



東海大學

環境科學與工程學系

碩士論文

建立以細胞自動機為基礎的空氣擴散模型

Establishing Air Pollution Diffusion Model

Based on Cellular Automata

研究生：陳欣宜

指導教授：陳鶴文 博士

陳維燁 博士

中華民國 107 年 7 月

東海大學碩士班研究生
論文指導教授推薦書

環境科學與工程學系陳欣宜君所提之論文

題目：建立以細胞自動機為基礎的空氣擴散模型

Establishing Air Pollution Diffusion Model Based on Cellular Automata

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授：陳德文 傅北學 (簽章)

107年07月20日

東海大學環境科學系碩士班

論文口試委員審定書

環境科學與工程學系碩士班陳欣宜君所提之論文

題目：建立以細胞自動機為基礎的空氣擴散模型

Establishing Air Pollution Diffusion Model Based on Cellular Automata

經本委員會審議，認為符合碩士資格標準。

論文口試委員召集人 李瑞芳 (簽章)

委員

林志強

高文麟

陳鶴文

陳維祥

中華民國 107 年 07 月 20 日

誌謝

兩年的研究生涯，最感謝我的指導教授陳鶴文老師與陳維燁老師，在因論文而徬徨、迷惘的時候，能夠為我引導方向，也因為老師們懇切耐心的教導，使學生能夠在各個方面皆有所成長，才使得論文能夠順利完成，在此謹敬上最高謝意與感激。

同時也感謝口試委員商文麟老師、林宏嶽老師與余瑞芳老師在百忙之中抽空指導並提供許多寶貴的意見，使我的論文更加的完備，在此也致上崇高的敬意。

研究期間要感謝研究所的同學們，以及研究室的學長姐，有你們一路相伴，足以克服重重關卡，在學習的路上不必孤軍奮戰，讓研究生涯更加美好充實。

最後感謝我的家人，在你們的支持與付出下，讓能無後顧之憂的完成學業，謹於此將論文及完成學業的喜悅獻給你們！

欣宜

摘要

近年來空氣品質日益受到重視，不良的空氣品質不僅會對人體健康造成影響，對生態環境也會造成嚴重的破壞。台灣因地狹人稠加上工廠林立，工廠設置的位置往往就在人口密集的住家附近，而與生活息息相關的空氣污染也逐漸受到民眾關注。空氣污染物在空氣中的擴散具有時間與空間的動態變化，而污染源排放後的污染物走向，可以通過電腦的模擬來描述。

本研究利用細胞自動機理論來建立空氣擴散模型，從微觀到整個系統，透過由下而上的方式了解空氣污染物在空間中移動的趨勢及變化，並結合機率的方式模擬風場變化，最後利用情境模擬，探討不同排放行為、污染源數量、位置對污染物的濃度變化及分布。模擬結果顯示，不同污染源所排放的污染物可能會受到距離及風場的影響而重疊，使重疊部分濃度較周圍高，不同的排放行為影響的污染時間及範圍也會有所不同。

關鍵字：細胞自動機、空氣污染、擴散模擬

ABSTRACT

Recently, people have gradually focused on air quality, the bad air quality not only affect human health but also destroy the natural ecological environment. Taiwan is a small island, which is highly populated. The factories stand in great numbers, factory settings are often located around densely population. Air pollution, which is closely related to people's daily life, has also received increasing attention. The diffusion of air pollutants in the air has dynamic changes in time and space, and the trend of pollutants after the discharge of the pollution source can be described by computer simulation.

This study uses cellular automata theory to establish an air diffusion model, simulate the entire system from micro to macro. Understand the trend and changes of air pollutants moving in space through a bottom-up approach, and simulate the wind field changes with probability. Finally, using situational simulation, exploring the variation and distribution of pollutants in different emission behaviors, quantity and location of pollutants. The simulation results show that the distance and the wind field may affect the pollutants emitted by different pollution sources, and the overlap concentration is higher than the surrounding area. The time and scope of pollution affected by different emission behaviors will vary.

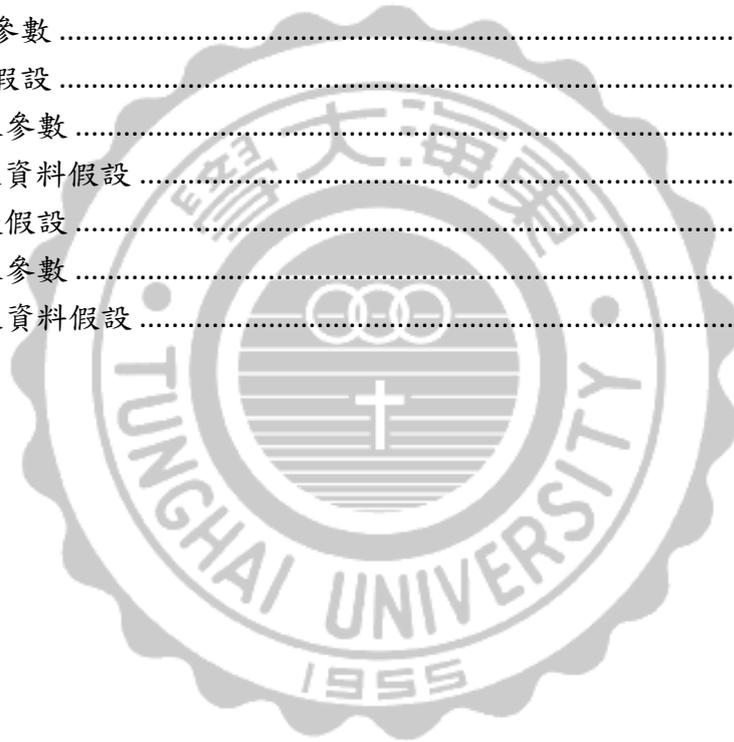
Keywords : Cellular Automata 、 Air Pollution 、 Diffusion Simulation

總目錄

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
總目錄.....	III
表目錄.....	IV
圖目錄.....	V
第一章 緒論.....	1
1.1 研究緣起.....	1
1.2 研究目的.....	3
第二章 文獻回顧.....	4
2.1 空氣污染.....	4
2.2 空氣擴散模擬.....	8
2.3 細胞自動機.....	12
第三章 研究方法.....	15
3.1 研究架構.....	15
3.2 細胞自動機.....	16
3.3 建立基本概念模型.....	19
3.4 空氣擴散模擬之相關參數.....	25
第四章 案例討論與結果.....	26
4.1 模型建立工具.....	26
4.2 模型輸入參數設定.....	26
4.3 情境設定.....	28
4.4 模擬結果.....	33
第五章 結論與建議.....	42
5.1 結論.....	42
5.2 建議.....	42
參考文獻.....	44
附錄.....	46
附圖一 情境 1 完整模擬結果.....	46
附錄二 情境 2 完整模擬結果.....	48
附錄三 情境 3 完整模擬結果.....	52
附錄四 情境 4 完整模擬結果.....	56
附錄五 情境 5 完整模擬結果.....	59

表目錄

表 2-1 空氣品質標準	5
表 2-2 空氣品質指標與健康影響	5
表 3-1 模擬對象	25
表 4-1 模型參數	27
表 4-2 情境 1 模擬假設	28
表 4-3 情境 1 輸入參數	28
表 4-4 情境 2 模擬假設	29
表 4-5 情境 2 輸入參數	29
表 4-6 情境 2 排放資料假設	29
表 4-7 情境 3 模擬假設	30
表 4-8 情境 3 輸入參數	30
表 4-9 情境 4 模擬假設	31
表 4-10 情境 4 輸入參數	31
表 4-11 情境 4 排放資料假設	31
表 4-12 情境 5 模擬假設	32
表 4-13 情境 5 輸入參數	32
表 4-14 情境 5 排放資料假設	32



