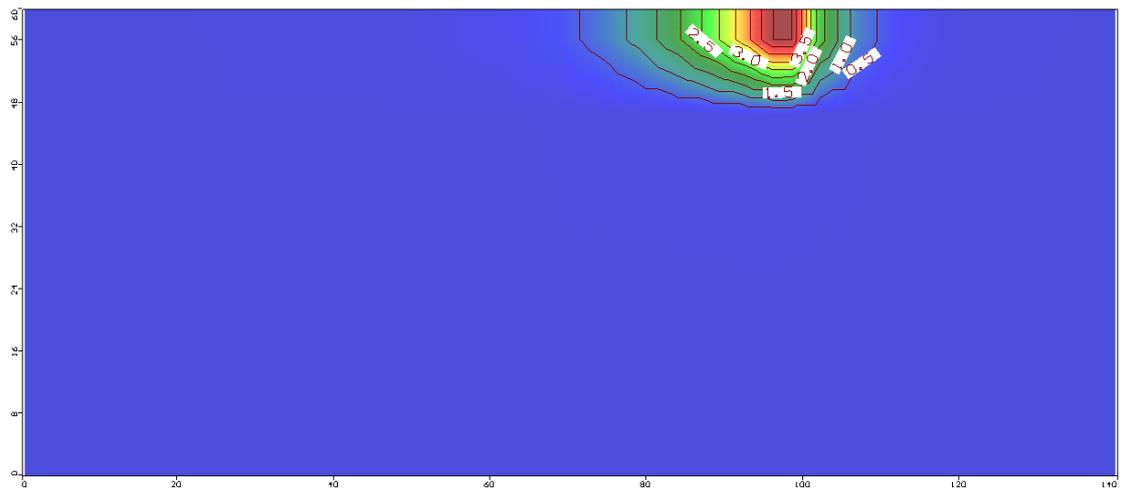


圖 4.1.3-7 C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

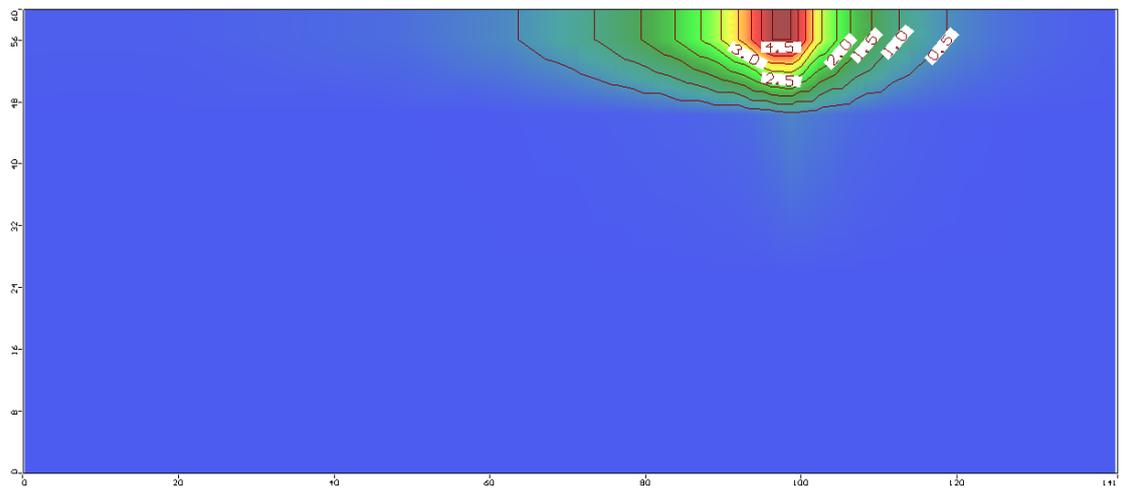


圖 4.1.3-8 C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

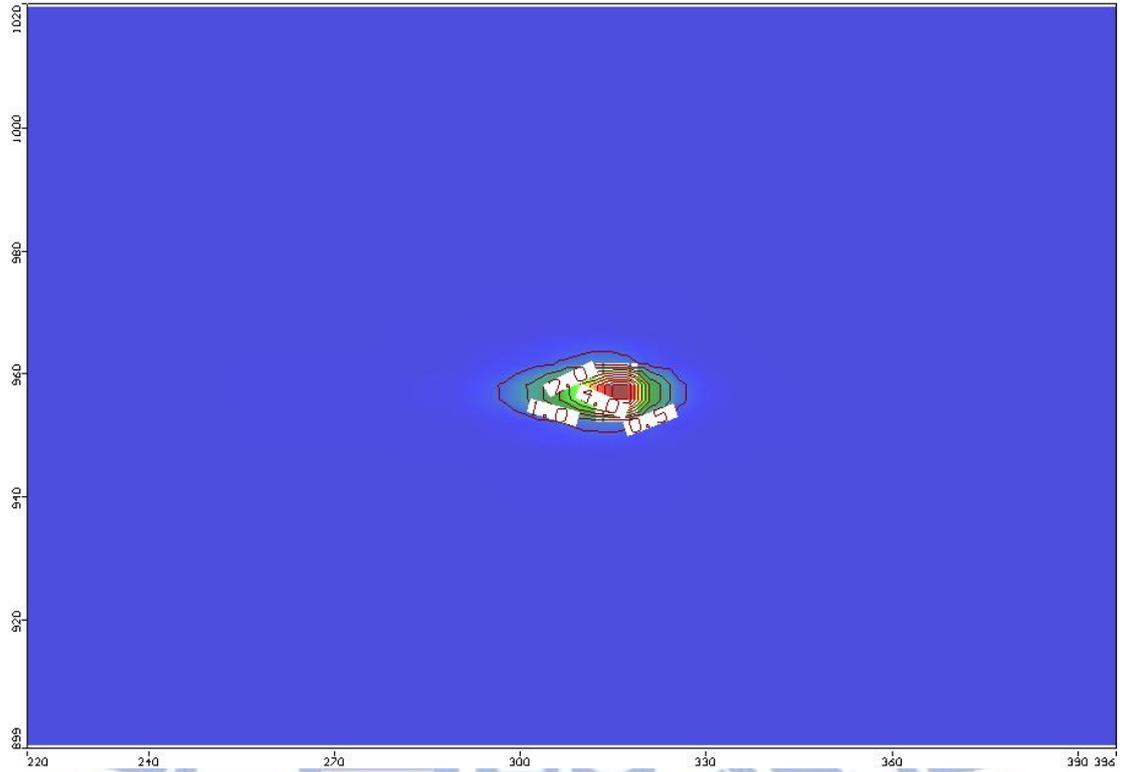


圖 4.1.3-9 C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

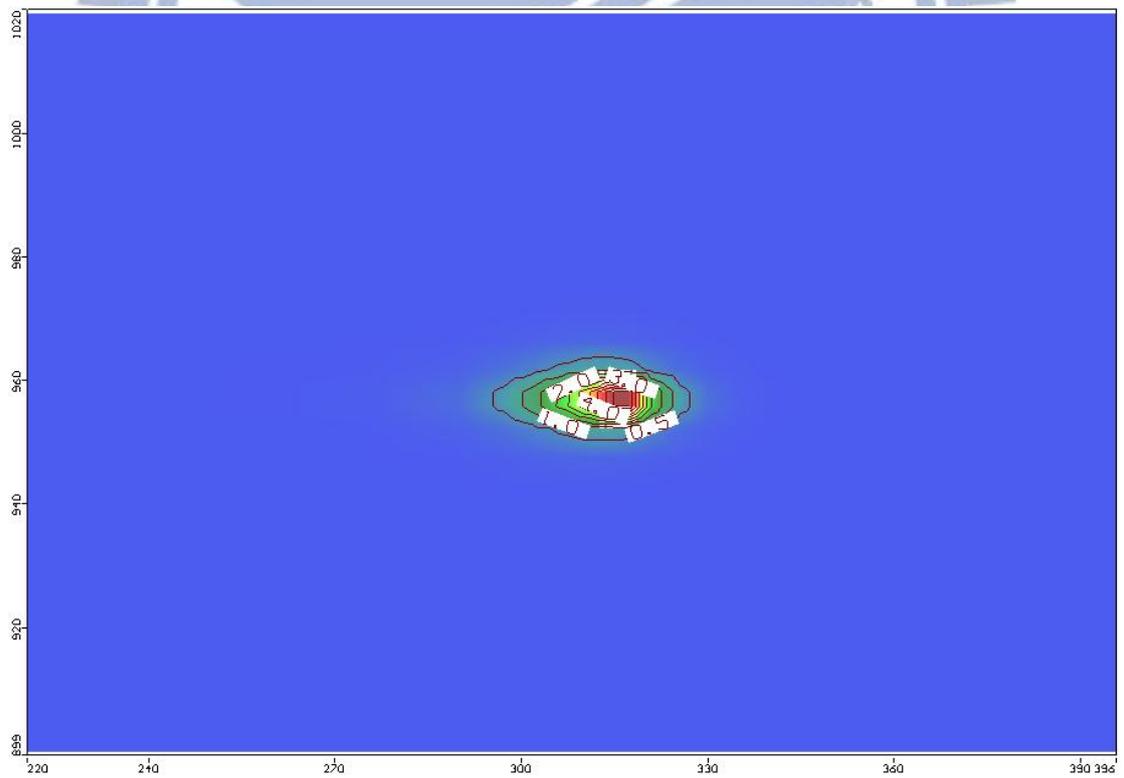


圖 4.1.3-10 C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

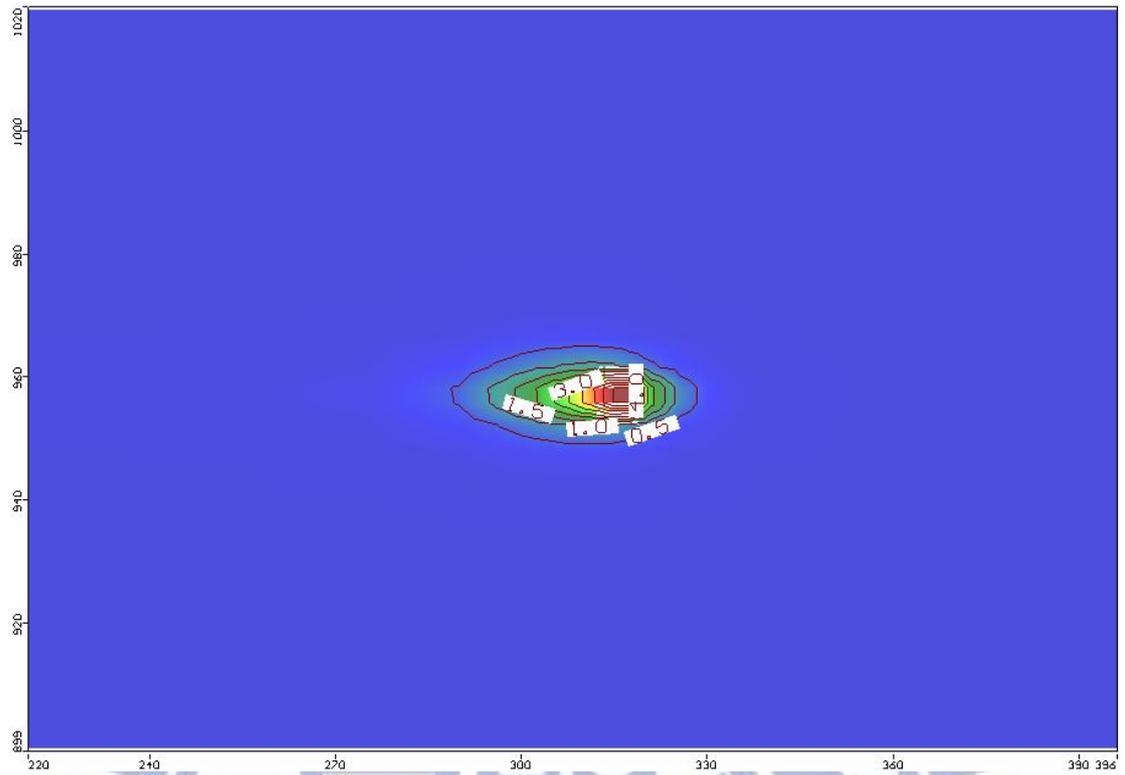


圖 4.1.3-11 C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

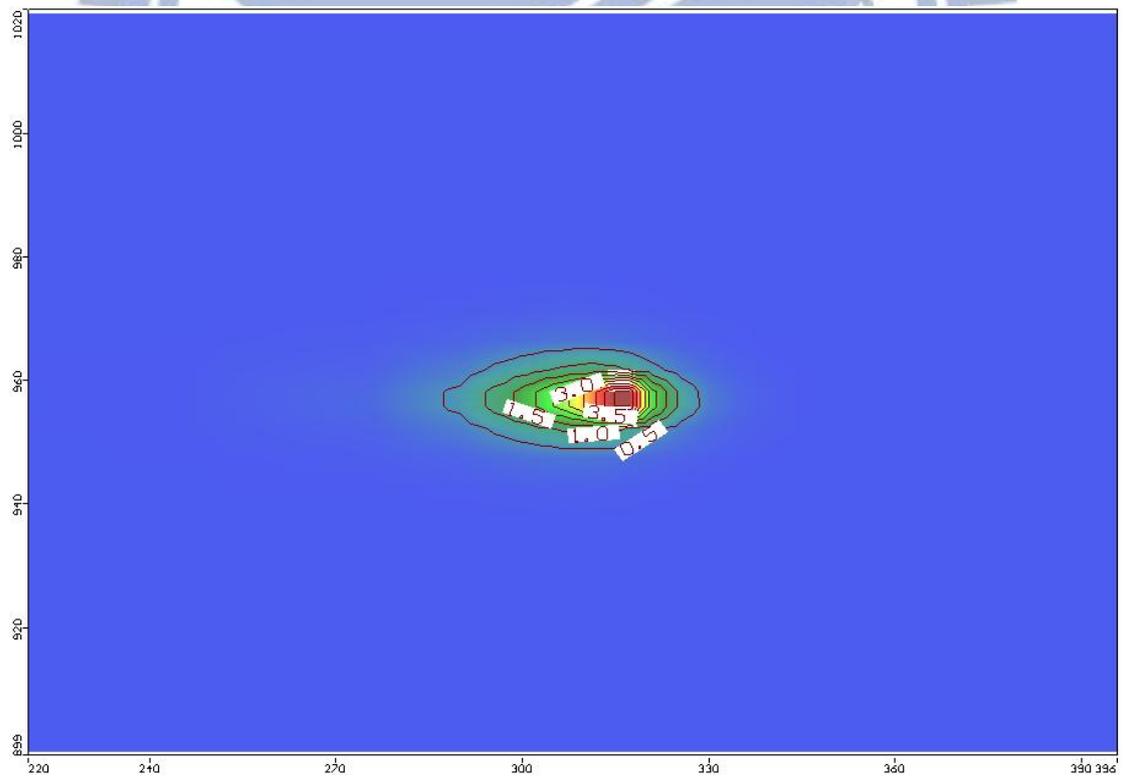


圖 4.1.3-12 C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

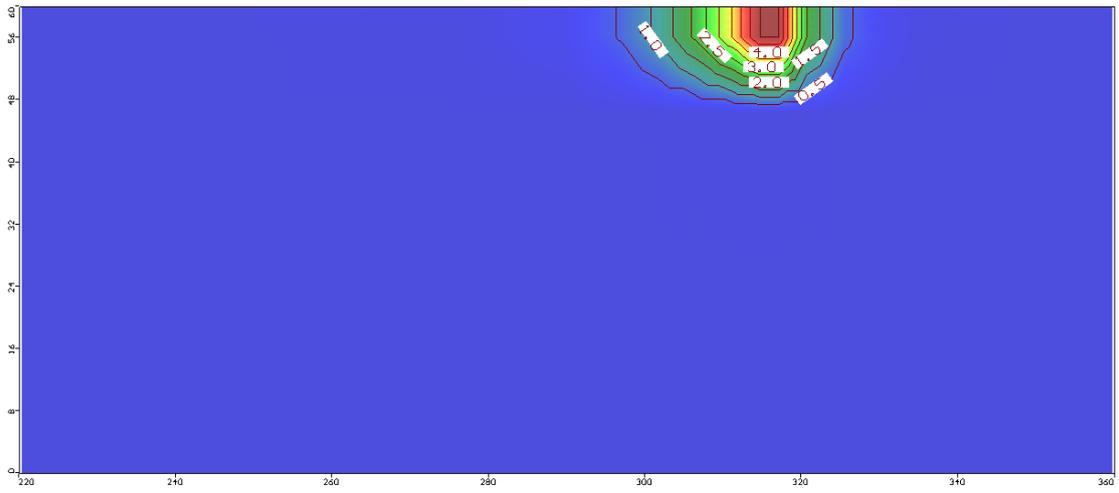


圖 4.1.3-13 C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

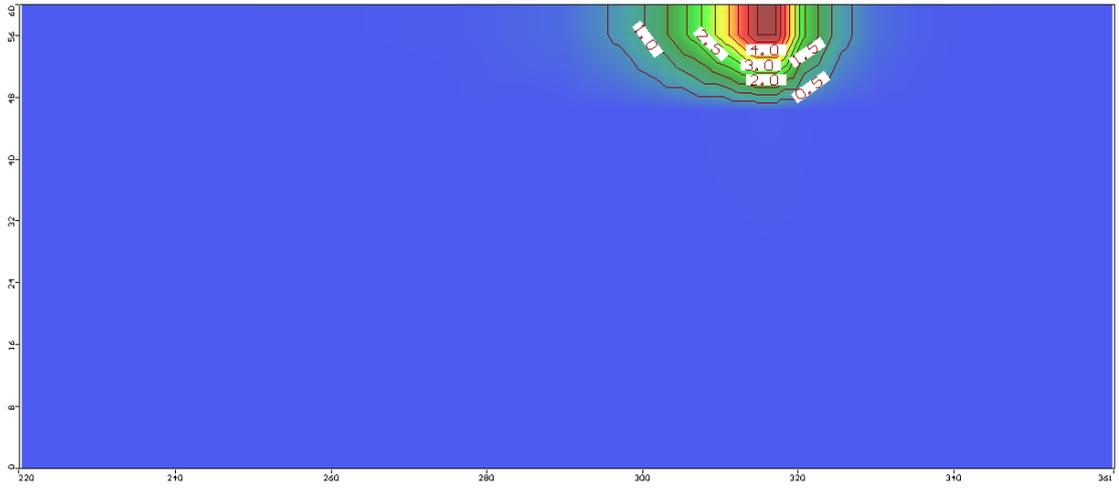


圖 4.1.3-14 C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

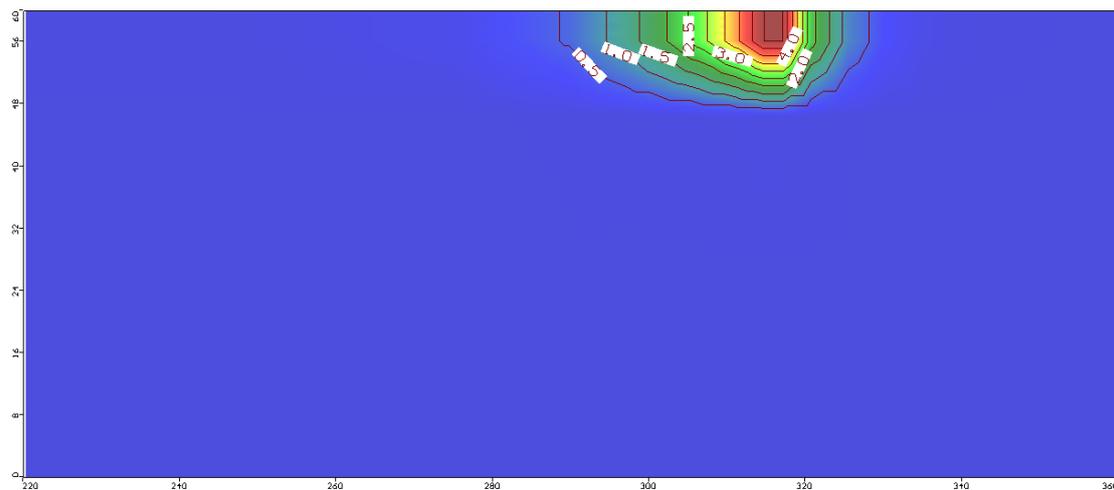


圖 4.1.3-1 C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

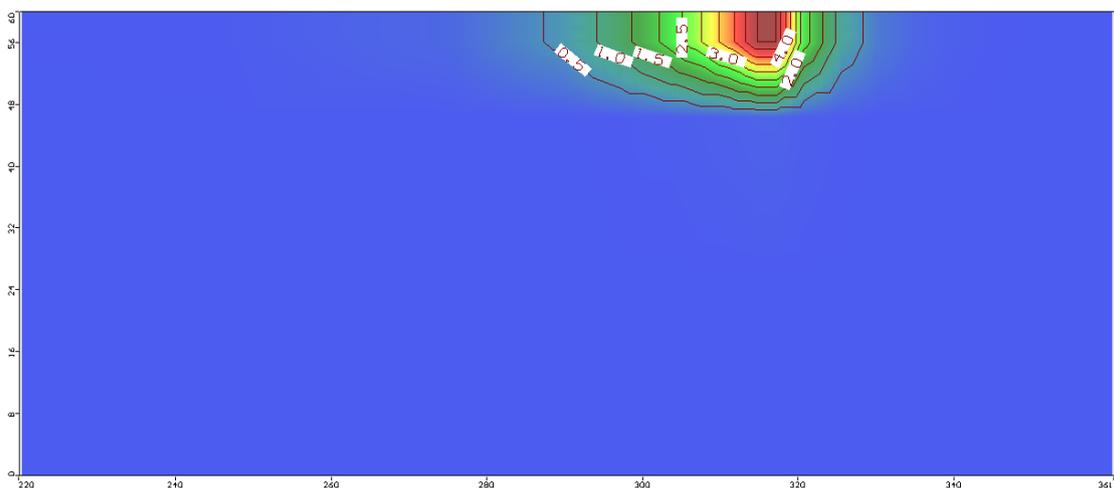


圖 4.1.3-16 C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

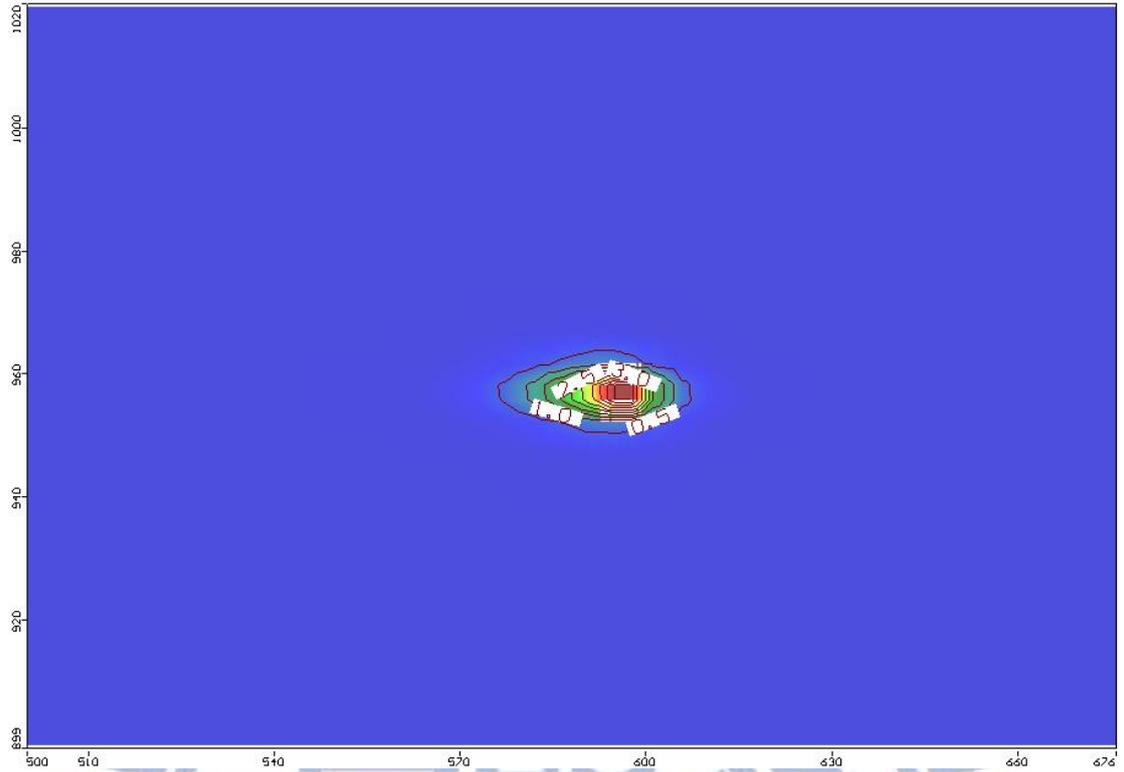


圖 4.1.3-17 C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

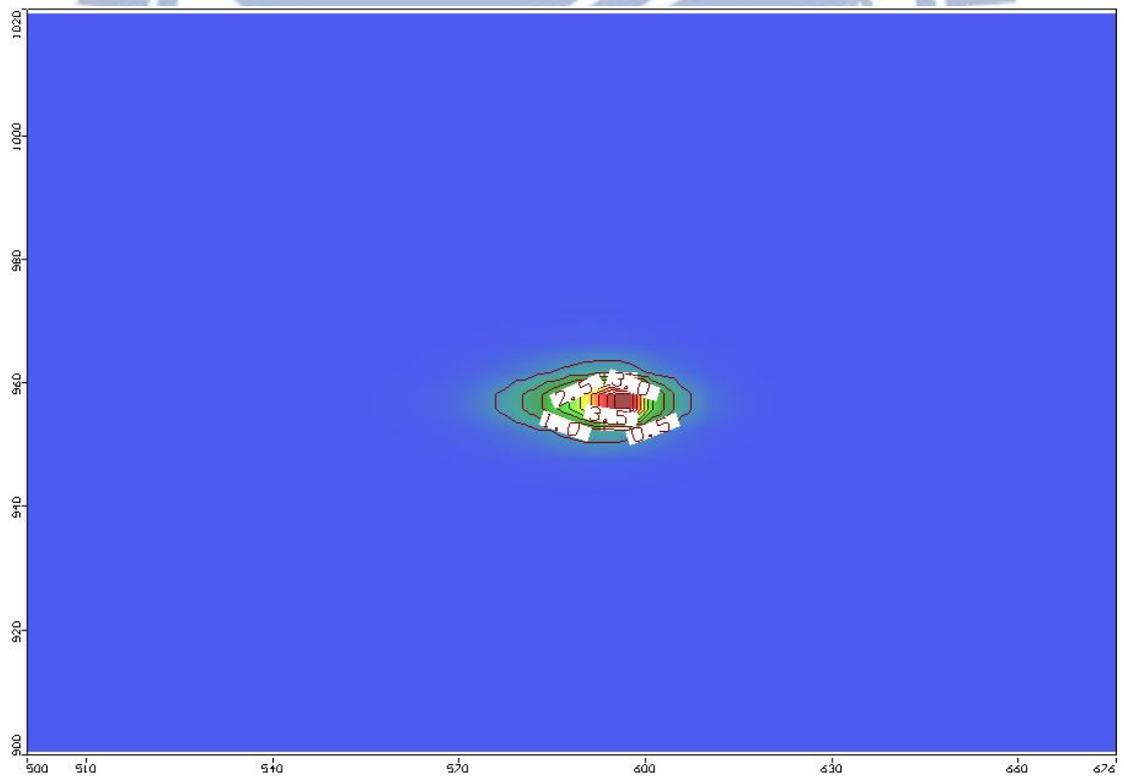


圖 4.1.3-18 C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

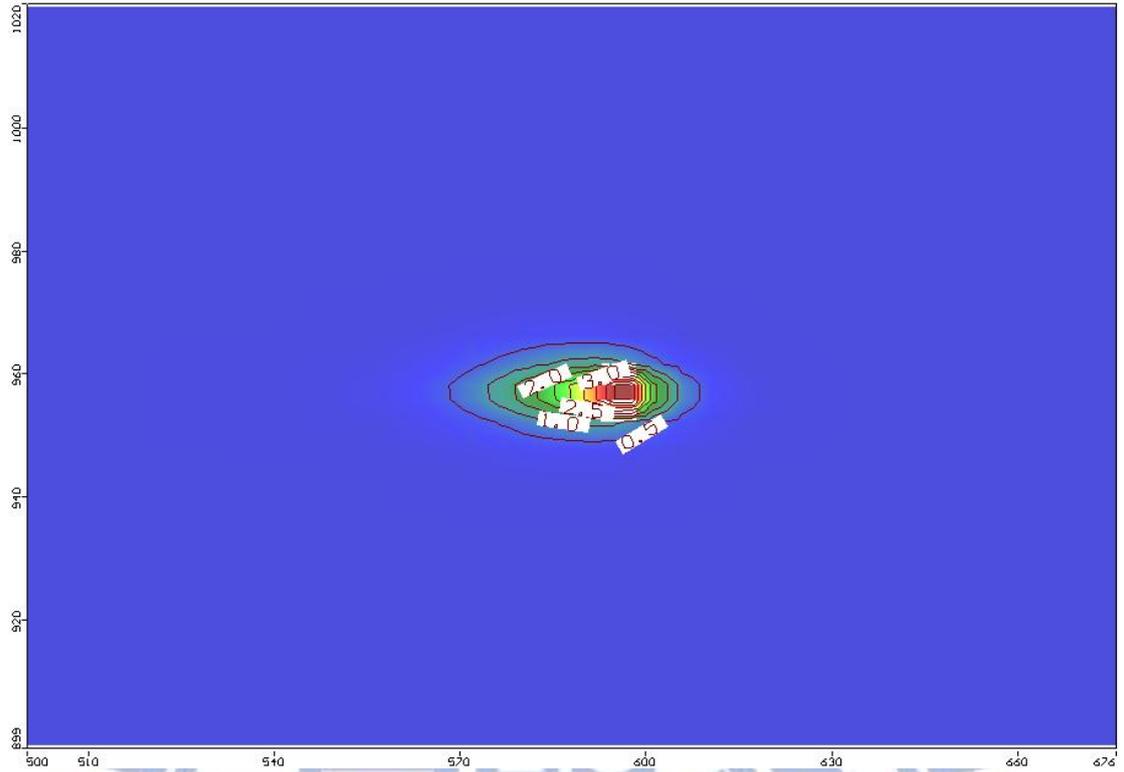


圖 4.1.3-19 C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

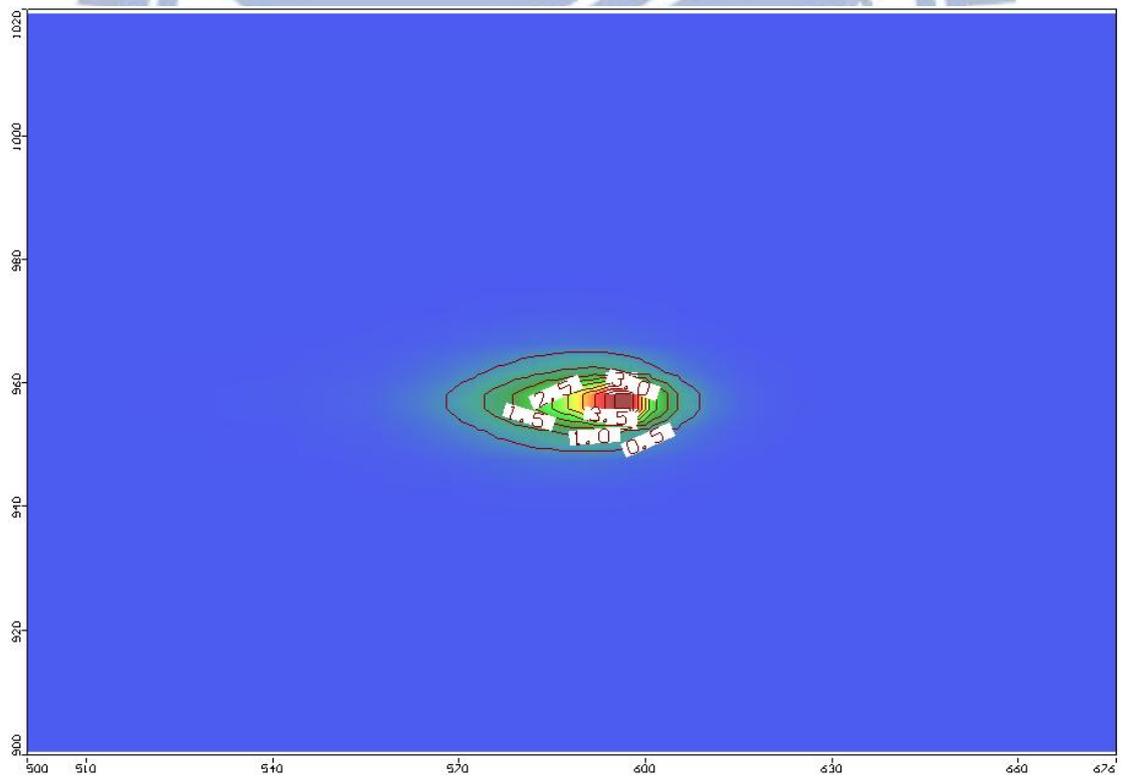


圖 4.1.3-20 C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

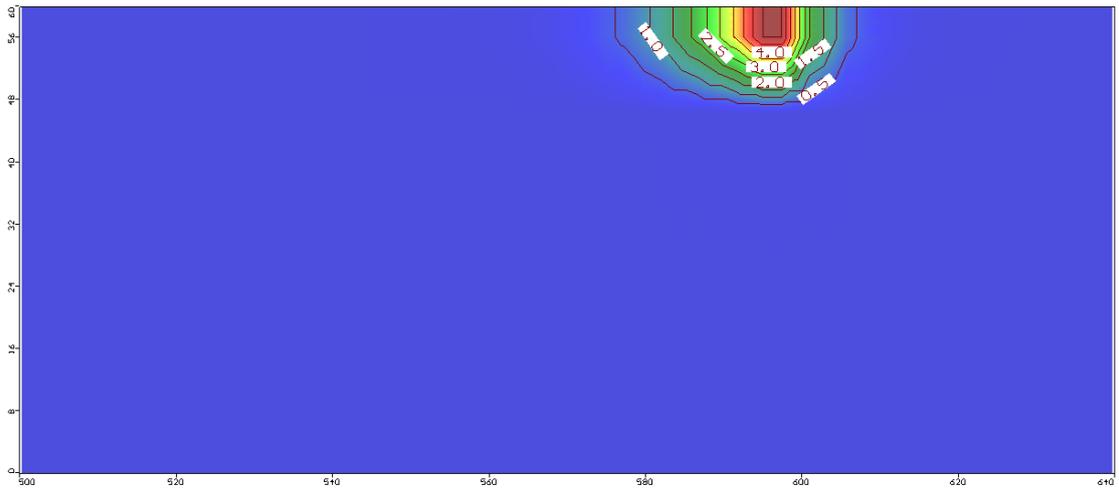


圖 4.1.3-21 C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

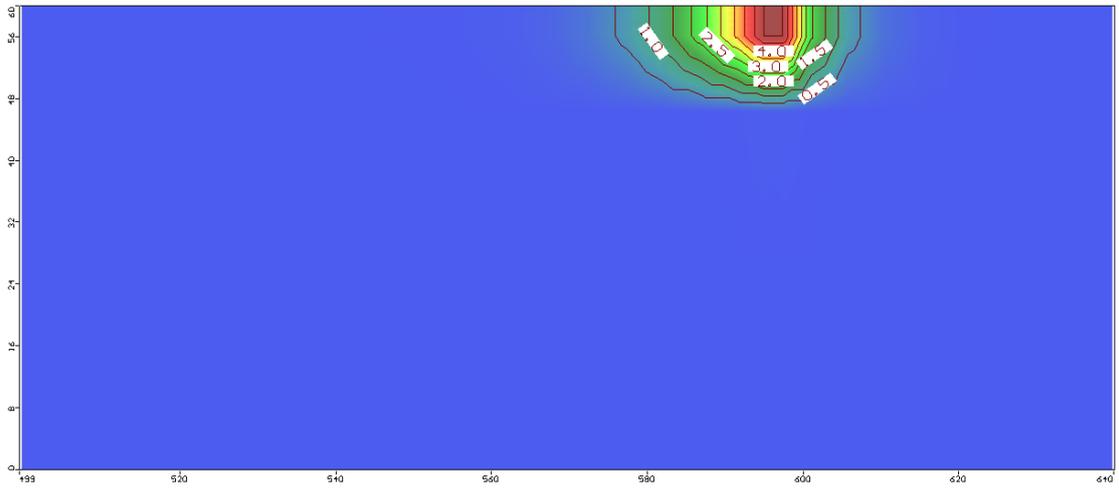


圖 4.1.3-22 C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

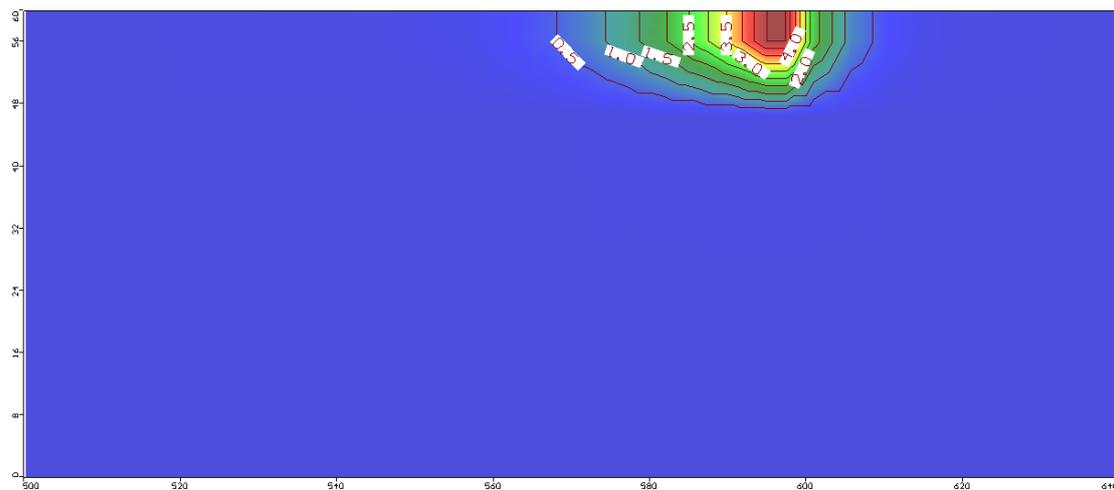


圖 4.1.3-23 C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

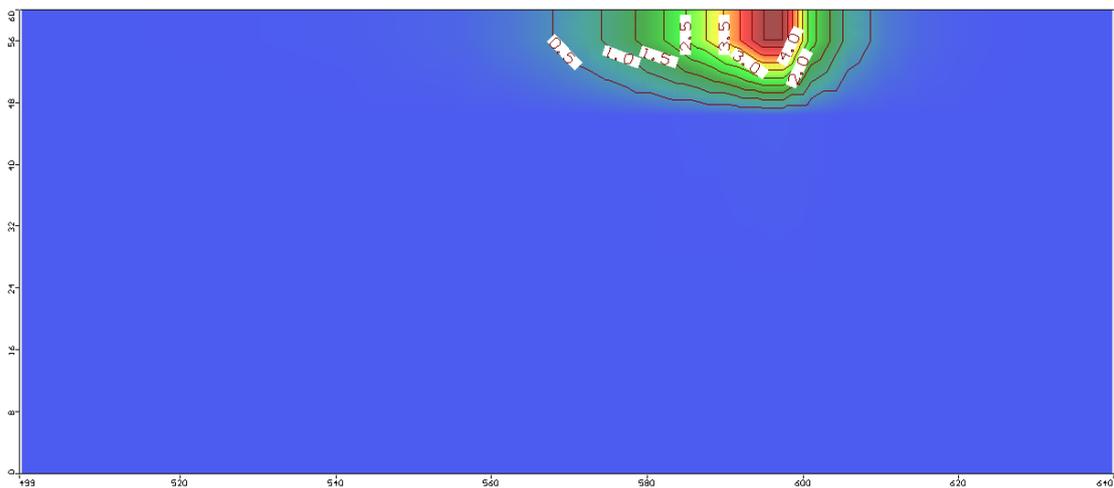


圖 4.1.3-24 C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.2 Case 2 將導水度放大五倍

以下的 18 張圖(圖 4.2-1 和圖 4.2-2)為各個位置上一年模擬以後的結果, 污染團範圍以 0.5 ppm 做為最小濃度, 5 ppm 為最大濃度, 中間間隔以 0.5 來做區分, 在場址中因為水力梯度小(1.84×10^{-3})的關係使得流場中的流速相當慢(平均流速約 2.9×10^{-8} m/s), 因此在模擬的呈現中將會把 E-1、E-2、E-3、M-1、M-2、M-3、C-1、C-2、C-3 各個位置的污染分佈情況以半年和一年的模擬結果呈現出來。在各小節中將會以 E、M、C 三個位置分別進行討論, 最後全部綜合再一起進行討論。



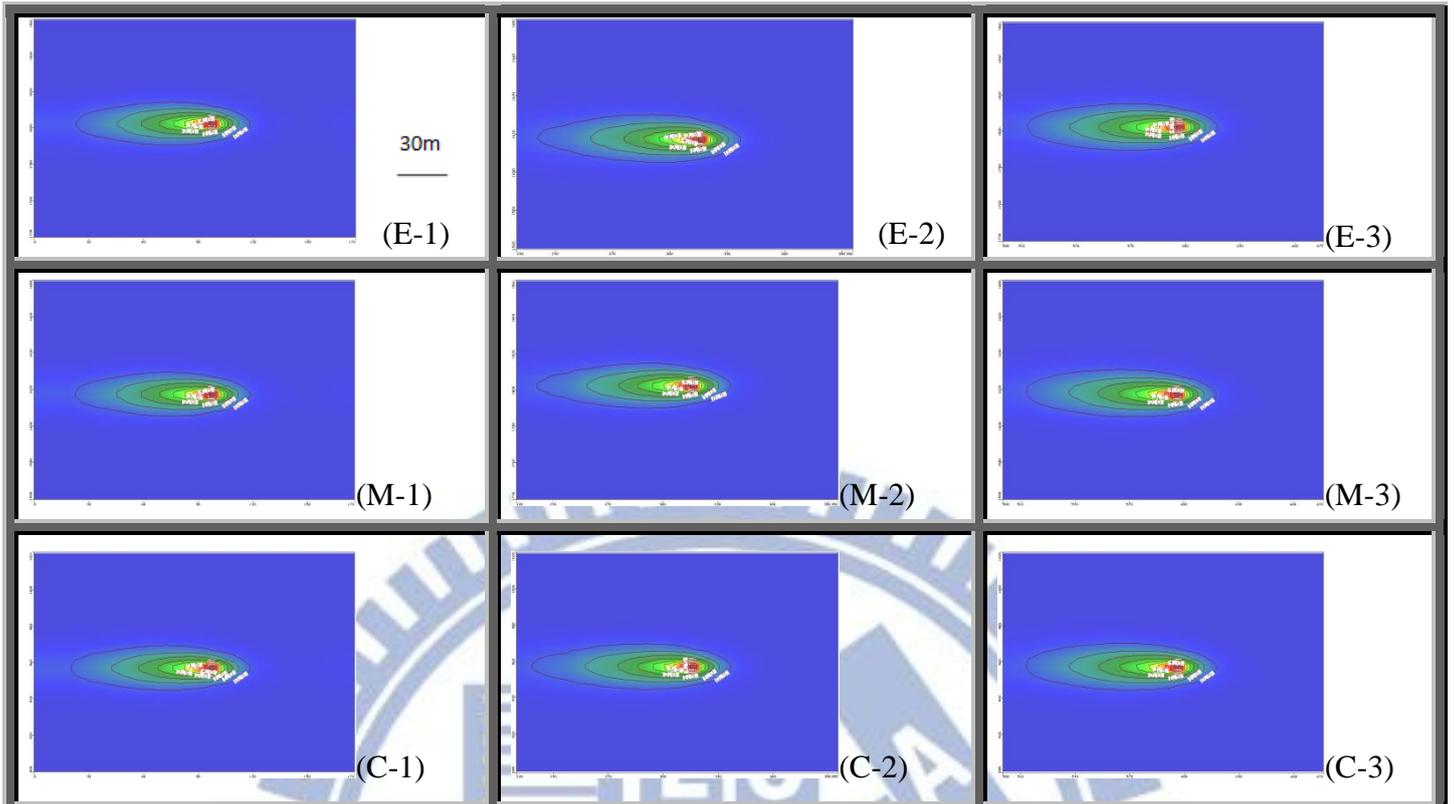


圖 4.2-1 無潮汐作用下污染團

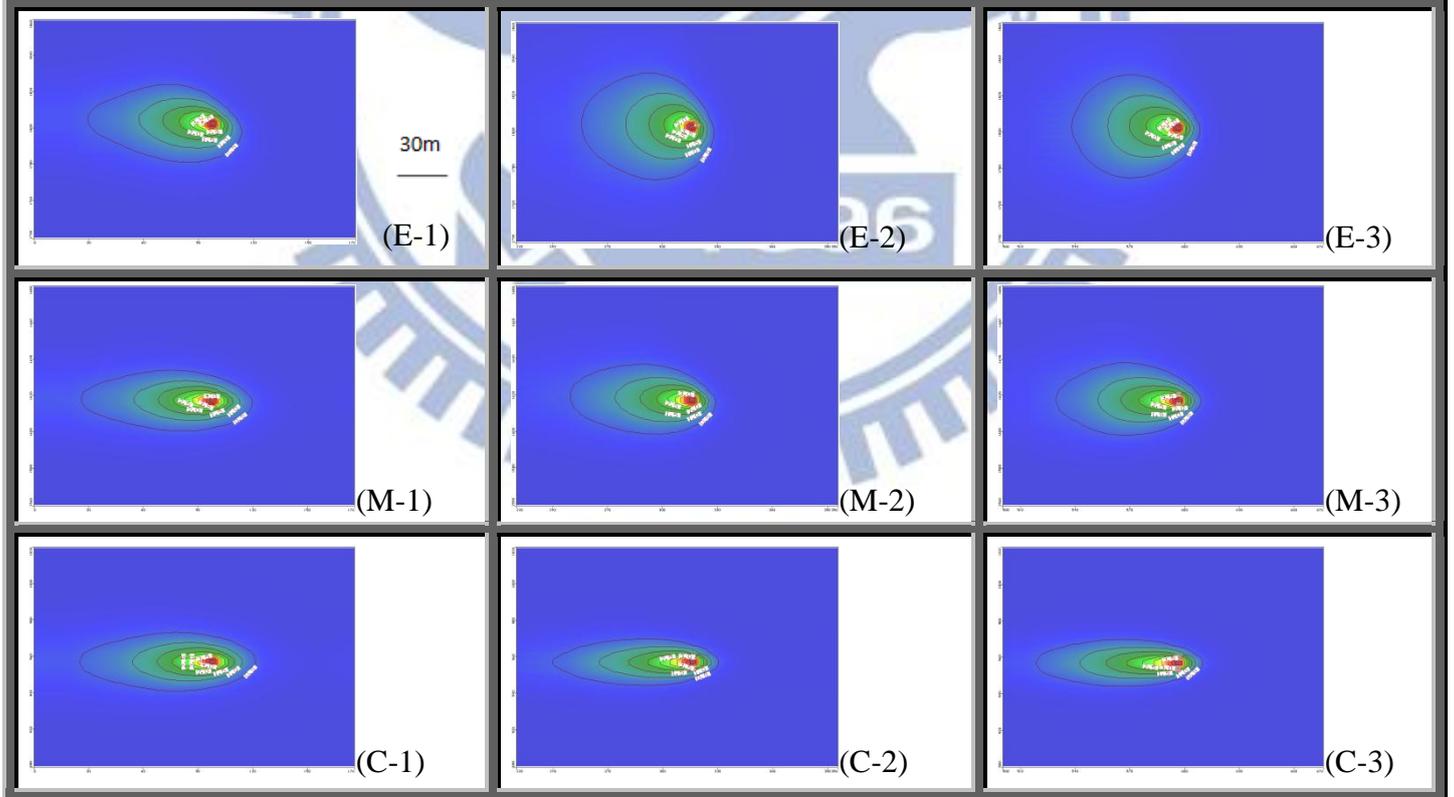


圖 4.2-2 潮汐作用下污染團

4.2.1 潮汐對於(E-1)、(E-2)、(E-3)影響比較

由表 4.2.1-1 當中可以觀察出不論是(E-1)、(E-2)、(E-3)受潮汐影響時污染團的長度(67.3 m, 59.4 m, 57 m)都較無潮汐時(73.3 m, 83.7 m, 81.7 m)小，以此可以推論出污染團因為潮汐的影響產生擠壓的效果；而其中(E-1)污染團長度之差值(6 m)比起其他兩個位置(E-2)、(E-3)之差值(24.3 m)、(24.7 m)更小，這是因為(E-1)位置上更靠近於海岸面，而海岸面潮汐作用影響使得鄰近海岸面的地下水水位變動顯著，間接的讓(E-1)污染團之長度上的擠壓效果受到了限制。

在污染團寬度上受到潮汐作用影響時會比無潮汐時大，這是因為有潮汐作用時河川面(上端)有設定變動水頭的緣故，使得流場也能夠往河川面移動，因此受潮汐影響時之寬度都較無潮汐時大。而另一個因素為假設初始延散度時，設定數據為 x 方向，並非為水流方向，這樣的情境和真實情況是不同的；在真實的情況下，因為排水路潮汐的變化，導致在高潮位時地下水梯度是由海岸線往內陸側流(如圖 4.2.1-1)，而低潮位時則往排水路徑流，因此污染團的方向產生轉向的效果。而這樣的假設中，也因為側向的機械延散增加，使得污染團的寬度變大了，這也是污染團寬度變大的影響因素之一。(E-2)和(E-3)因為污染源離海岸線距離遠，讓海岸線的潮汐影響效果降低，污染團也因為海岸線的潮汐影響減弱使得河川面的影響效果增強許多，因此在(E-2)、(E-3)的污染團寬度(24.2 m)、(19.6 m)都較(E-1)之寬度(16.2 m)大上許多。在長寬比方面因為(E-1)的污染團長度較(E-2)、(E-3)大，而寬度又較(E-2)、(E-3)小，使得長寬比較(E-2)、(E-3)大。

污染團的夾角上和 Case 1 之 E 位置情況相同，因為排水路潮汐的變化，導致在高潮位時地下水梯度是由海岸線往內陸側流，而低潮位時則往排水路拉，因此污染團的方向產生轉向的效果。在污染團長軸與 x 軸之夾角中(E-1)位置因為較靠近海岸線，而海岸線的潮汐影響比河川面大，讓污染團有被海岸線拉去的現象，最後呈現出較小的角度(3°)；(E-2)離海岸線都有一定的距離因此潮汐影響減弱不少，讓河川面的潮汐影響加大，最後呈現出的較大的角度(10°)；而(E-3)的位置上因為離海岸線和河川面潮汐影響區域有一段距離，因此在轉向的夾角上已不明顯(0°)。

表中的深度方面，可以看出當污染源(E-1)、(E-2)、(E-3)離海岸線越遠其有無潮汐時之深度差值越小(9.9 m)、(3.5 m)、(0.65 m)，可能是因為海岸線顯著的潮汐現象，當污染源越靠近海岸線時其地下水水位變動起伏大，讓污染深度增加。深寬比的部分，因為(E-1)深度(19.15 m)相較於(E-2)(12.55 m)、(E-3)(9.54 m)大，而寬度較小於(E-2)、(E-3)，因此(E-1)之深寬比相較於(E-2)(0.52)、(E-3)(0.5)大。由剖面圖上會看到污染物下端尖起的部分，這部分可能是因為程式中網格切割的影響以及在下一層的分層中滲透性較高導致污染物向下的速度加快，因此在表 4.2.1-1 中受潮汐的影響下之污染團深度大很多。

當此情境和 Case 1 相比較時，因為長、寬的絕對值會按照流速改變的水動力延散係數影響，因此以夾角、長寬比來進行討論；在夾角的部分中，在 Case 1

裡(E-1)、(E-2)、(E-3)各夾角為 36° 、 80° 、 79° ，而在 Case 2 中為 3° 、 10° 、 0° ，能夠發現到 Case 1 之夾角大於 Case 2 之夾角很多，這其中最主要的原因為導水度的加大，流速加快，讓 Case 2 中海岸線的潮汐影響減弱，最後呈現出 Case 2 受潮汐影響時的夾角都小於 Case 1 受潮汐時的夾角；在長寬比方面，Case 2 受潮汐影響時之長寬比(4.15, 2.45, 2.9)都較 Case 1 受潮汐影響時之長寬比(2.7, 1.07, 1.18)大，這和上述的情況一樣，因為導水度的增加，流速加快，讓 Case 2 中海岸線的潮汐影響減弱，最後呈現出 Case 2 受潮汐影響時的長寬比都較 Case 1 受潮汐時的長寬比大。

污染團受到潮汐影響時之半年模擬情況(圖 4.2.1-2 和圖 4.2.1-10)和一年的模擬情況(圖 4.2.1-4 和圖 4.2.1-12)相比較能夠發現到污染團長軸和 x 軸之夾角發生了轉向(逆時針)，以此可以推論出，污染團在半年的模擬結果後，污染團的擴散趨勢還尚未穩定。



表 4.2.1-1 污染團面積之比較結果(一年)

(E-1)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	73.3	10.7	9.25	7	1.45
有潮汐	3°	67.3	16.2	19.15	4.15	1.18
(E-2)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	83.7	11.2	9.05	7.47	0.8
有潮汐	10°	59.4	24.2	12.55	2.45	0.52
(E-3)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	81.7	10	8.89	8.17	0.89
有潮汐	0°	57	19.6	9.54	2.9	0.5