圖目錄

圖 1-1 環保署空氣品質監測站分布	2
圖 3-1 研究架構	15
圖 3-2 網格型態由左至右分別是六角形、四角形、三角形	16
圖 3-3 不同顏色的狀態表示	17
圖 3-4 細胞鄰域分別為 Von Neumann 型和 Moore 型	17
圖 3-5 狀態階層	19
圖 3-6 鄰域範圍	20
圖 3-10 無風時的風向係數矩陣	20
圖 3-7 十六風向涵蓋範圍	21
圖 3-8 北風涵蓋範圍示意圖	22
圖 3-9 不同風向下的風向係數矩陣	23
圖 4-1 情境 1 模擬結果	33
圖 4-2 情境 2-1 模擬結果	34
圖 4-3 情境 2-2 模擬結果	35
圖 4-4 情境 3-1 模擬結果	36
圖 4-5 情境 3-2 模擬結果	37
圖 4-6 情境 4 模擬結果	39
圖 4-7 情境 5 模擬結果	41
附圖 1-1 情境 1 完整模擬結果 (1/2)	46
附圖 1-2 情境 1 完整模擬結果 (2/2)	47
附圖 2-1 情境 2-1 完整模擬結果 (1/2)	48
附圖 2-2 情境 2-1 完整模擬結果 (2/2)	49
附圖 2-3 情境 2-2 完整模擬結果 (1/2)	50
附圖 2-4 情境 2-2 完整模擬結果 (2/2)	51
附圖 3-1 情境 3-1 完整模擬結果 (1/2)	52
附圖 3-2 情境 3-1 完整模擬結果 (2/2)	53
附圖 3-3 情境 3-2 完整模擬結果 (1/2)	54
附圖 3-4 情境 3-4 完整模擬結果 (2/2)	55
附圖 4-1 情境 4 完整模擬結果 (1/3)	56
附圖 4-2 情境 4 完整模擬結果 (2/3)	57
附圖 4-2 情境 4 完整模擬結果 (3/3)	58
附圖 5-1 情境 5 完整模擬結果 (1/3)	59
附圖 5-1 情境 5 完整模擬結果 (2/3)	60
附圖 5-1 情境 5 完整模擬結果 (2/3)	61

第一章 緒論

1.1 研究緣起

隨著科技進步以及經濟活動的快速成長，人們的生活型態也逐漸改變，在生活愈發便利的情況下，各式各樣的污染伴隨而來。在產業發展的同時，台灣的土地上工廠林立，截至 107 年 6 月經濟部公布的登記工廠名錄中，生產中之工廠已達九萬兩千多家。近年來民眾的環保意識抬頭，環保知識也逐漸普及，生活周遭各種型態的污染伴隨工業發展而來，民眾開始重視與自身健康相關的議題，與生活息息相關的空氣污染也逐漸受到關注，許多研究指出吸入過多的空氣污染物，會引起身體不適、造成呼吸道疾病等損害人體健康的影響。

空氣污染在大氣中的擴散跟傳輸過程多變且複雜，環保署為了監控、維護空氣品質以及評估空氣污染對民眾健康的威脅及損害，至今設置了 77 站空氣品質監測站如圖 1-1，來獲得準確、具代表性的監測數據，並且將數據公開提供民眾查詢(行政院環保署)。

環保署所設置的監測站，主要的目的在於監控大範圍的空氣品質狀況及長期趨勢，監測站彼此之間都存在一些距離，對於部分與污染源比鄰而居的民眾而言，民眾所在的小區域範圍內，沒有監測站的地方則需要靠模擬來獲得據。

空氣擴散模式被廣泛應用在與空氣品質相關的決策上，它可以用來評估現況、研擬管制對策等。擴散模式是用數學方式來描述污染物如何在大氣中擴散，不同的擴散模式需要輸入的參數、運算的時間、模擬的範圍皆有所不同，模擬時

應依照所關注的議題選擇適合模式來建立模型。

污染物在空氣中的擴散，受到許多因素的影響，為一種複雜的問題，而計算機科學的快速發展，則為解決複雜問題提供一個有利的工具，其中以細胞自動機模型所建立的模擬系統，因其架構簡單且靈活性高，已被廣泛的使用在模擬不同複雜系統。本研究想使用細胞自動機模型建立一個模擬小區域範圍的空氣擴散模型，能夠容易且快速的了解小範圍內，污染源排放的污染物走向。

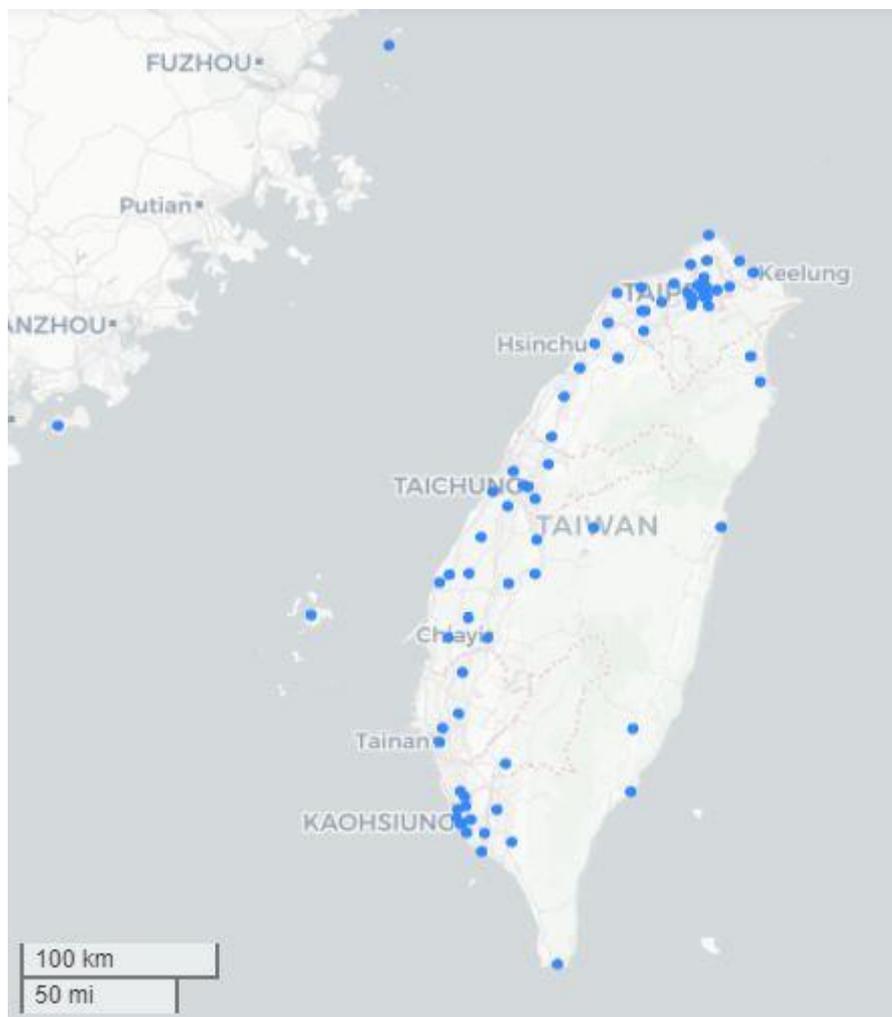


圖 1-1 環保署空氣品質監測站分布

1.2 研究目的

空間中的污染物擴散具有時空的動態性，本研究以細胞自動機理論為基礎建立擴散模型，應用於模擬空氣污染的擴散，用細胞網格展示污染物在空間中的動態變化，且在模型的設計上，簡化擴散過程不須輸入複雜的參數，提供簡易的模型，能夠在不同情境下，模擬污染物在空間中的擴散。



第二章 文獻回顧

2.1 空氣污染

空氣中原本就存在許多不同的物質，在自然的情況下並不會對生態造成影響，但隨著人為活動增加，排放到空氣中的物質變得更為複雜，濃度也隨之增加，進而影響人類的健康和生態系統。空氣污染防治法中，空氣污染物被定義為空氣中足以直接或間接妨害國民健康或生活環境之物質。空氣污染物的來源可分為自然及人為因素造成，自然來源包括火山活動、森林火災、揚塵等，人為因素為工廠或是交通所排放的廢氣等(紀宗廷 2011)。

為了維護空氣品質、改善空氣污染對環境的影響，國家頒布空氣品質標準(表 2-1)來規定空氣中污染物的濃度限值，且設置了許多空氣品質監測站，獲取具代表性的監測數據，作為推動空氣品質保護及空氣污染防制的重要依據。