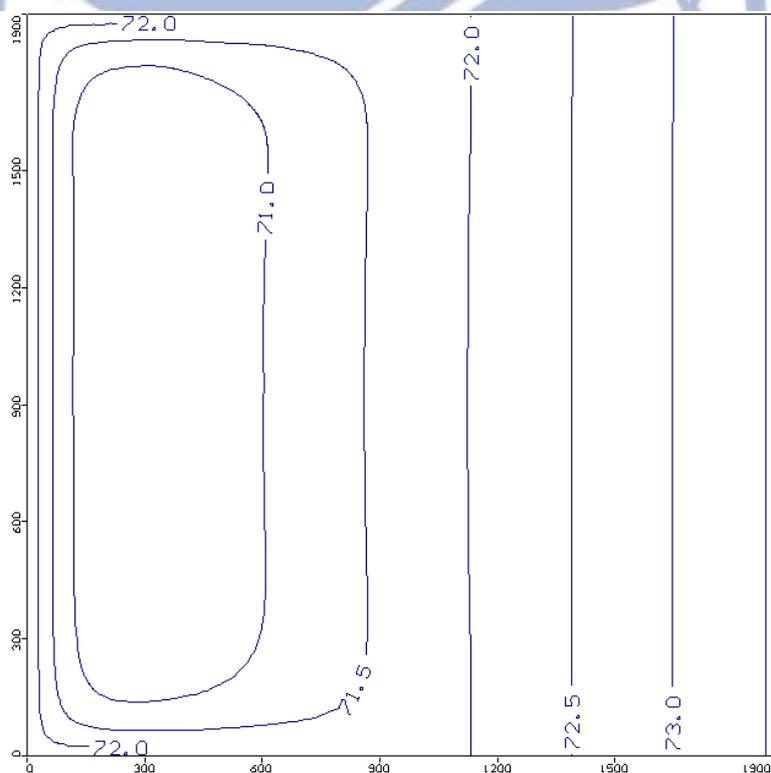


圖 4.2.1-1 高潮位時之等水位線

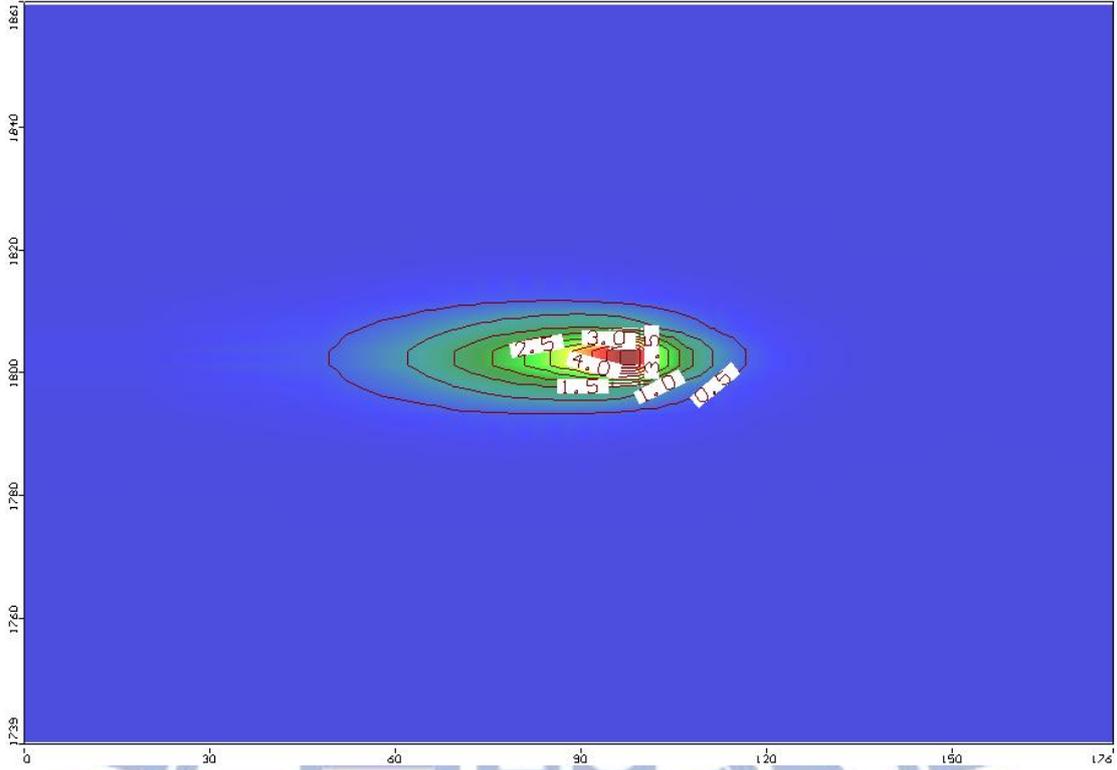


圖 4.2.1-2 E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

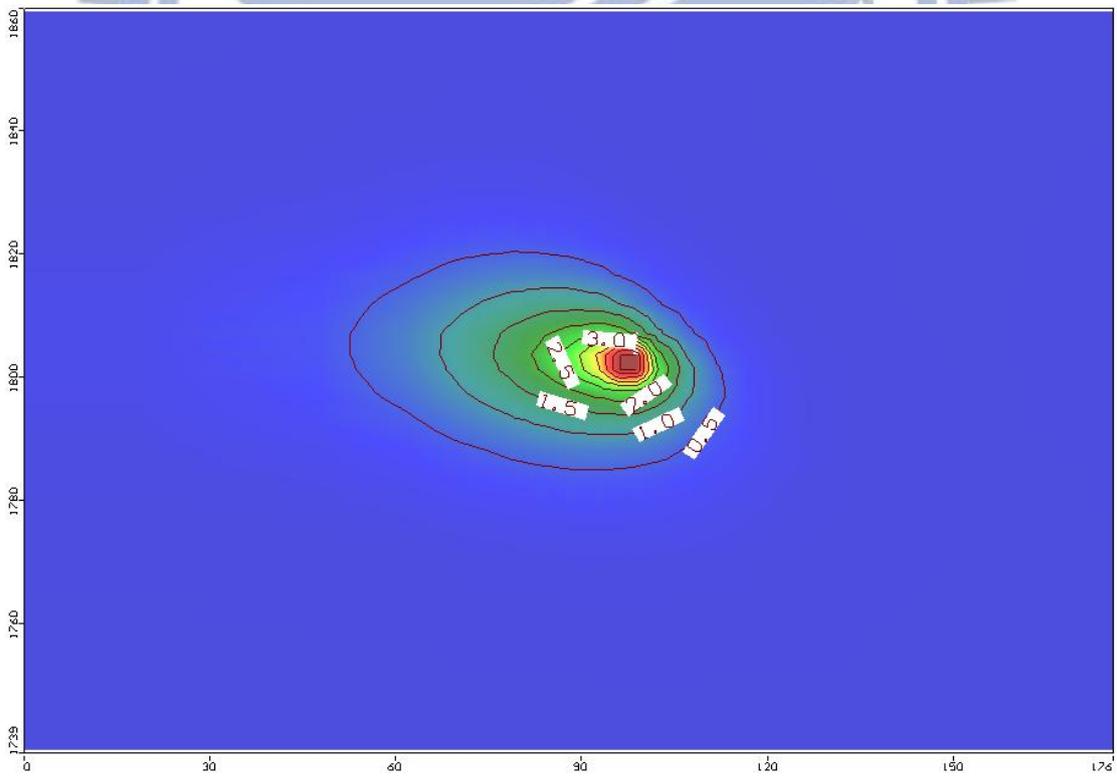


圖 4.2.1-3 E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

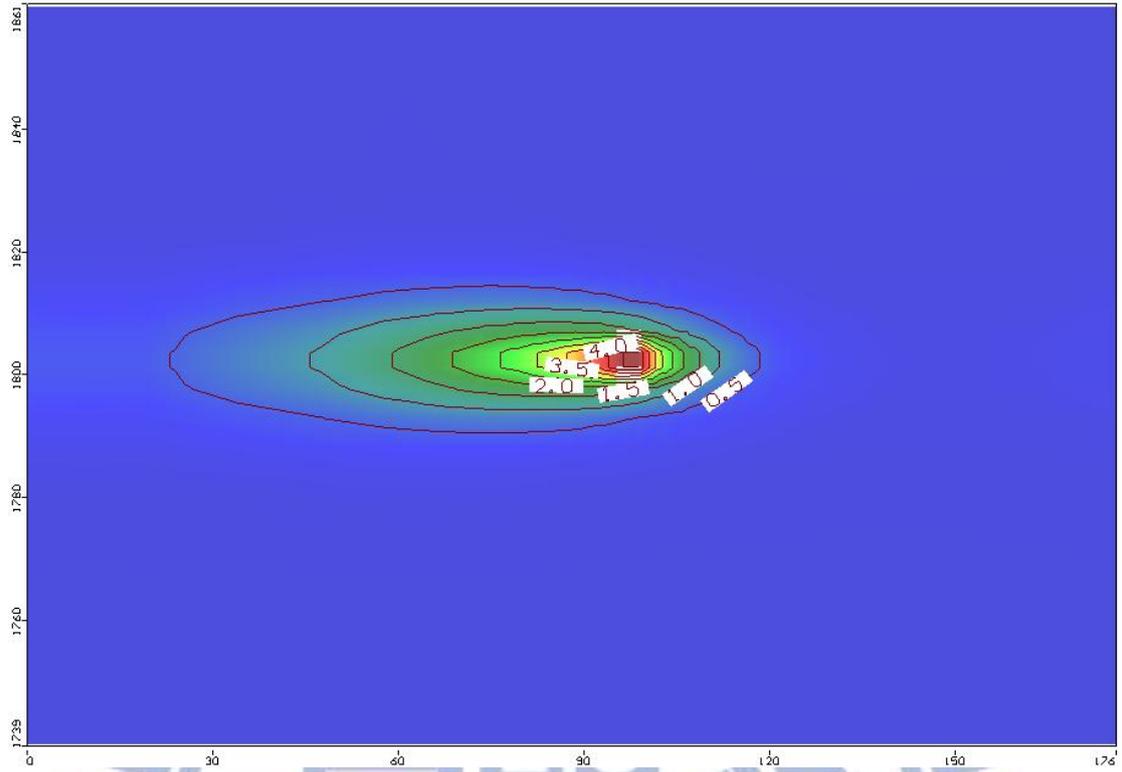


圖 4.2.1-4 E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

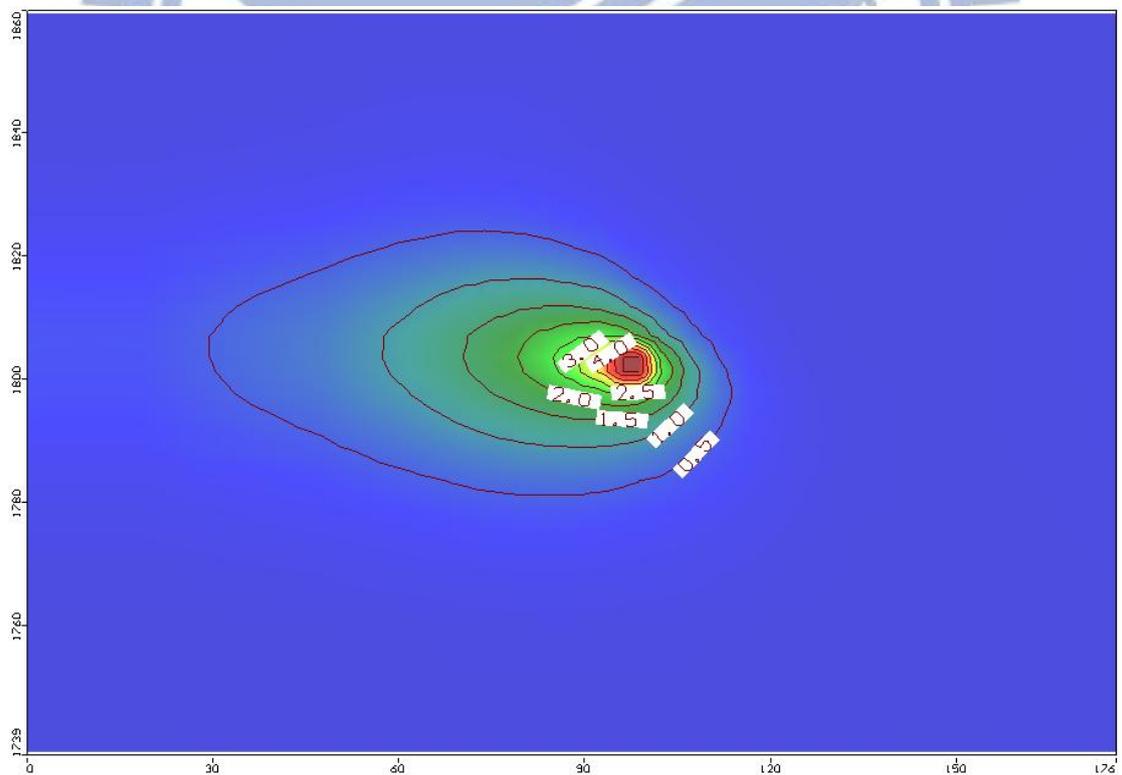


圖 4.2.1-5 E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

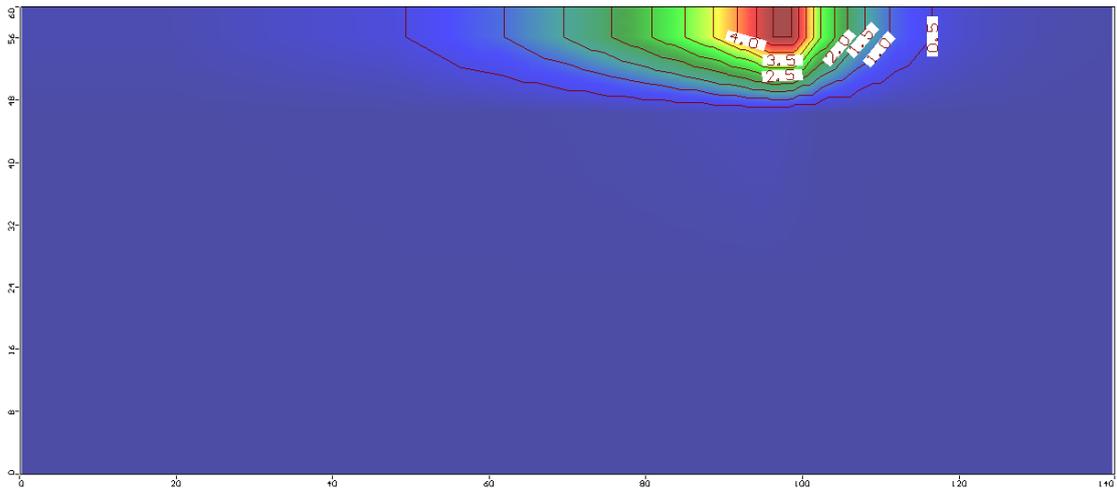


圖 4.2.1-6 E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

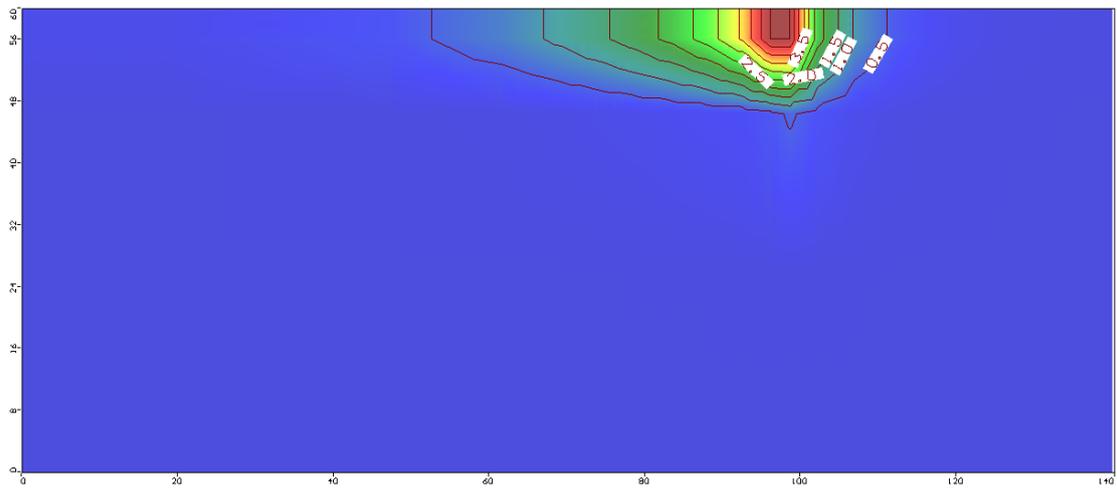


圖 4.2.1-7 E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

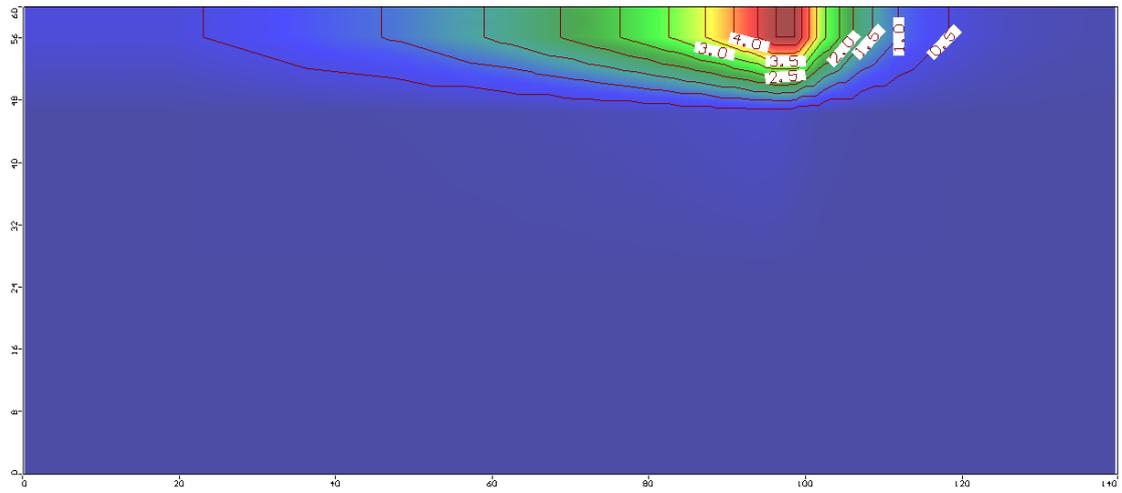


圖 4.2.1-8 E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

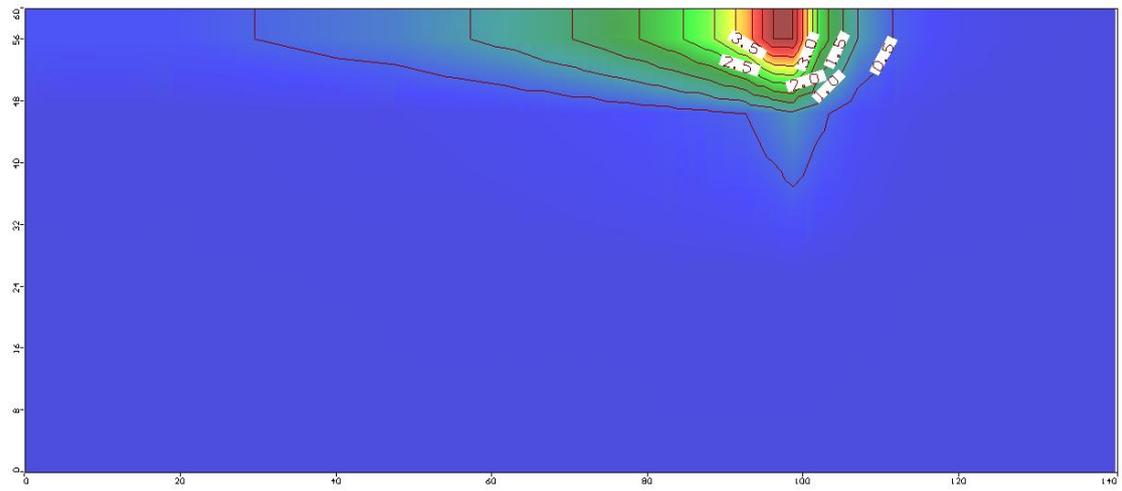


圖 4.2.1-9 E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

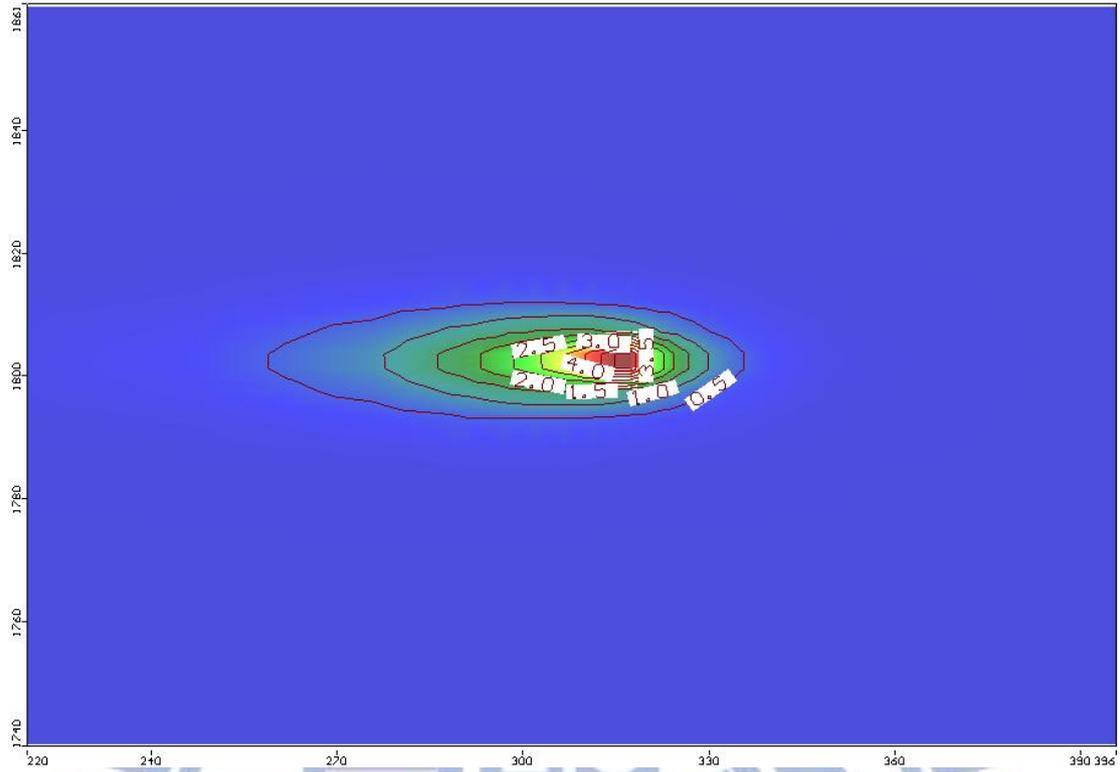


圖 4.2.1-10 E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

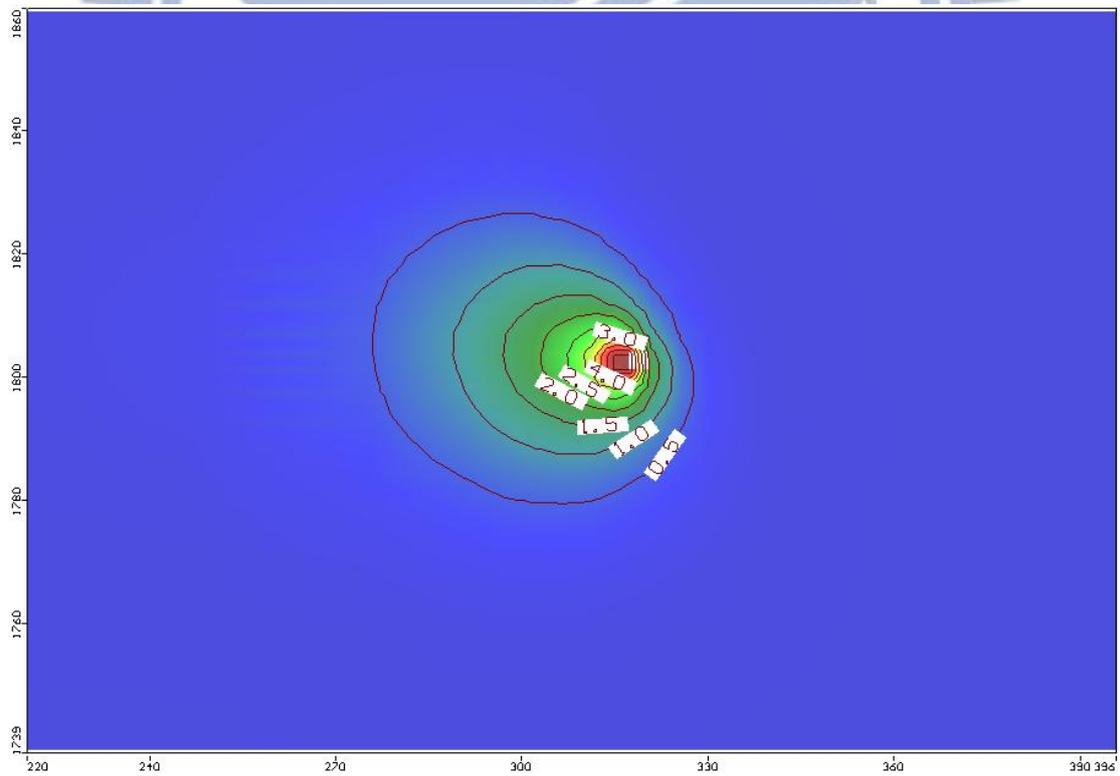


圖 4.2.1-11 E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

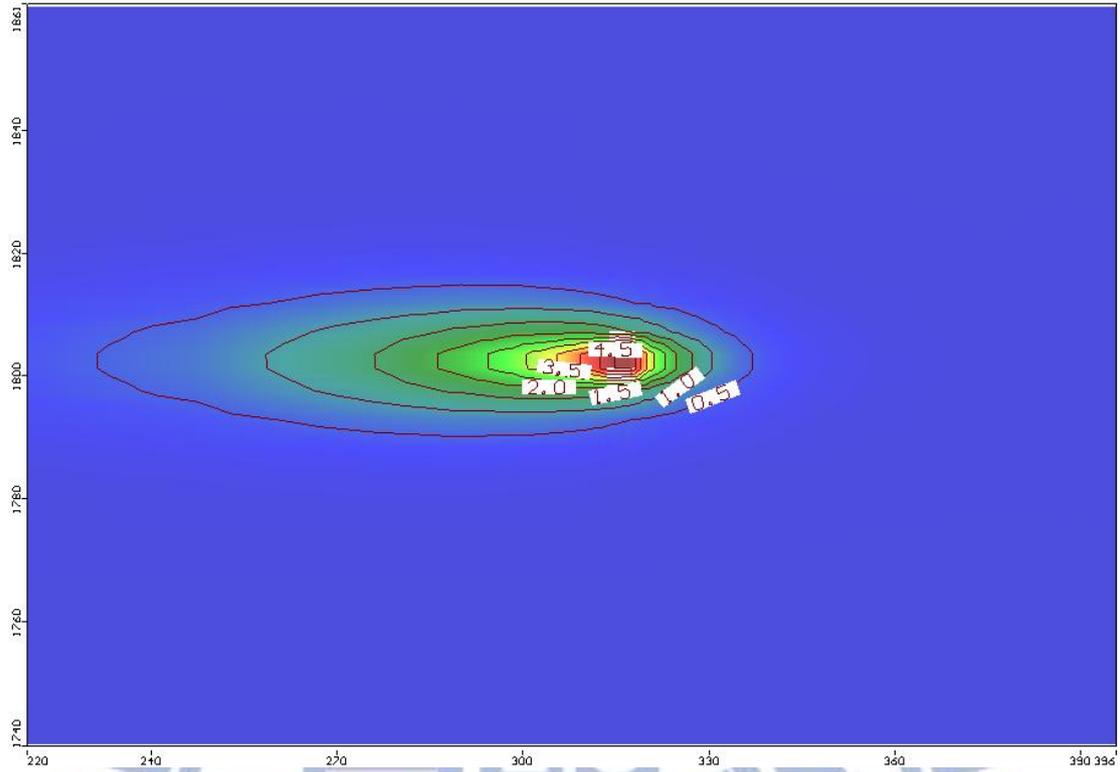


圖 4.2.1-12 E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

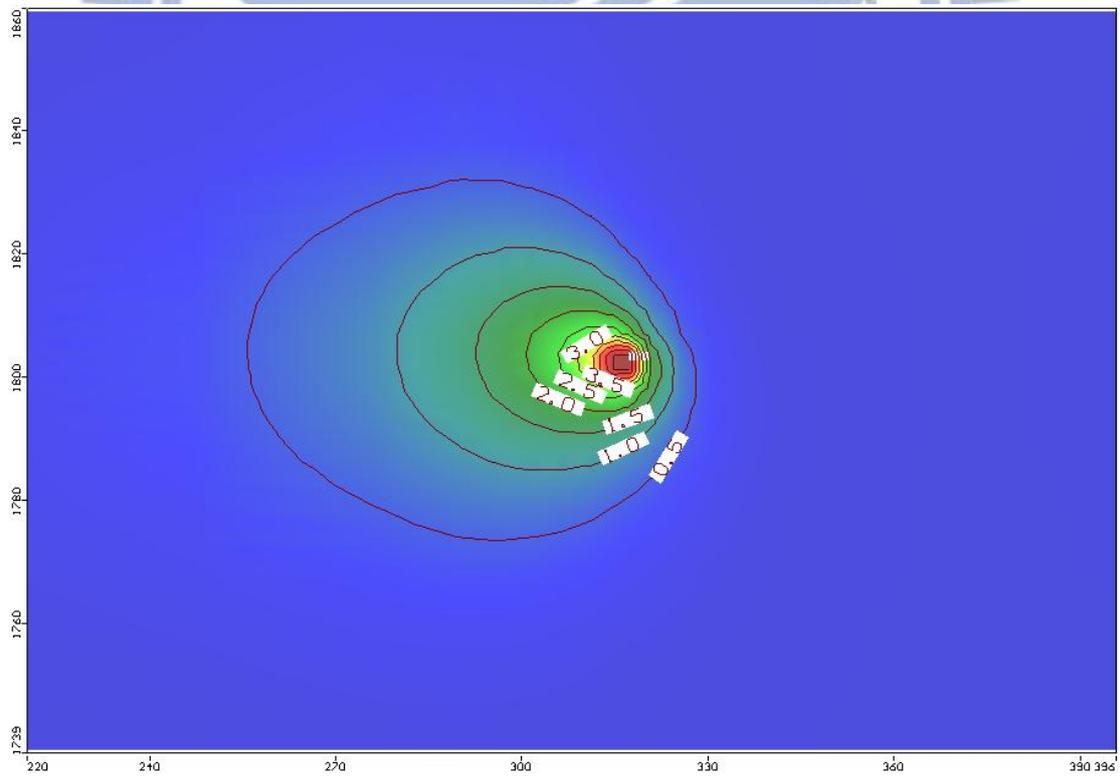


圖 4.2.1-13 E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

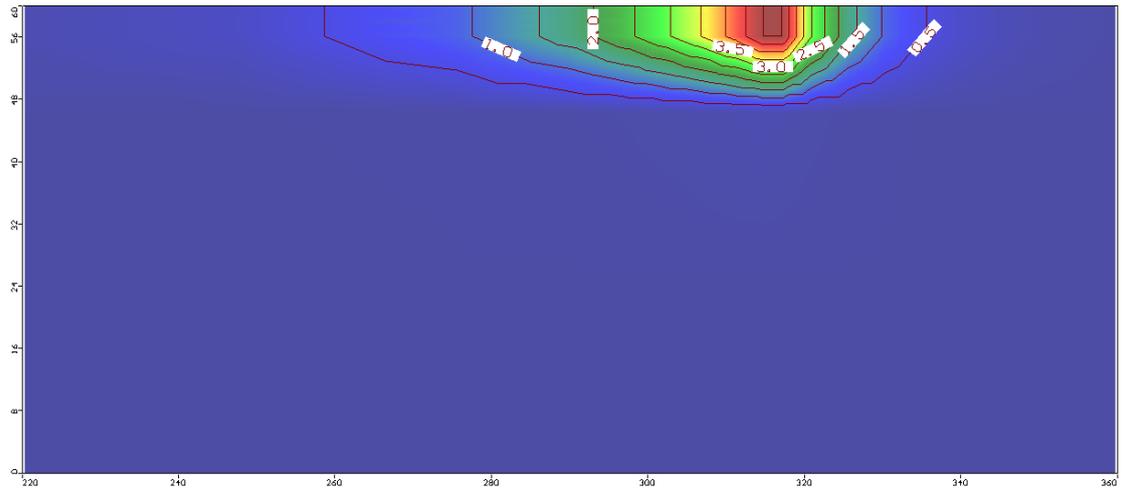


圖 4.2.1-14 E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

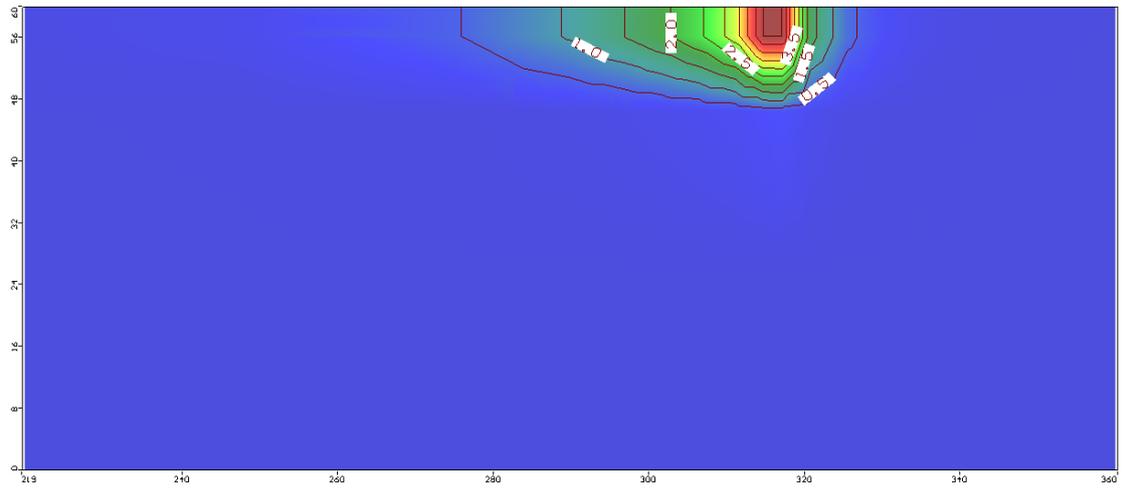


圖 4.2.1-15 E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

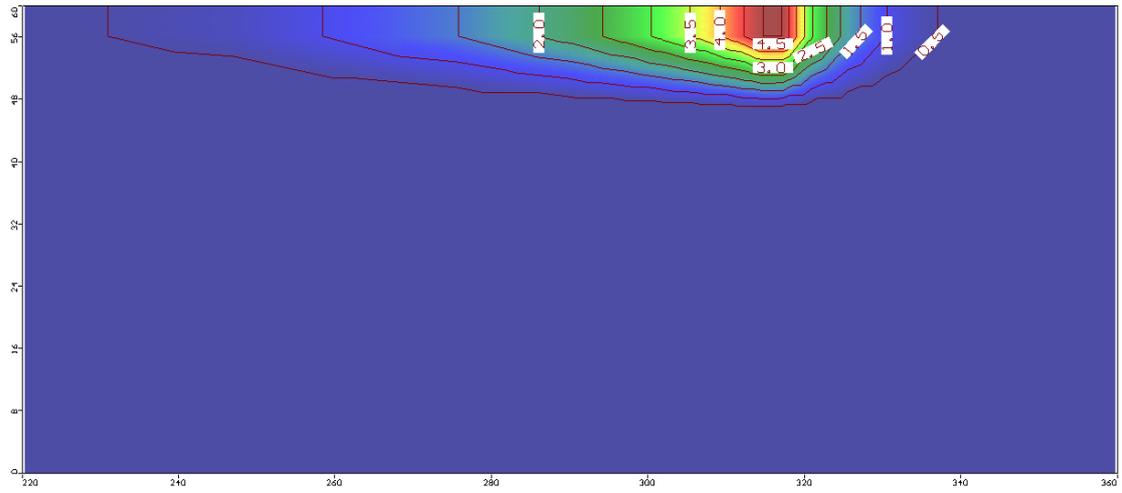


圖 4.2.1-16 E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

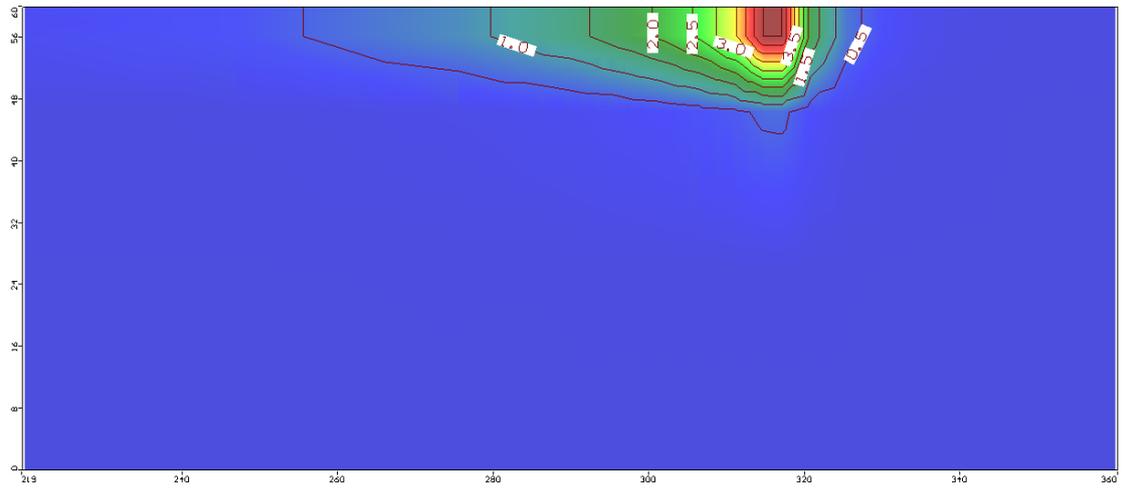


圖 4.2.1-17 E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

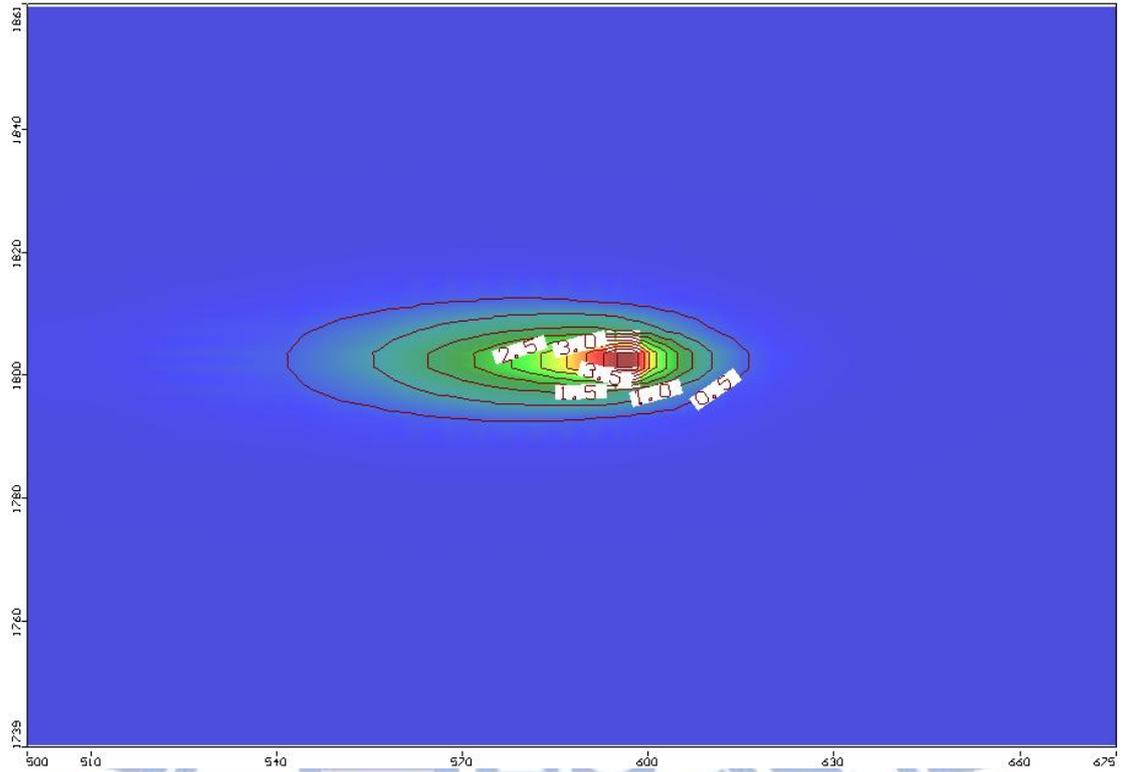


圖 4.2.1-18 E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

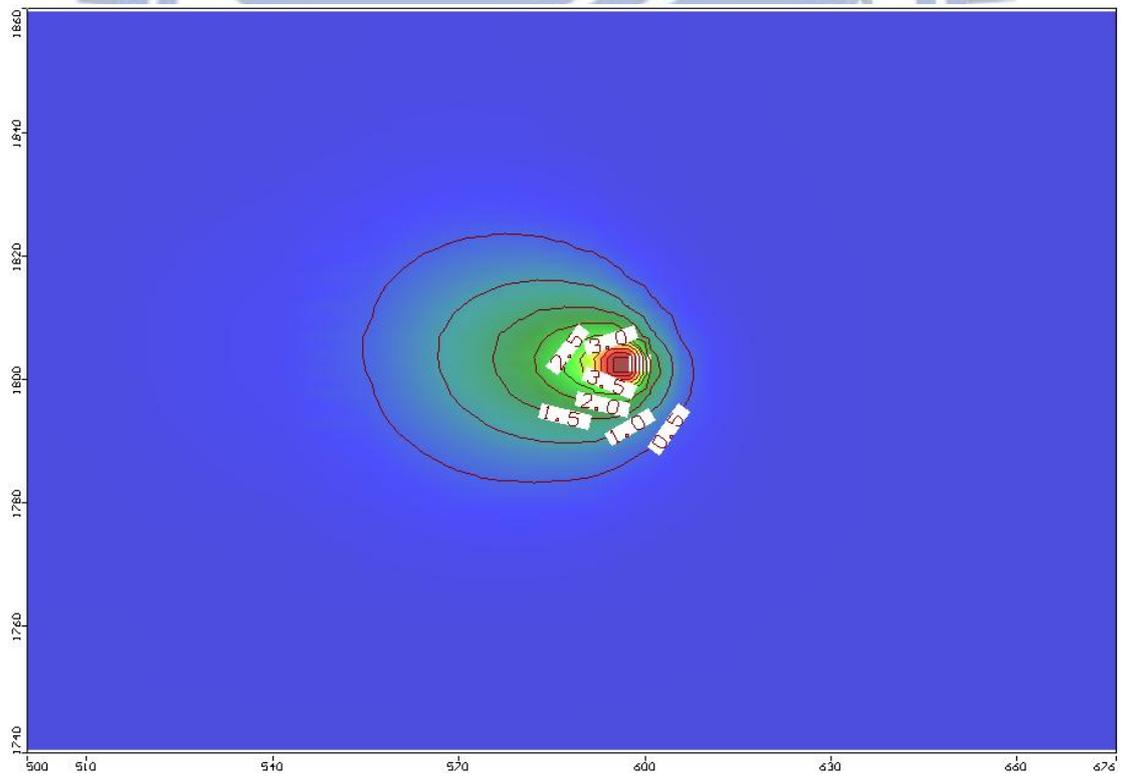


圖 4.2.1-19 E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

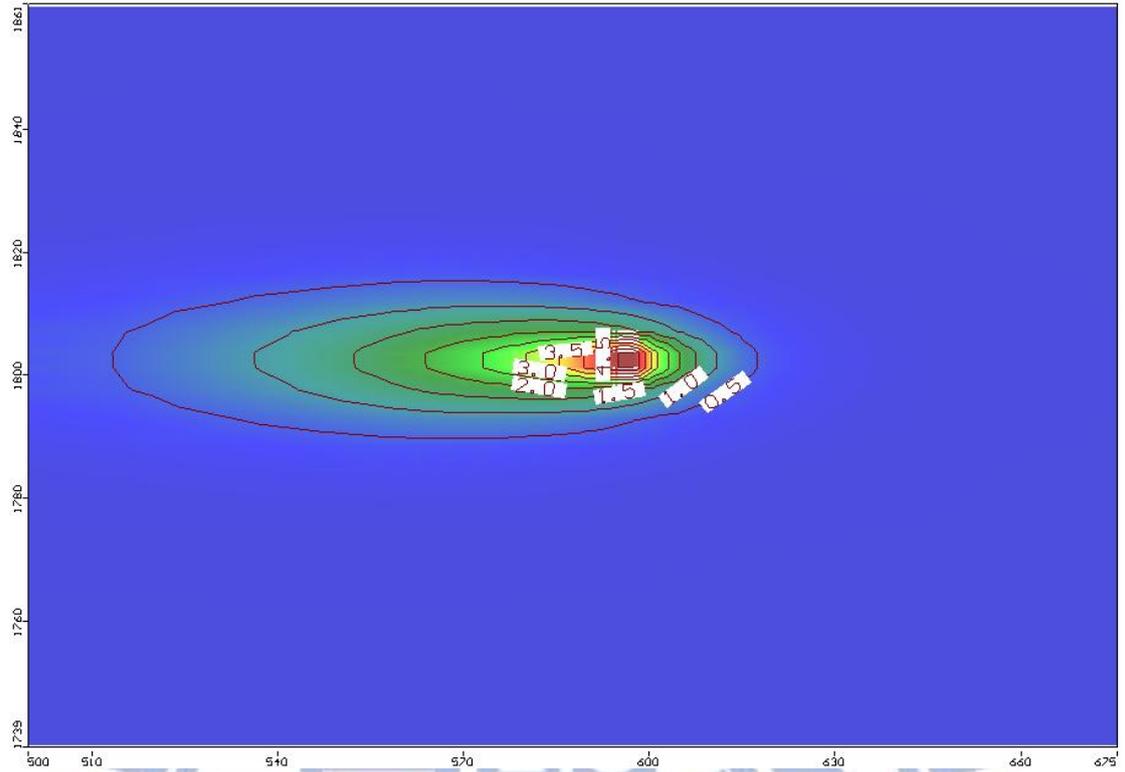


圖 4.2.1-20 E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

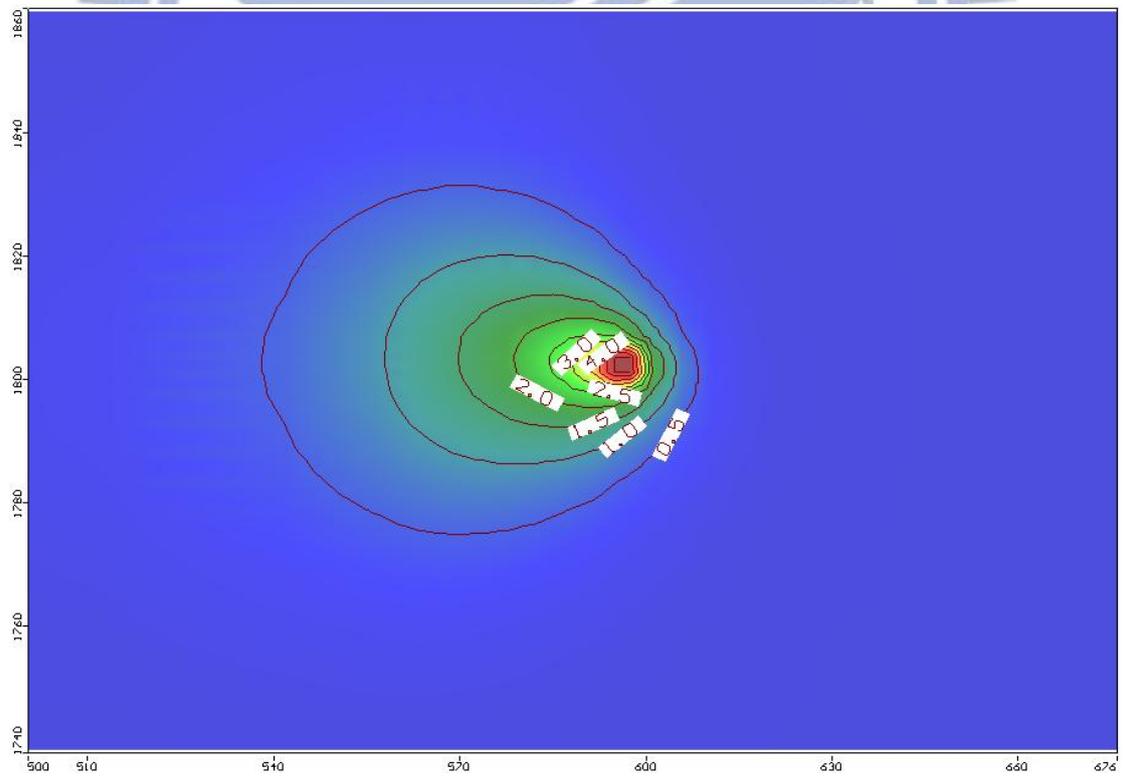


圖 4.2.1-21 E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

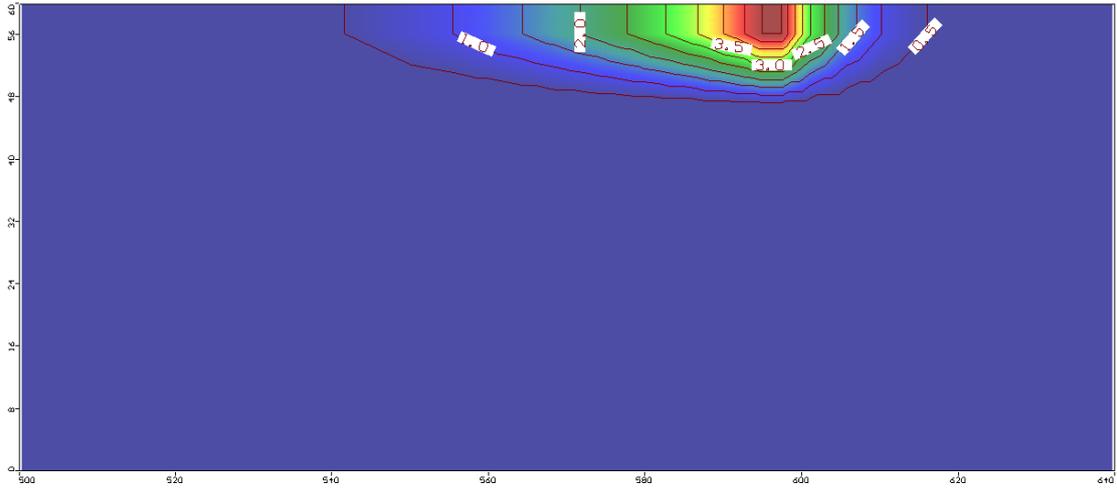


圖 4.2.1-22 E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

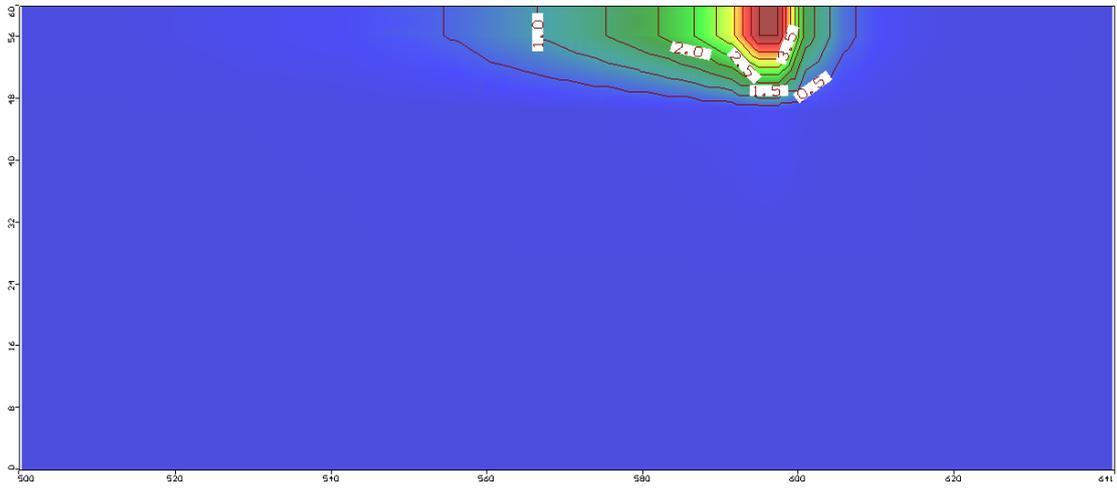


圖 4.2.1-23 E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

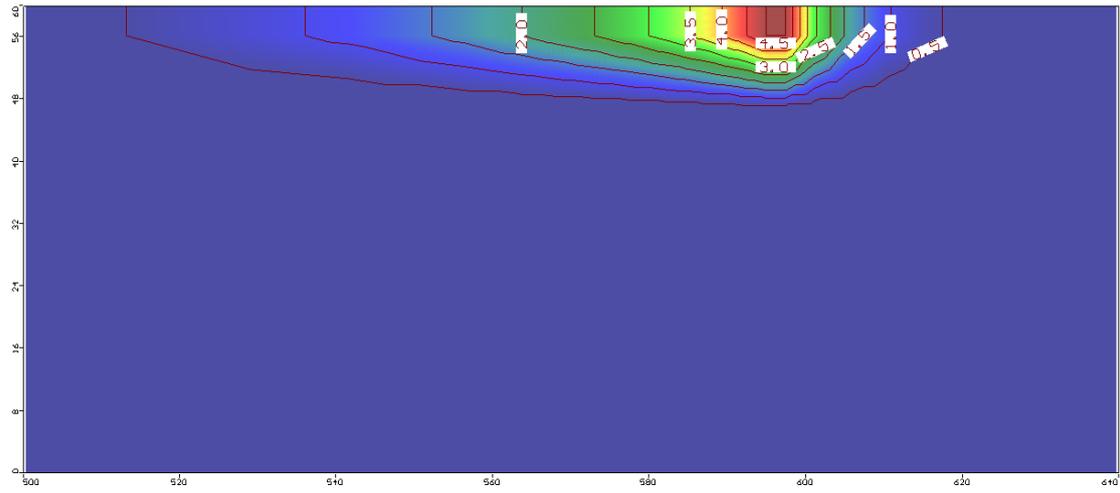


圖 4.2.1-24 E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

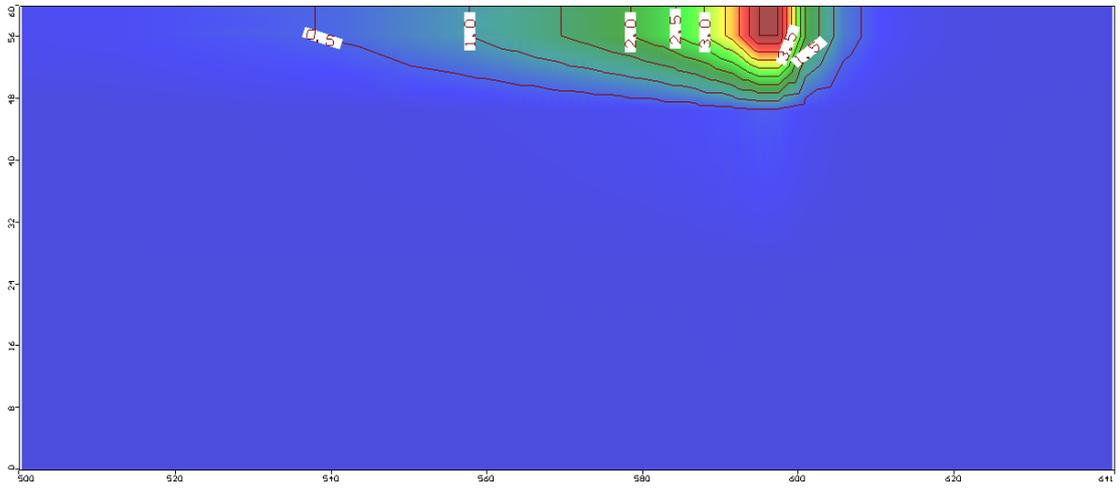


圖 4.2.1-25 E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.2.2 潮汐對於(M-1)、(M-2)、(M-3)影響比較

在污染團的長度中，由表 4.2.2-1 能夠發現到受潮汐時污染團的長度都較無潮汐時小，污染團被推的作用相較於拉的作用大，因此產生壓縮的現象，而其中因為(M-1)的位置相較於(M-2)、(M-3)靠近海岸線，海岸線潮汐變動的速度較快，地下水位上下變動也加快，使得污染團有類似還來不及產生反應結果就接著要進行下一個步驟現象，最後呈現出(M-1)有無潮汐時之污染團長度差值(3.5 m)相對於(M-2)、(M-3)的污染團長度差值(19 m)、(6 m)小；而在(M-3)的位置中因為離海岸線和河川面都有一定的距離下，讓海岸線和河川面之潮汐影響減弱，因此在受潮汐和無潮汐的情況下(M-3)之污染團的長度較(M-2)小。

在寬度的比較中，因為污染團的方向沒有發生轉向(污染團長軸和 x 軸夾角為零)，因此和 E 位置相比較時能夠發現程式再延散度設定上並不影響寬度。因此可以推論(M-1)、(M-2)、(M-3)是受到流速的影響，也就是水力梯度受潮汐影響的關係，除了上述的原因外，同時因為距離排水路徑近，所以受到排水路徑水位變化的影響，最後呈現出(M-1)、(M-2)、(M-3)受潮汐作用時寬度(13 m, 13.3 m, 12.8 m)都比無潮汐時(10.5 m, 9.5 m, 10 m)大。長寬比的部分因為(M-1)、(M-2)、(M-3)受潮汐影響時污染團寬度都較無潮汐時大上許多，而污染團長度再受潮汐影響下都較無潮汐時小，因此很明顯的在長寬比的部分有潮汐影響時(5.4 m, 4.9 m, 5.94 m)較無潮汐時(9.25 m, 8.86 m, 8.1 m)小。

表中的深度方面，只有(M-1)污染團深度再有無潮汐時差異性最大，這是因為較靠近海岸面的緣故，海岸線潮汐變化上下振幅較大，讓污染團的向下的擴散速度加快；而這也可能和程式中網格切割的影響以及在下一層的分層中滲透性較高導致污染物向下的速度加快有關，因此在表 4.2.1-1 中受潮汐的影響下之污染團相較於無潮汐時加大很多。和 E 位置相比較時可以發現在(E-2)和(M-2)之間的差異，在較接近河川面的(E-2)其有無潮汐影響時深度差值為 3.5 m，而在(M-2)時有無潮汐影響其深度差值為 0.6 m，因此可以推論出當污染團越靠近潮汐影響範圍中，深度的變化就越增加。

再和 Case 1 比較後能夠發現因為污染團的方向沒有發生轉向，因此在夾角上都呈現 0° 的狀況。在長寬比的部分中，Case 1 有無潮汐時之長寬比差值(0.61, 0.04, 1.54)相較於 Case 2 有無潮汐時之長寬比差值(1.62, 3.96, 2.26)小，其中最主要原因為導水度的加大，其流速加快，讓 Case 2 中海岸線的潮汐影響減弱，因此最後呈現出 Case 1 有無潮汐時之長寬比較 Case 2 小。

在此情境下半年和一年污染團之擴散趨勢和 E 位置擴散情況相同，污染團之擴散趨勢在半年內已趨於穩定。

表 4.2.2-1 污染團面積之比較結果(一年)

(M-1)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	73.7	10.5	9.25	7.02	0.9
有潮汐	0°	70.2	13	21.25	5.4	1.6
(M-2)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	84.2	9.5	9	8.86	0.94
有潮汐	0°	65.2	13.3	9.6	4.9	0.72
(M-3)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	82	10	9	8.2	0.89
有潮汐	0°	76	12.8	9.7	5.94	0.77