空氣品質指標(AQI)，依據監測資料將當日空氣中臭氧(O₃)、細懸浮微粒(PM_{2.5})、懸浮微粒(PM₁₀)、一氧化碳(CO)、二氧化硫(SO₂)及二氧化氮(NO₂)濃度等數值，以其對人體健康的影響程度，分別換算出不同污染物之副指標值，再以當日各副指標之最大值為該測站當日之空氣品質指標值(AQI)，用以評估空氣品質的好壞及空氣污染的程度，提供民眾作為參考。空氣品質指標分為五個層級，分別代表對人體健康的影響程度，如表 2-2 所示(行政院環保署)。

表 2-1 空氣品質標準

項目	標準值	單位
總懸浮微粒(TSP)	二十四小時值	250
	年幾何平均值	130
粒徑小於等於十微米(μm)之懸浮微粒(PM ₁₀)	日平均值或二十四小時值	125
	年平均值	65
粒徑小於等於二·五微米(μm)之懸浮微粒(PM _{2.5})	二十四小時值	35
	年平均值	15
二氧化硫(SO ₂)	小時平均值	0.25
	日平均值	0.1
	年平均值	0.03
二氧化氮(NO ₂)	小時平均值	0.25
	年平均值	0.05
一氧化碳(CO)	小時平均值	35
	八小時平均值	9
臭氧(O ₃)	小時平均值	0.12
	八小時平均值	0.06
鉛(Pb)	一月平均值	1.0

資料來源：行政院環保署

表 2-2 空氣品質指標與健康影響

級別	空氣品質指標值	人體健康影響
良好	0-50	空氣品質為良好，污染程度低或無污染
普通	51-100	空氣品質普通；但對非常少數之極敏感族群產生輕微影響。
對敏感族群不健康	101-150	空氣污染物可能會對敏感族群的健康造成影響，但是對一般大眾的影響不明顯。
對所有族群不健康	151-200	對所有人的健康開始產生影響，對於敏感族群可能產生較嚴重的健康影響。
非常不健康	201-300	健康警報：所有人都可能產生較嚴重的健康影響。
危害	301-500	健康威脅達到緊急，所有人都可能受到影響。

資料來源：行政院環保署

空氣品質指標中，六種主要的指標污染物對健康的影響分別概述如下：

1. 臭氧

臭氧為氮氧化物及揮發性有機物經過光化學反應所形成的二次污染物，具有強烈的刺激性，且對人類健康、植物、建築物皆具有破壞性，暴露在低濃度的情況下，會刺激眼睛、呼吸道與肺部，吸入過量將損害呼吸道，甚至傷害中樞神經系統。長時間暴露下，會引起肺部組織受傷、肺水腫等現象(Bromberg and Koren 1995)。

2. 懸浮微粒(PM₁₀)

懸浮微粒是泛指粒徑小於 10 微米的懸浮顆粒，懸浮微粒不是特定的物質所構成，可以是無機離子、金屬化合物、炭、有機化合物等，微小的顆粒可能在大氣中與不同物質結合，發生化學反應，形成不同的化合物(Vallero 2014a)。過多的懸浮微粒會沉積在深呼吸道、支氣管，使支氣管黏膜過度分泌、抑制深呼吸、形成慢性支氣管炎、肺水腫等症狀(曾國書 2006)。

3. 細懸浮微粒(PM_{2.5})

細懸浮微粒是指粒徑小於 2.5 微米的顆粒，細懸浮微粒相較於懸浮微粒更具危險性，除了濃度之外，顆粒的組成、顆粒的大小，決定了它的毒性和進入呼吸系統的程度。細懸浮微粒可以經肺泡進入血液循環系統，釋放發炎介質，造成全生性的反應，長期吸入細懸浮微粒會引起呼吸系統、心血管系統、神經系統等相關疾病(Maté and others 2010)。

4. 一氧化碳(CO)

一氧化碳主要來自於不完全燃燒產生，為一種無色無臭無味的窒息性氣體。

一氧化碳在血液中與血紅素的結合能力為氧的 240 倍，當空氣中存在一氧化碳時，血紅素會優先與一氧化碳結合，導致氧氣無法被血液輸送，使細胞、組織供氧不足，引起頭痛、頭暈、噁心、嘔吐、視力模糊、虛弱、心臟衰竭，甚至死亡。

5. 二氧化硫(SO₂)

二氧化硫為一具刺激臭味的無色氣體，在空氣中雨水反應成為亞硫酸，是酸雨形成的主要因素之一。具有刺激性及腐蝕作用，易引起呼吸道發炎反應及支氣管收縮，對於氣喘患者，暴露在 100 ppb 濃度下，可能引起呼吸困難，威脅生命安全(程學儒 2016)。

6. 二氧化氮(NO₂)

二氧化氮為紅棕色且具有刺激性的氣體，與水反應成亞硝酸及硝酸，為酸雨的主要成分之一。且二氧化氮在紫外光照射下會產生光化學反應，引發光化學煙霧，反應過程中也會形成臭氧及懸浮微粒，對環境造成二次污染。暴露在低濃度的二氧化氮下，會刺激眼、鼻、喉嚨及肺部，引起咳嗽、呼吸急促、長期吸入會降低肺部功能，高濃度的二氧化氮，則會對體內造成灼傷，甚至死亡(林淑靜 2017)。

2.2 空氣擴散模擬

空氣中污染物的擴散會受到到許多的因素影響，擴散是一個複雜的過程且具有時空的動態變化，使得污染物在大氣中傳輸的過程難以控制，要能夠精準的模擬需要考慮到各式各樣的因子，因此想要了解污染物在大氣中的狀況，而發展出了空氣擴散模式，有助於空氣品質的掌握。

空氣擴散模式是可以用來說明污染物如何在大氣環境中擴散的數學模式，通過一組簡化的方程式來計算污染物在擴散時不同位置或時間的濃度，在模擬空氣中污染物擴散的時候，已經有許多不同複雜程度及尺度的空氣擴散模式可以選擇，因應不同的案例或需求來選擇適合的模式，用以評估空氣品質或提供決策者做為參考依據(Vardoulakis and others 2003)。模式主要有箱型模式(Box models)、高斯模式(Gaussian models)、拉格朗日模式(Lagrangian models)、計算流體力學模式(Computational fluid dynamic models,CFD)(Holmes and Morawska 2006)各項模式的概述如下：

1. 箱型模式

箱型模式是描述空氣污染物在空氣中變化的簡單方法，在箱型模式中，模擬範圍假設成箱型，污染物被視為均勻的散布在箱型內部，將污染物的濃度變化以微分方程式表示，污染物進出會經過物理、化學反應的過程並且遵守質量平衡。箱型模式的優點為，只需輸入簡單的氣象資料及排放資料並設定相關參數，即可運算出結果。但由於輸入的條件過於簡略，且污染物被假設為均勻混合，沒有考慮到局部的濃度變化，因而不適合用於探討局部環境中污染物濃度變化時建模。

Zhong and others (2016)應用箱型模式模擬都市街道的空氣污染情形，並比較了箱型模式的差異性及侷限性。

2. 高斯模式

高斯模式為說明污染物沿著風的方向擴散，在風的垂直方向，污染物的濃度分布在空氣中水平及垂直方向上呈現高斯分布。在高斯模式中，煙流的擴散是假設在穩態的條件下，即風速、風向不隨著時間而改變，不需輸入複雜的參數，即可模擬單一污染源在污染排放時，在下風處受體點的污染物擴散濃度，其容易使用的特性，使之廣泛的應用在空氣污染物擴散的模擬上。但高斯模式沒有考慮污染物擴散到受體所需的時間，且其基本假設忽略了風向的改變，因此不適用於大範圍的擴散模擬，氣象條件有能在這麼大的範圍內發生變化。

高斯模式已經廣泛的應用在空氣擴散模型建模，例如：CALINE 4 (California Line Sources Dispersion Model)、CDM 2.0 (Climatological Dispersion Model - Version 2.0)、ISC (Industrial Source Complex)、AERMOD (AMS/EPA Regulatory Model)。高苙凱 (2013)使用高斯擴散模式，模擬工業園區內半導體產業排放的污染物擴散在環境中的分布情形，用以評估目標污染源對周遭環境的影響。劉漢琪 (2012)比較了 AERMOD 與 ISCST3 在空氣污染物面源排放模擬時的差異，在模擬複雜地形及地表特徵影響較大之模擬範圍時，AERMOD 因其學理基礎較 ISC3 完整，故使用 AERMOD 模擬的結果更具可信度。

3. 拉格朗日模式

拉格朗日模式描述了粒子在時間和空間中的移動和變化，假設污染物粒子包含在空氣中的一個氣塊(air parcel)中，透過計算氣塊的移動軌跡，模擬污染物在大氣中的移動路徑傳輸和擴散，其中包含許多複雜的物理和化學過程，這種用來描述路徑、軌跡的模型可以應用在建立空氣污染事件中染污染源及受體的關係(Stohl 1998)。拉格朗日模式包含由平均流體速度、風的紊流(turbulence)、分子擴散所影響的濃度變化，且可將化學反應加入計算，應用於複雜的地形或是非穩態大氣條件下也能有良好的效果(Holmes and Morawska 2006)。Wen and others (2012)利用拉格朗日為基礎建立空氣品質模型，以模型所預測的臭氧濃度與觀測值比較，在鄉村及城市皆得到一致的結果，且使用該模型模擬加拿大安大略省臭氧濃度來源受到美國境外傳輸的影響比例。Strong and others (2010)開發拉格朗日模型來對英國春季和夏季的臭氧事件進行模擬，找出污染的來源，結果顯示英國、歐洲沿海及內陸皆對事件有所貢獻，愈向西邊移動臭氧的貢獻比例愈大。

4. 計算流體力學模式

計算流體力學模式，這種建模方法應用連續流體中的流動數值表示，模擬了空氣中污染物從污染源排放到局部微環境內污染物濃度在時間和空間上的變化。通過計算方式求得流體流動的控制方程式解，可以在時間和空間上描述完整流場的數值，且同時考慮動量和質量的守恆。精密的計算流體力學模式能夠考慮細部的地形變化及局部的空氣流動，熱通量也可以加到地表或是建築物表面，模擬熱能對污染物傳送和擴散的影響(Vallero 2014b)。計算流體力學模式的開發需要

複雜的參數及大量的數據，需要較高效能的運算資源。Amorim and others (2013) 將計算流體力學模式結合植被冠層模型，考慮到樹木的空氣動力學效應，模擬兩個歐洲城市中樹木對交通排放一氧化碳的擴散影響，其結果顯示城市中的建築物及樹木對空氣污染擴散具有複雜的影響，且模型所提供的結果可作為都市規劃的參考依據。

計算流體力學模式及拉格朗日模式雖然能對不同地形、尺度、氣象條件的擴散做較詳細的模擬，但所需要的資料及參數也較為複雜，且需要較大的計算時間，通常應用在長時間或大範圍的模擬。本研究目的主要為模擬與民眾所在地周圍的污染排放及擴散，高斯模式應用在小範圍的模擬已有豐富的使用經驗，但其基本假設忽略了風速風向隨著時間的動態變化且不考慮瞬間排放或污染物意外釋出的情況。綜合上述建模方式的特性與差異後，本研究為了增加建模時的靈活性，以及考慮到研究的目的、輸入資料的複雜程度和結果運算時資源的消耗，本研究選用架構輕巧的細胞自動機做為建模的方法，在研究過程中可以容易的更動其架構，讓模式更符合實際的情況。

2.3 細胞自動機

細胞自動機(Cellular Automata)概念於 1950 年代由 von Neumann 提出，以能夠自我複製的自動機為發想，1970 年 John Conway 提出著名的生命遊戲，因為它產生了與現實相似的現象(Dewdney 2008)，證明了簡單的規則也能模擬出複雜的行為，讓細胞自動機的概念受到關注，逐漸被使用在模擬各種複雜系統中，細胞自動機是一個離散的動力學模型，由一組相同的細胞單元組成，它們只會與周遭相鄰的單元互動，並受限於一組有限的規則，規則以不連續的時間同步的更新所有細胞單元，細胞狀態會受到規則及相鄰的細胞狀態影響。細胞自動機擁有優秀的空間演算的能力，以簡單的細胞單元互動來實現空間上的複雜性。由於細胞自動機強調從局部變化具有靈活及良好的適應性，已經被應用在許多不同的領域(Bouaine and Rachik 2018; Zheng and others 2017)。

在都市規劃方面，陳芃妤 (2012)應用細胞自動機對都市擴張進行模擬，預測都市空間變化了解都市未來發展的情況，並探討不同政策面向對都市未來可能發展的趨勢影響，使用 SLEUTH 模式進行大台北地區都市擴張的模擬，將 2010 年模擬結果與實際值比對，Kappa 指標檢驗結果的準確度為 88.68%，結果驗證此模式進行都市擴張是具有一定的可靠性。

環境方面，宋鴻均 (2005)運用細胞自動機模擬海洋油污擴散，探討複雜科學中油污擴散與移動，擴散與移動的行為屬於一種高度的非線性問題，模式中考量了水中流場及陸地邊界對油污擴散分布的影響，針對不同海象條件案例進行展示，結果顯示應用細胞自動機能夠將過去無法一起考量的油污擴散機制一同

加入模型，並憑著細胞自動機直觀展示的能力，直接觀察到不同機制相互作用的結果。根據不同的研究需求，可以修改細胞自動機中的要素，有別於空間劃分常用的四角形 Hernández Encinas and others (2007)使用六角形細胞自動機模擬森林火災蔓延，將森林區域劃分為六角形網格做為細胞單元，假設 11 種狀態來代表燃燒的程度，如 0 代表為燃燒，1 代表完全燃燒，並模擬八種情境測試模型，主要分為在均質和非均質森林的火災模擬。結果表示該模型於八種假設情境，獲得的模擬圖形都與真實的火勢蔓延獲得一致性的結果。

在行為科學方面 Feng and others (2013)建立一個細胞自動機模型來模擬行人穿越街道的過程，行人的決策過程式複雜且隨機的，因為周圍環境的變化而改變行走的路線，行人也會互相的影響，模式中加入三個基本參數來描述行人的移動，行人會隨著變動的環境選擇自己的路線，結果顯示模擬數據與真實的行人穿越街道的過程相似，可以應用於評估行人交通的規劃或設施設置。

在生態方面，Perez and Dragicovic (2012)結合了細胞自動機、地理資訊系統，模擬因昆蟲感染導致樹木死亡的機率，進而影響森林的覆蓋面積，細胞自動機的離散性使得模型能夠與地理資訊系統中的網格做結合，且有助於時間空間上皆具有動態變化的模型建立。Cannas and others (2003)將細胞自動機原理用於模擬森林中外來物種入侵與原生物種間的交互作用，該研究建立多個模擬單一物種動態特徵的細胞自動機，再透過定義交互規則，將多個單一模型整合在一起成交互式多元細胞自動機，模型成功的模擬入侵物種和本地物種相互作用的影響，結

果可以用於設計最佳管理，用以保護本地物種族群，和同時防止和控制外來物種入侵。

在生命科學方面，Sirakoulis and others (2003)將細胞自動機應用於 DNA 序列演化的研究，建立一維的細胞自動機模型模擬 DNA 的演化，設置四種狀態，分別代表 DNA 序列中的四種鹼基，由方形的矩陣表示線性演化的過程，並得到了與現實相仿的結果。在開發 DNA 序列演化模型上，以細胞自動機為基礎的建模方式可以同時加入多種計算方式在一個模型中，因應 DNA 的結構來設置模擬函數和演化規則。

在材料科學方面，Hallberg and others (2010)用細胞自動機模擬冶金時控制晶粒大小的動態再結晶過程，模擬在熱壓縮下銅的結構變化，比較了不同條件下結晶尺寸和形狀的變化，並分析微觀晶粒尺寸的改變對流變應力(flow stress)的影響，模擬得到的再結晶程度與阿夫拉米方程理論相符。

近年來細胞自動機被廣泛地運用在各個領域之研究，而本研究將細胞自動機應用在環境的領域，來模擬污染物在空氣中的擴散及污染物的濃度變化。

第三章 研究方法

3.1 研究架構

本研究以細胞自動機為基礎的模型，不論是模型的演算或是參數，都可以依照不同的目的、情境來做修改，細胞自動機的模型建立過程可以根據研究目的來做細胞自動機要件的設計或變動，圖 3-1 為本研究的研究架構。