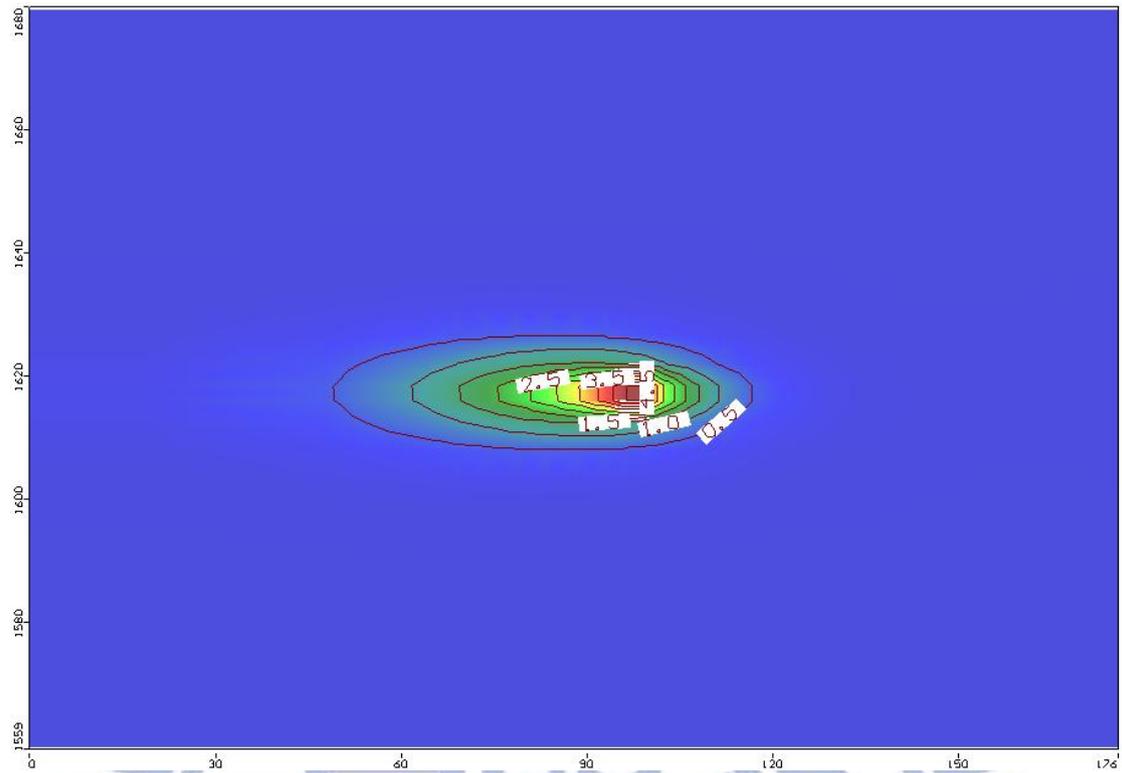


圖 4.2.2-1 M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

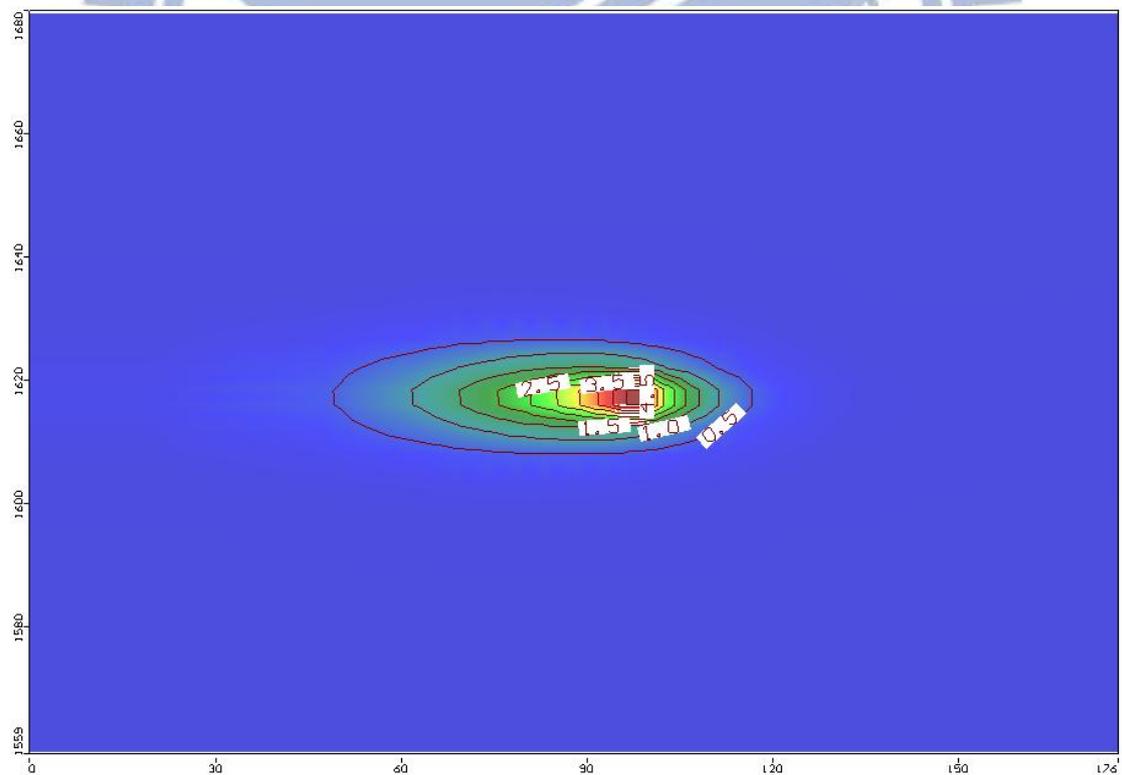


圖 4.2.2-2 M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

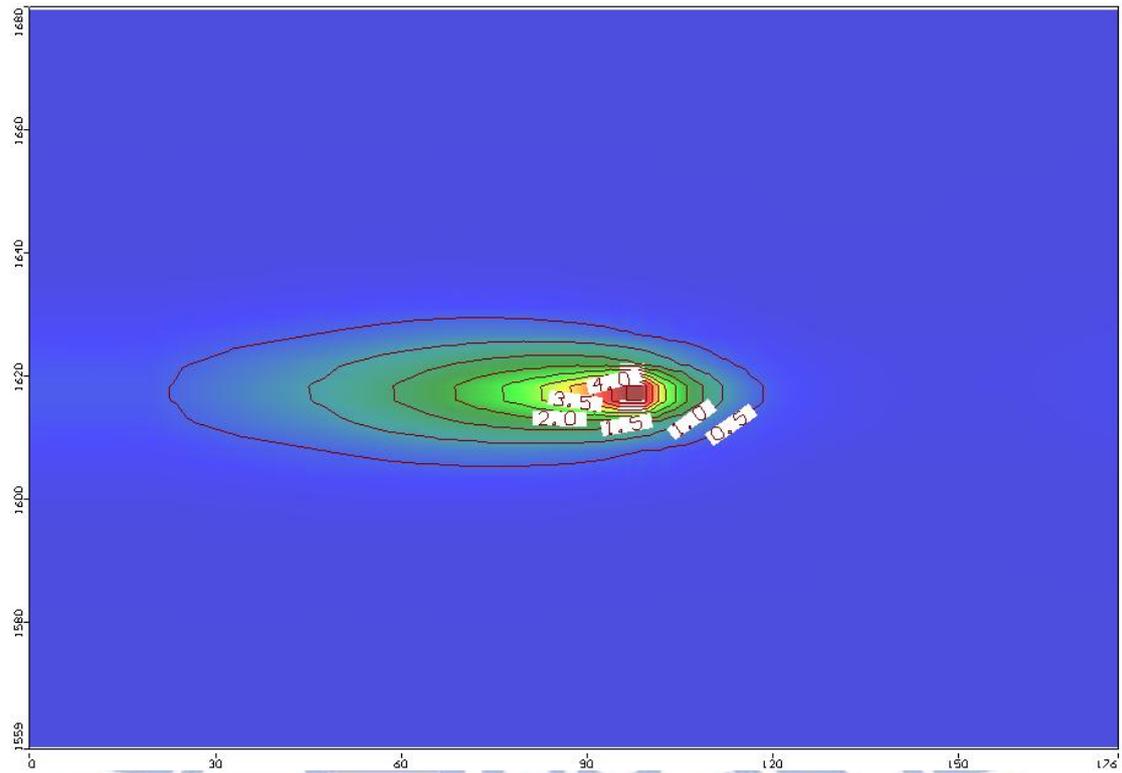


圖 4.2.2-3 M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

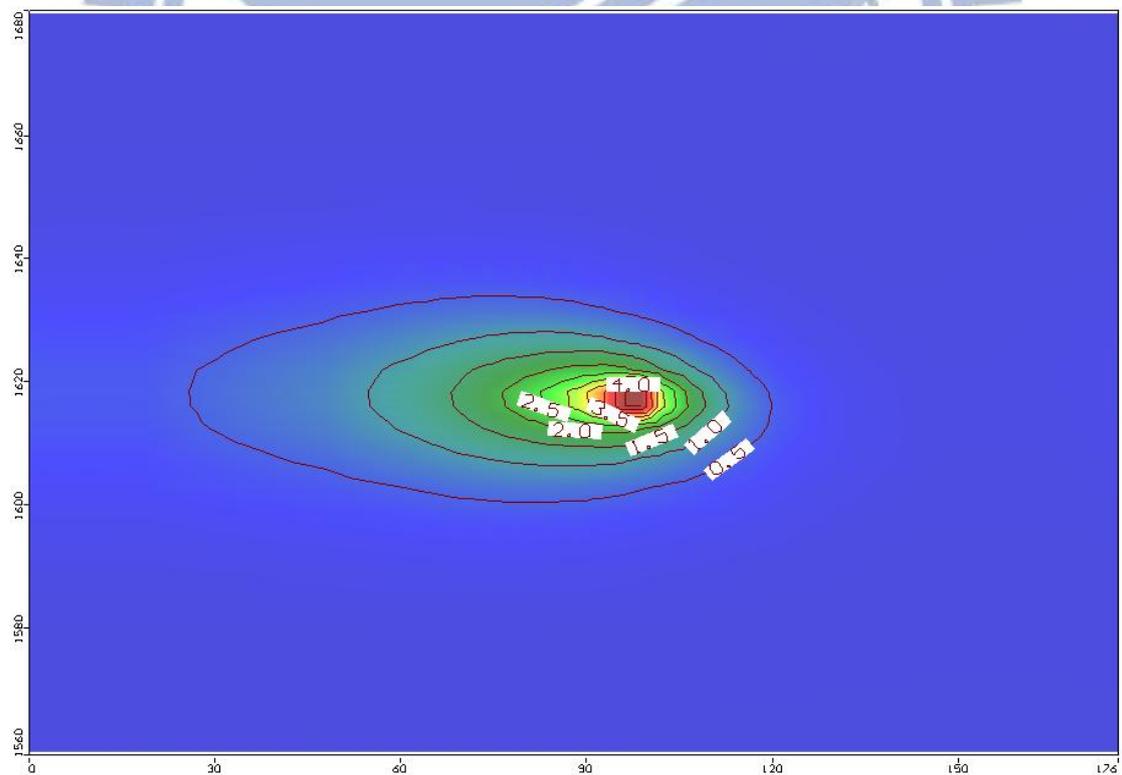


圖 4.2.2-4 M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

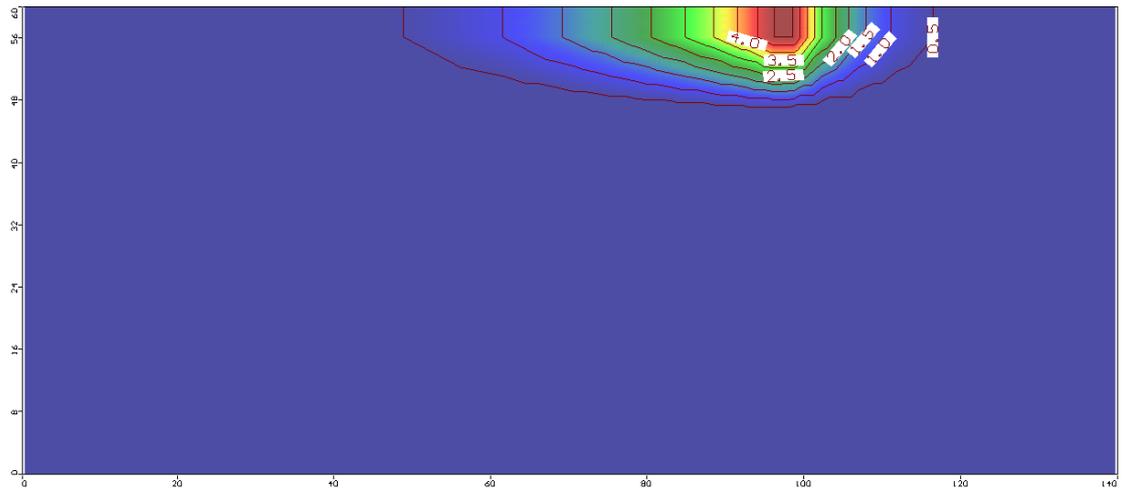


圖 4.2.2-5 M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

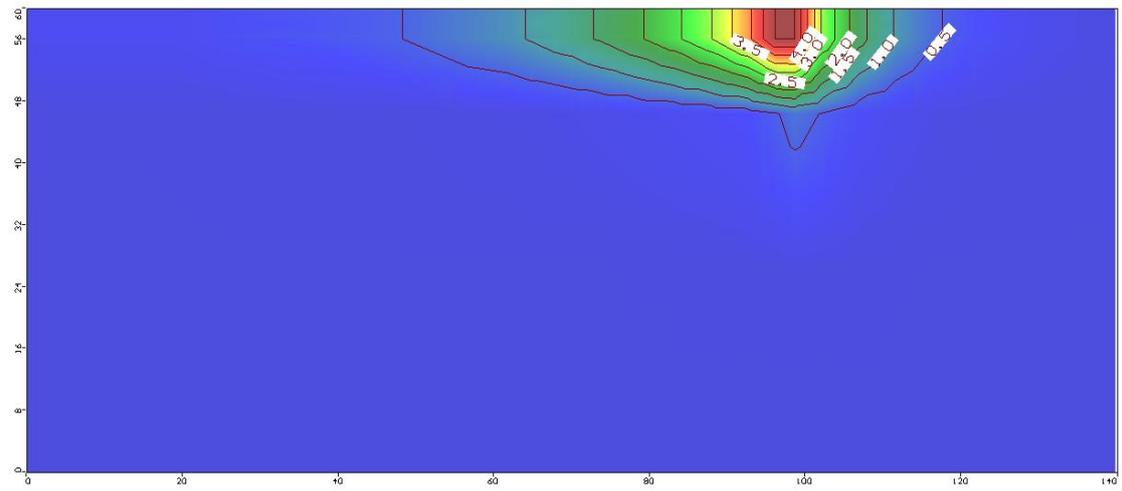


圖 4.2.2-6 M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

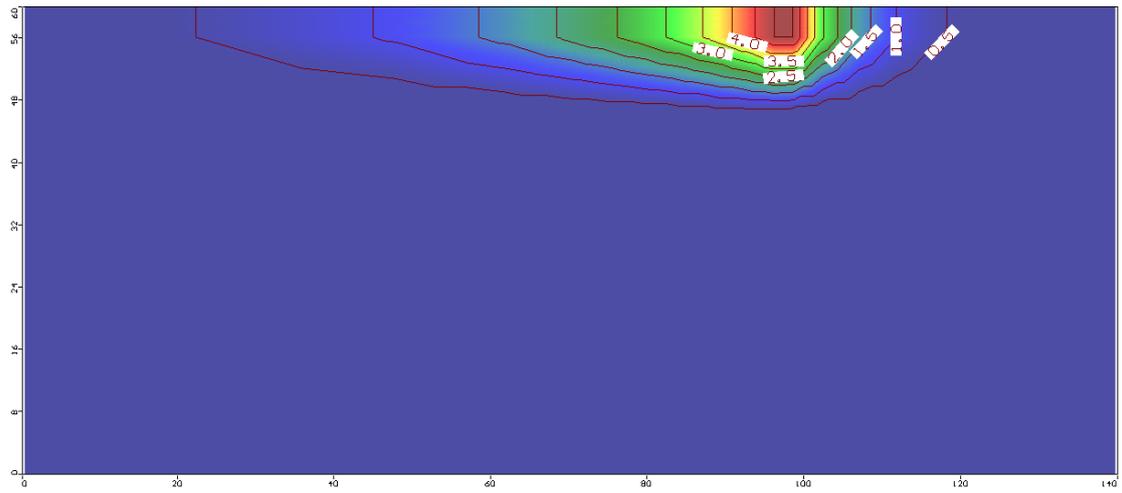


圖 4.2.2-7 M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

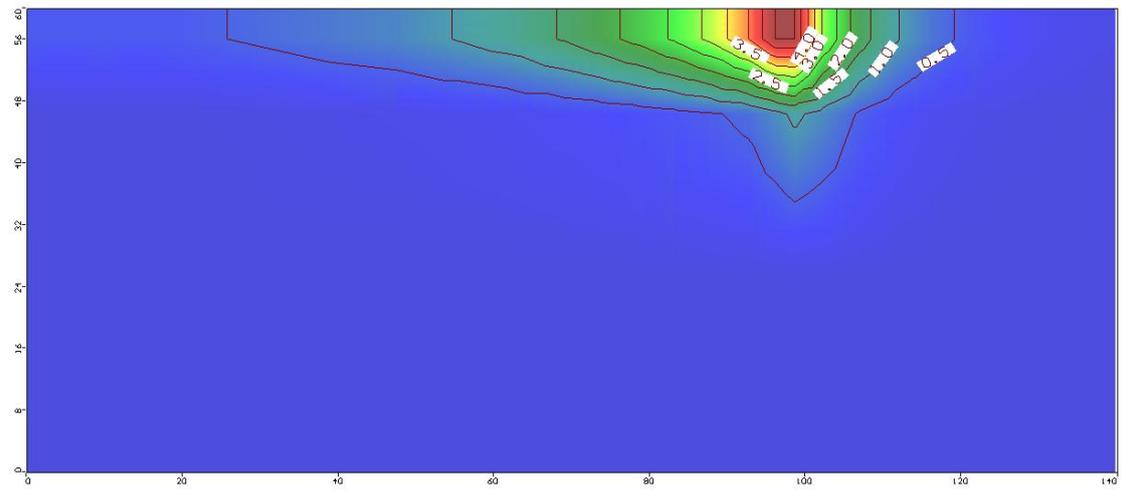


圖 4.2.2-8 M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

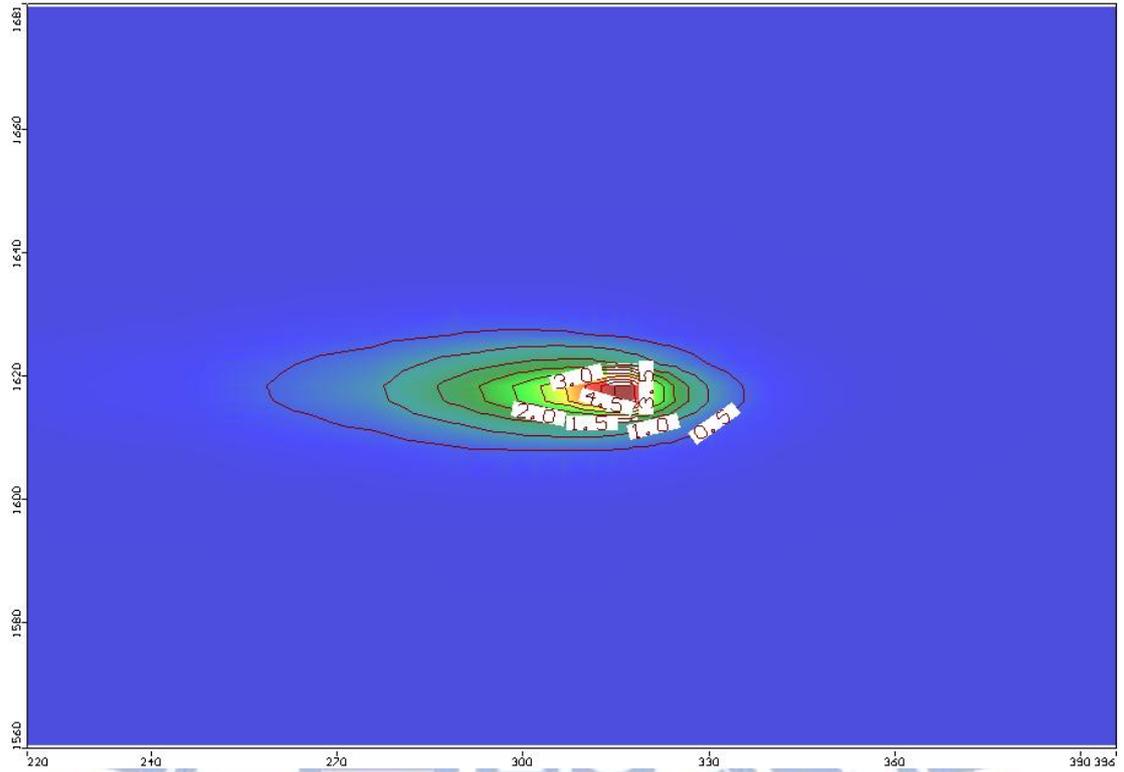


圖 4.2.2-9 M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

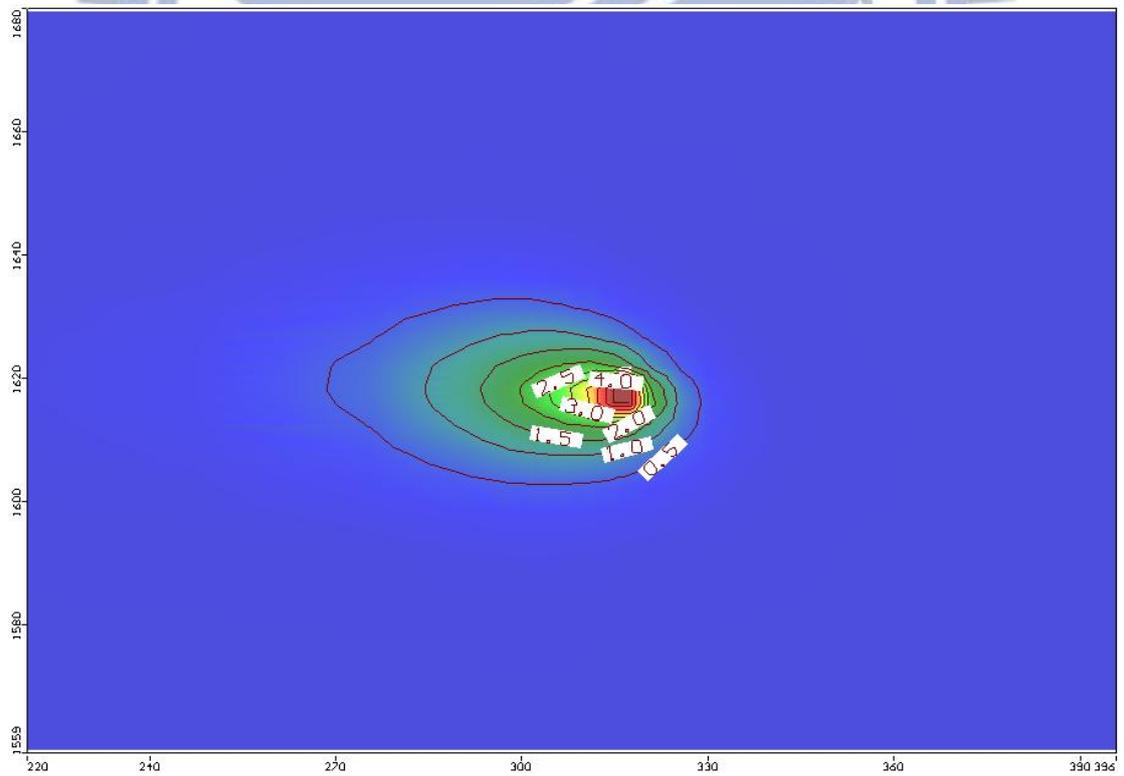


圖 4.2.2-10 M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

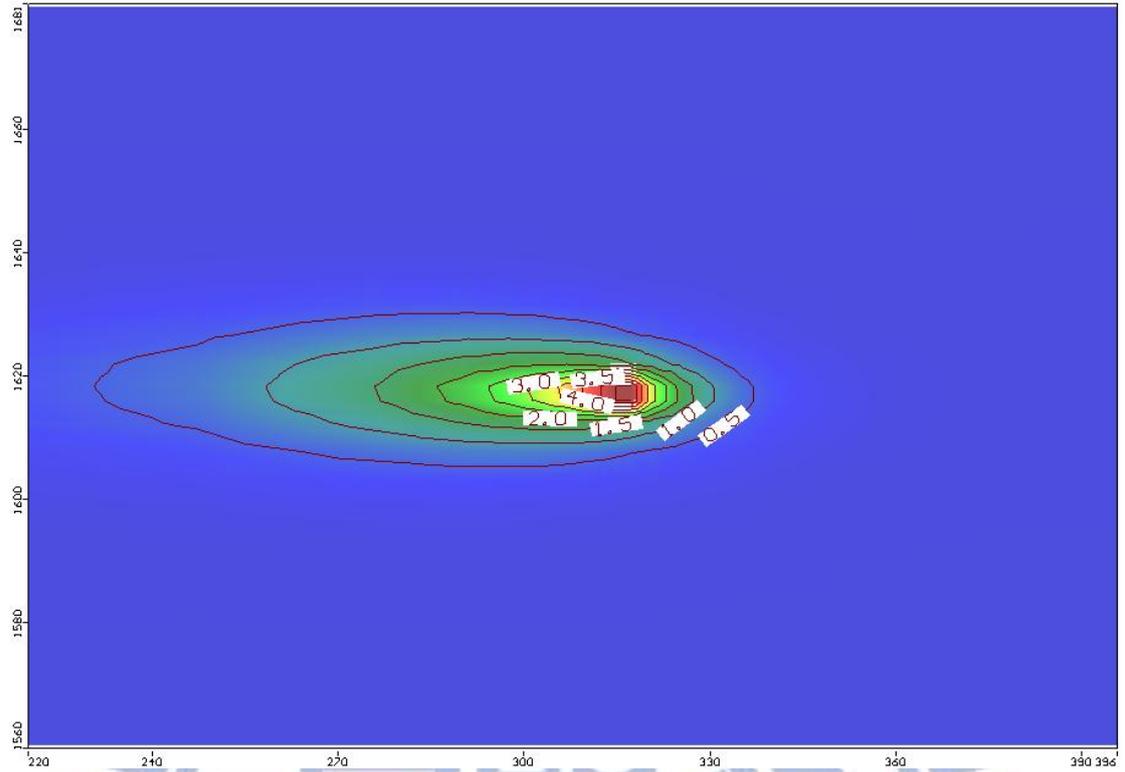


圖 4.2.2-11 M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

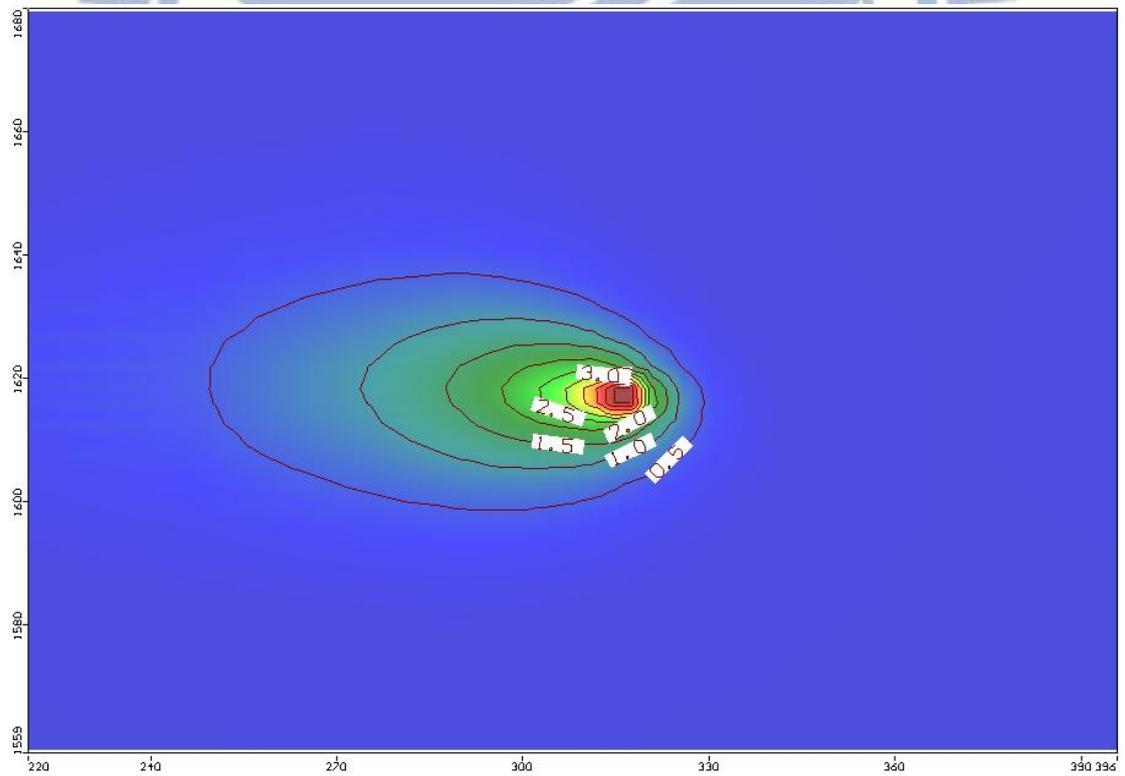


圖 4.2.2-12 M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

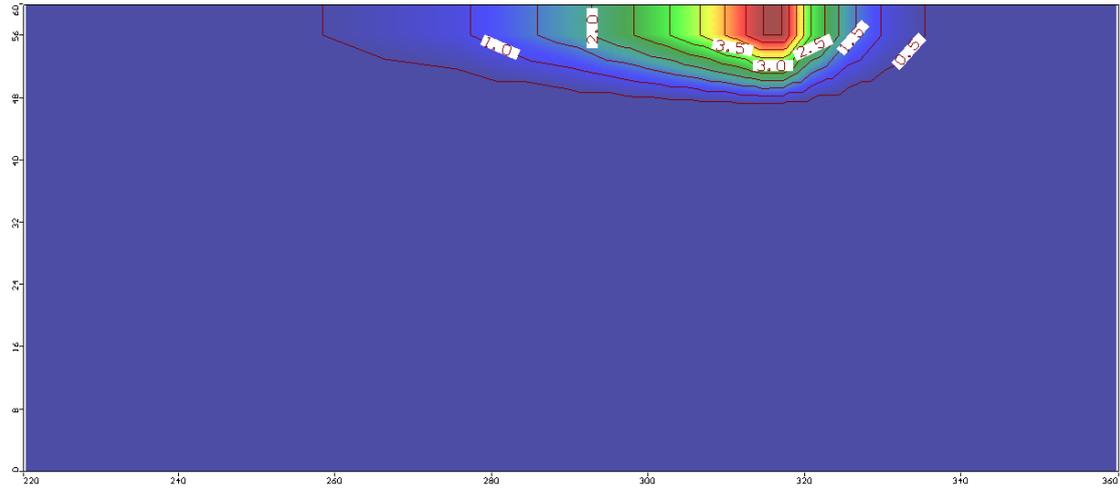


圖 4.2.2-13 M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

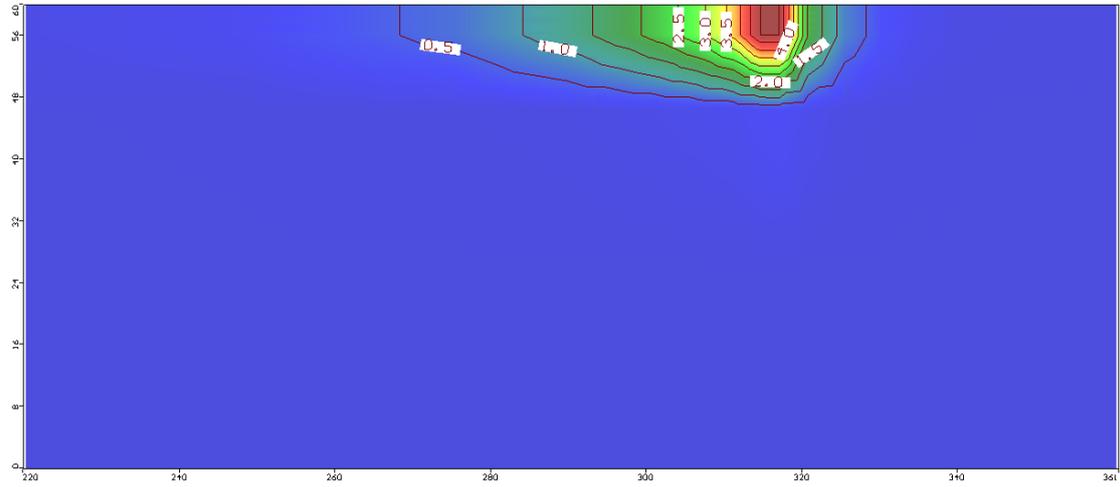


圖 4.2.2-14 M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

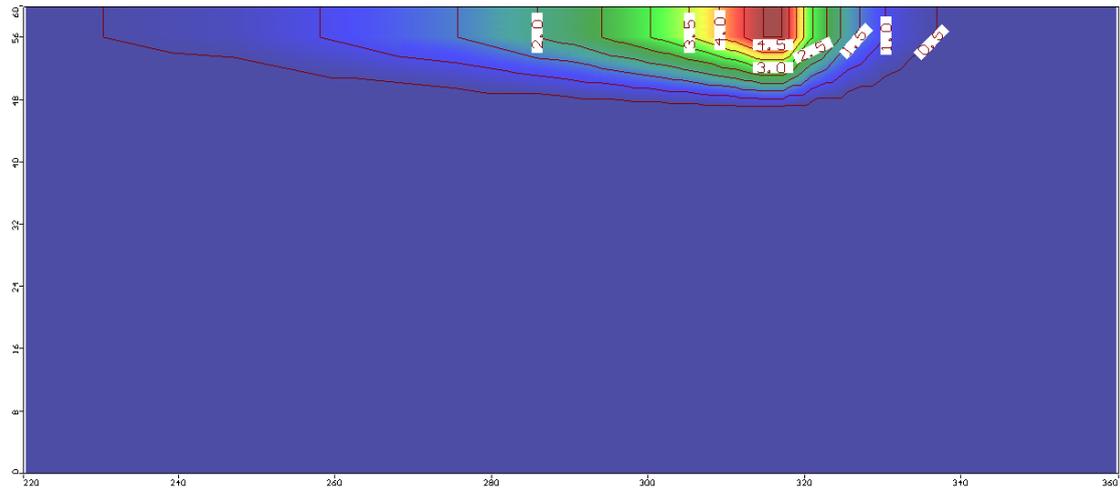


圖 4.2.2-15 M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

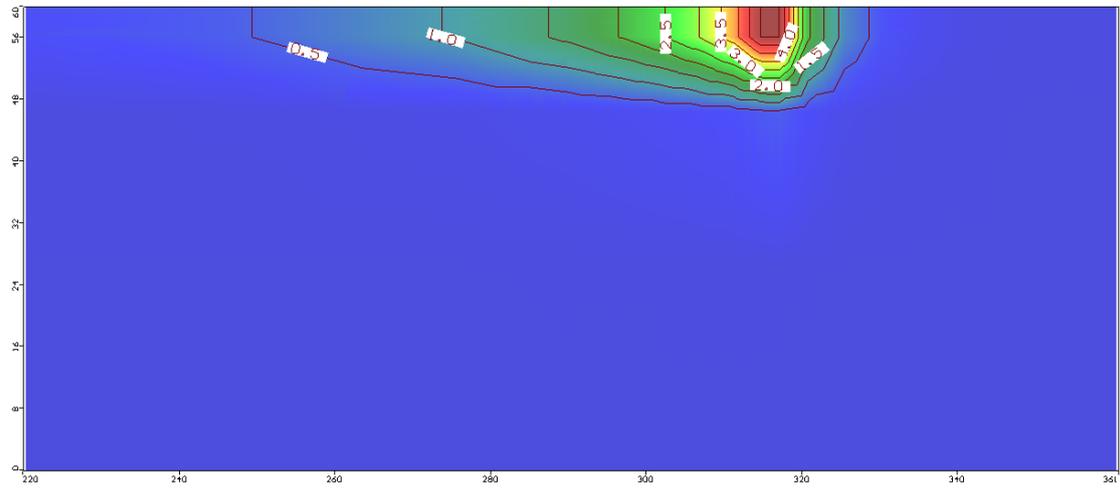


圖 4.2.2-16 M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

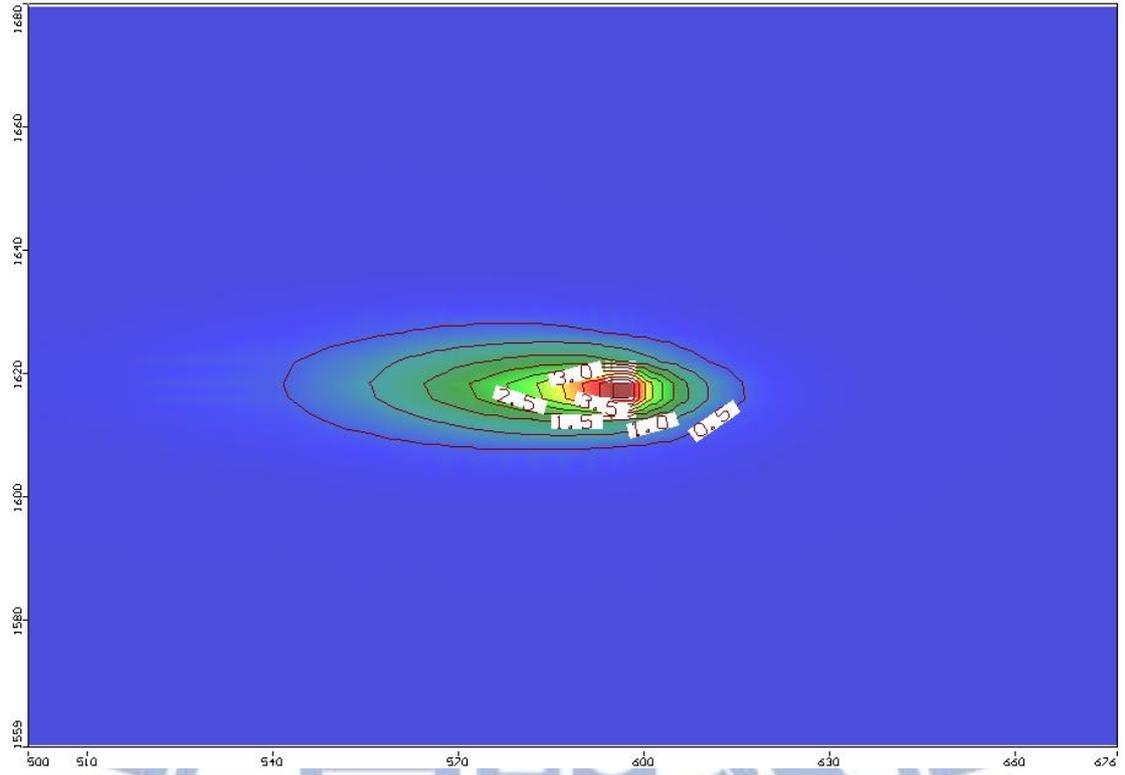


圖 4.2.2-17 M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

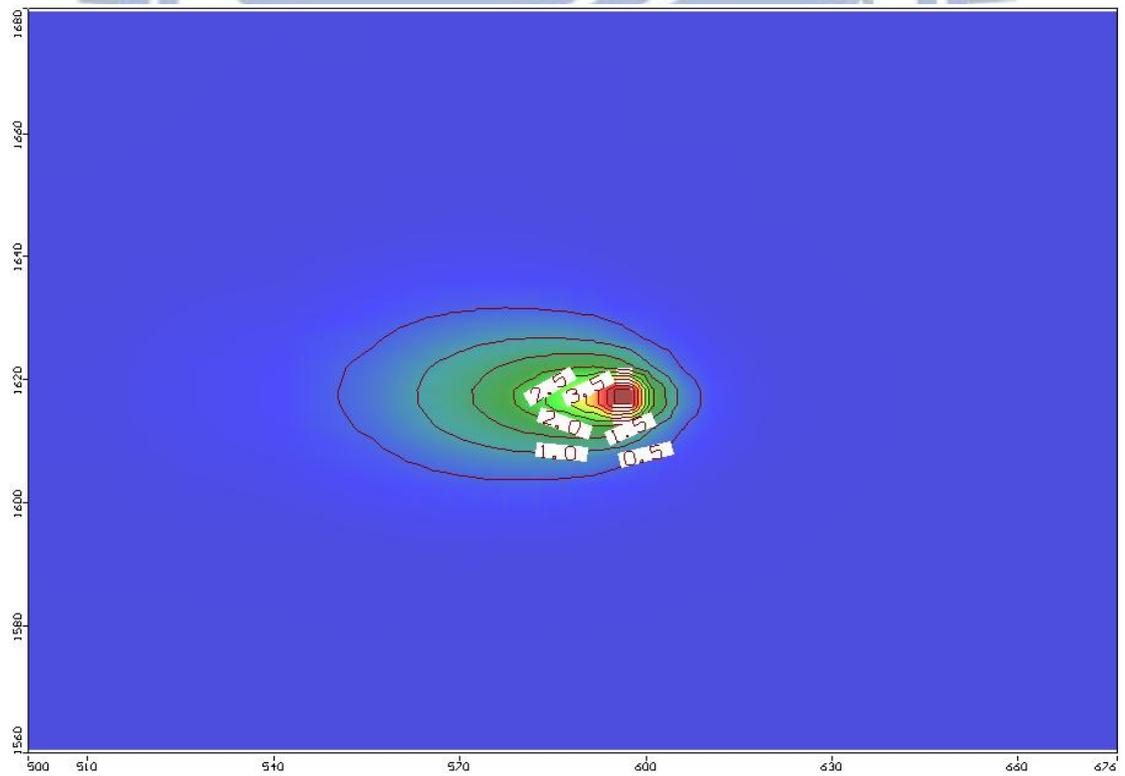


圖 4.2.2-18 M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

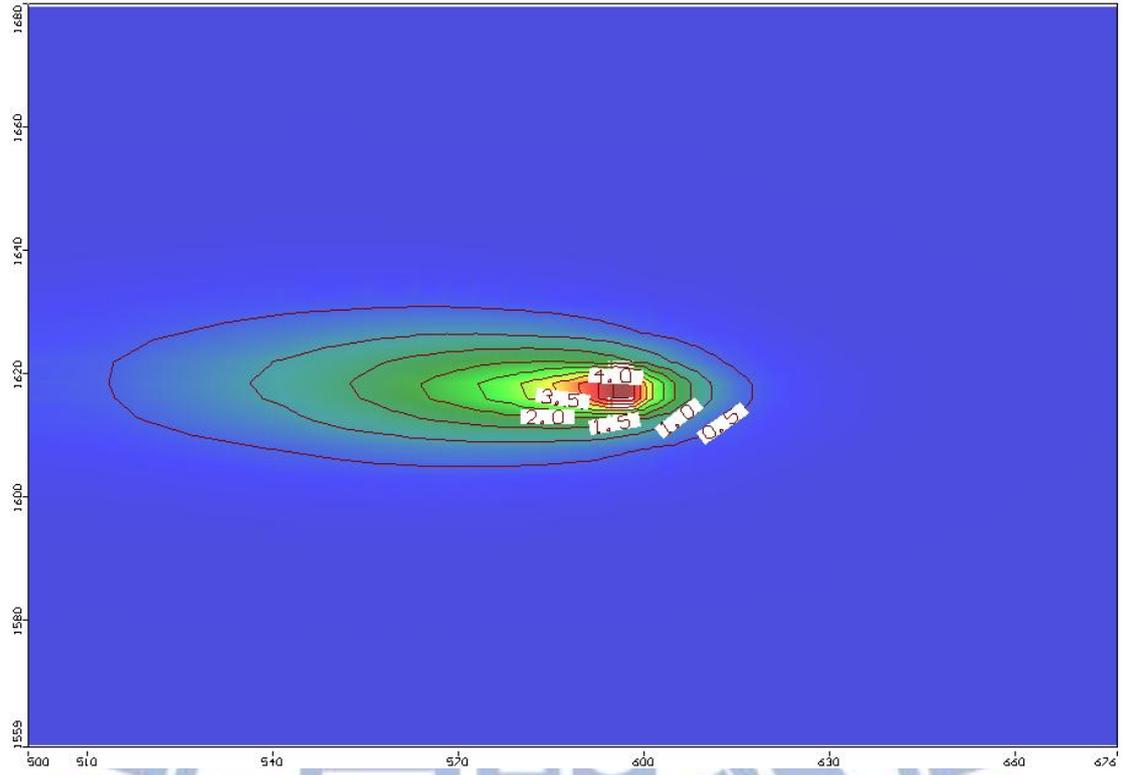


圖 4.2.2-19 M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

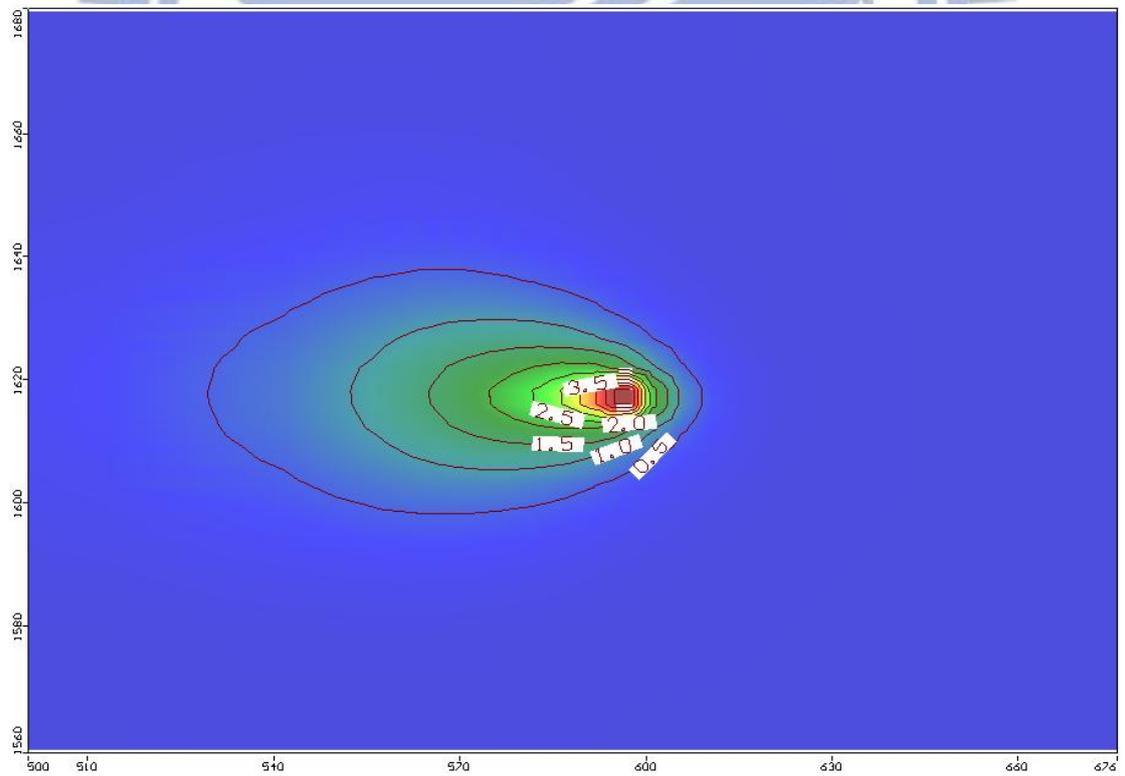


圖 4.2.2-20 M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

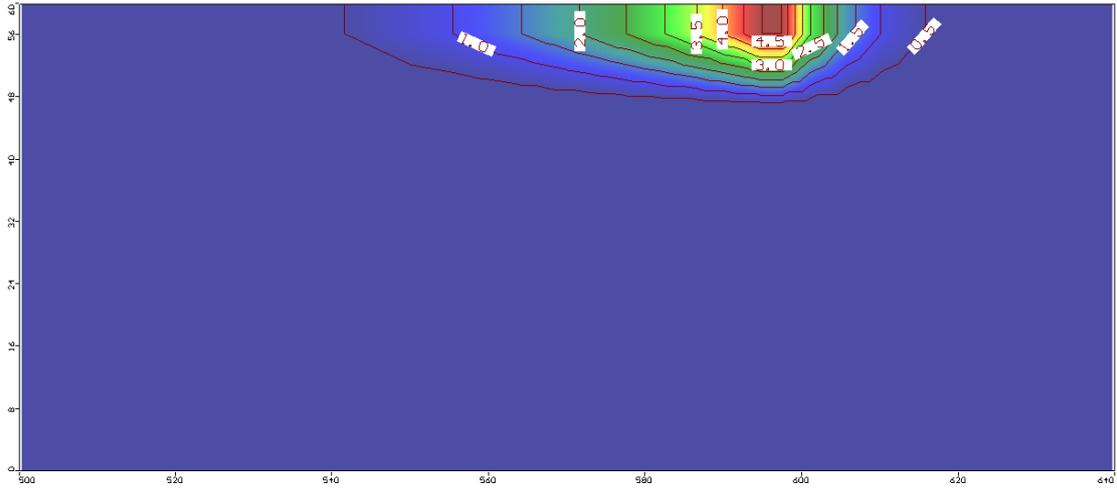


圖 4.2.2-21 M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

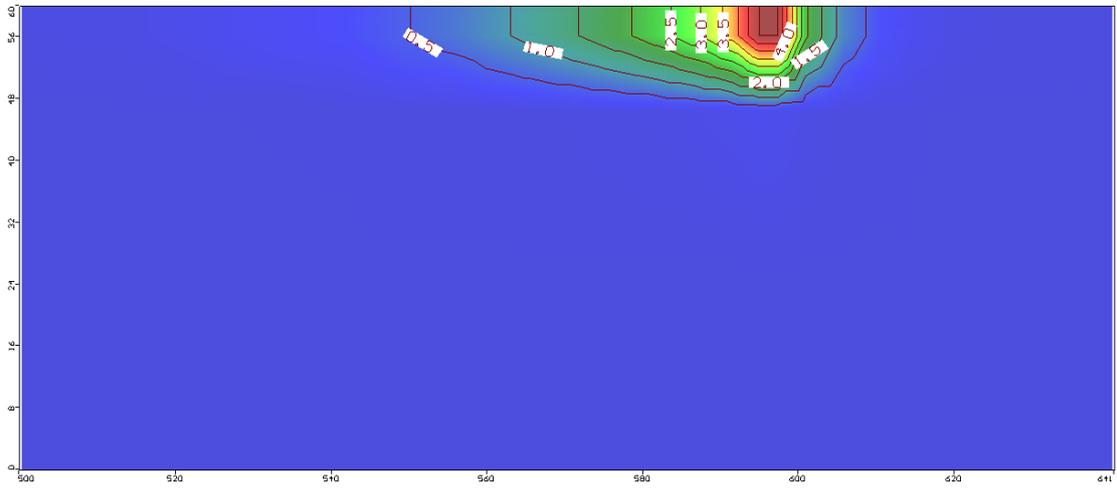


圖 4.2.2-22 M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

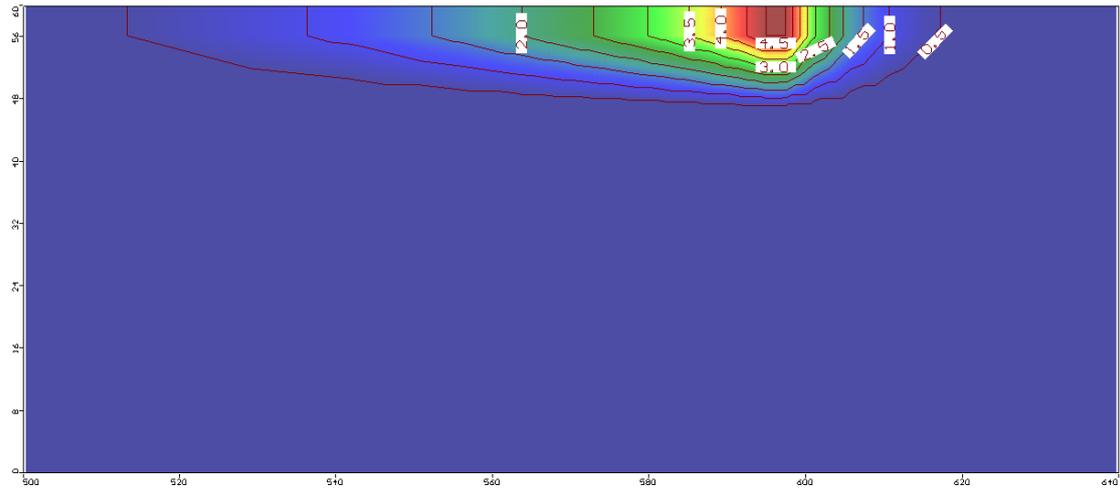


圖 4.2.2-23 M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

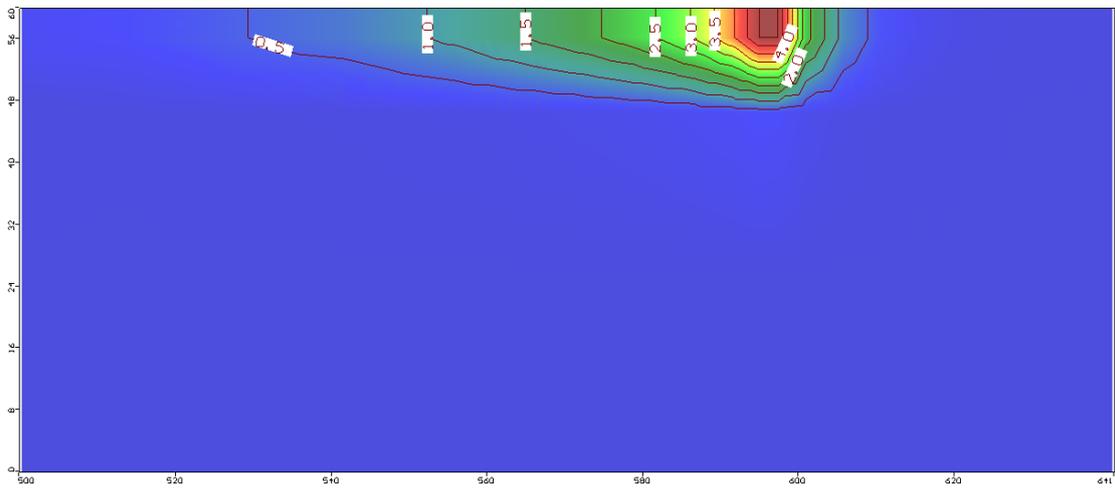


圖 4.2.2-24 M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.2.3 潮汐對於(C-1)、(C-2)、(C-3)影響比較

在這個位置下，河岸面(上端)的潮汐作用已經影響很小，可以單純的就海岸面(左端)的潮汐部分做探討；在污染團的長度中，由表 4.2.3-1 能夠發現到受潮汐時污染團的長度都較無潮汐時小，污染團被推的作用相較於拉的作用大，因此產生壓縮的現象，而其中因為(C-1)的位置相較於(C-2)、(C-3)靠近海岸線，海岸線潮汐變動的速度較快，地下水位上下變動也加快，使得污染團有還來不及產生反應結果就接著要進行下一個步驟現象，最後呈現出(C-1)有無潮汐時之污染團長度差值(3 m)相對於(C-2)、(C-3)有無潮汐時之污染團長度差值(11 m)、(6 m)小；而在(C-3)的位置中因為離海岸線和河川面都有一定的距離下，讓海岸線和河川面之潮汐影響減弱，因此在受潮汐和無潮汐的情況下(C-3)之污染團的長度較(C-2)小。

在寬度的比較中，受潮汐時寬度除了(C-1)外，(C-2)、(C-3)之寬度都較無潮汐時小，(C-1)、(C-2)、(C-3)污染團的方向也沒有發生轉向(污染團長軸和 x 軸夾角為零)因此可以推論出在此位置中 Modflow 的延散度設定上並不影響寬度，也不受排水路徑的影響。而在(C-1)因為較靠近海岸面的緣故，海岸線潮汐變化上下振幅較大，讓污染團的寬度受到了一定的影響，但對於(C-2)、(C-3)不影響。

表中污染團的深度方面，只有(C-1)污染團深度再有無潮汐時差異性最大，這是因為較靠近海岸面的緣故，讓污染團的向下的擴散速度加快；而這也可能和程式中網格切割的影響以及在下一層的分層中滲透性較高導致污染物向下的速度加快有關，因此在表 4.2.3-1 中受潮汐的影響下之污染團相較於無潮汐時加大很多。和 E 位置相比較後可以發現到(E-2)和(C-2)之間的差異，在較接近河川面的(E-2)其有無潮汐影響時深度差值為 3.5 m，而在(C-2)時有無潮汐影響其深度差值為 0 m，因此可以推論出當污染團越靠近潮汐影響範圍中，深度的變化就越增加，此情況和 M 情況相同。

和 Case 1 的 C 位置比較後能夠發現，兩個情境中的(C-2)、(C-3)幾乎不受海水和排水路徑的影響，而(C-1)會受到海岸線潮汐的影響寬度增加；長寬比方面，Case 1 和 Case 2 兩種情境中最主要的差別在於導水度的不同，Case 2 導水度的增加，讓有潮汐時污染團長度小於無潮汐時的狀況，因此得到 Case 2 中(C-1)有無潮汐之長寬比差值(3)較 Case 1 中的(C-1)有無潮汐之長寬比差值(0.43)大。

在此情境下半年和一年污染團之擴散趨勢和 E 位置擴散情況相同，污染團之擴散趨勢在半年內已趨於穩定。

表 4.2.3-1 污染團面積之比較結果(一年)

(C-1)	污染團長 軸與 x 軸 之夾角	污染團長 度(x 軸) (m)	污染團寬 度(y 軸) (m)	污染團深 度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	74	10	9.35	8	1
有潮汐	0°	71	13	21	5	1.5
(C-2)	污染團長 軸與 x 軸 之夾角	污染團長 度(x 軸) (m)	污染團寬 度(y 軸) (m)	污染團深 度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	86	9.5	9	9	0.9
有潮汐	0°	75	9	9.6	8.3	1
(C-3)	污染團長 軸與 x 軸 之夾角	污染團長 度(x 軸) (m)	污染團寬 度(y 軸) (m)	污染團深 度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	82	9	9	8.7	0.96
有潮汐	0°	76	8.3	9	9.2	1.08