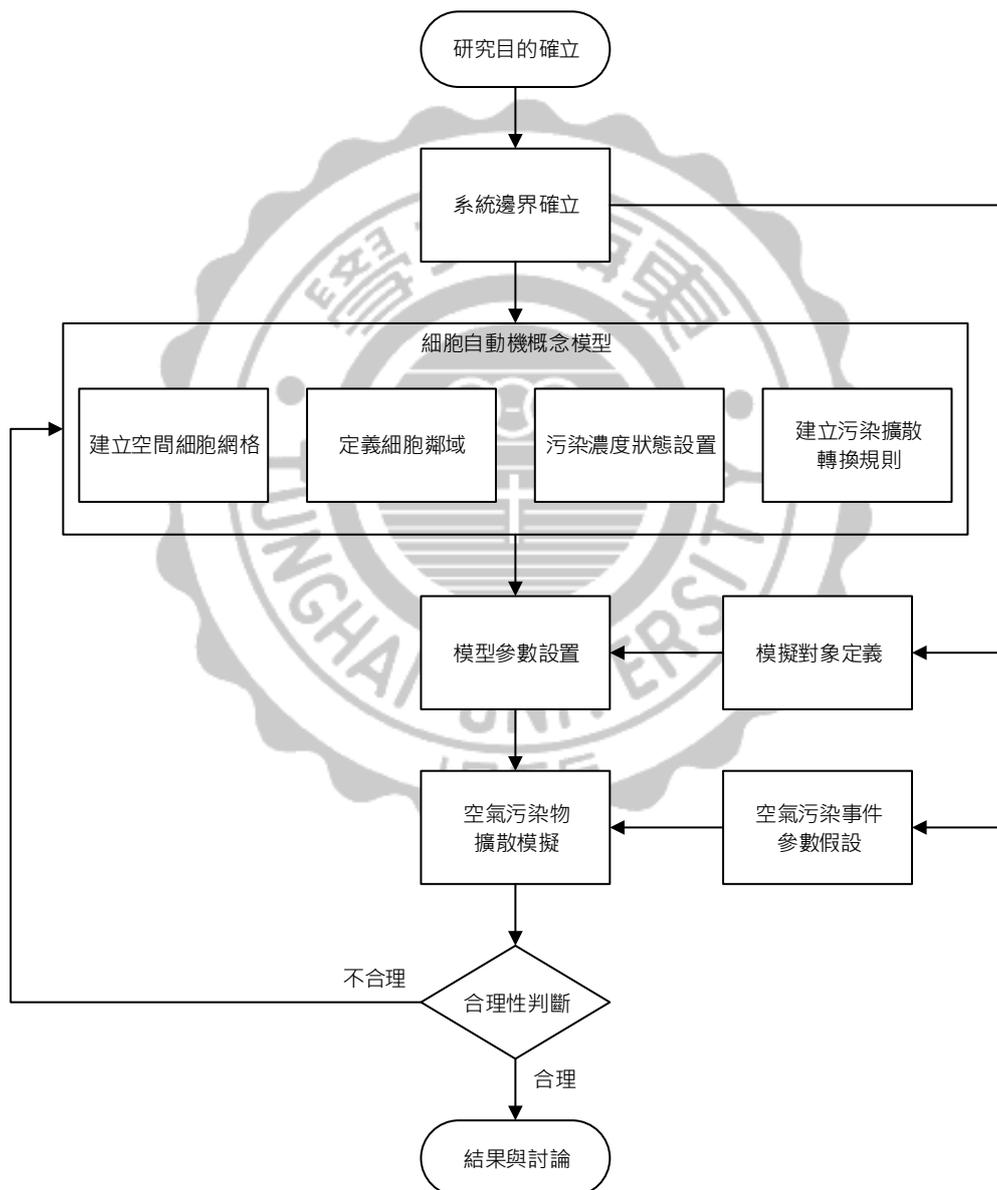


圖 3-1 研究架構

3.2 細胞自動機

細胞自動機是一種時間和空間都不連續的數學模型，透過簡單的規則來簡化複雜的行為，已經被廣泛的應用在模擬不同的複雜系統，由下而上的通過局部區域的交互作用模擬整個系統宏觀的複雜現象。根據第二章的文獻中討論細胞自動機因為其具有輕巧的架構，可以依據不同的需求來建立模型，以及根據不同的情況做參數的調整。細胞自動機主要包含四個要件，分別為細胞(cells)、狀態(states)、鄰域(neighborhoods)、轉換規則(rules)。

1. 細胞(cells)

細胞是組成細胞自動機最基本的要素，細胞所表示的空間可以是任意的形狀，它的形狀可以是三角形、四邊形、五邊形等的幾何形狀，而細胞會規則地排列成網格的形式，可以依照不同的目的來選擇較適合的細胞的形狀，目前的研究多半以四方型來表示細胞空間如圖 3-2。

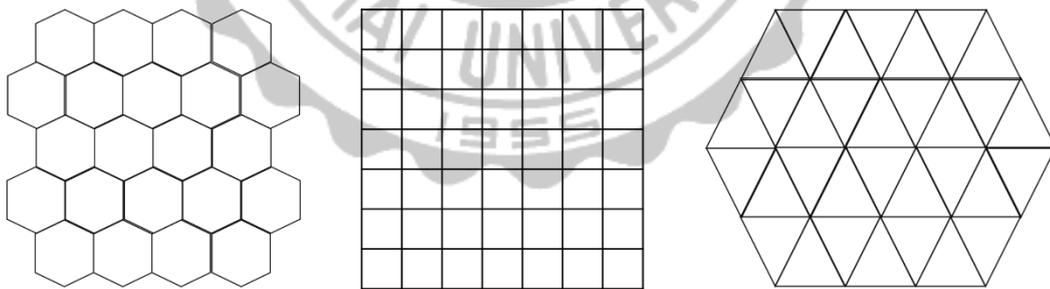


圖 3-2 網格型態由左至右分別是六角形、四角形、三角形

2. 狀態(states)

細胞自動機的狀態是由一組有限的集合來表示，每個獨立的細胞單元在每個時刻只會顯示集合中的一個值，可以依照不同的研究內容來制定狀態。可以是數字(1，表示受污染，0，表示未受污染)，也可以是自定義的名稱。狀態可以用不同的顏色或是用顏色的深淺來做視覺化的呈現如圖 3-3。

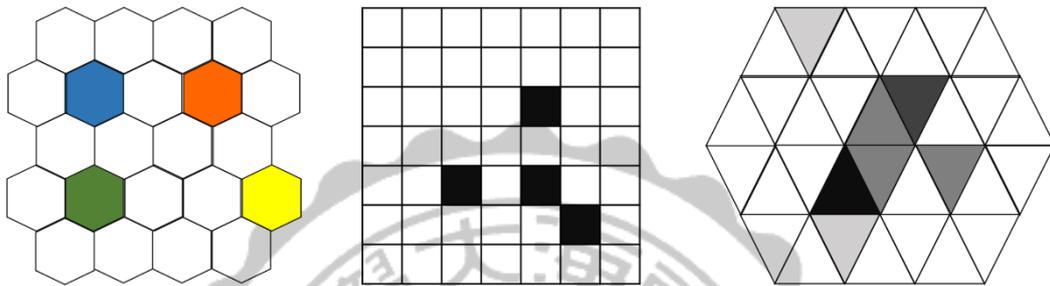


圖 3-3 不同顏色的狀態表示

3. 鄰域(neighborhoods)

細胞周圍相鄰的細胞是影響細胞演化的重要關鍵，每個細胞演化都會受到周圍細胞當前的狀態影響，所以需要根據不同的需求來定義細胞的鄰域來決定轉換規則的作用範圍，也可以是一定半徑範圍內的所有細胞。常見的鄰域可分為 Von Neumann 型和 Moore 型，Von Neumann 型的鄰域是上下左右四個相鄰的細胞，Moore 型的鄰域則是相鄰的八個細胞如圖 3-4。

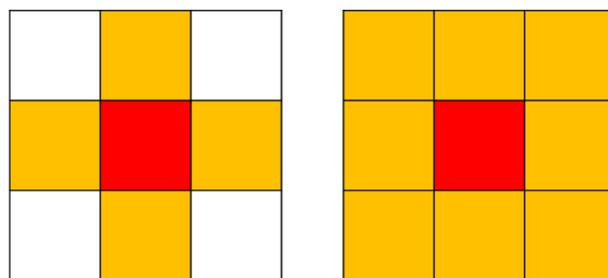


圖 3-4 細胞鄰域分別為 Von Neumann 型和 Moore 型

4. 轉換規則(rules)

轉換規則是驅使細胞演變至下一個時刻狀態的動力函數，細胞當前的狀態跟鄰域是決定轉換後細胞狀態的重要因素，制定一至數條的轉換規則，轉換規則會按照所定義的鄰域決定影響範圍，並同步將所有細胞的狀態從 t 時間狀態變換到 $t+1$ 時間的狀態。可由下列公式表示：

$$S_{ij}^{t+1} = f_N(S_{ij}^t)$$

其中 S 表示細胞 (i,j) 的轉換函數，它定義細胞狀態從 t 時刻到 $t+1$ 時的轉移， N 表示細胞鄰域，為 f 的一個輸入變量。



3.3 建立基本概念模型

由第二章的文獻回顧可以得知，空氣擴散的過程為一非線性的複雜行為，依照上述細胞自動機的原理及必要的物件規則，就可以將其應用在模擬空氣污染的擴散之上，以下將說明本研究模型建立的步驟：

1. 網格建立

本研究使用大小相同的方型網格將空間離散化代表細胞，每一格都是獨立的細胞空間，以C表示網格陣列。

2. 狀態建立

本研究使用二十個顏色的階層如圖 3-4 來做為不同的濃度值的分類標準，這二十個色階是固定且不隨時間變動的，將不同時刻的污染濃度值分別帶入不同的狀態，依照該類別在狀態階層中的顏色來做視覺上的呈現，藉此可以更容易觀察到污染濃度隨時間的變化，模式中狀態的極值可以自訂更改，預設最大值為 2，最小值為 0。

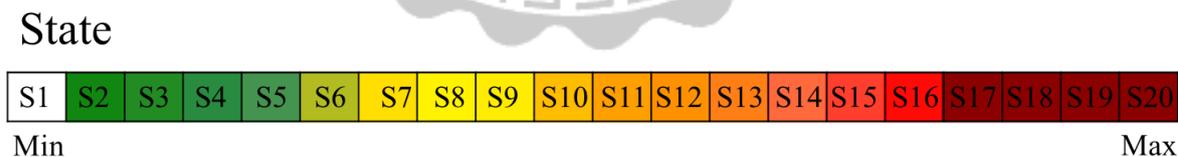


圖 3-5 狀態階層

3. 鄰域建立

以 Moore 型，作為本研究的細胞鄰域，中心細胞向外延伸的八個鄰近細胞，以 i,j 來表示中心細胞($C_{i,j}$)的位置，細胞鄰域位置如圖 3-6 所示。

$i-1, j-1$	$i-1, j$	$i-1, j+1$
$i, j-1$	i, j	$i, j+1$
$i+1, j-1$	$i+1, j$	$i+1, j+1$

圖 3-6 鄰域範圍

4. 轉換規則建立

A. 無風狀態之擴散

本研究假設基本的擴散為中心細胞($C_{i,j}$)污染物濃度在時間 t 到 $t+1$ 時，會平均的分配到在鄰域範圍內包括中心點的九個細胞中，圖 3-10 為無風時的擴散係數矩陣。

0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11
0.11	0.11	0.11

圖 3-10 無風時的風向係數矩陣

B. 風向影響之擴散

接著考慮到風向的影響，本研究將風向劃分為十六個風向，每個風向角度範圍為 22.5 度，以細胞($C_{i,j}$)為例，十六個風向在鄰域範圍內涵蓋不同大小的面積如圖 3-7 所示。

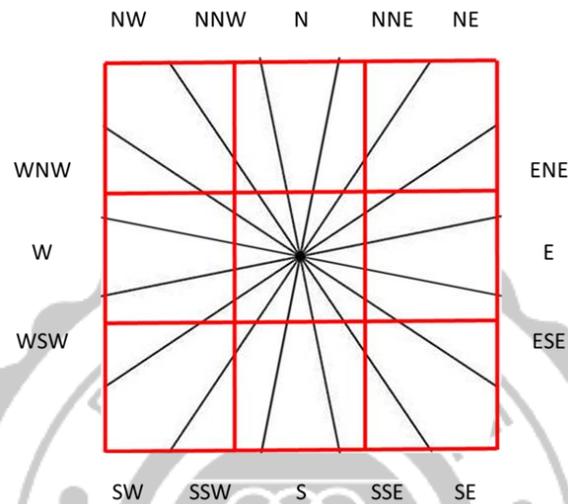


圖 3-7 十六風向涵蓋範圍

計算時將風通過中心點後的扇形面積及±22.5度的兩個扇形面積(分配的污染物濃度比例為 9:0.5:0.5)，與鄰域範圍內的八個相鄰細胞與中心細胞交集的面積範圍的比值(以北風為例如圖 3-8，橘色部分為北風的角度範圍，綠色部分為計算的污染面積)，以一個三乘三的矩陣表示 ($W_{3 \times 3}$)，以W為風向擴散係數矩陣，圖 3-9 為不同風向下的係數矩陣示意(圖中為四捨五入後的數值，計算時會使用實際的數值)。t+1 時的值可以以下列式子表示如式：

$$M_{i,j}^{t+1} = (M_{i,j}^t \times W_{2,2}^x) + (M_{i-1,j-1}^t \times W_{3,3}^x) + (M_{i-1,j}^t \times W_{3,2}^x) + (M_{i-1,j+1}^t \times W_{3,1}^x) + (M_{i,j-1}^t \times W_{2,3}^x) + (M_{i,j+1}^t \times W_{2,1}^x) + (M_{i+1,j-1}^t \times W_{1,3}^x) + (M_{i+1,j}^t \times W_{1,2}^x) + (M_{i+1,j+1}^t \times W_{1,1}^x)$$

其中 $M_{i,j}^t$ 代表細胞 $C_{i,j}$ 在時間 t 時的濃度， $M_{i,j}^{t+1}$ 為時間 t+1 時細胞 $C_{i,j}$ 的濃度值，x 代表風向， W^x 為在 x 風向下的擴散係數矩陣。