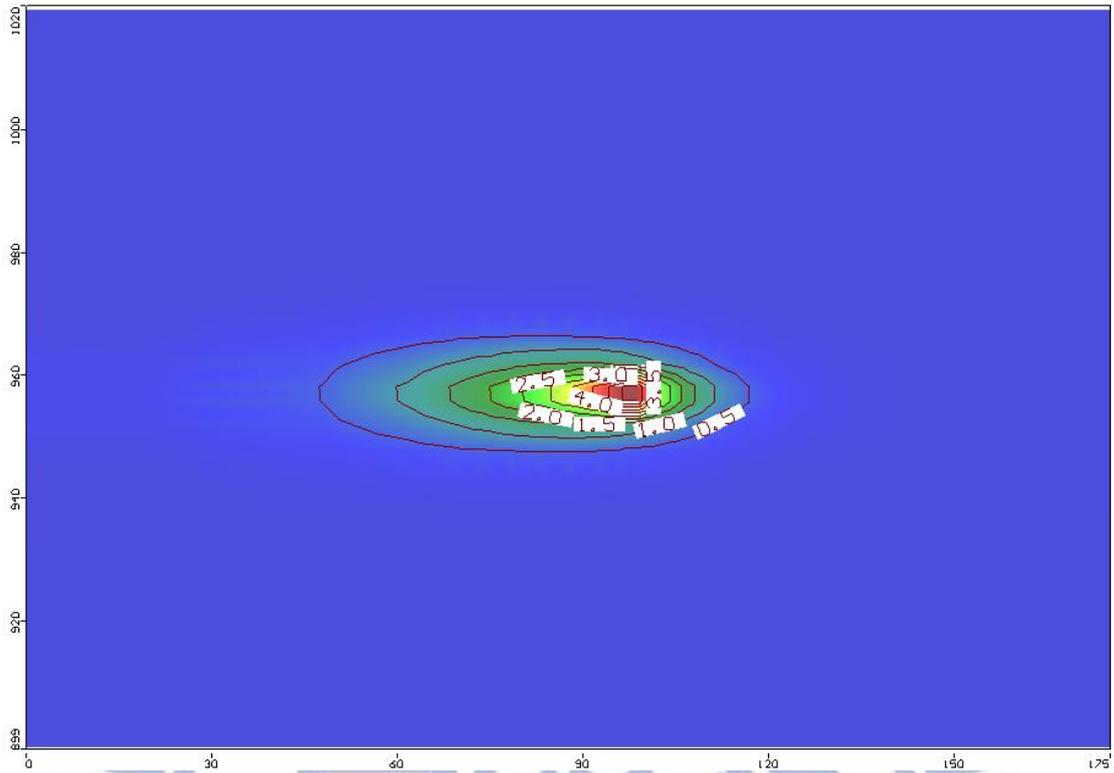


圖 4.2.3-1 C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

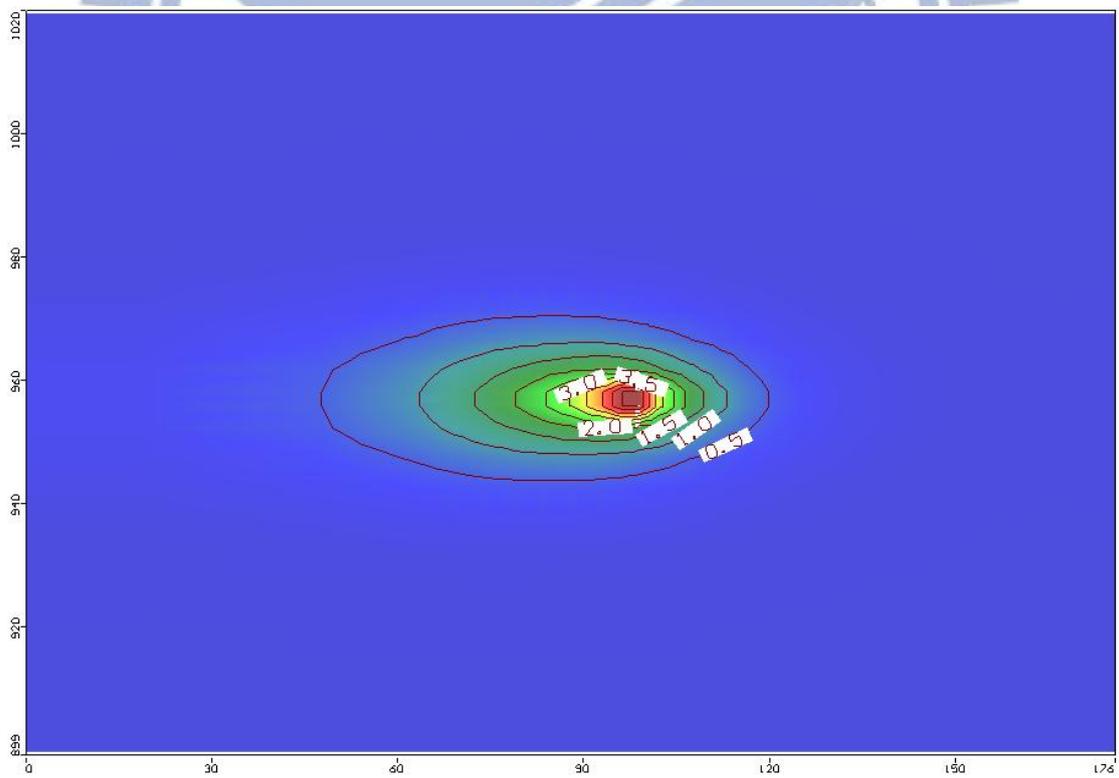


圖 4.2.3-2 C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

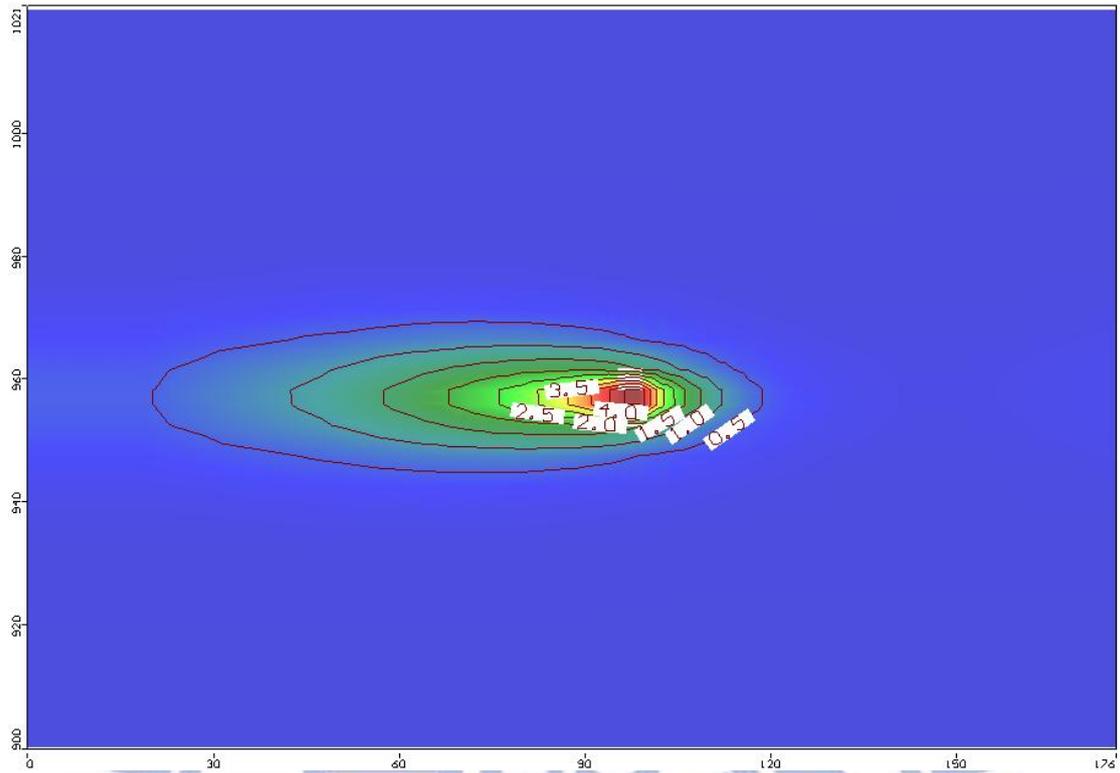


圖 4.2.3-3 C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

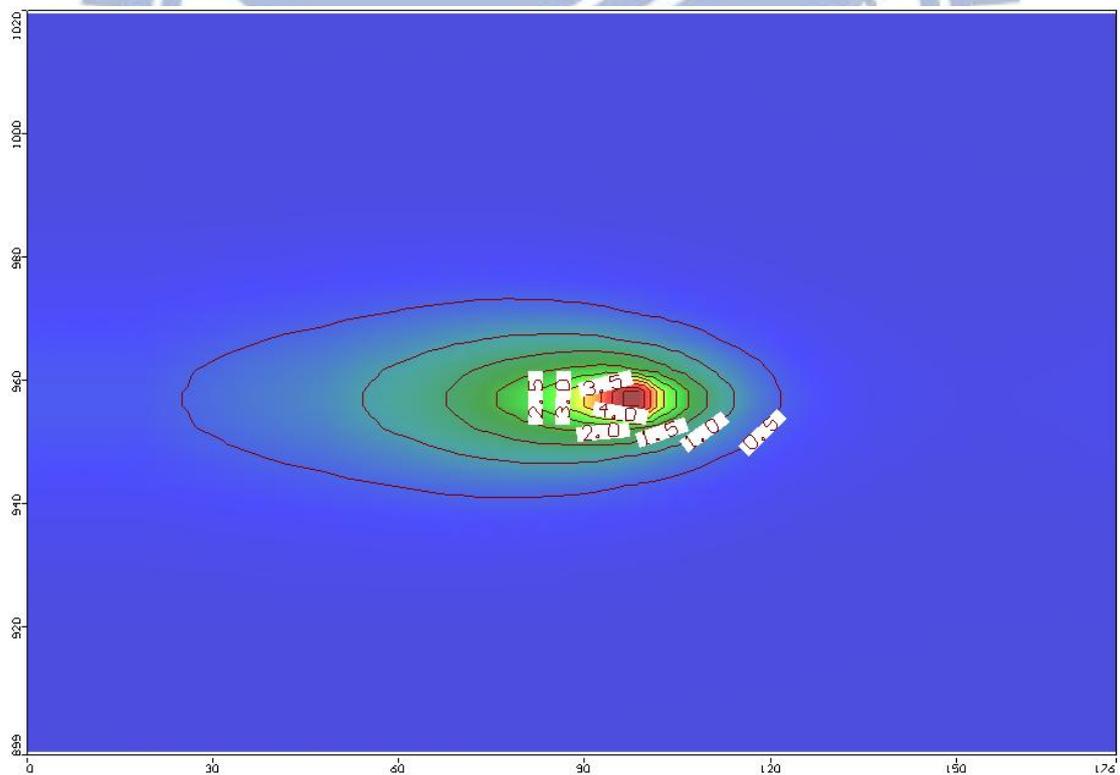


圖 4.2.3-4 C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

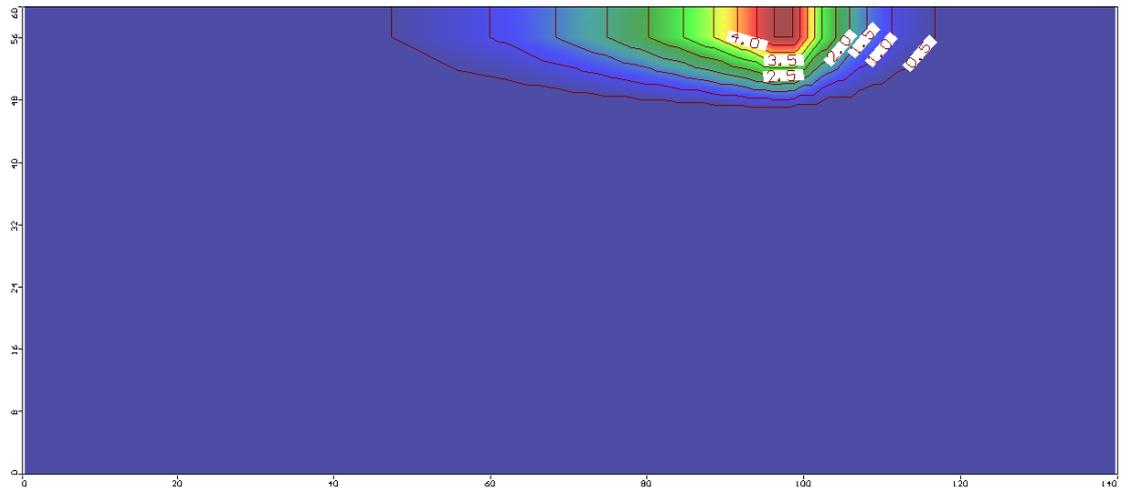


圖 4.2.3-5 C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

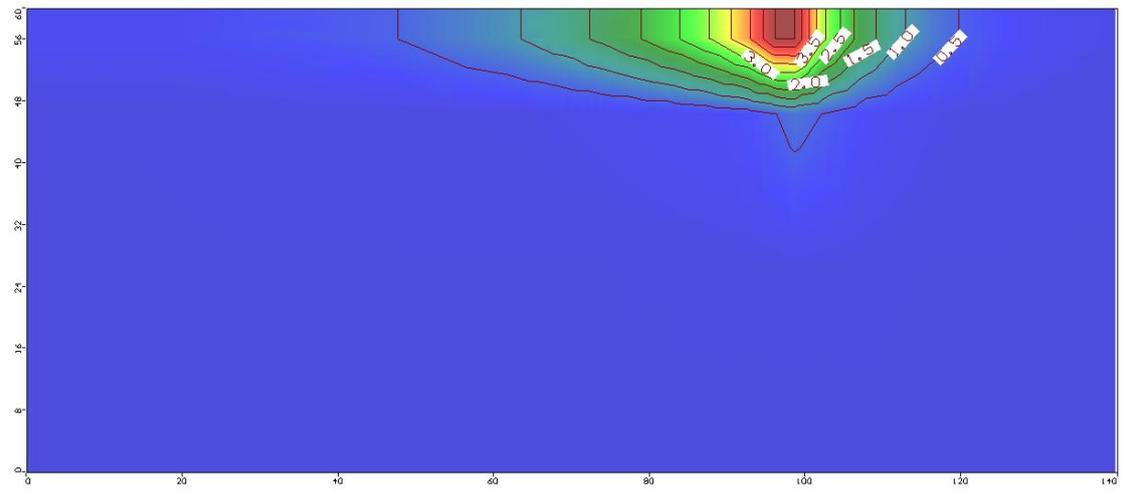


圖 4.2.3-6 C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

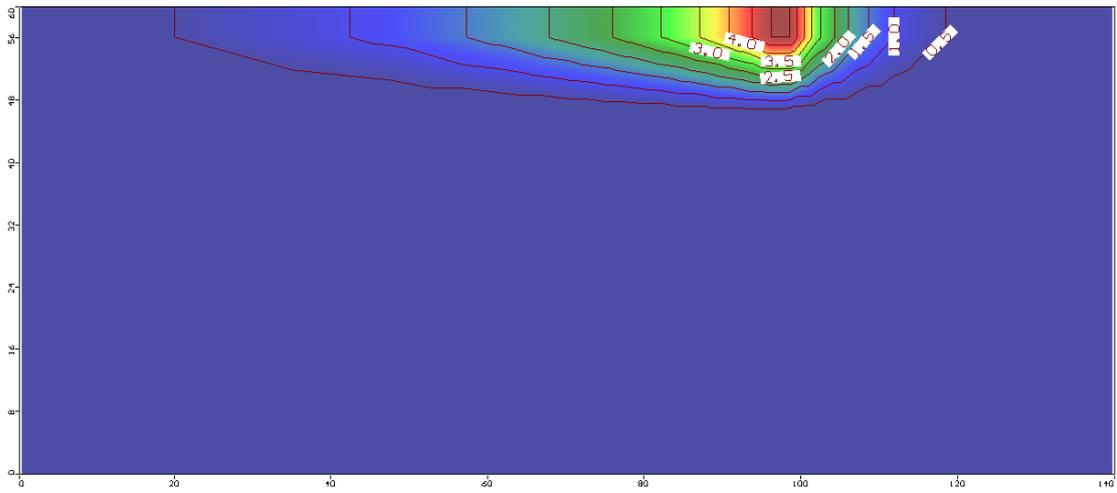


圖 4.2.3-7 C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

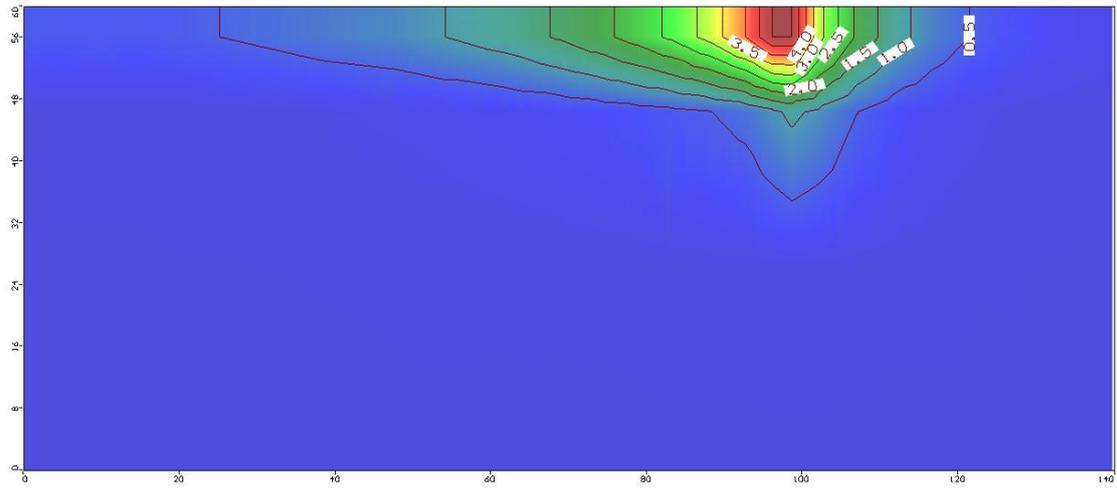


圖 4.2.3-8 C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

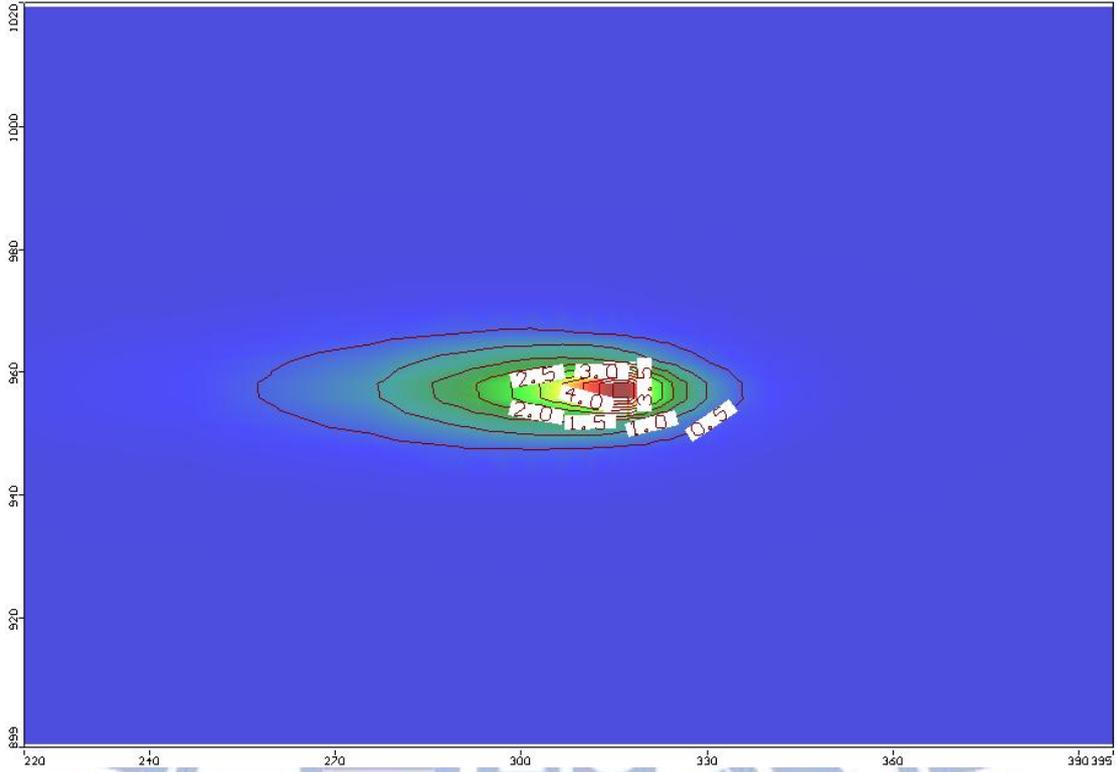


圖 4.2.3-9 C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

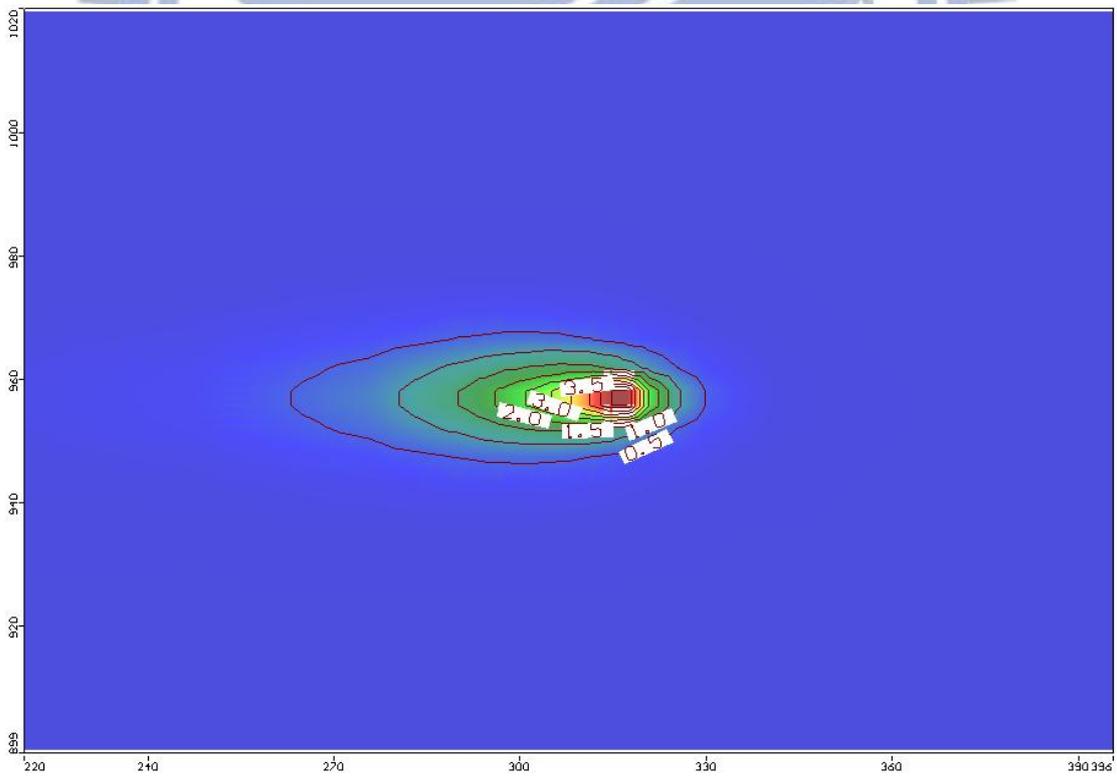


圖 4.2.3-10 C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

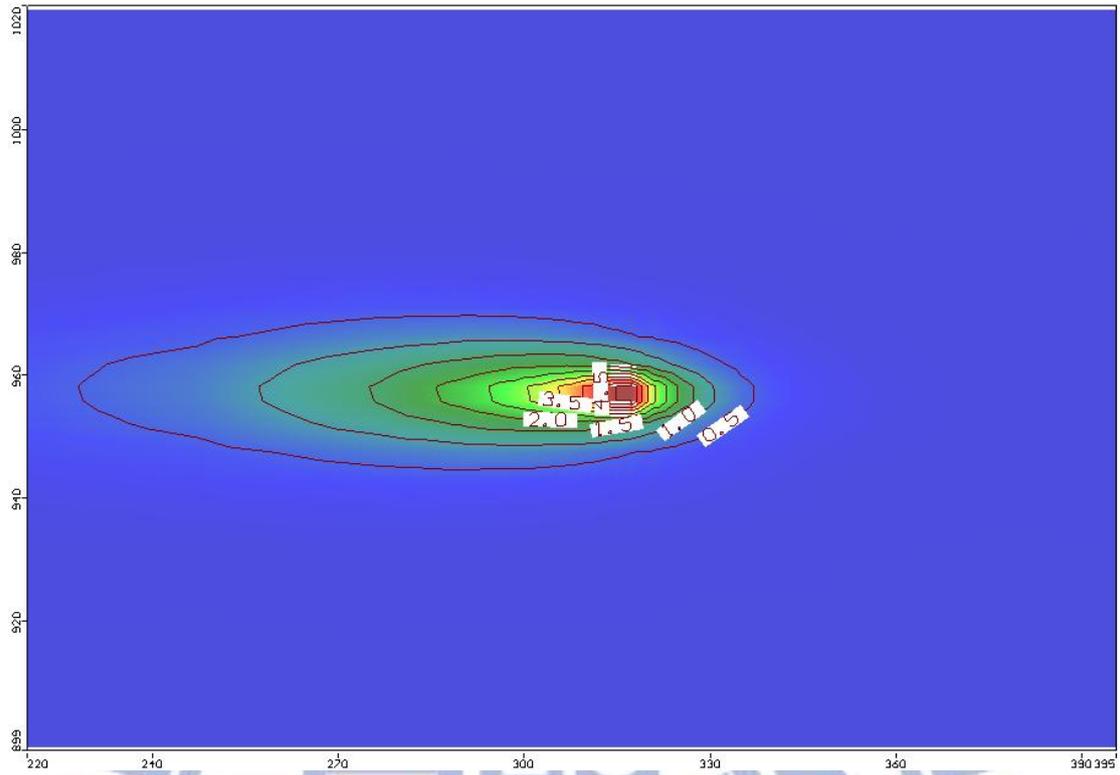


圖 4.2.3-11 C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

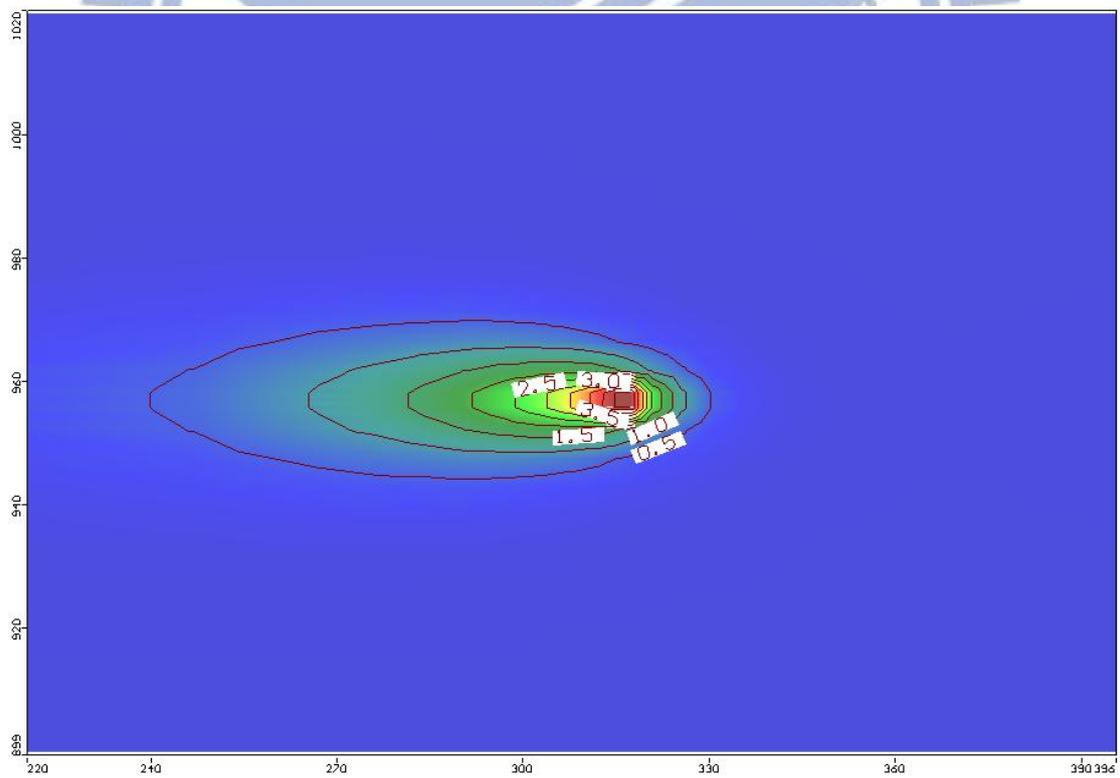


圖 4.2.3-12 C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

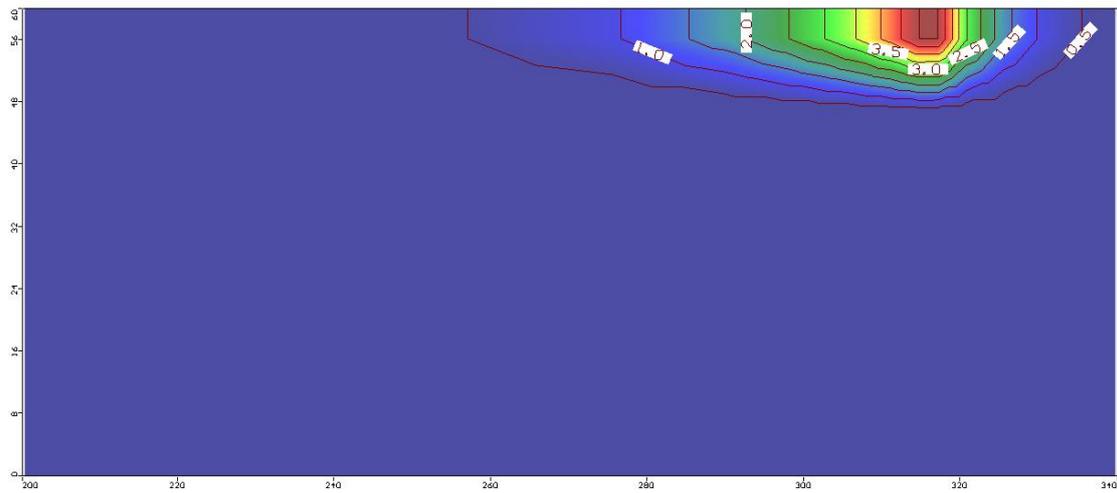


圖 4.2.3-13 C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

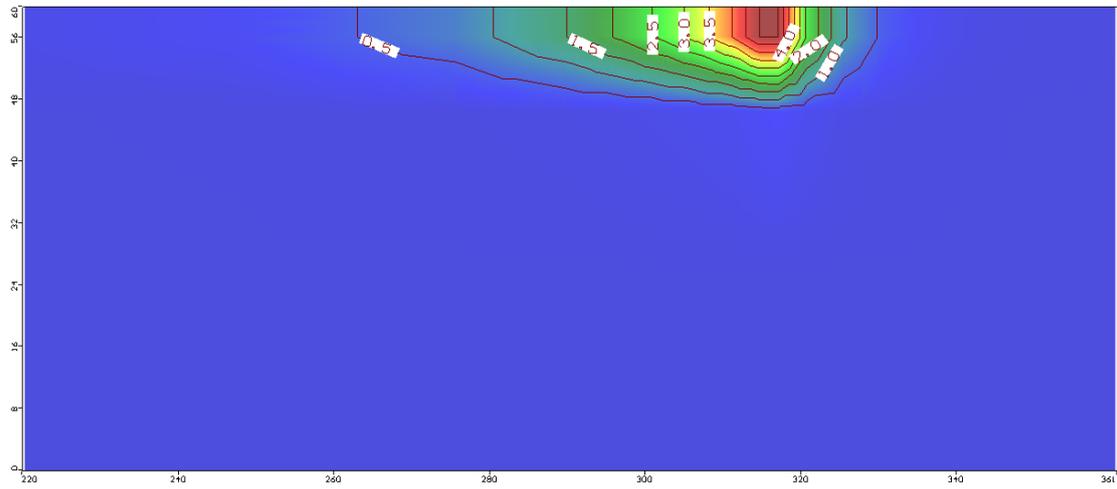


圖 4.2.3-14 C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

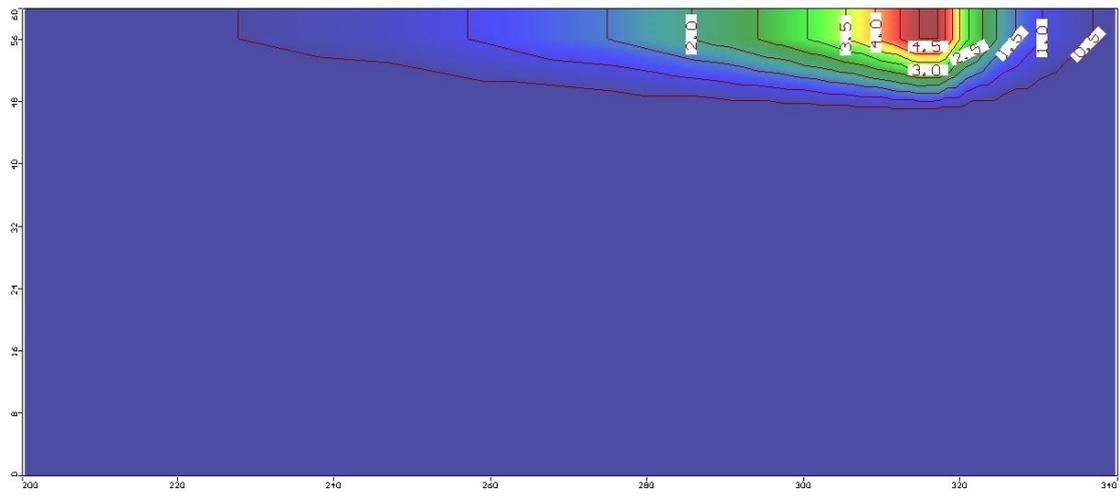


圖 4.2.3-15 C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

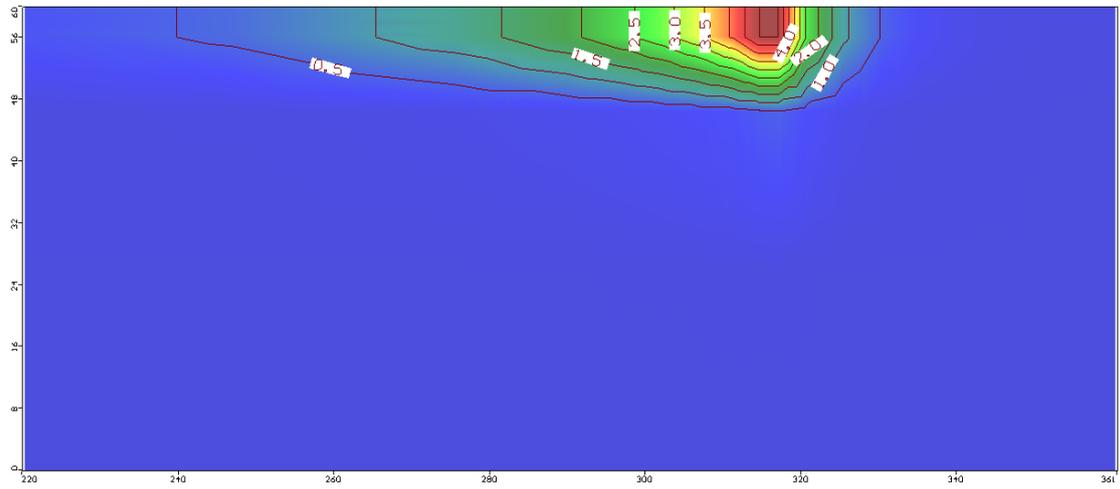


圖 4.2.3-16 C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

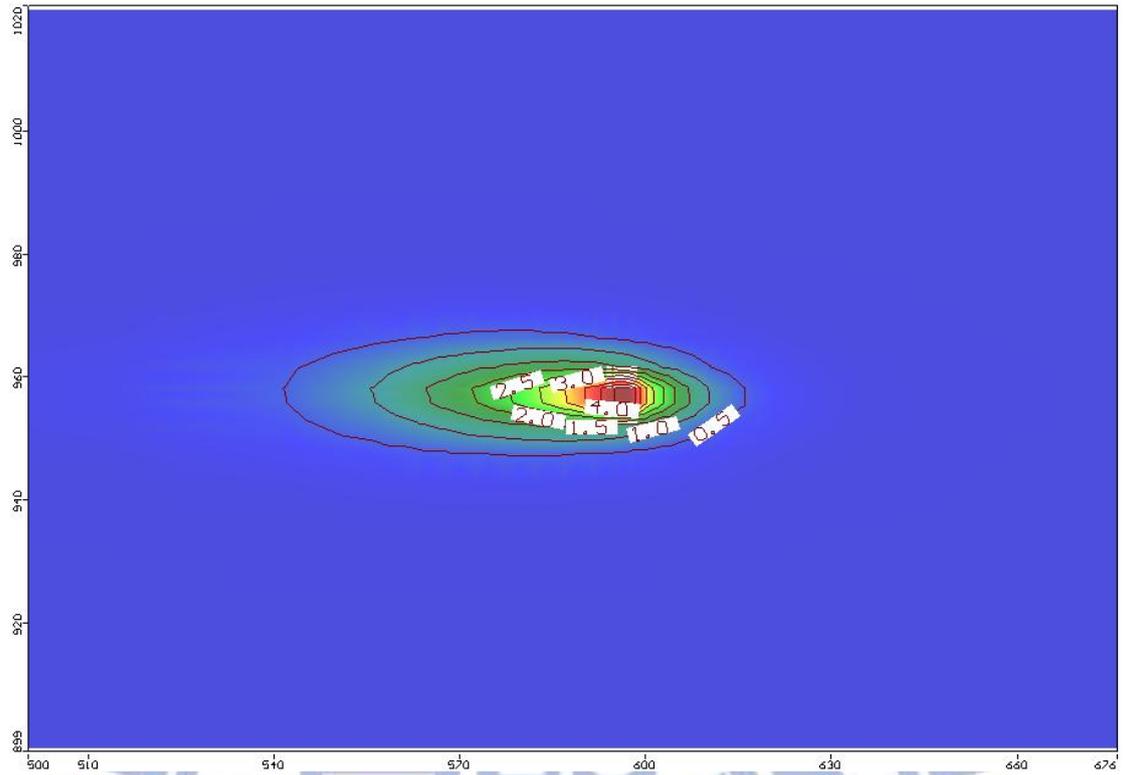


圖 4.2.3-17 C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

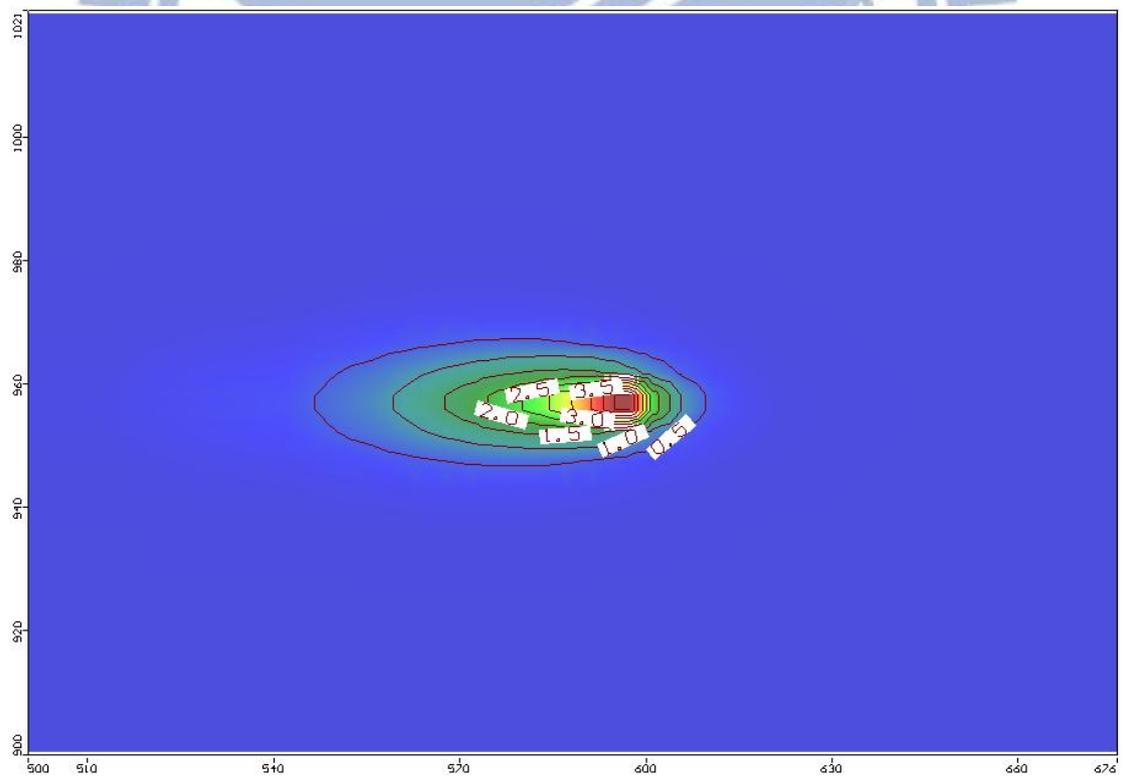


圖 4.2.3-18 C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

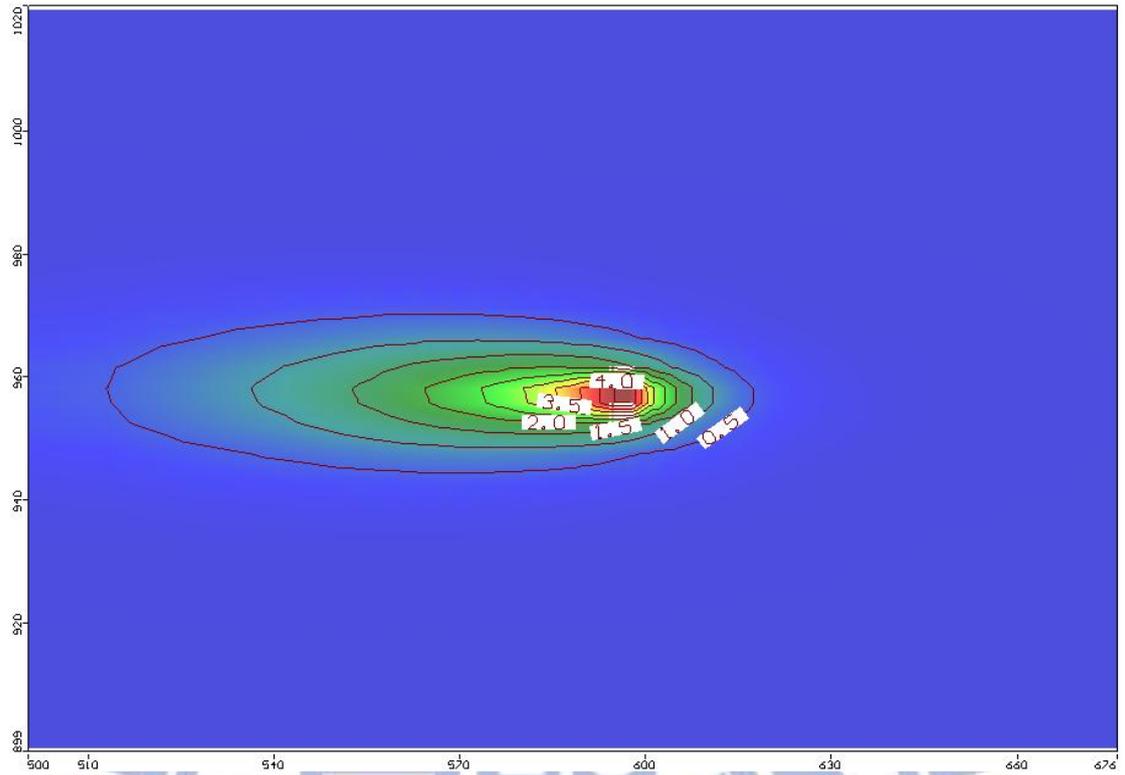


圖 4.2.3-19 C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

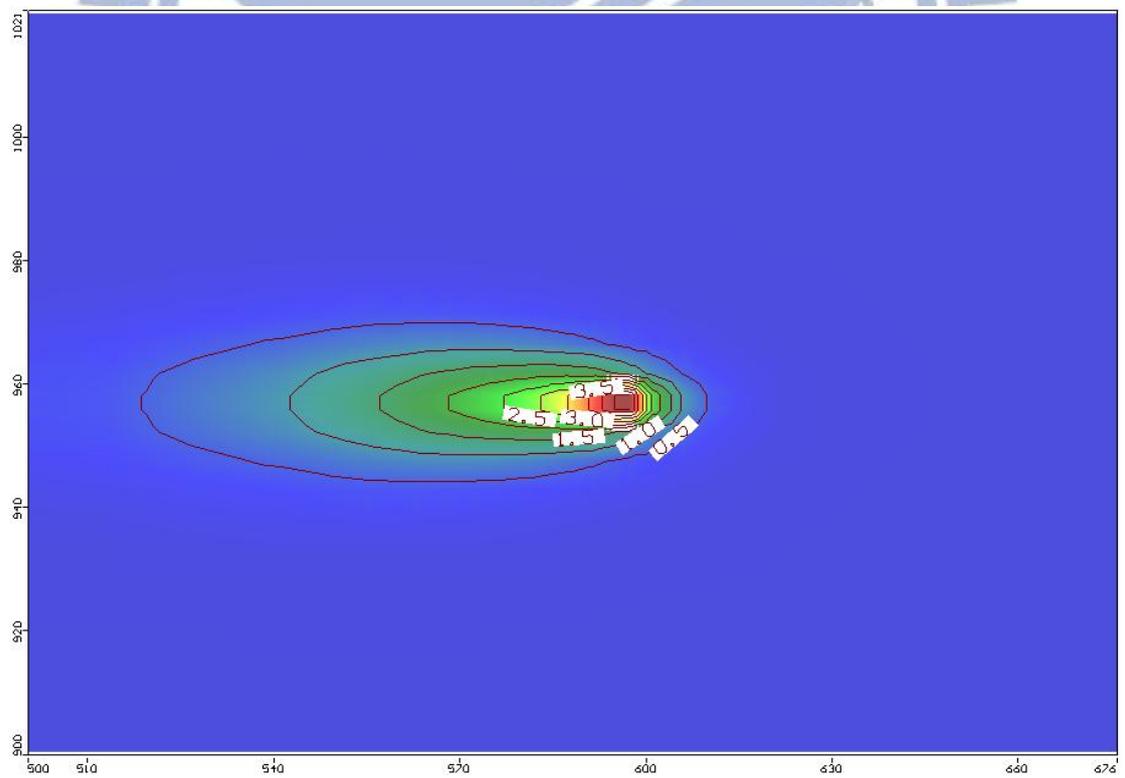


圖 4.2.3-20 C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

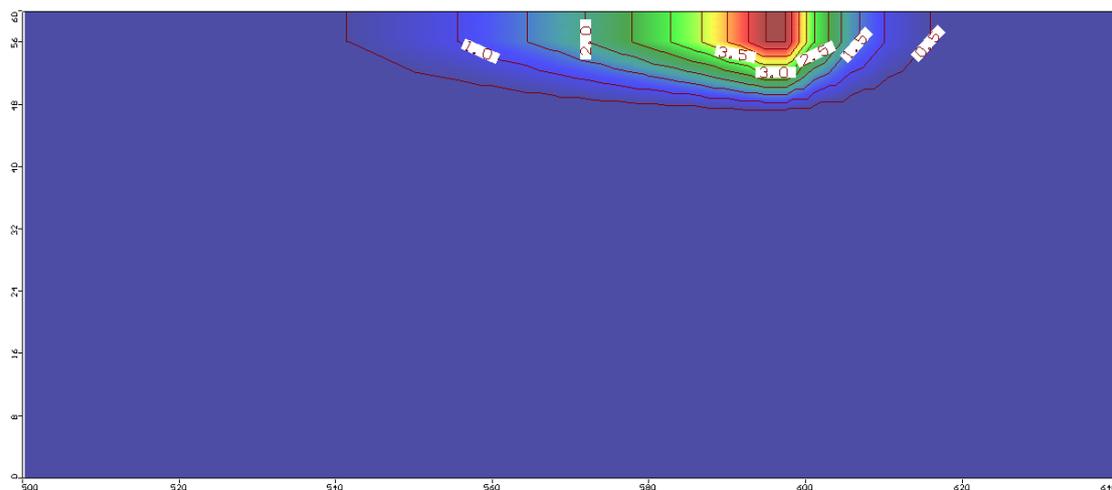


圖 4.2.3-21 C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

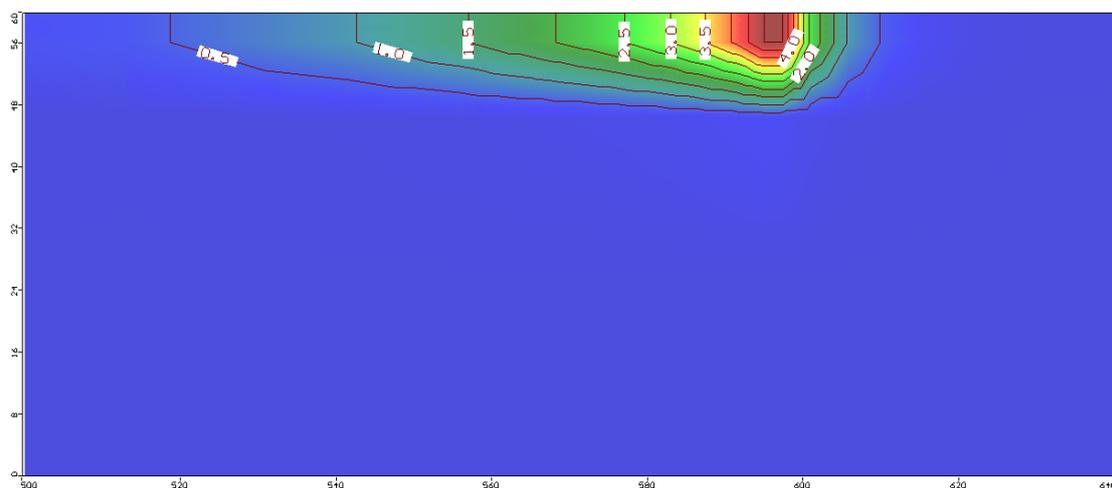


圖 4.2.3-22 C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

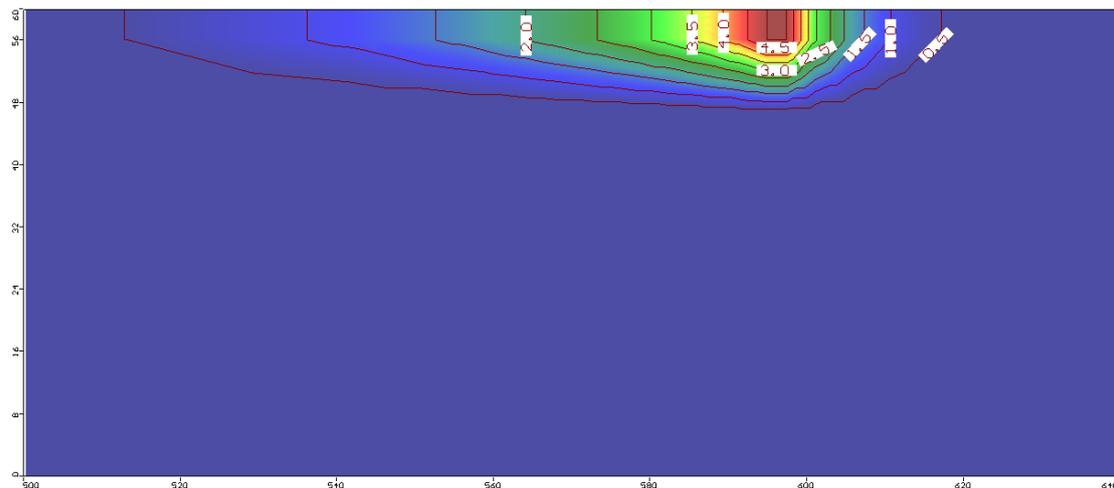


圖 4.2.3-23 C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

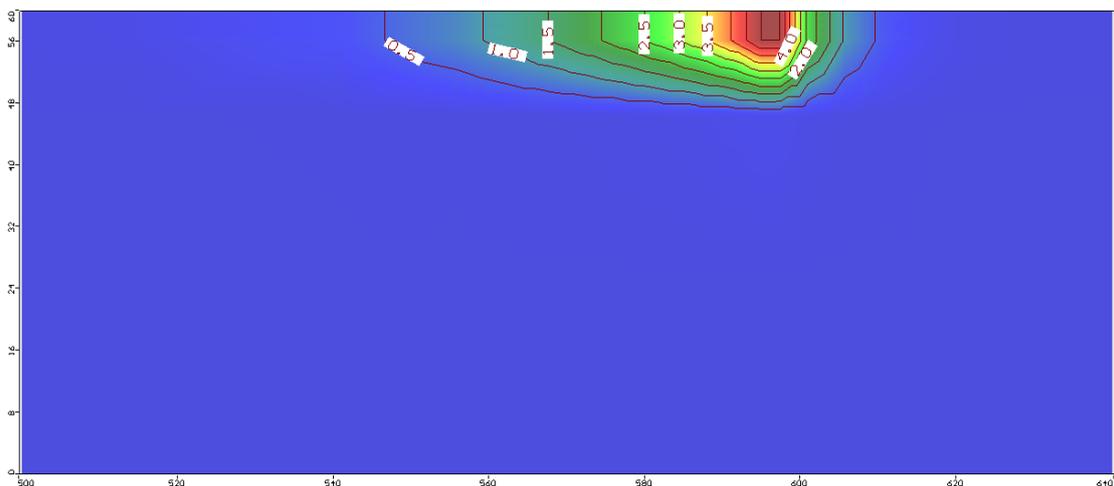


圖 4.2.3-24 C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.3 Case 3 將導水度縮小五倍