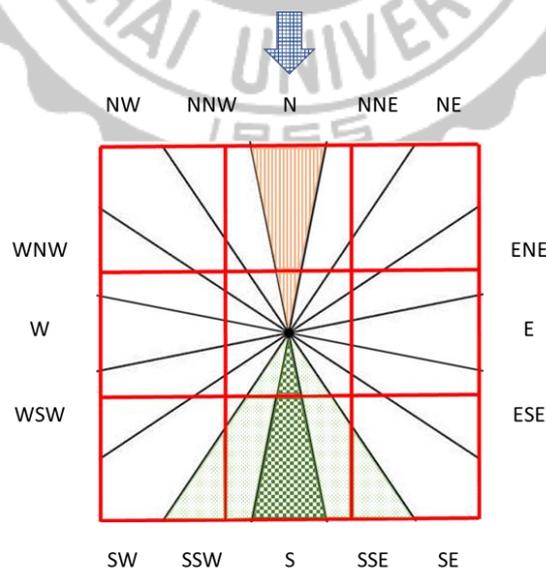


圖 3-8 北風涵蓋範圍示意圖

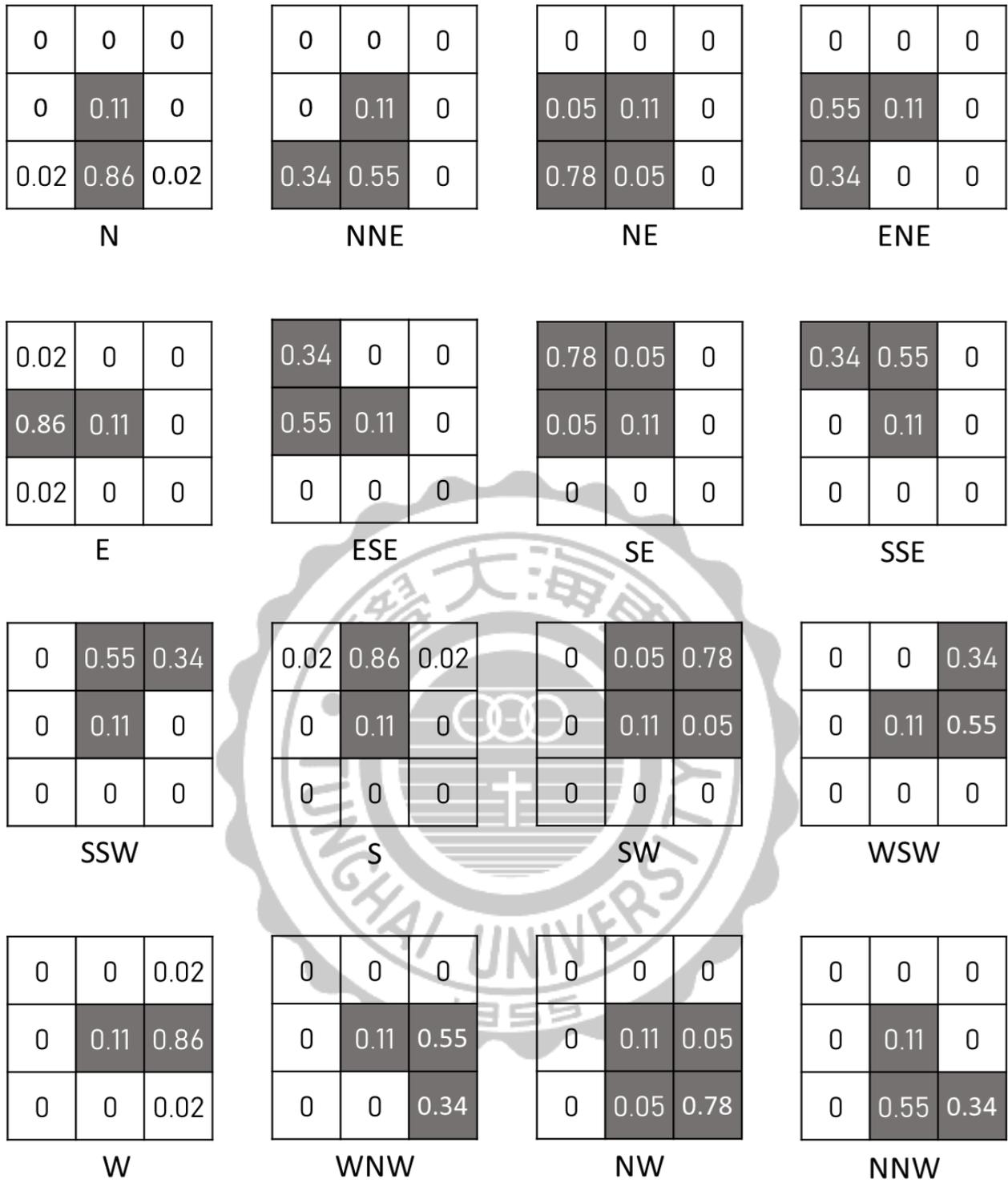


圖 3-9 不同風向下的風向係數矩陣

C. 風速影響之時間間隔

假設風速為 1m/s 時，每小時可以移動 3600 公尺，以細胞網格長寬各為 200 公尺計算，一個時間間格往外擴張一個網格，一個小時會被切分為 18 個時間間格，每一個為 200 秒。間隔越小，迭代的次數越多，擴散的距離越遠，時間間隔可以以下式表示：

$$\text{Time step} = \text{WS}(\text{m/s}) * 3600(\text{s/hr}) / \text{Cell_size}(\text{m})$$

其中

Time step：時間間隔

WS：小時平均風速

Cell_size：方形網格寬



3.4 空氣擴散模擬之相關參數

本研究所建立的空氣污染物擴散模型根據假設情境，將模擬的對象包含：排放源、排放行為、以及是否受到風的影響，如表 3-1 所示。以下將說明每個對象的建立：

1. 排放源：欲模擬的污染源數量及其位置，分為單點及多點。
2. 排放行為：依模擬的排放時間將排放行為分為連續性排放、間歇性排放、不連續性放。連續排放定義為連續排放一個小時以上；間歇性排放定義為排放時間具有間隔，間隔至少一個小時，不連續排放為排放時間少於一小時。
3. 風：依照十六方位將風向劃分，並將其定義為當：風速大於 1(公尺/秒)時為有風的狀態，且污染物會受風向的影響擴散；風速小於 1(公尺/秒)時為無風狀態，不會受風向影響。

表 3-1 模擬對象

對象	參數	屬性	定義
排放源	座標(經緯度)	單點	一個排放源
		多點	一個以上的排放源
排放行為	排放量(單位/小時)	連續性排放	連續排放一小時以上
	排放時間(小時)	間歇性排放	排放時間間隔一個小時以上(含)
		不連續排放	排放時間少於一小時(含)
風	風向(十六方位)	有風	風速大於 1(公尺/秒)(含)
	風速(公尺/秒)	無風	風速小於 1(公尺/秒)

第四章 案例討論與結果

4.1 模型建立工具

本研究以程式語言 Python 來建立模型，Python 是一個直譯式且跨平台的程式語言，不須經過修改就可在許多主要的作業系統上運行，開源的性質使它可以自由的發布或是使用程式庫，因此累積了許多第三方開發的套件模組，可以應用於網站開發、資料收集、數據分析及視覺化。

4.2 模型輸入參數設定

根據第三章介紹的細胞自動機原理所建立的空氣污染擴散模型，本節將依照模型所需要輸入的參數設定做說明。需要輸入的參數包含網格中心點、污染源位置、細胞空間大小、細胞數量、排放資料、模擬的資料筆數、風向、風向權重、狀態極值，如表 4-1 所示。

1. 中心點：網格的建立是給定一個中心點座標後，向外延伸依照每個細胞空間的四個角的座標，由上而下，由左而右依序畫出所有細胞，每個細胞都是獨立的方格。
2. 污染源位置：經污染源座標計算出相對應的網格，該網格會依序讀取污染源的排放資料。
3. 細胞空間大小：給定一個數值決定細胞的大小，以經緯度表示。
4. 細胞數量：給定一個數值決定細胞數量，細胞數量會影響網格涵蓋的範圍大小(如：輸入 M ，則產生 $M \times M$ 個細胞數量)。

5. 排放資料：排放資料需具備日期、時間(以小時為單位)、排放量、風速。每小時的排放量會因為風速影響的時間間隔不同，平均分配給每一個時間間隔。
6. 模擬期程：依照排放資料決定要要模擬的時間長度(如：排放資料輸入十個小時的數據，可以選擇只模擬五個小時)
7. 模擬風向：依十六方位，可自行選擇要模擬的風向。
8. 模擬風向權重：根據模擬風向所填的風向，依序給定所佔的權重。
9. 狀態極值：輸入最大值及最小值來表示細胞狀態的範圍，最大值跟最小值之間會切分為 20 個區間。預設的最小值為 0，最大值為 2。

表 4-1 模型參數

參數	資料類型	描述
中心點	經緯度	網格範圍中心點
污染源位置	經緯度	污染源位，置需在網格範圍內
細胞空間大小	數值	以經緯度差表示細胞大小
細胞數量	數值	細胞數量、和大小決定網格範圍
排放資料	表單	包含日期、時間、排放量、小時風速
模擬期程	數值	模擬的時間範圍
模擬風向	陣列	輸入欲模擬的風向
模擬風向權重	陣列	輸入風向所佔的權重，長度要等於風向
狀態極值	數值	狀態的和最小值和最大值，預設為(0,2)

4.3 情境設定

本節將模擬的情境分為五種，設定不同的排放對象、參數，來觀察在不同情況下，污染物擴散的變化。模擬的細胞大小皆使用 0.002，每個細胞空間約為 200 m²，每個污染源初始值(t=0)範圍皆假設為一個細胞空間。

1. 情境 1：單點無風擴散

利用單一個污染源在沒有風的情況下，模擬污染物沒有受到風向影響時的擴散現象，情境設定污染源排放一個小時後，即停止排放，相關設定如表 4-2、表 4-3 所示。

表 4-2 情境 1 模擬假設

對象	屬性
排放源	單點
排放行為	不連續性排放
風	無風

表 4-3 情境 1 輸入參數

參數	情境 1
模擬風向	無
風向比重	無
風速	無

2. 情境 2：單點連續擴散

設定不同大小的風速來探討風速對污染物濃度及擴散距離的影響，和風向的權重的比例，對擴散方向的影響，情境 2-1 風速為 1，情境 2-2 風速為 2 相關設定如表 4-4、表 4-5、表 4-6 所示。