以下的 18 張圖(圖 4.3-1 和圖 4.3-2)為各個位置上一年模擬以後的結果,污染團範圍以 0.5 ppm 做為最小濃度,5 ppm 為最大濃度,中間間隔以 0.5 來做區分,在場址中因為水力梯度小(1.84×10^{-3})的關係使得流場中的流速相當慢(平均流速約 1.16×10^{-9} m/s),因此在模擬的呈現中將會把 E-1、E-2、E-3、M-1、M-2、M-3、C-1、C-2、C-3 各個位置的污染分佈情況以半年和一年的模擬結果呈現出來;其中因為在有無潮汐時深度的範圍差別不大,因此在呈現的過程中沒有加入剖面圖。在各小節中將會以 E、M、C 三個位置分別進行討論,最後全部綜合再一起進行討論。Case 3 中呈現的上視圖大小和 Case 1、Case 2 不同,主要是因為污染團擴散範圍太小,因此再呈現比例尺上相較於 Case 1、Case 2 大。



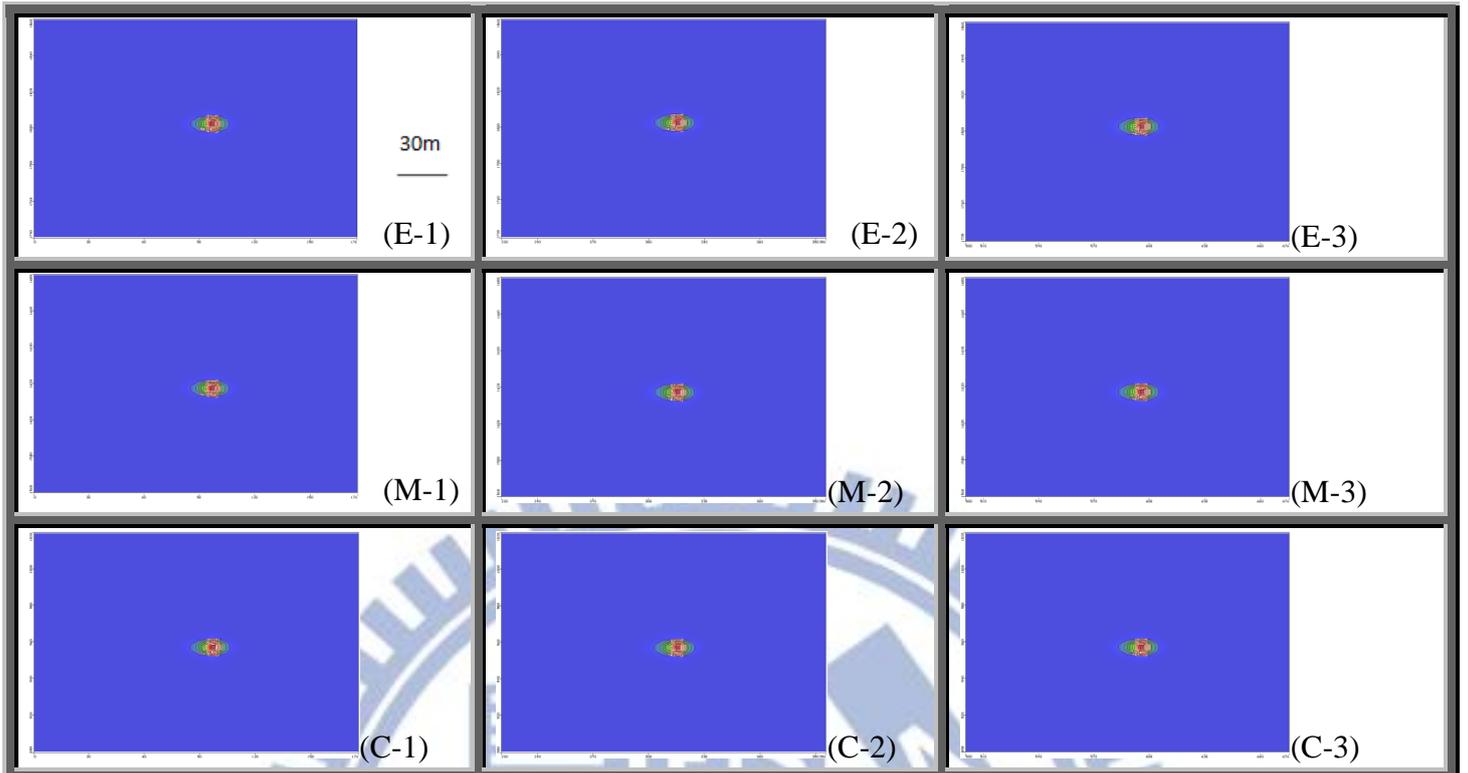


圖 4.3-1 無潮汐作用下污染團

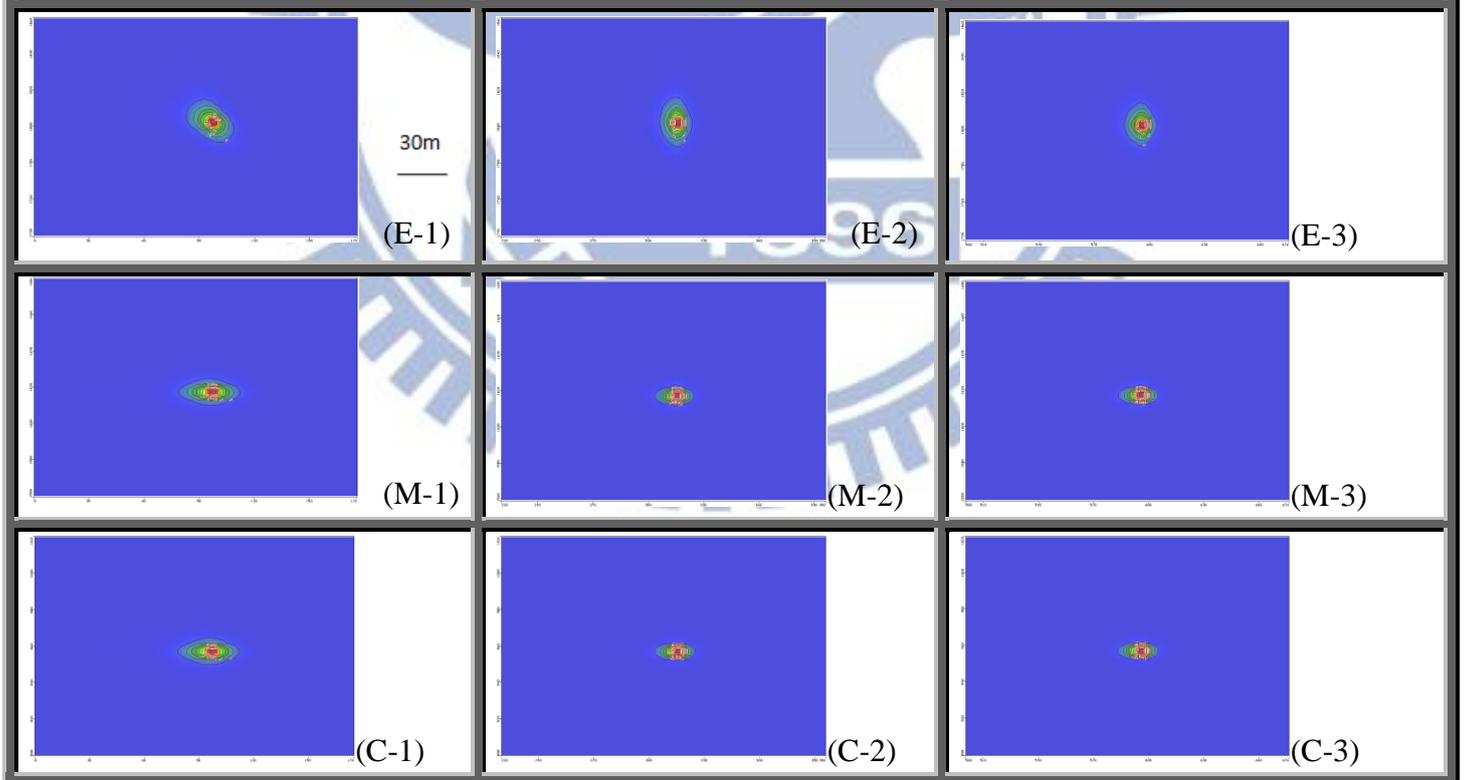


圖 4.3-2 潮汐作用下污染團

4.3.1 潮汐對於(E-1)、(E-2)、(E-3)影響比較

在表 4.3.1-1 中可以觀察出有潮汐的影響下只有(E-1)的污染團長度(x 軸)較無潮汐時大。這現象是因為海岸線潮汐變動幅度較河岸面潮汐變動大，所以當污染源離海岸線較近時，海岸線的潮汐影響遠比河岸面的潮汐影響大上許多，間接的讓河岸面潮汐影響效果降低。表中(E-2)、(E-3)有潮汐時污染團長度都較無潮汐時小，這是因為離海岸線有一定的距離讓潮汐作用減弱，而讓河川面的潮汐作用影響加大，因此污染團有被河川面拉去的現象。

由表中可以觀察出(E-1)、(E-2)、(E-3)污染團寬度在受潮汐作用時會比無潮汐時大，這是因為有潮汐作用時河川面(上端)有設定變動水頭的緣故，使得流場能夠往河川面移動，因此受潮汐影響時之寬度都較無潮汐時大。而另一個因素為假設初始延散度時，設定數據為 x 方向，並非為水流方向，這樣的情境和真實情況是不同的；在真實的情況下，因為排水路潮汐的變化，導致在高潮位時地下水梯度是由海岸線往內陸側流(如圖 4.3.1-1)，而低潮位時則往排水路徑流，因此污染團的方向產生轉向的效果。而在程式中這樣的限制是有問題的，而這樣的假設中，也因為側向的機械延散增加，使得污染團的寬度變大了，這也是污染團寬度變大的影響因素之一。(E-2)和(E-3)因為污染源離海岸線距離遠，讓海岸線的潮汐影響效果降低，污染團也因為海岸線的潮汐影響減弱使得河川面的影響效果增強許多，因此在(E-2)、(E-3)的污染團寬度都較(E-1)大上許多。

在(M-1)、(M-2)、(M-3)的位置中，潮汐對於污染團的深度幾乎已不影響。半年和一年的擴散趨勢和前述的 E 和 M 位置都相同，污染團之擴散趨勢在半年內已趨於穩定。

在 Case 1、Case 2、Case 3 情境中 E 位置最大的不同在於污染團長軸與 x 軸之夾角，在 Case 1 中(E-1)、(E-2)、(E-3)的各夾角為 36° 、 80° 、 79° ，而在 Case 2 中各夾角為 3° 、 10° 、 0° ，Case 3 中各個夾角為 52° 、 90° 、 90° ；比較各個角度後可以發現當導水度增大時，角度隨導水度的增加越小(Case 2)，導水度最小時角度越大(Case 3)，這可能是因為導水度的增加，讓水流速加大，而海岸線的變化幅度相較於河川面大，因此水流速在 x 軸方向的增加量相較 y 軸方向的增加量大。

表 4.3.1-1 污染團面積之比較結果

(E-1)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	11	3.5	9	3.14	2.57
有潮汐	52°	13	9.7	9	1.34	0.93
(E-2)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	11	3.5	9	3.14	2.57
有潮汐	90°	9	12.8	9	0.7	0.7
(E-3)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	11.9	3.2	9	3.72	2.8
有潮汐	90°	9	11	9	0.82	0.82

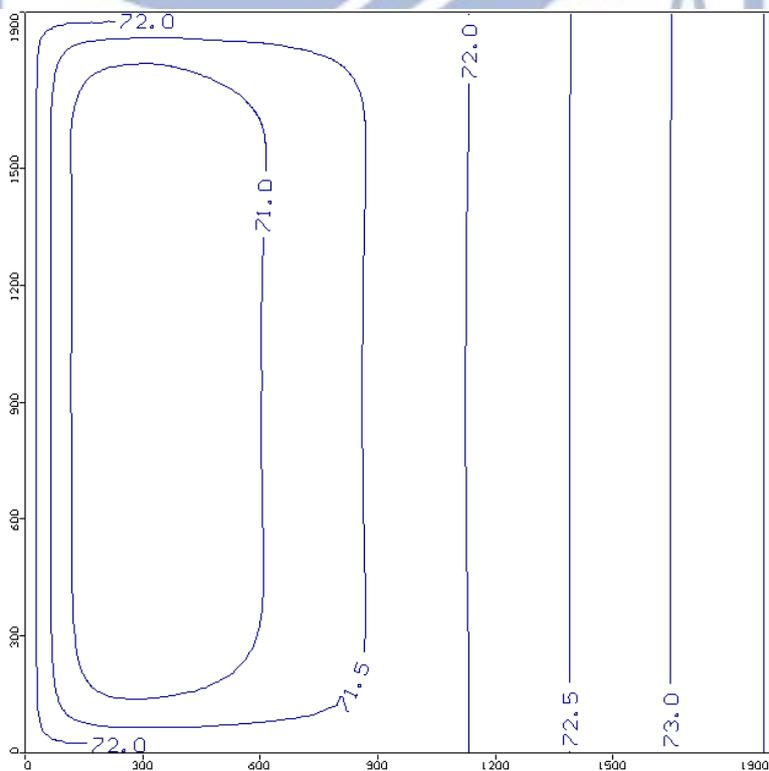


圖 4.3.1-1 高潮位時之等水位線

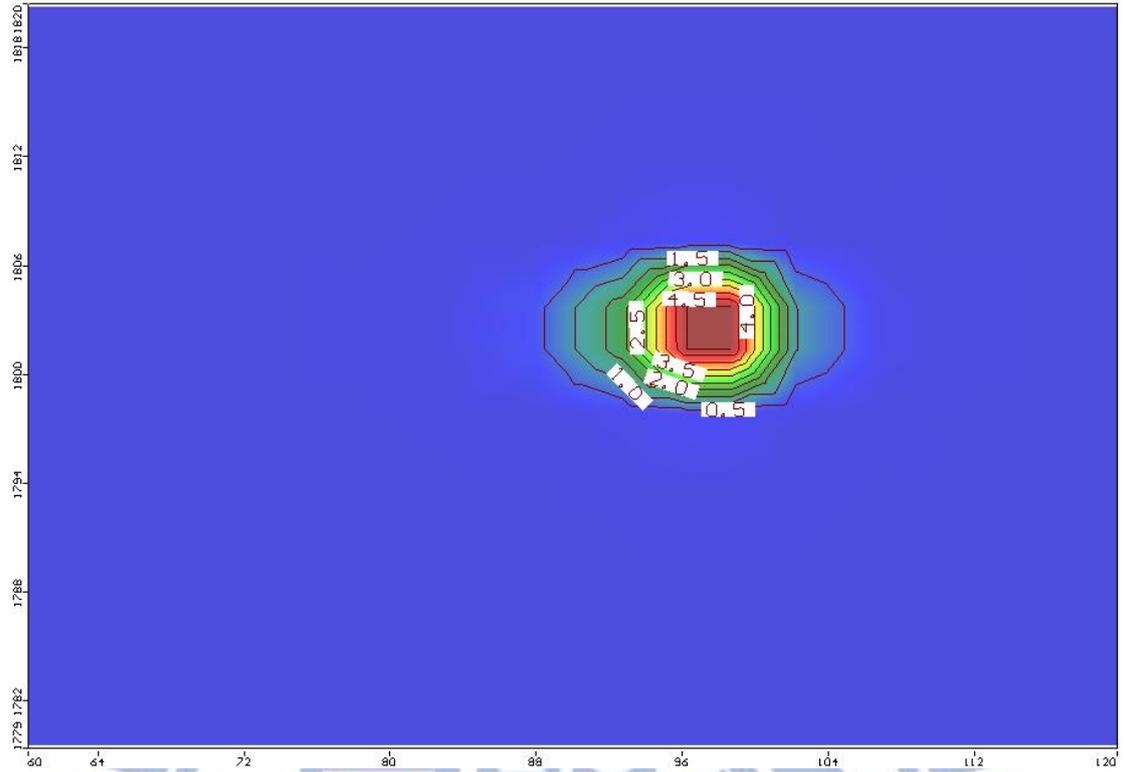


圖 4.3.1-2 E-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

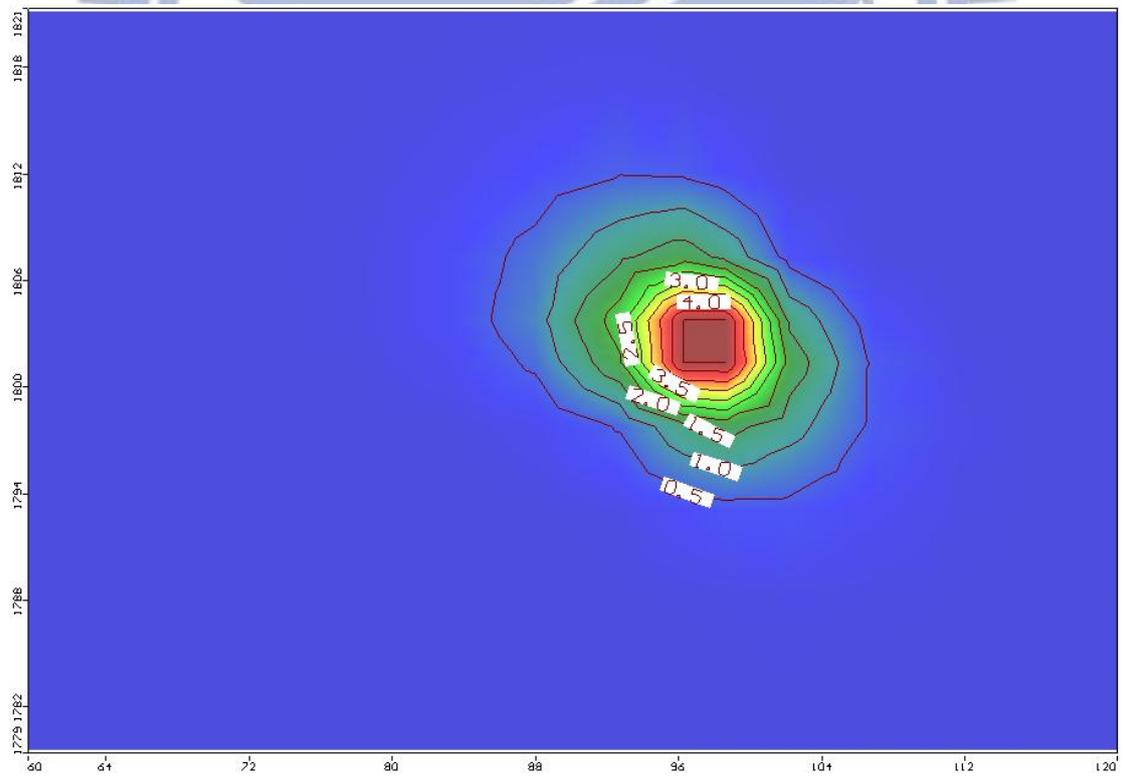


圖 4.3.1-3 E-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

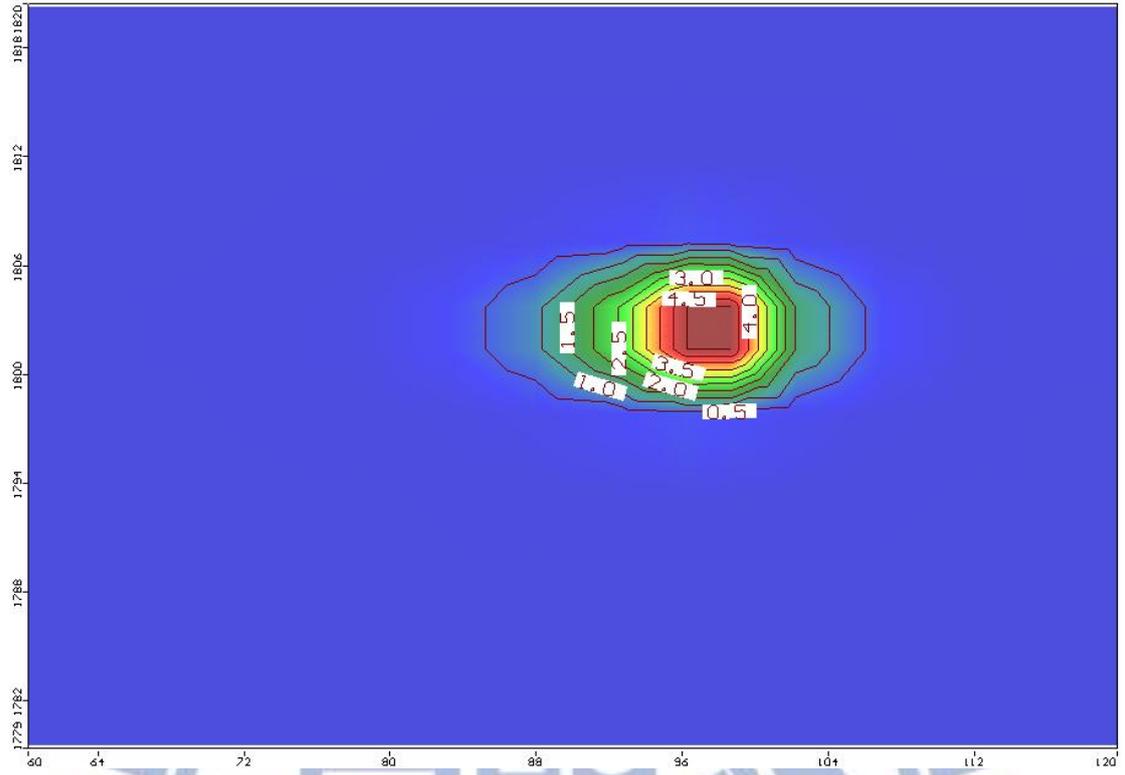


圖 4.3.1-4 E-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

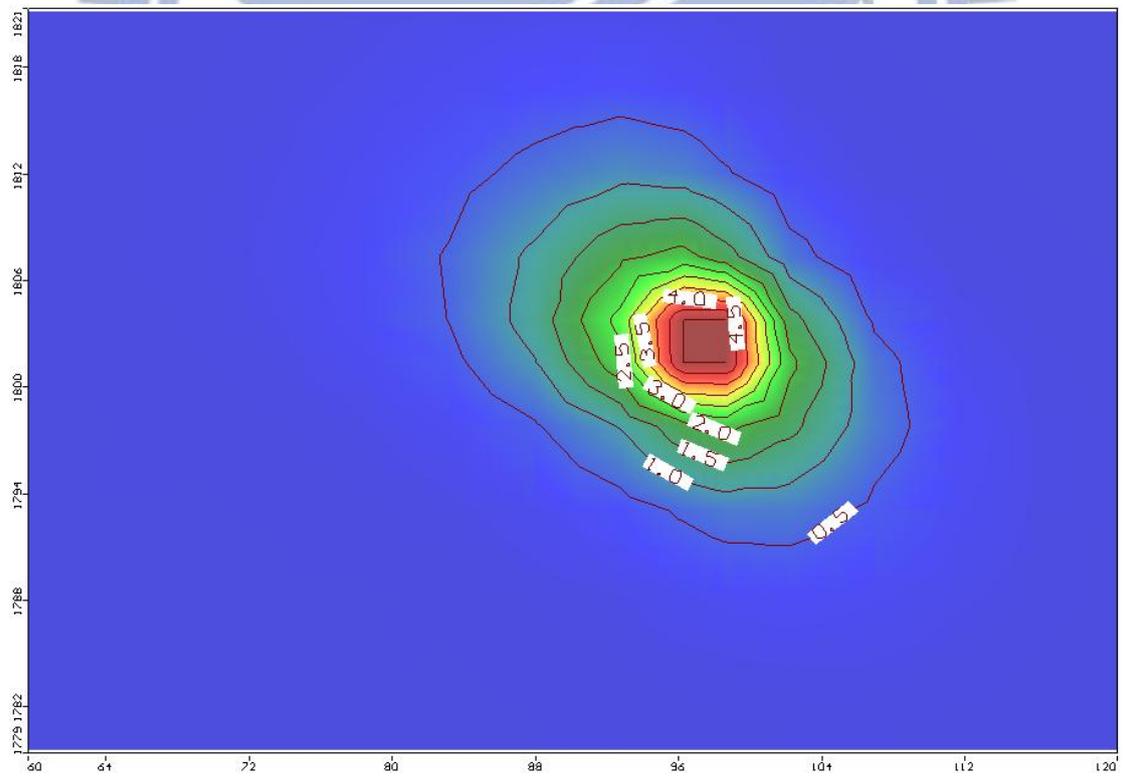


圖 4.3.1-5 E-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

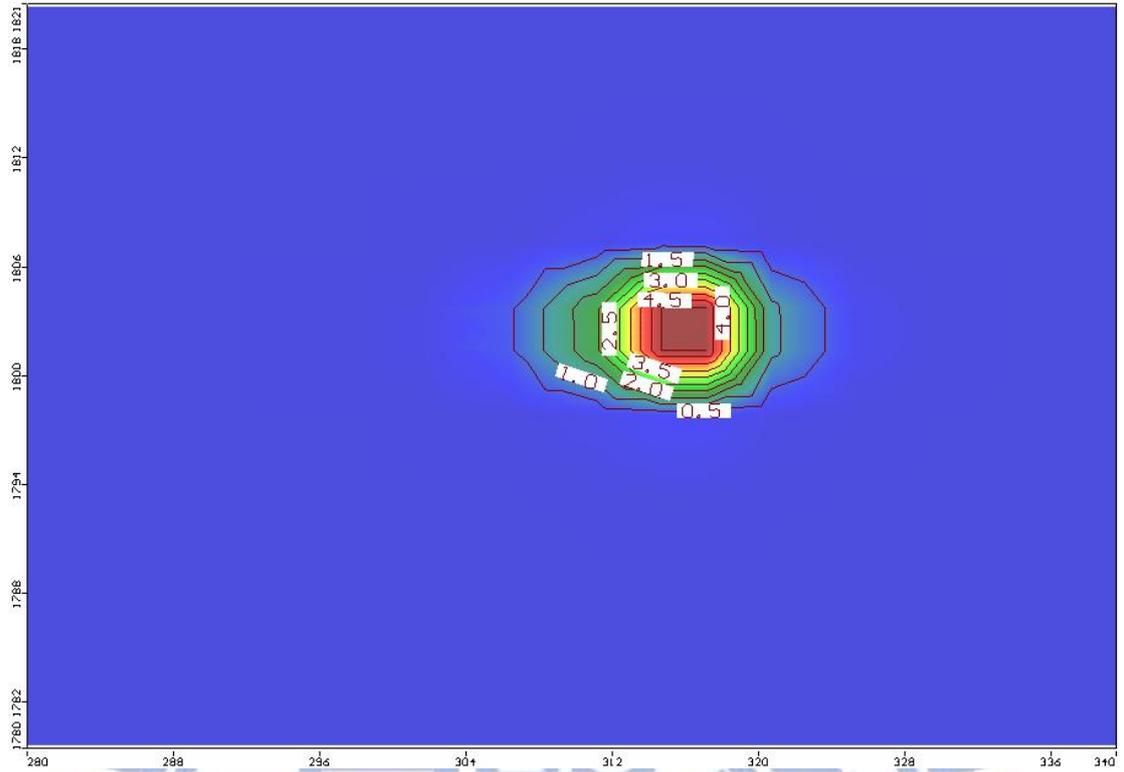


圖 4.3.1-6 E-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

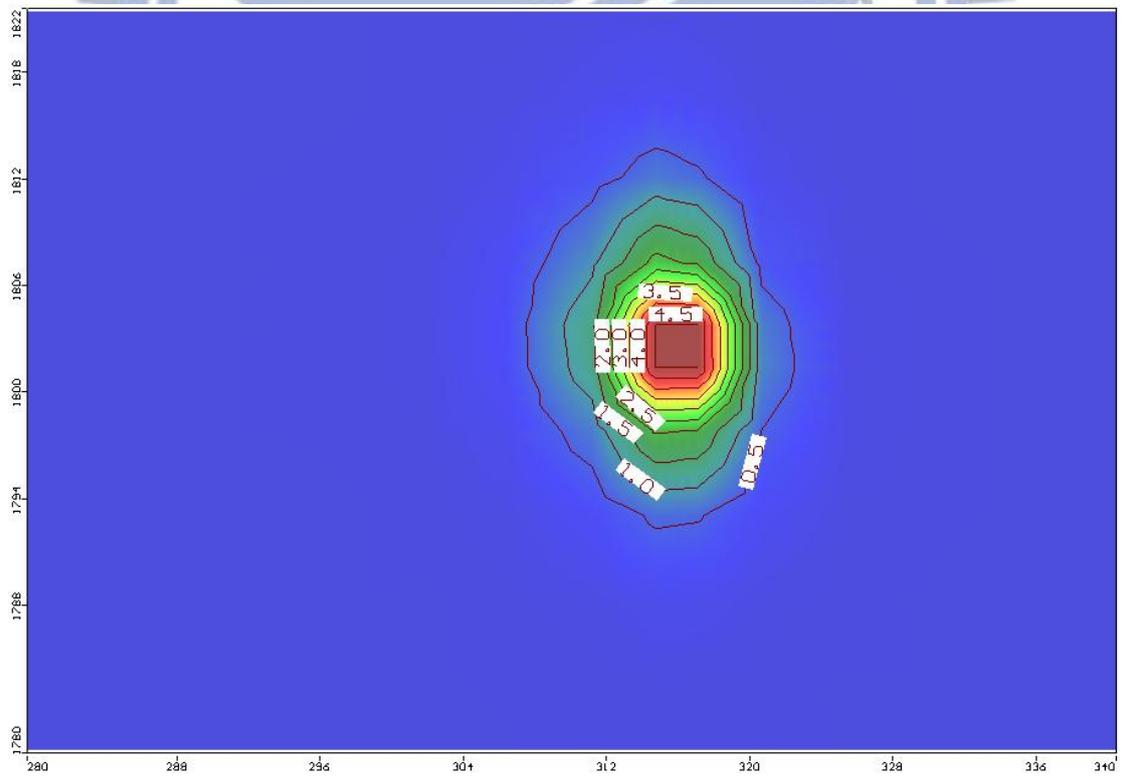


圖 4.3.1-7 E-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

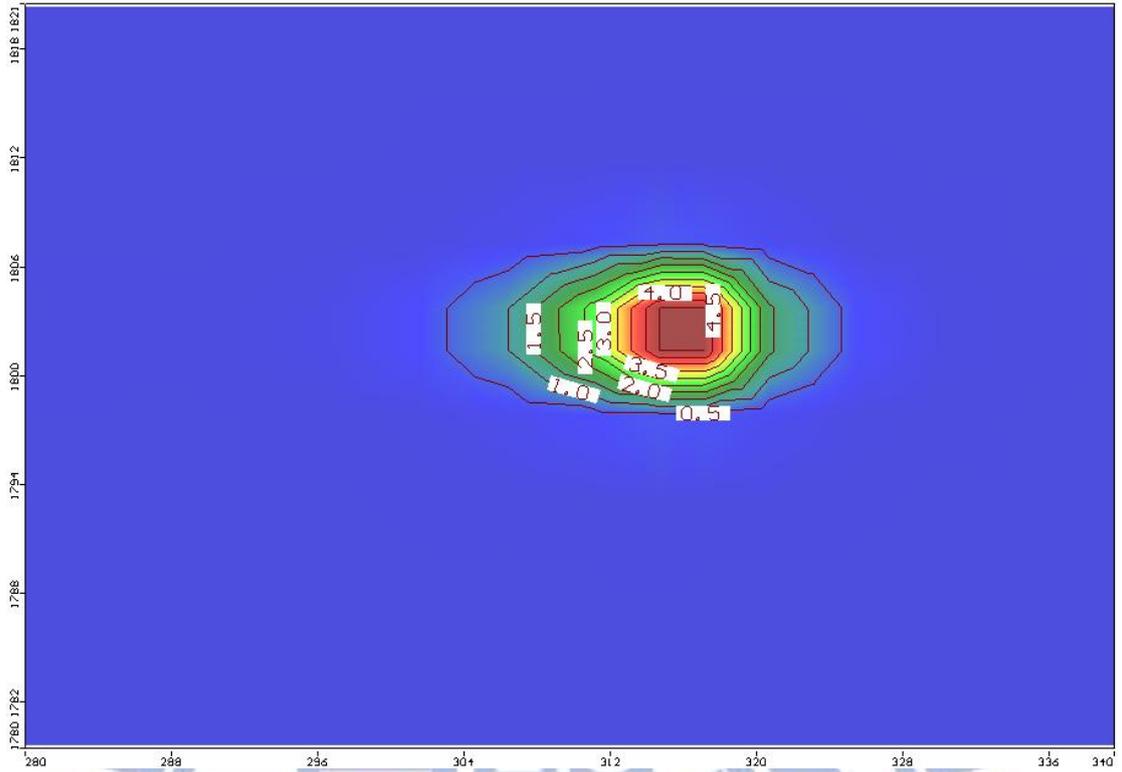


圖 4.3.1-8 E-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

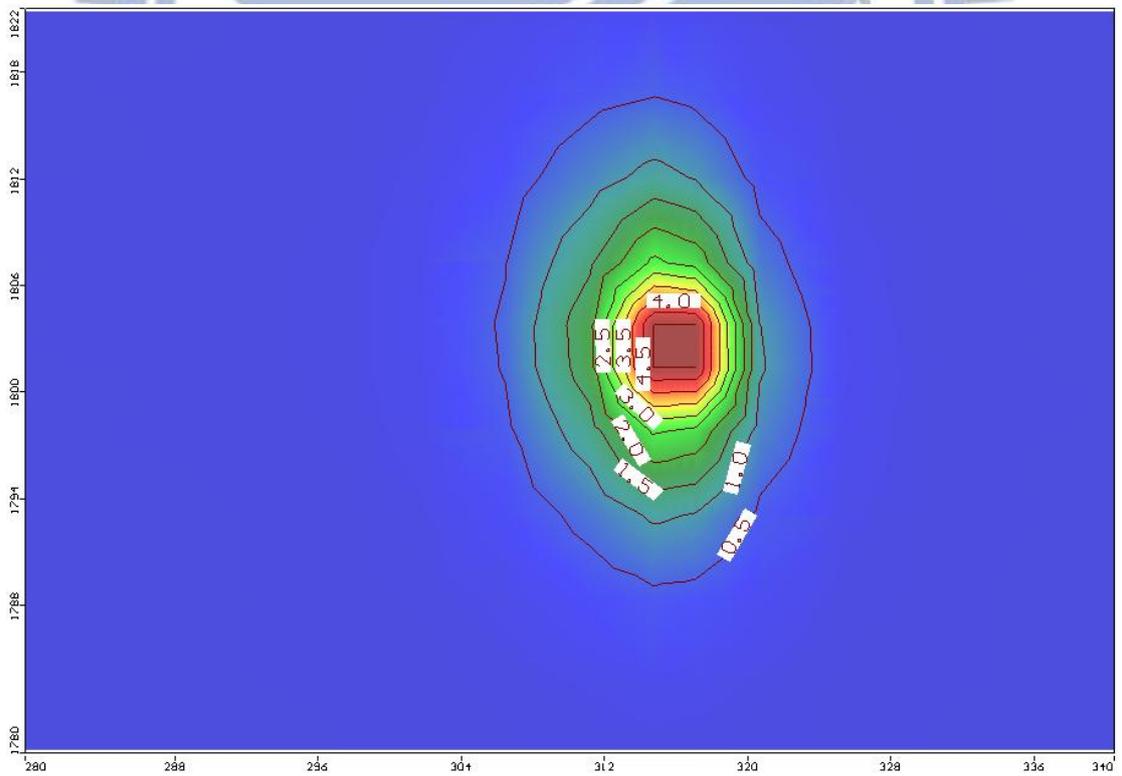


圖 4.3.1-9 E-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

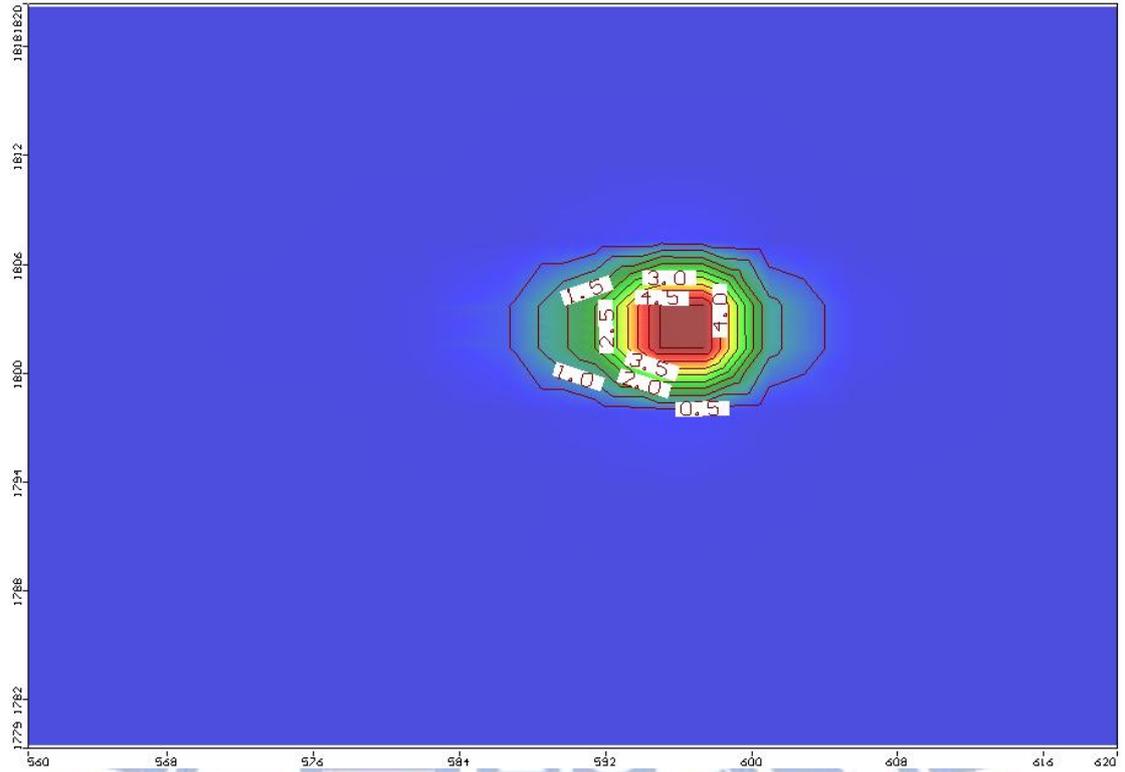


圖 4.3.1-10 E-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

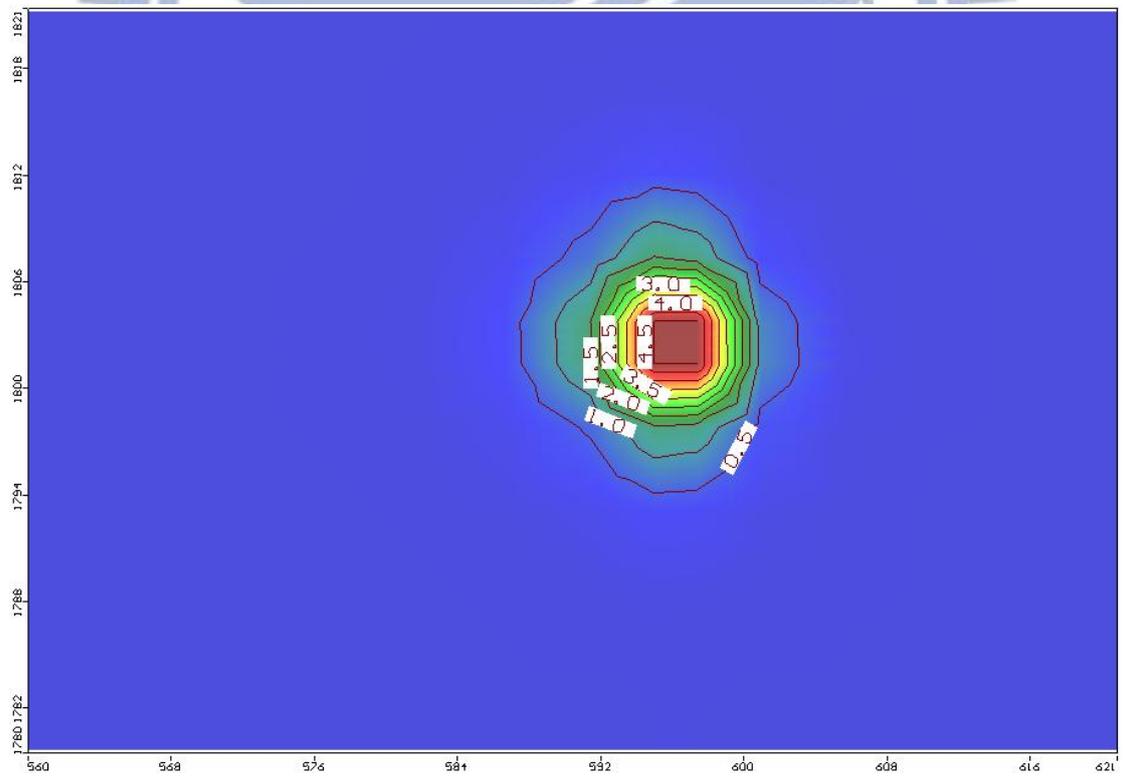


圖 4.3.1-11 E-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

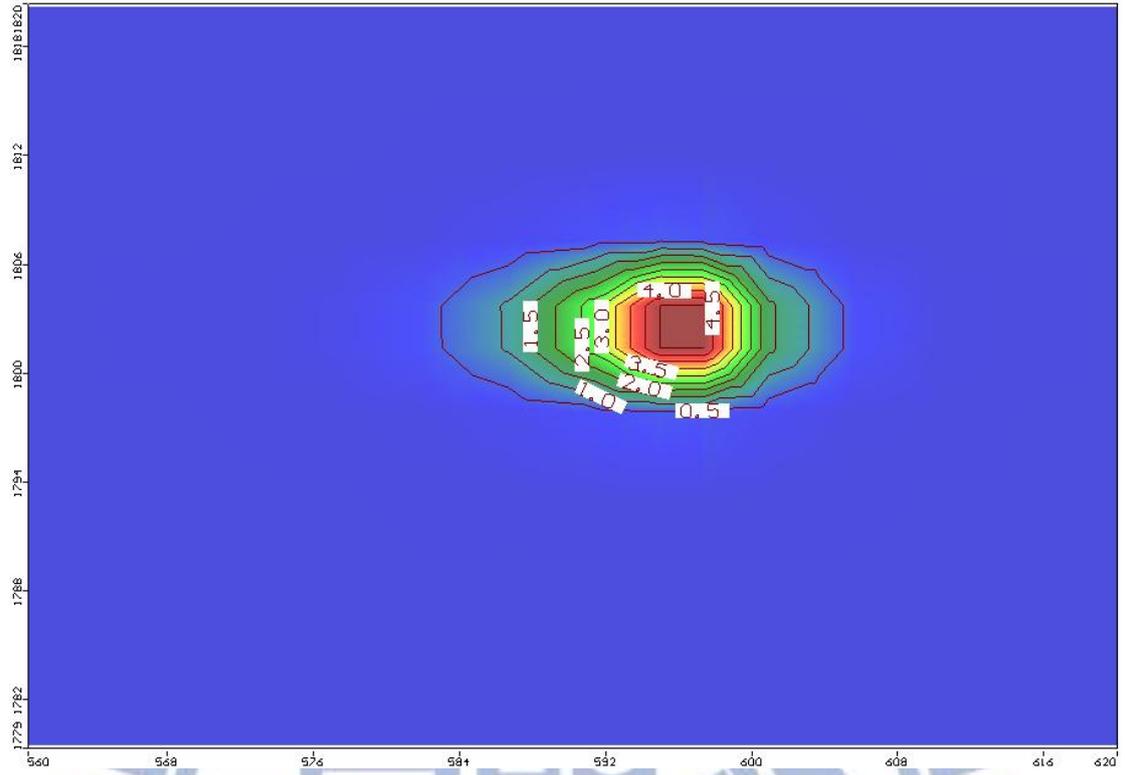


圖 4.3.1-12 E-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

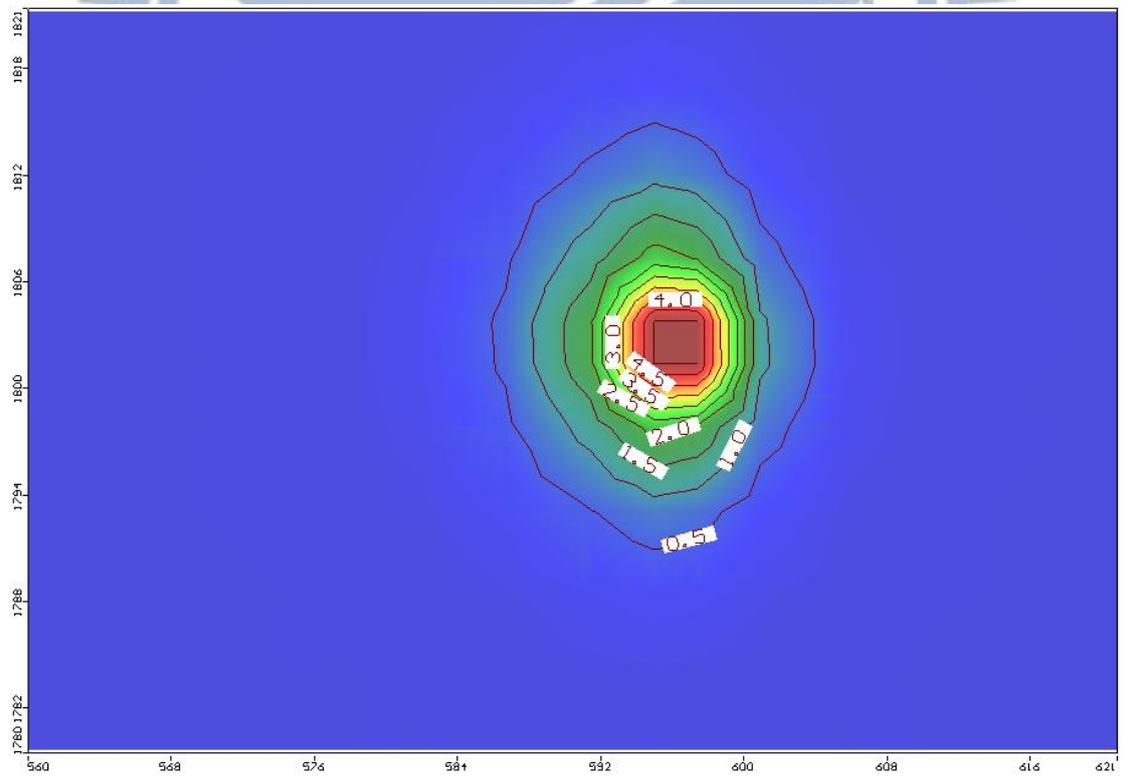


圖 4.3.1-13 E-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.3.2 潮汐對於(M-1)、(M-2)、(M-3)影響比較

(M-1)因為離海岸線較近，海岸線的潮汐影響遠比河岸面的潮汐影響大上許多，使得河岸面潮汐影響效果降低，因此污染團長度受潮汐影響下有被拉長的現象，此情境和 Case 1 的(M-1)趨勢相同，而(M-2)、(M-3)因為導水度的降低，導致潮汐影響範圍降低，最後呈現出有無潮汐時污染團長度大約相同。

污染團寬度部分，污染團的方向沒有發生轉向(污染團長軸和 x 軸夾角為零)，而距離排水路徑近，所以受到排水路徑水位變化的影響，因此在有潮汐時寬度都較無潮汐時大，而在(M-1)的部分中污染團之差值(2.9 m)相較(M-2)和(M-3)之差值(1.35 m)(1.4 m)大，這是因為導水度降低，讓離海岸線及河川面較遠的(M-2)及(M-3)，其排水路徑水位變化受到一定的限制。

在(M-1)、(M-2)、(M-3)的位置中，潮汐對於污染團的深度幾乎已不影響。半年和一年的擴散趨勢和前述的 E 和 M 位置都相同，污染團之擴散趨勢在半年內已趨於穩定。

表 4.3.2-1 污染團面積之比較結果(一年)

(M-1)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	11.08	3.5	9	3.17	2.57
有潮汐	0°	17.18	6.4	9	2.68	1.41
(M-2)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	11.7	3.55	9	3.3	2.34
有潮汐	0°	11.5	4.9	9	2.35	1.84
(M-3)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	11.5	3.5	9	3.29	2.57
有潮汐	0°	11.5	4.9	9	2.35	1.84

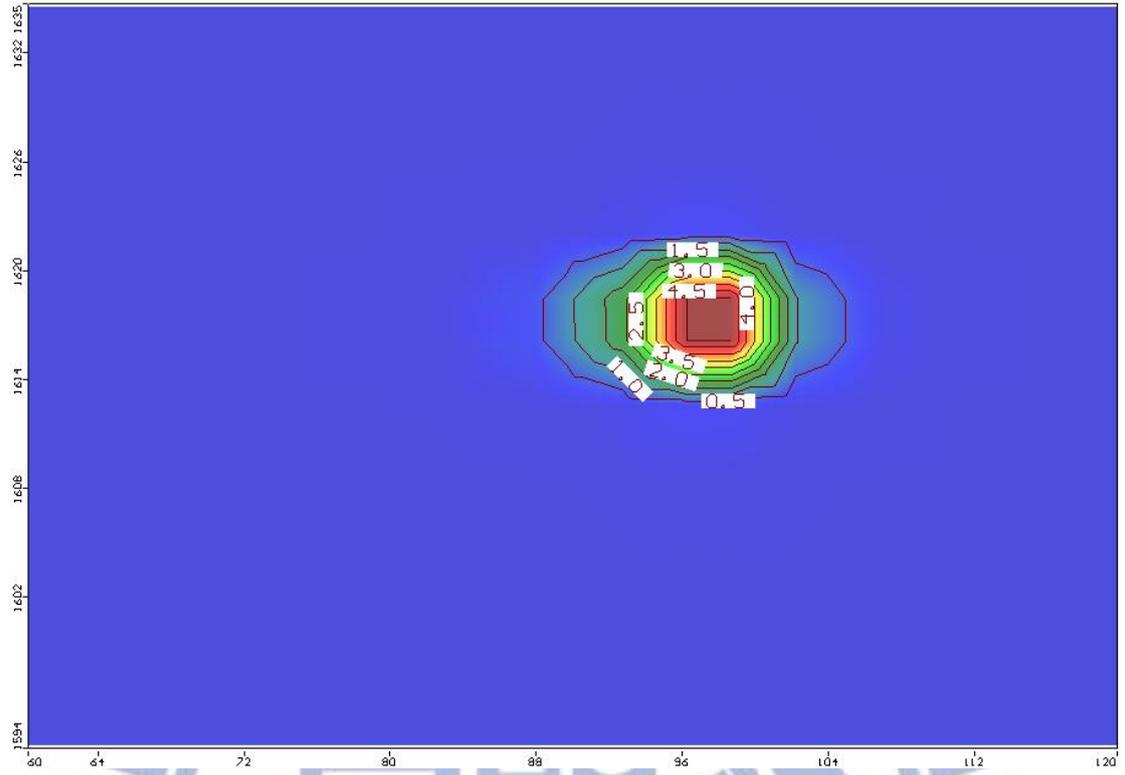


圖 4.3.2-1 M-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

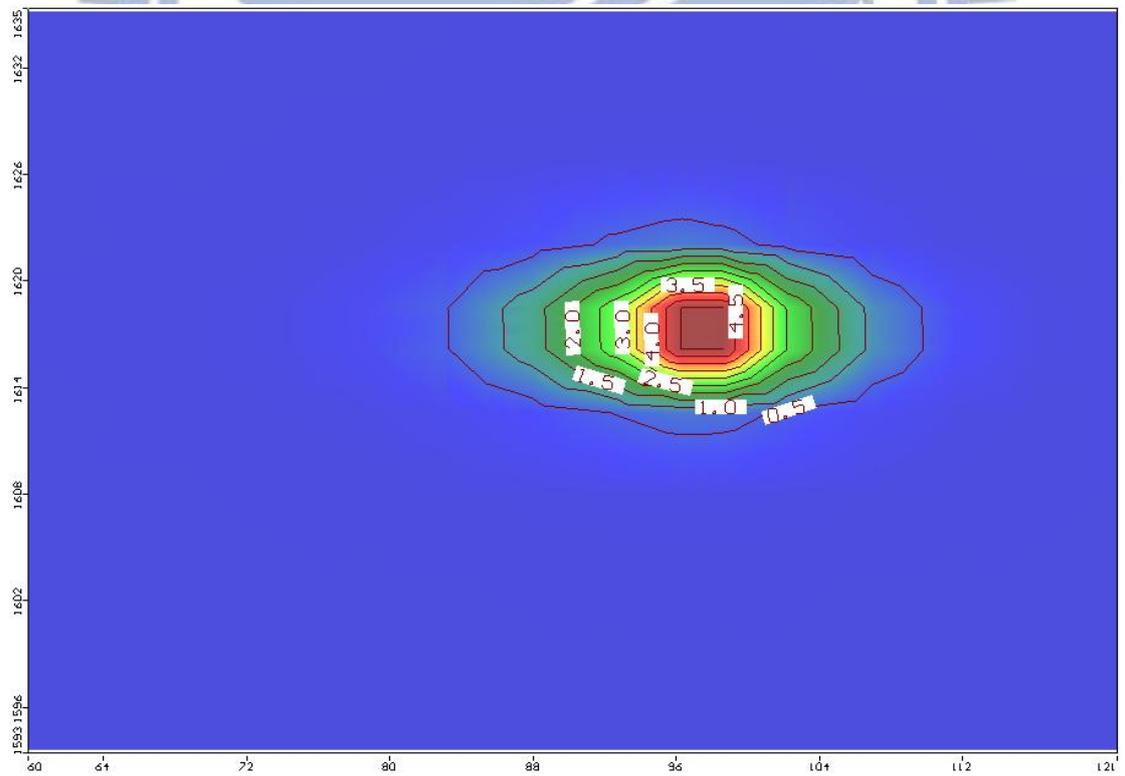


圖 4.3.2-2 M-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

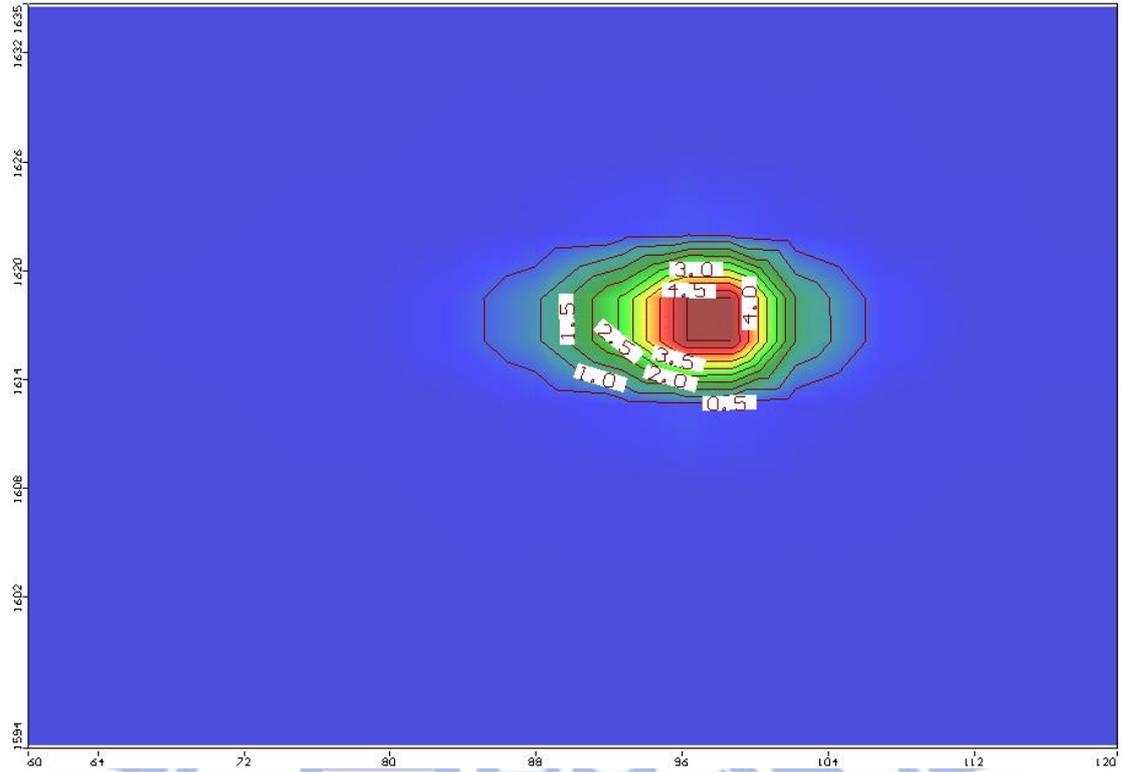


圖 4.3.2-3 M-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

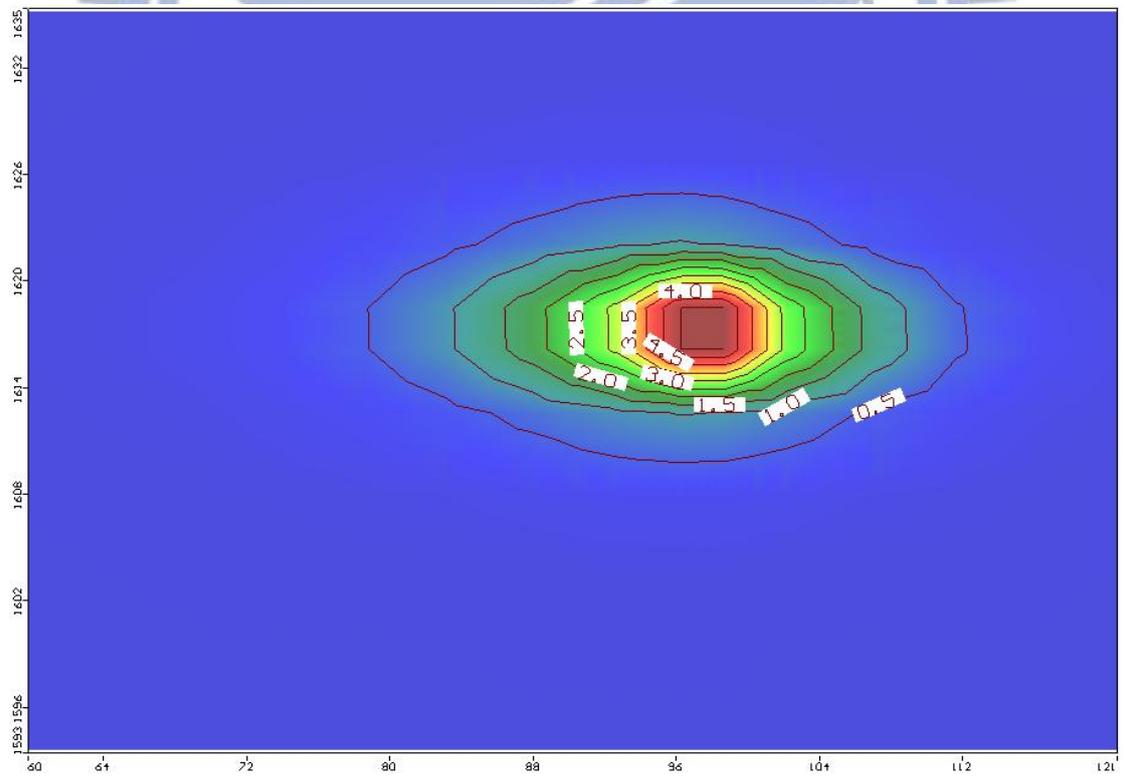


圖 4.3.2-4 M-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

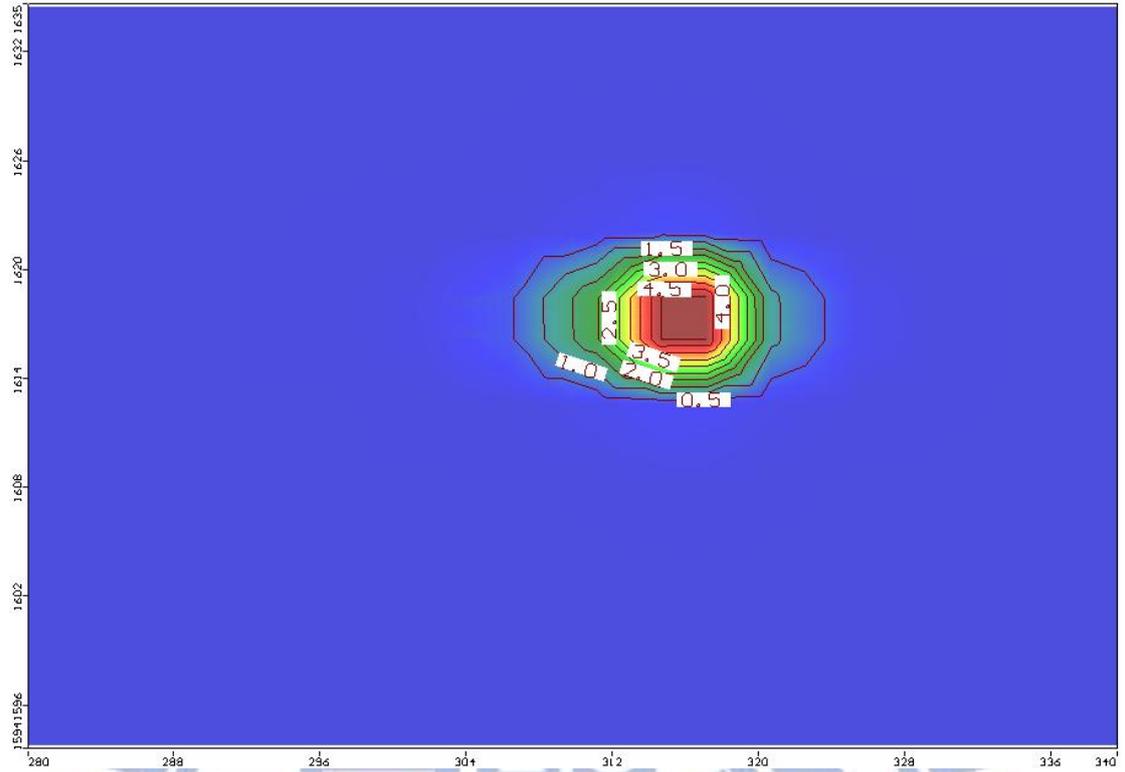


圖 4.3.2-5 M-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

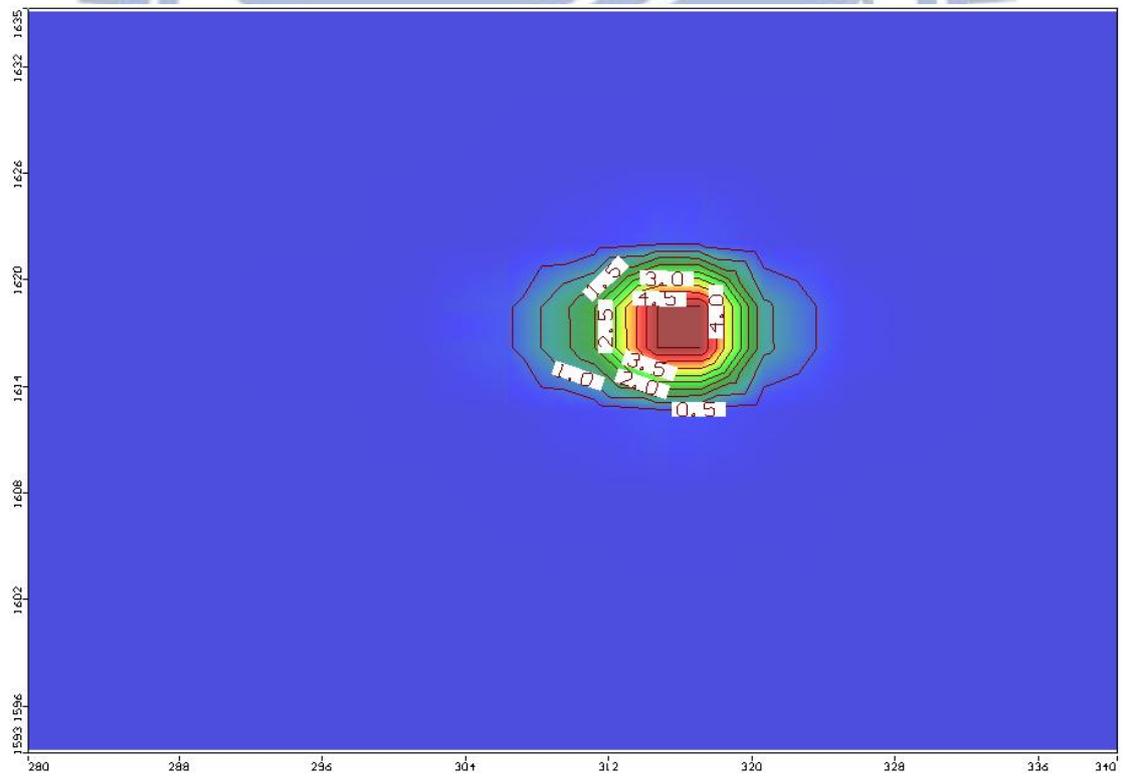


圖 4.3.2-6 M-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

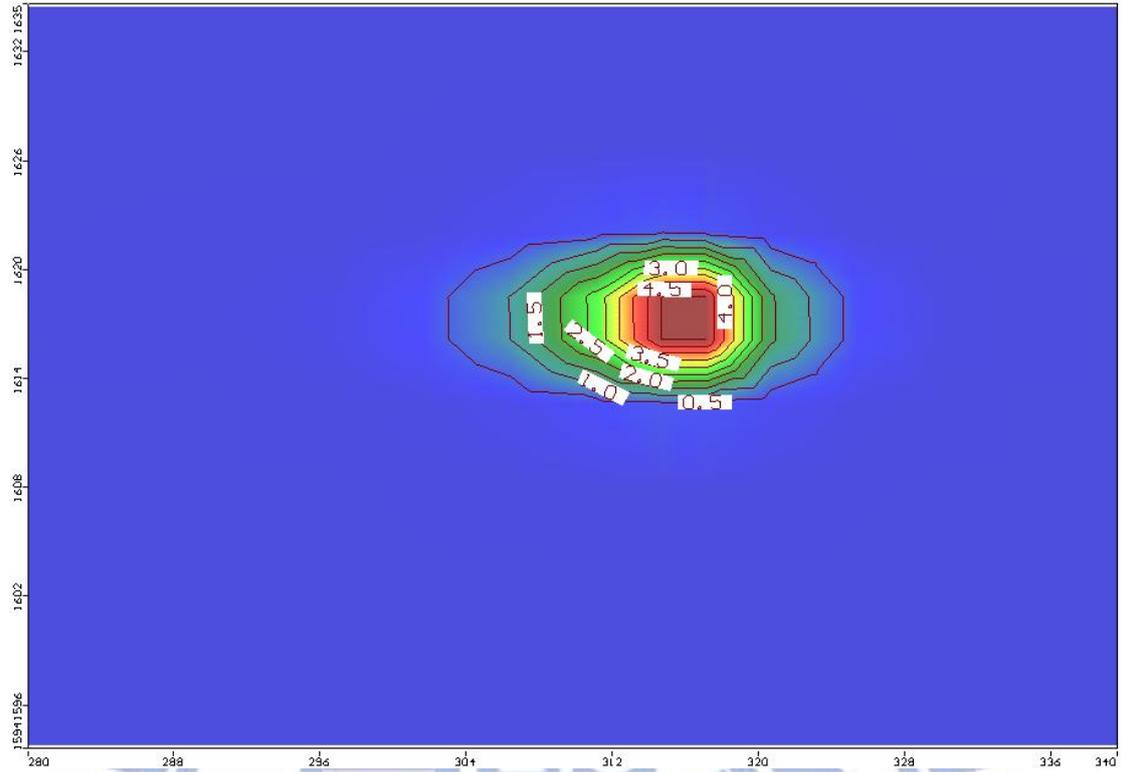


圖 4.3.2-7 M-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

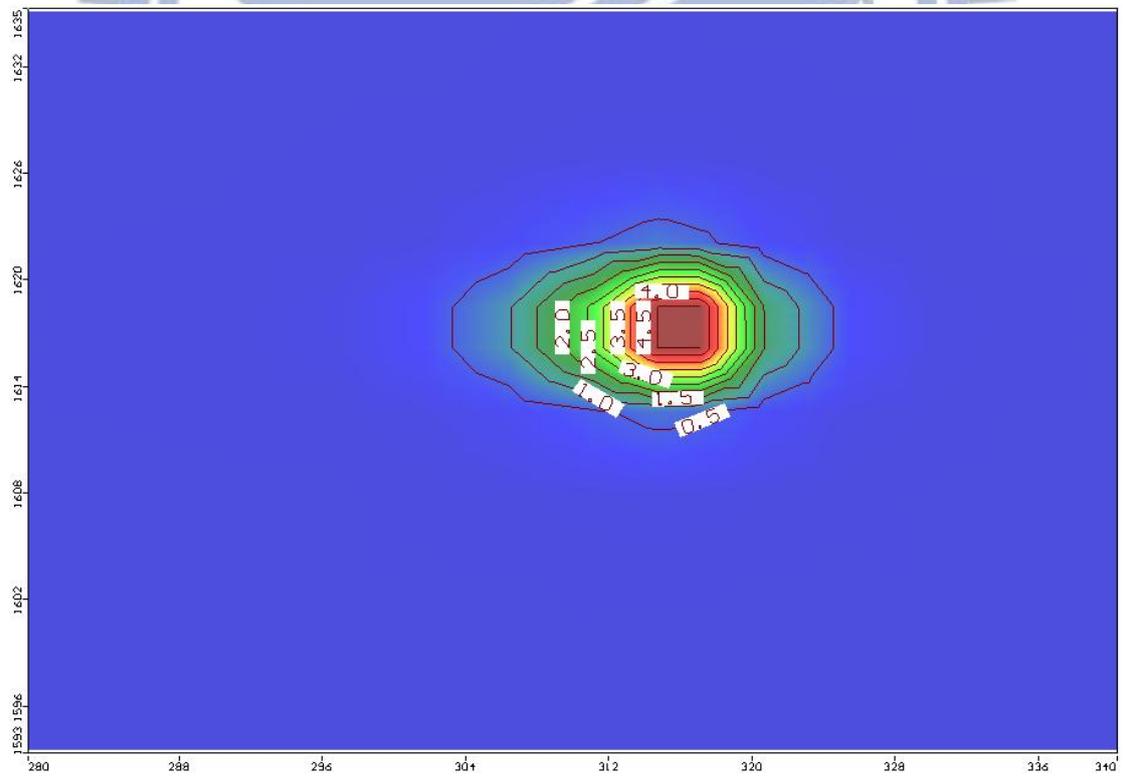


圖 4.3.2-8 M-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

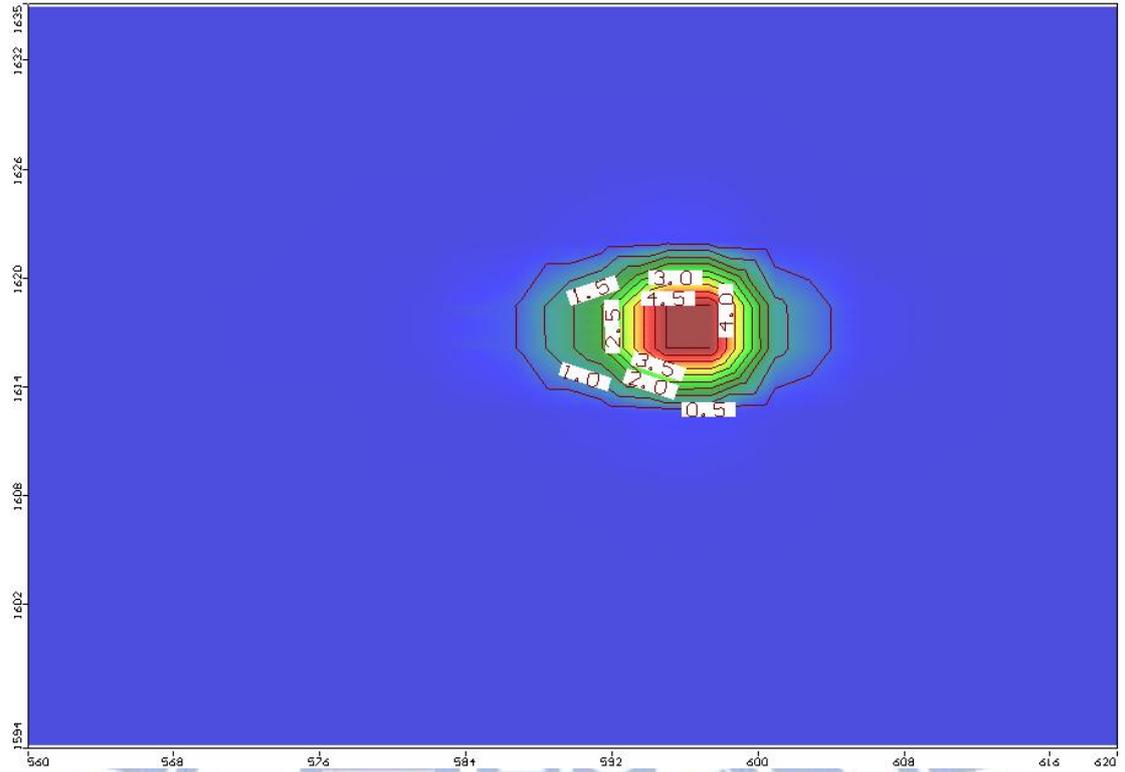


圖 4.3.2-9 M-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

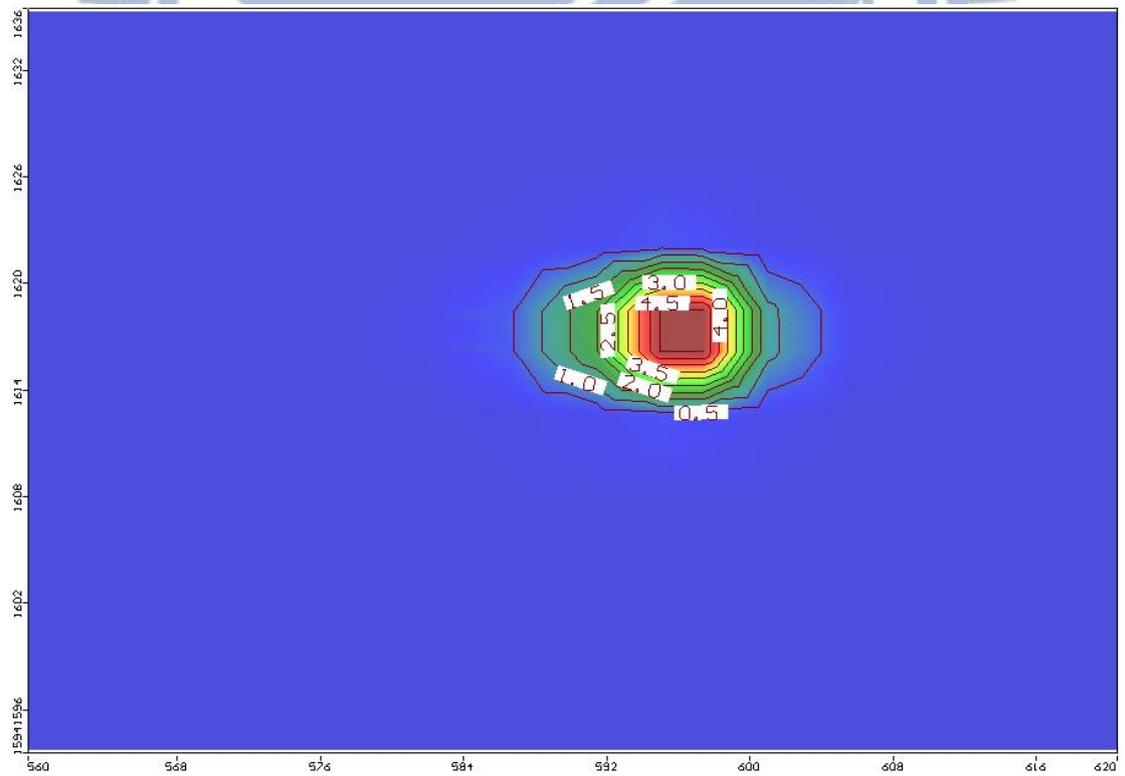


圖 4.3.2-10 M-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

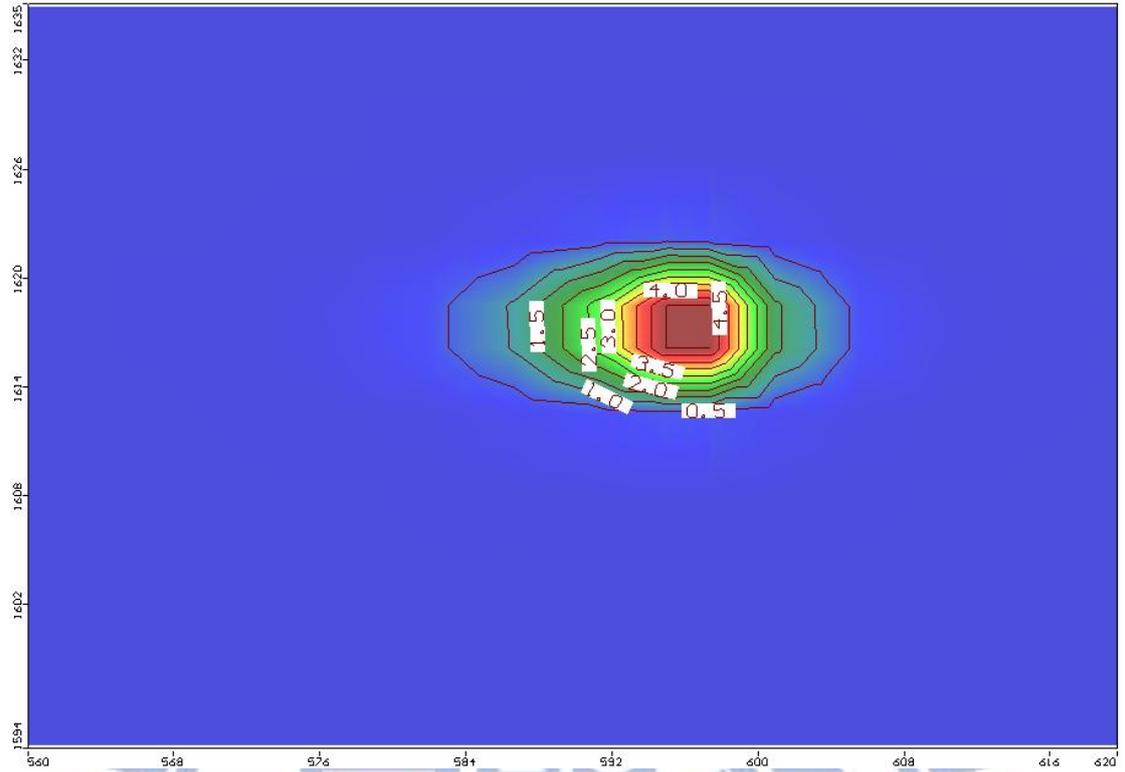


圖 4.3.2-11 M-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

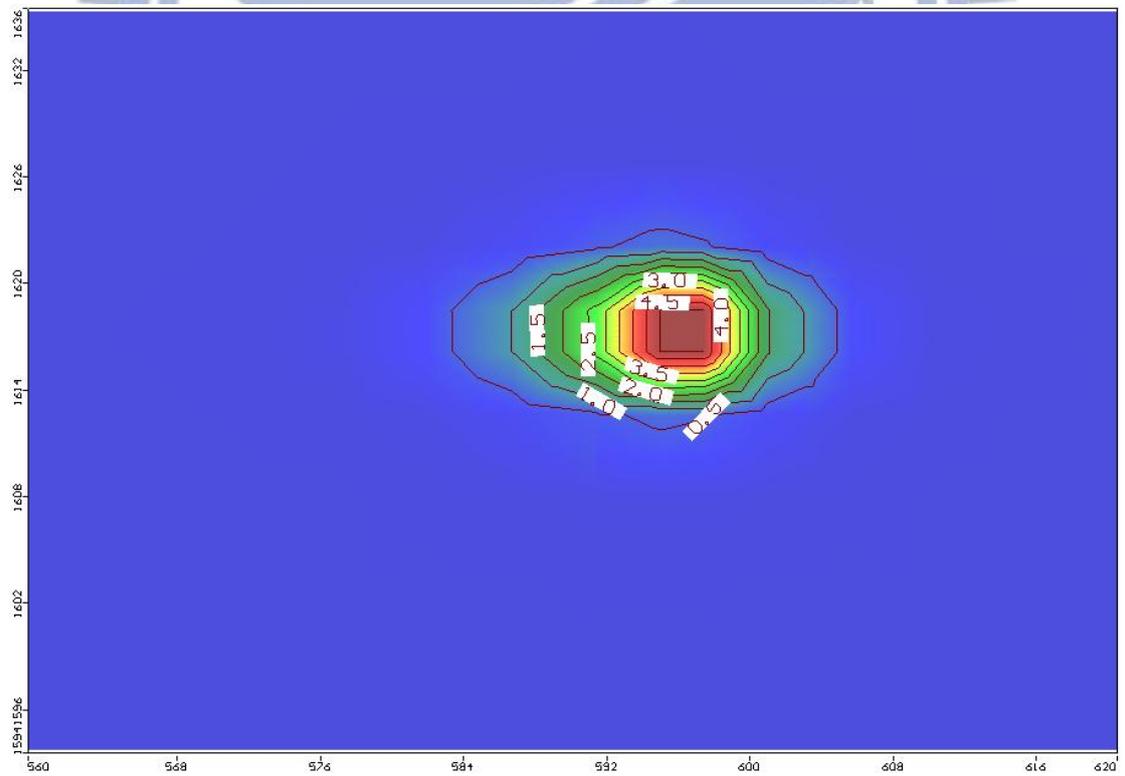


圖 4.3.2-12 M-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.3.3 潮汐對於(C-1)、(C-2)、(C-3)影響比較

(C-1)受潮汐影響時污染團的長度、寬度都比無潮汐影響時大，這是因為離海岸線非常靠近的緣故，當潮汐影響效果顯著，地下水位的上下變動的幅度也會較大，因此污染團長度在潮汐影響下被拉長了。因為導水度的降低，讓離海岸線有一定距離的(C-2)、(C-3)其污染團長度、寬度在有無潮汐時幾乎相同。

在(C-1)、(C-2)、(C-3)的位置中，潮汐對於污染團的深度幾乎已不影響。半年和一年的擴散趨勢和前述的E和M位置都相同，污染團之擴散趨勢在半年內已趨於穩定。

表 4.3.3-1 污染團面積之比較結果(一年)

(C-1)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	11.2	3.5	8.8	3.2	2.51
有潮汐	0°	17.4	6.3	9	2.76	1.43
(C-2)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	11.5	3.5	8.8	3.29	2.51
有潮汐	0°	12	3.5	8.8	3.43	2.51
(C-3)	污染團長軸與 x 軸之夾角	污染團長度(x 軸)(m)	污染團寬度(y 軸)(m)	污染團深度(m)	長寬比	深寬比
無潮汐	0°	12	3.4	6.75	3.43	2
有潮汐	0°	12	3.4	6.75	3.43	2

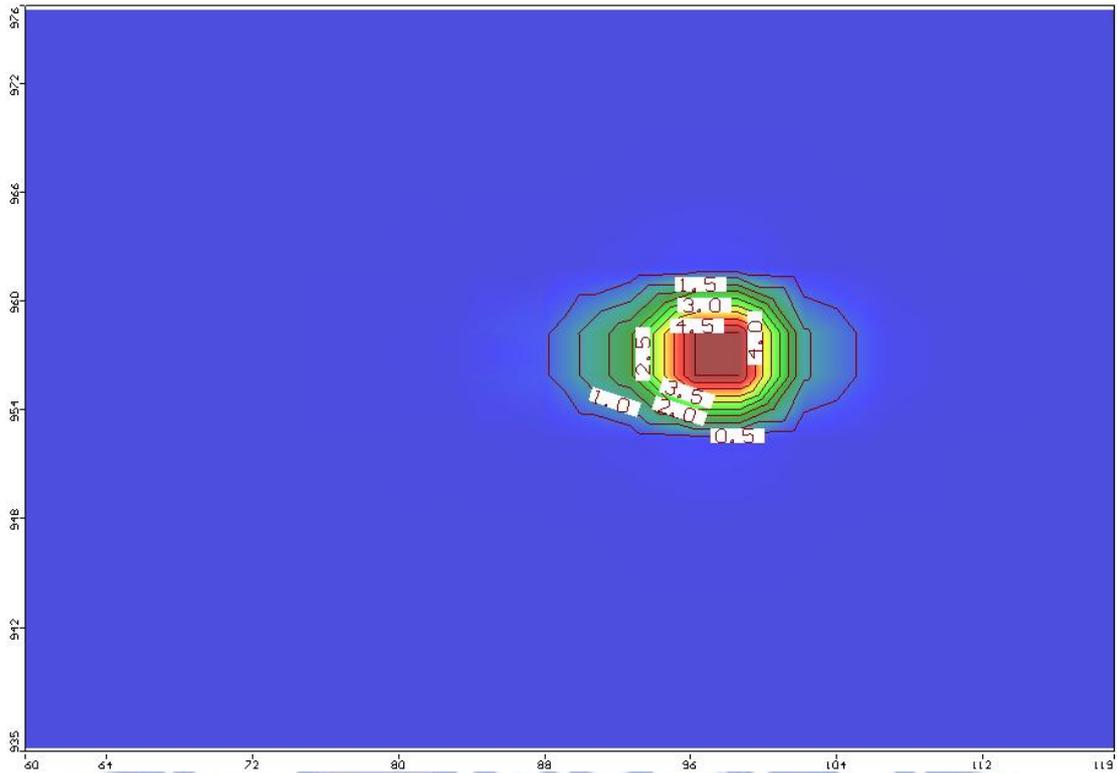


圖 4.3.3-1 C-1 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

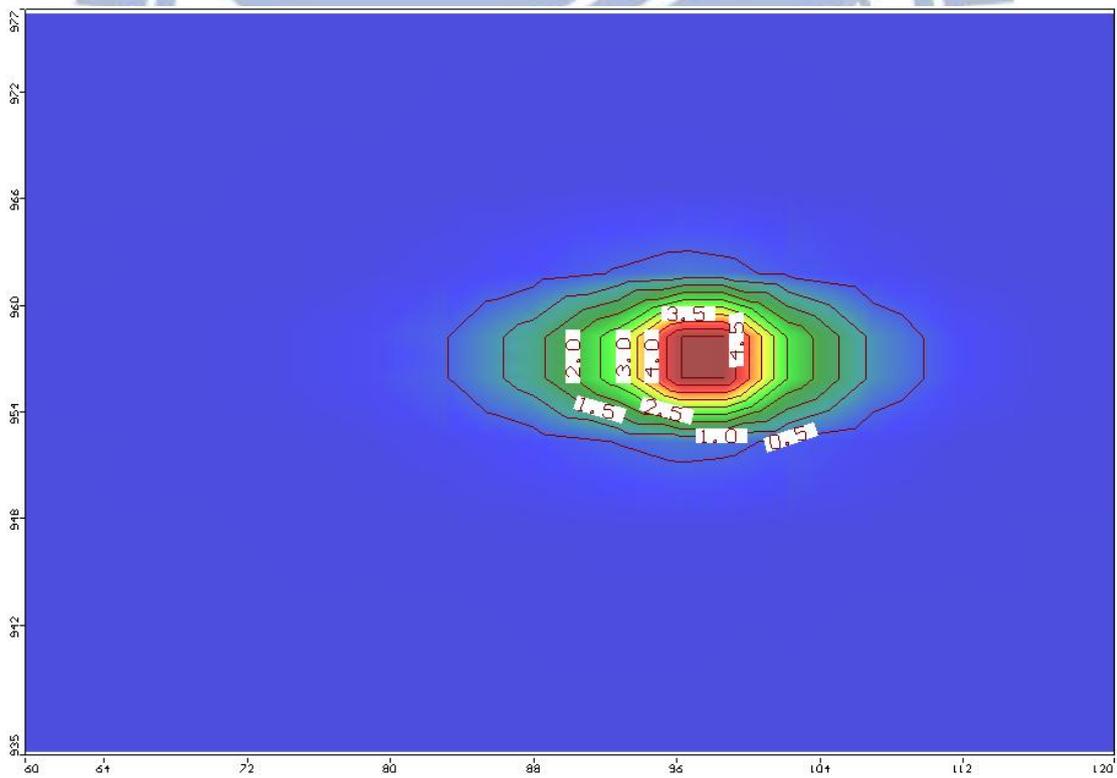


圖 4.3.3-2 C-1 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

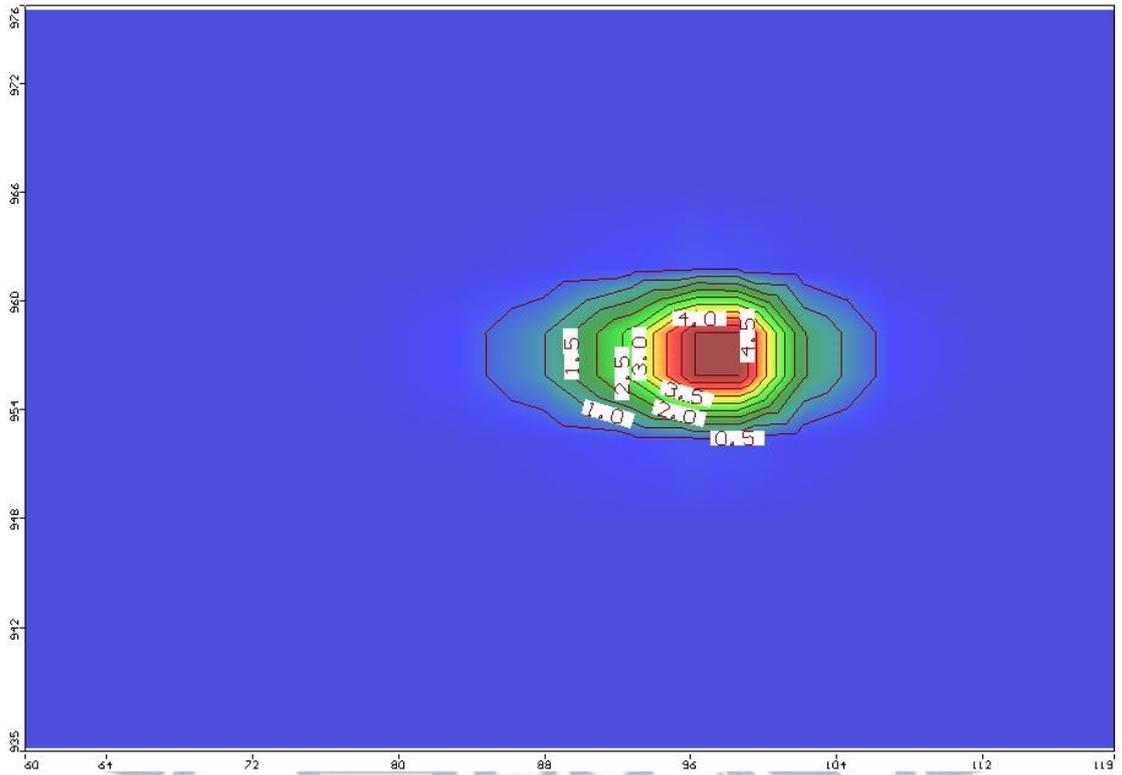


圖 4.3.3-3 C-1 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

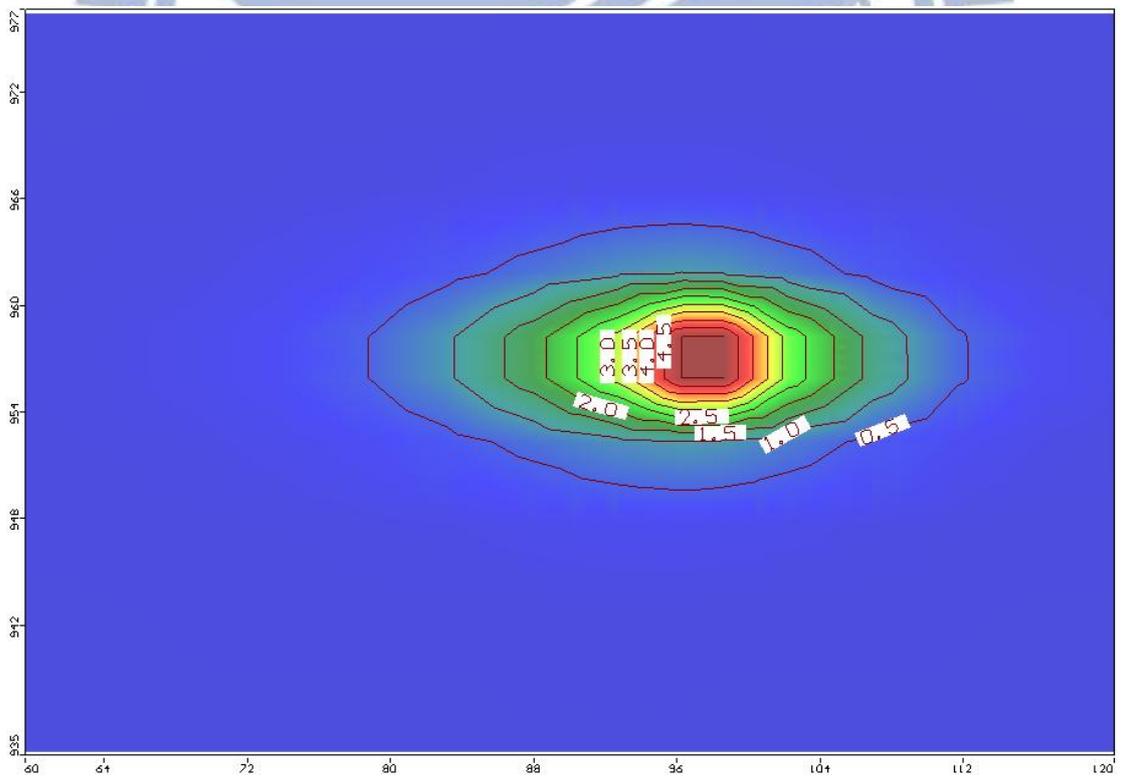


圖 4.3.3-4 C-1 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

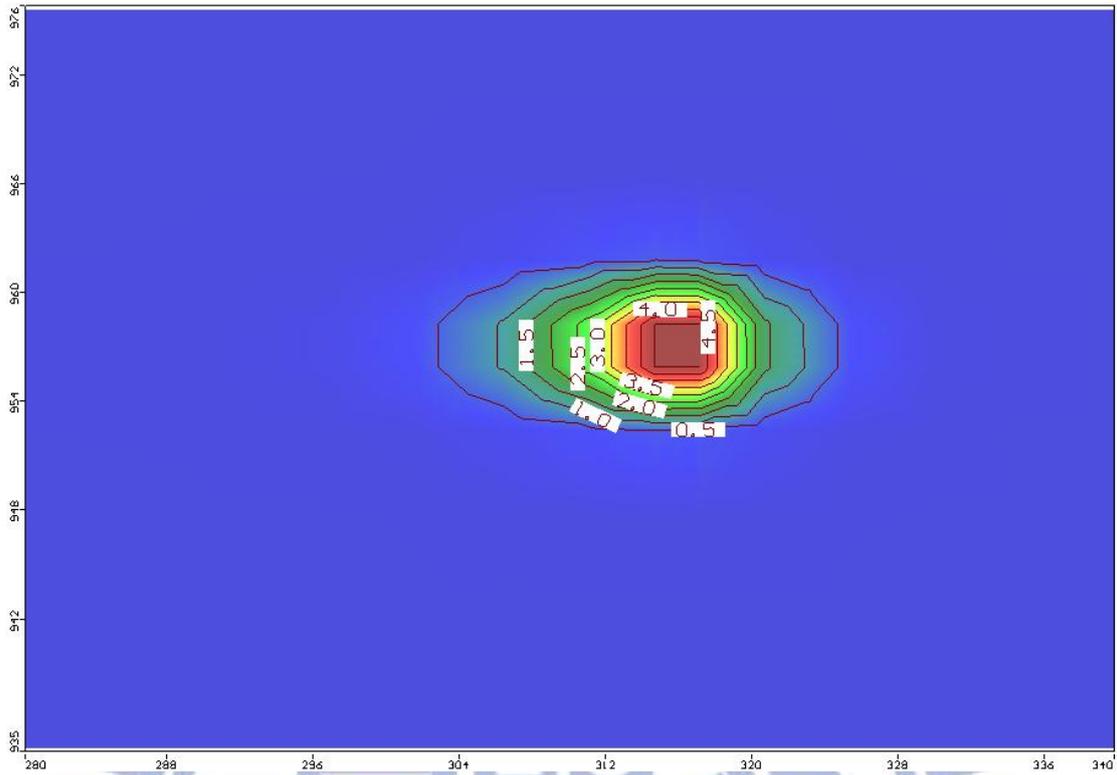


圖 4.3.3-5 C-2 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

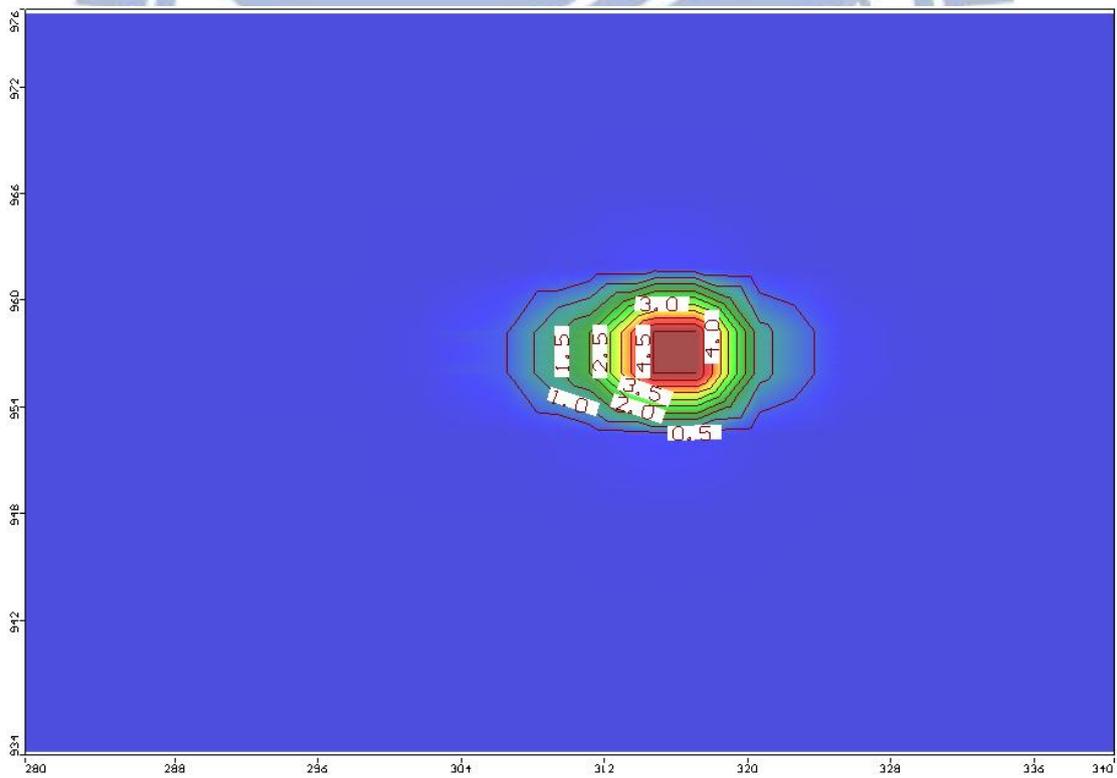


圖 4.3.3-6 C-2 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

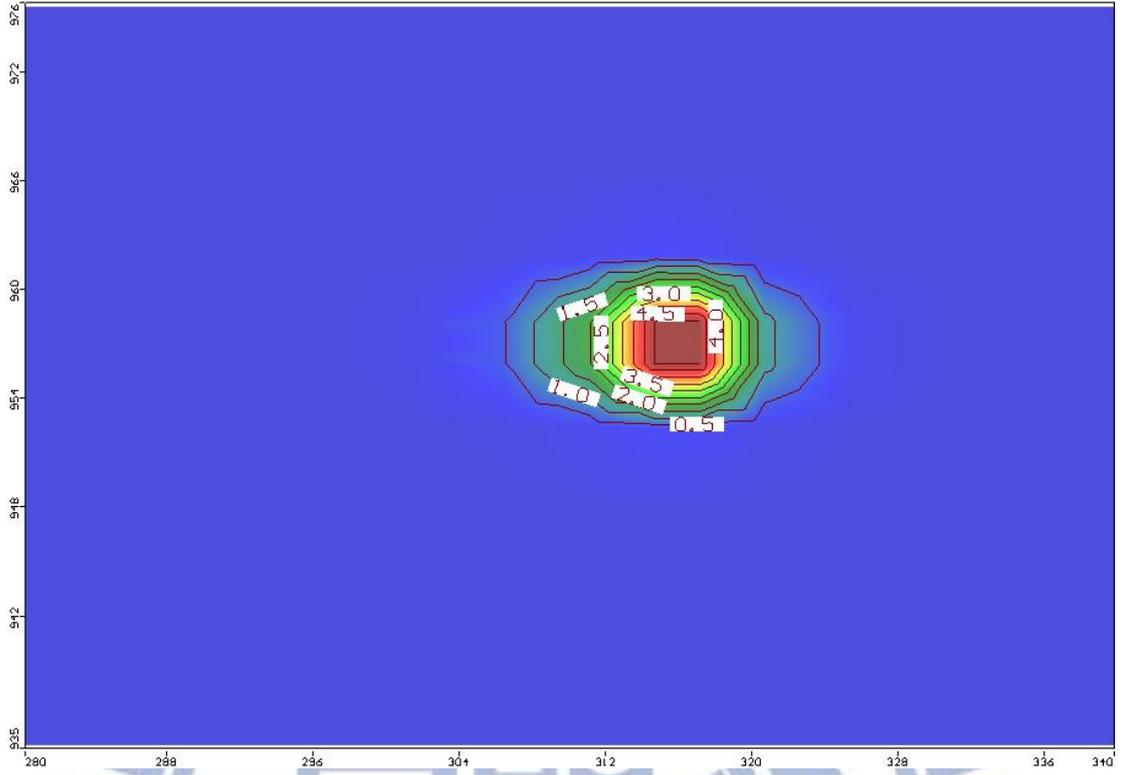


圖 4.3.3-7 C-2 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

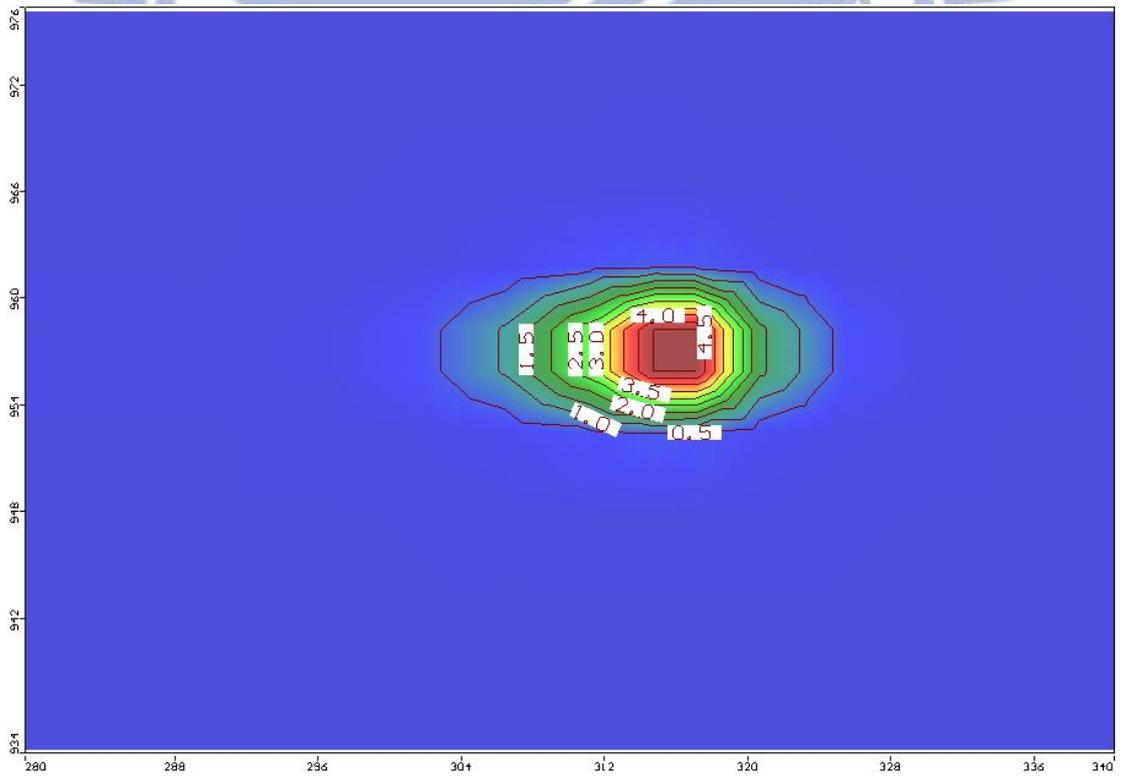


圖 4.3.3-8 C-2 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

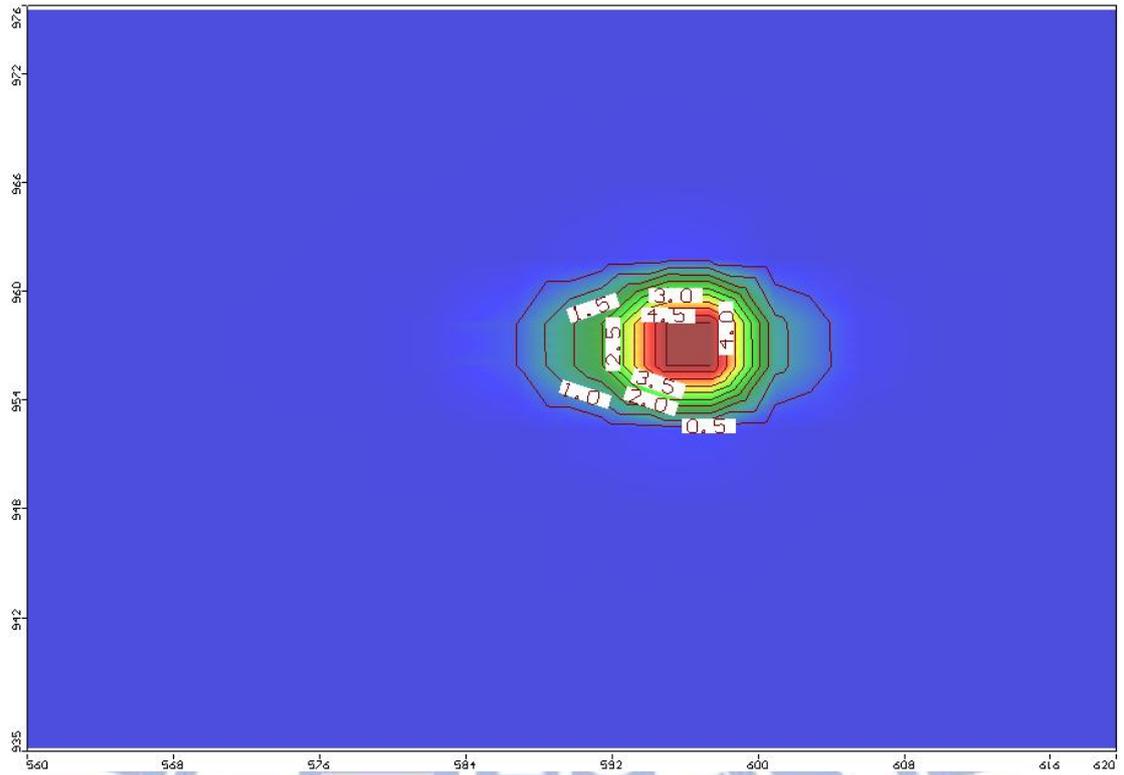


圖 4.3.3-9 C-3 位置污染物滲漏半年無潮汐作用污染團

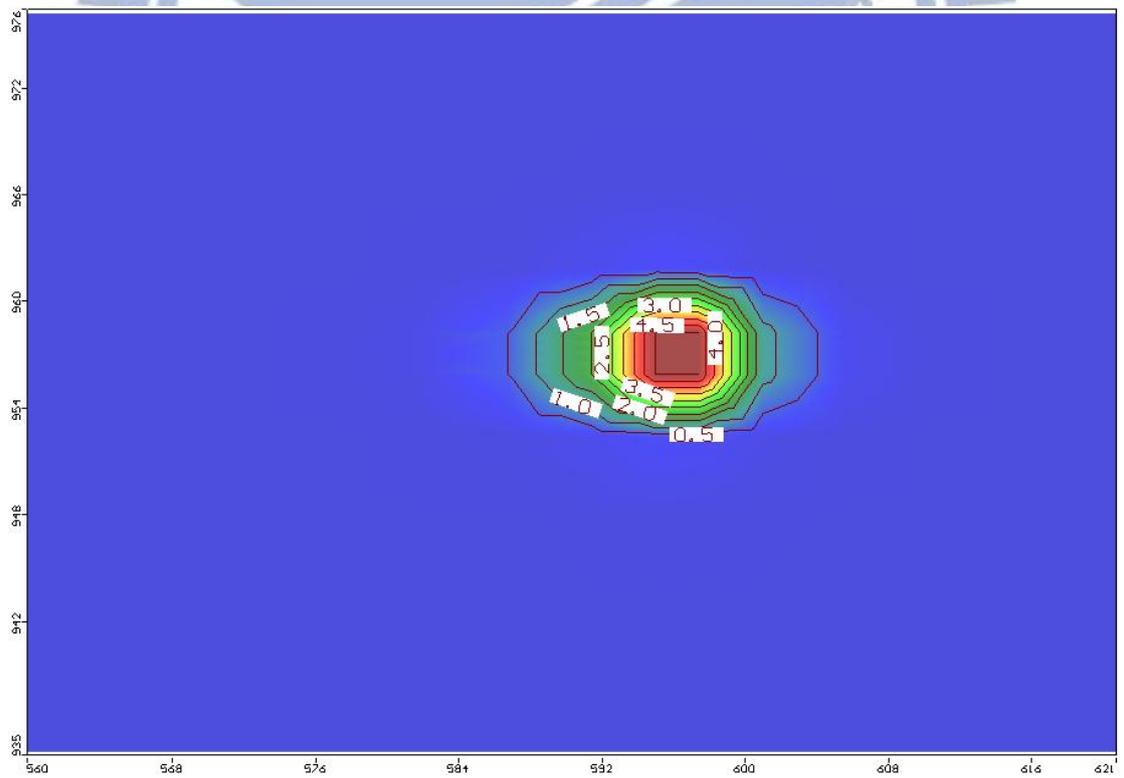


圖 4.3.3-10 C-3 位置污染物滲漏半年潮汐作用污染團

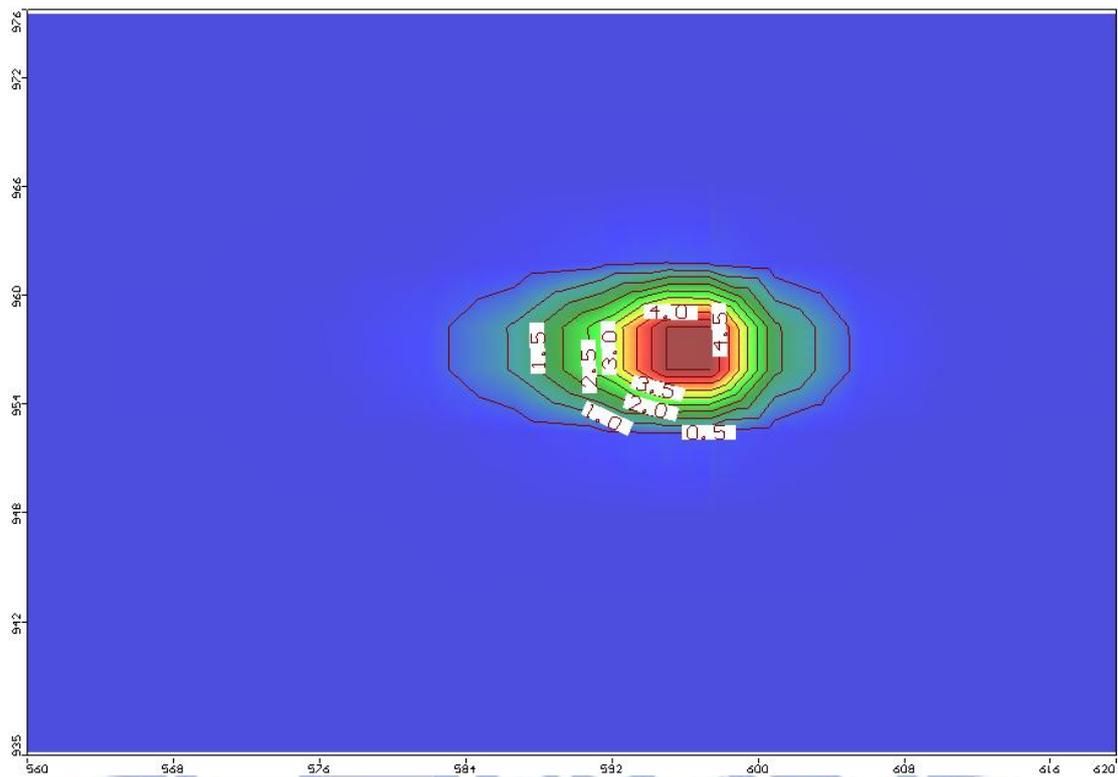


圖 4.3.3-11 C-3 位置污染物滲漏一年無潮汐作用污染團

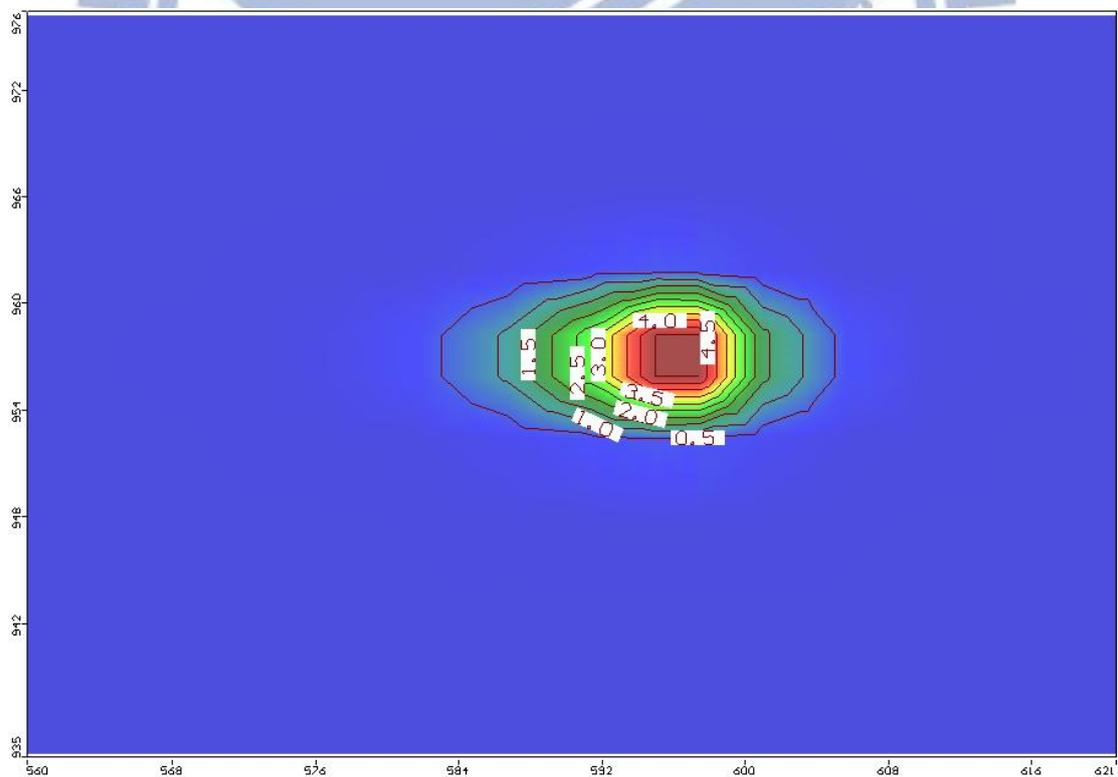


圖 4.3.3-12 C-3 位置污染物滲漏一年潮汐作用污染團

4.4 綜合討論

污染團的長度上 Case 1 和 Case 3 的情況相同，(E-1)、(M-1)、(C-1)污染團長度受到潮汐影響時相較於無潮汐時大，其中以(E-1)有無潮汐時其污染團長度之相差值(1 m, 2 m)相較於(M-1)、(C-1)污染團長度之相差值(9 m, 6 m)、(8.2 m, 6.2 m)小；而在 Case 2 中這些狀況完全不同，污染團長度受潮汐影響時較無潮汐時小，而在(E-1)中有無潮汐時污染團長度之相差值(6 m)相較於(M-1)、(C-1)有無潮汐時污染團長度之相差值(3.5 m, 3 m)大；可以推論出當導水度增加，流速加快，讓 Case 2 中海岸線的潮汐影響減弱而呈現出的模擬結果。

以污染團的寬度來觀察，能夠發現到三種情況下的寬度變化趨勢相同，Case 1、Case 2、Case 3 在(E-1)位置上有無潮汐影響時污染團寬度之相差值為(6 m, 5.5 m, 6.2 m)，而在(M-1)和(C-1)裡位置上有無潮汐影響時污染團寬度之相差值為(3.52 m, 2.5 m, 3 m)和(3.17 m, 3 m, 2.8 m)，由上述可以發現到 Case 1、Case 2、Case 3 污染團寬度之相差值都相差不多，以此推論出導水度的增加對於污染團的寬度影響不大，而再(E-1)位置中因為較靠近海岸線和河川面，雙重的潮汐作用讓污染團的寬度增大。

在比較污染團長度與 x 軸之夾角時可以發現，導水度越大時角度越小(Case 2, 3°)，而導水度越小時角度越大(Case 3, 52°)，這可能是因為導水度的增加，讓水流速加大，而海岸線的變化幅度相較於河川面大，因此水流速在 x 軸方向的增加量相較 y 軸方向的增加量大。

由表 4.4-1 可以觀察到，潮汐對於污染物的深度影響不大，但在其中的 Case 2 中(C-1)和(M-1)的位置上，污染團深度有潮汐影響時深度異常的大，這是因為程式中網格切割的影響以及在下一層的分層中滲透性較高導致污染物向下的速度加快。

將模擬結果可以發現到沿岸區域中的水流方向會因為潮汐的作用影響到內陸的地下水水流方向，如圖 4.4-1 所示，在高潮位的情況中，地下水梯度是由海岸線往內陸側流，因此沿岸地下水水流方向逆轉的狀況，這樣的模擬結果使得文獻回顧中的圖 2-3 和圖 2-4 單井的異常流向有了很好的對照以及解釋。

對地下水監測井的設置來說，考慮到土基會的預警監測井網概念，在設置監測井情況中以地勢的走向以及蒐集到的水文地質、流向來判斷水流方向時，當污染團位置靠近排水渠道而產生轉向的效果，此時所量測出的結果將會有很大的疑慮；因此當污染源靠近排水渠道的情形時，應該要去考量到轉向情況的發生，由導水度的大小去考量到轉向的角度，導水度越小污染團發生轉向的效果越顯著，以此來進行評估監測井的設置位置。

在研究中所採用的場址位置位於台中市梧棲區，由經濟部水利署「易淹水地區水患治理計畫」中發現在此地區長期有淹水的問題，每年平均地下水幾乎都在地表以上(表 4.4-2)，因此在這樣現象裡對於本研究沒有去考慮到非飽和層的情況，其相對的影響減小了許多。

表 4.4-1 污染團面積之比較結果(一年)

Case 1	污染團長 軸與 x 軸 之夾角	污染團長 度(x 軸) (m)	污染團寬 度(y 軸) (m)	污染團深 度(m)	長寬比	深寬比
(E-1)無潮汐	0°	24	6	8.7	4	1.45
(E-1)有潮汐	36°	25	12	9.3	2.7	0.775
(M-1)無潮汐	0°	23.3	6.48	8.87	3.6	1.37
(M-1)有潮汐	0°	32.4	10	9.48	3	1.13
(C-1)無潮汐	0°	24.5	6.33	8.8	3.87	1.39
(C-1)有潮汐	0°	32.7	9.5	9.42	3.44	1
Case 2	污染團長 軸與 x 軸 之夾角	污染團長 度(x 軸) (m)	污染團寬 度(y 軸) (m)	污染團深 度(m)	長寬比	深寬比
(E-1)無潮汐	0°	73.3	10.7	9.25	7	1.45
(E-1)有潮汐	3°	67.3	16.2	19.15	4.15	1.18
(M-1)無潮汐	0°	73.7	10.5	9.25	7.02	0.9
(M-1)有潮汐	0°	70.2	13	21.25	5.4	1.6
(C-1)無潮汐	0°	74	10	9.35	8	1
(C-1)有潮汐	0°	71	13	21	5	1.5
Case 3	污染團長 軸與 x 軸 之夾角	污染團長 度(x 軸) (m)	污染團寬 度(y 軸) (m)	污染團深 度(m)	長寬比	深寬比
(E-1)無潮汐	0°	11	3.5	9	3.14	2.57
(E-1)有潮汐	52°	13	9.7	9	1.34	0.93
(M-1)無潮汐	0°	11.08	3.5	9	3.17	2.57
(M-1)有潮汐	0°	17.18	6.4	9	2.68	1.41
(C-1)無潮汐	0°	11.2	3.5	8.8	3.2	2.51
(C-1)有潮汐	0°	17.4	6.3	9	2.76	1.43

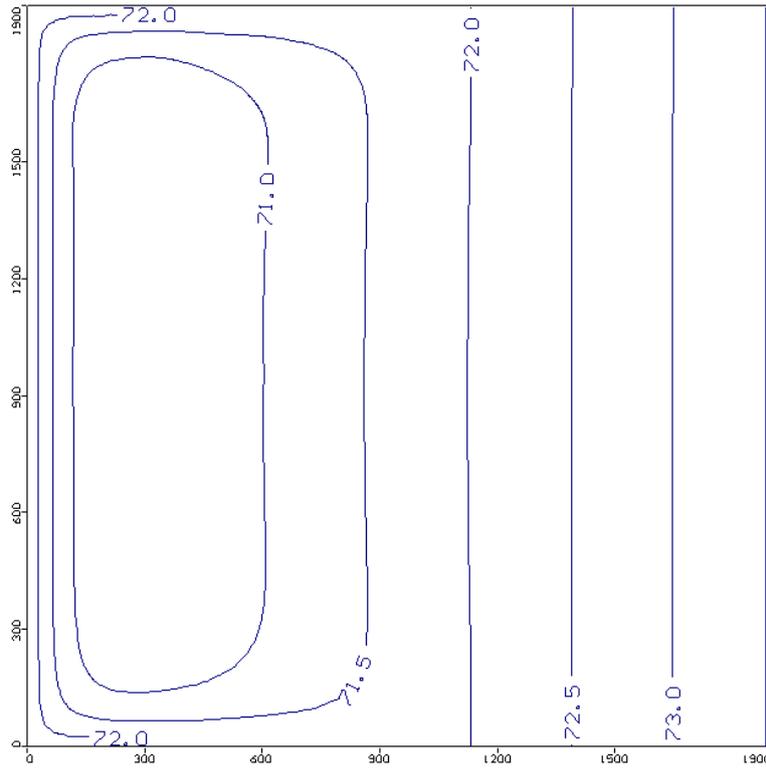


圖 4.4-1 高潮位時之等水位線

表 4.4-2 台中港特定區(中棲路以南)地下水調查統計表(單位：公尺)

\年度 站別\	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	歷年平均
梧棲	1.44	1.40	-	-0.40	0.01	0.08	-0.95	-1.62	-0.36	-0.15	-0.36	-0.31	-0.11

第五章 結果與建議

5.1 結論

當污染源離海岸線較近時，因為海岸線潮汐變動幅度較河岸面潮汐變動大，因此污染物受潮汐影響時之污染團長度較無潮汐大；但是當導水度增加時，因為流速的增加，讓海岸線的潮汐效果減弱，最後呈現出受潮汐影響時之污染團長度較無潮汐小。

在潮汐對於污染團的寬度而言，當污染源較靠近河川面，受潮汐作用時會比無潮汐時大，主要是因為有潮汐作用時河川面(上端)有設定變動水頭的緣故，使得流場能夠往河川面移動，因此受潮汐影響時之寬度都較無潮汐時大；而另一個因素為假設初始延散度時，設定數據為 x 方向，並非為水流方向，這樣的情境和真實情況是不同的，因為程式中的水流方向發生轉向，這樣的假設中，也因為側向的機械延散增加，使得污染團的寬度變大了，這也是污染團寬度變大的影響因素之一。但是當污染源離河川面較遠時，受潮汐作用時寬度比無潮汐時大，污染團的方向沒有發生轉向(污染團長軸和 x 軸夾角為零)，因此和 E 位置相比較時能夠發現 Modflow 的延散度設定上並不影響寬度，主要是因為受到流速的影響，同時也因為距離排水路徑近，受到排水路徑水位變化的影響。導水度的增加或減少對於污染團有無潮汐影響時之寬度影響不大。

污染團的深度上在有潮汐影響時較無潮汐時大，但只有在靠近海岸面時會有顯著的差別，當污染團離海岸線有一定的距離時潮汐的影響並不明顯。導水度增加對污染團深度會加大，但對潮汐效果並不影響。

在污染團長軸與 x 軸之夾角關係上會因為導水度的增加，讓水流速加大，而海岸線的變化幅度相較於河川面大，因此水流速在 x 軸方向的增加量相較 y 軸方向的增加量大，此結果會導致導水度越大污染團發生轉向的效果越不明顯。

5.2 建議

1. 污染物的性質在本研究中沒有去設定某一特定物質，建議日後從事相關研究時可以去設定特定的污染物質，污染物可能會因為受到潮汐的日夜影響、氧化還原等等會有不同的變化成果。
2. 在沿岸區域的地質條件中可以去考量到坡度高低的影響，在此研究中因為場址地形低平的原因所以不加以考慮，但如果能夠去考量坡度對於潮汐影響地下水位的關係做更深入的探討，那將可以增加參考的價值。
3. 本研究所使用的軟體為 Modflow 對於污染物質只會考慮到飽和狀態下的情況，並沒有分析到非飽和層的路徑，這樣的影響將會讓模擬過程中放大潮汐的效應，讓模擬的結果無法更貼近真實的情境，如果可以將非飽和層納入考量，對於真實情境將能更完整的呈現出來。



參考文獻

- 台中港務局全球資訊網，2011，「港灣海氣地象觀測資料年報(台中港)」。
- 行政院環境保護署，2011，「土壤及地下水污染整治法」。
- 行政院環境保護署，2013，「全國高污染潛勢工業區地下水質預警監測井網規劃建置計畫」(第二期)
- 吳龍華、莊水英、李凌、楊建貴，2009，「潮汐對近岸地下水水位波動影響的試驗研究」，水利學報，第三十七卷第二期，228-231 頁。
- 林宛蓉、吳銘志，1998，「濁水溪沖積扇南緣地下水水位變化影響因子之關聯性研究」，國立成功大學，碩士論文。
- 邱啟敏、許泰文、張國棟，2004，「台灣四周沿岸潮汐特性探討及颱風暴潮迴歸分析之研究」，國立成功大學，碩士論文。
- 施清芳，2012，「建立核能電廠廠區地下水傳輸基準版概念模式」，台灣電力股份有限公司。
- 范光龍，2008，「海洋環境概論：談台灣沿海環境」，台灣西書有限公司，二版。
- 徐筱婷、謝平城，2013，「潮汐波動與降雨對非侷限傾斜含水層的影響」，水土保持學報，第四十五卷第三期，693-702 頁。
- 莊文傑、江中權，2000，「台灣四周海域海流數值模擬研究」，交通部運輸研究所港灣技術研究中心，共 257 頁。
- 陳娟、莊水英，2006，「潮汐對地下水波動影響的數值模擬」，水利學報，第三十七卷第五期，630-633 頁。
- 經濟部水利署，2011，「易淹水地區水患治理計畫」。
- 經濟部水利署，2012，「中港加工出口區土壤及地下水品質監測暨地下環境特徵概念模型建立計畫」。
- 廖建明、莊文傑、許泰文，2012，「台灣重要商港海域海流模擬」，交通部運輸研究所港研中心專題研究計畫，22-34 頁。

- Ashtiani, B. A., Volker, R.E., DA Lockington, 2002, "Contaminant transport in aquifers influenced by tide", Sharif University of Technology, PhD.
- Ashtiani, B. A., 2007, "MODSharp: Regional-scale numerical model for quantifying groundwater flux and contaminant discharge into the coastal zone", Environmental Modelling & Software, 22, pp. 1307-1315.
- Elfeki, M. M., 2006, "Simulation of solute transport under oscillating groundwater flow in homogeneous aquifer", Journal of Hydraulic Research, Vol, 00, No. 0, pp. 1-72.
- Kumar, P., Tsujimura, M., Nakano, T., Minoru, T., 2011, "The effect of tidal fluctuation on ground water quality in coastal aquifer of Saijo plain", Desalination, pp. 1-10.
- Licata, I. L., 2008, "Effect of tidal fluctuations on transient dispersion of simulated contaminant concentrations in a coastal aquifer", Salt Water Intrusion Meeting, pp. 132-135.
- Pecchioli, J.A., Ding, Y., 2009, "Contaminant transfer in coastal aquifer", New Jersey Institute of Technology, Ph.D.
- Robinson, C., Brovelli, A., Barry, D. A., Li, L., 2009, "Tidal influence on BTEX biodegradation in sandy coastal aquifers", Advances in Water Resources, 32, pp. 16-28.
- Smith, T. E., 1994, "Analysis of fluctuation effects on a confined and unconfined aquifer", Northeastern University, Master's thesis.
- Yim, C. S., Mohsen, M. F. N., 1992, "Simulation of tidal effects on contaminant transport in porous media", Ground Water, Vol. 30, No. 1, pp. 78-86.
- Zhang, Q., Volker, R.E., Lockington, D. A., 2002, "Experimental investigation of contaminant transport in coastal groundwater", Advances in Environmental Research, 6, pp. 229-237.

參考網址

行政院環境保護署土壤及地下水整治網，場址列管情形。

<http://sgw.epa.gov.tw/public/0401.asp>

水利署，地理資訊倉儲中心，查詢地下水位資料。

<http://gic.wra.gov.tw/gic/Water/Space/Main.aspx>

行政院環境保護署土壤及地下水整治網，全國工業區土壤及地下水品質管理計畫

<http://sgw.epa.gov.tw/public/0507.aspx>