表 4-4 情境 2 模擬假設

對象	屬性
排放源	單點
排放行為	連續
風	有風

表 4-5 情境 2 輸入參數

參數	情境 2-1	情境 2-2
模擬風向	[S,WSW,W,SSW, E]	[S,WSW,W,SSW, E]
風向比重	[5,4,3,2,1]	[5,4,3,2,1]
風速	1	2

表 4-6 情境 2 排放資料假設

情境 2-1				情境 2-2			
日期	時間	排放量	風速	日期	時間	排放量	風速
1070701	200	100	1	1070701	200	100	2
1070701	300	100	1	1070701	300	100	2
1070701	400	100	1	1070701	400	100	2
1070701	500	100	1	1070701	500	100	2
1070701	600	100	1	1070701	600	100	2
1070701	700	100	1	1070701	700	100	2
1070701	800	100	1	1070701	800	100	2

3. 情境 3：多點無風擴散

延伸情境 1 的設定，情境 3 在模擬對象增加一個污染源，模擬不同污染源擴散範圍重疊時觀察濃度的變化，且設定不同大小的狀態尺度，觀察可視化呈現的結果差異，相關設定如表 4-7、表 4-8 所示。

表 4-7 情境 3 模擬假設

對象	屬性
排放源	多點
排放行為	不連續
風	無風

表 4-8 情境 3 輸入參數

參數	情境 3-1	情境 3-2
模擬風向	無	無
風向比重	無	無
風速	無	無
狀態最大值	2(預設)	1
狀態最小值	0(預設)	0(預設)

4. 情境 4：多點連續、間歇擴散

延伸情境二，增加一個污染源，同時模擬兩個不同排放行為，觀察兩種排放行為所排放的污染物在空間上的變化，相關設定如表 4-9、表 4-10、表 4-11 所示。

表 4-9 情境 4 模擬假設

對象	屬性
排放源	多點
排放行為	連續、間歇
風	有風

表 4-10 情境 4 輸入參數

參數	情境 4
模擬風向	[S,SSW,SW,WSW,W,WNW,NW,NNW]
風向比重	[20,15,10,5,1,1,1,1]
風速	1

表 4-11 情境 4 排放資料假設

日期	時間	排放量 1	排放量 2	風速
1070701	200	100	0	1
1070701	300	100	0	1
1070701	400	100	100	1
1070701	500	0	100	1
1070701	600	0	0	1
1070701	700	100	100	1
1070701	800	0	0	1

5. 情境 5：多點連續、間歇、不連續擴散

設置三個污染源，同時模擬三種不同的排放行為，及有風無風兩種情況交互出現的情境下，觀察污染物在空間上的變化，相關設定如表 4-12、表 4-13、表 4-14 所示。

表 4-12 情境 5 模擬假設

對象	屬性
排放源	多點
排放行為	連續、間歇、不連續
風	有風

表 4-13 情境 5 輸入參數

參數	情境 5
模擬風向	[S,SSW,SW,WSW,W,WNW,NW,NNW]
風向比重	[20,15,10,5,1,1,1,1]
風速	1

表 4-14 情境 5 排放資料假設

日期	時間	排放量 1	排放量 2	排放量 3	風速
1070701	200	100	0	100	1
1070701	300	100	0	0	0
1070701	400	100	100	0	1
1070701	500	0	100	0	0
1070701	600	0	0	0	1
1070701	700	100	100	0	0
1070701	800	0	0	0	1

4.4 模擬結果

由五種情境的模擬結果，觀察不同條件下，污染物在空間中的分布及濃度的變化。每個細胞空間約為 200 m^2 ，圖中的 t 為細胞自動機迭代的次數。

1. 情境 1 模擬結果

情境 1 模擬在沒有風的影響下擴散，從圖 4-1 可以看到，擴散的形狀趨近於圓形，且中心濃度隨時間降低，由紅色轉變成綠色，可以發現中間高濃度範圍隨時間逐漸縮小，污染物擴散範圍到達一定距離後，因濃度過低而沒有呈現。

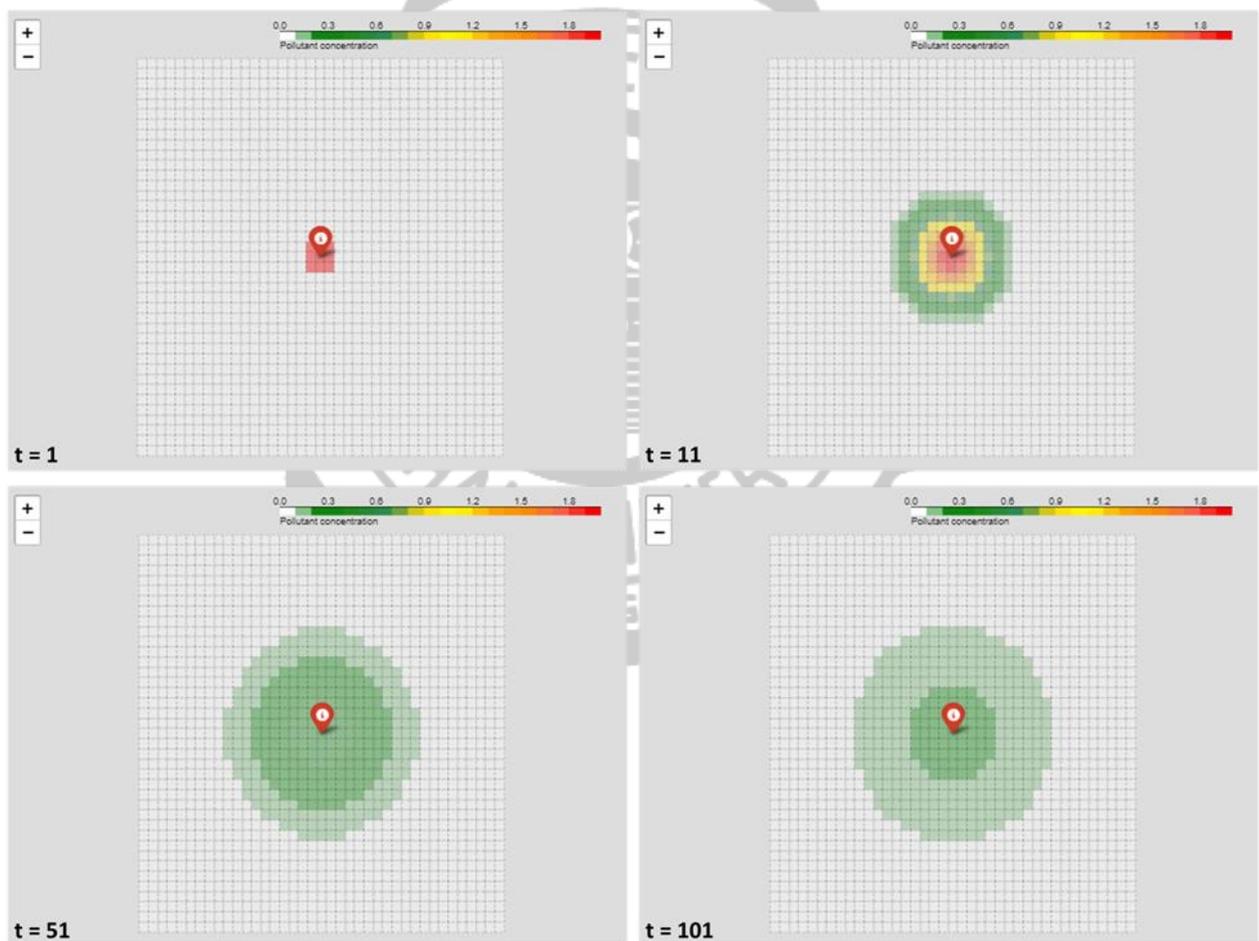


圖 4-1 情境 1 模擬結果

2. 情境 2 模擬結果

設置不同的風速，來比較風速大小對污染物擴散的影響，情境 2-1 風速為 1 m/s，情境 2-2 風速為 2 m/s。在有風的情況下，受到風向的影響，由 2-1、2-2 可以發現，風向權重較高的南風跟西南西風，對擴散的方向影響較大，污染物有往東北方向擴散的趨勢(圖 4-2、圖 4-3)。

a. 情境 2-1

由圖圖 4-2 可以看到，污染排放後，受到風向權重較高的風向影響而移動，移動的距離愈遠，濃度也會降低。

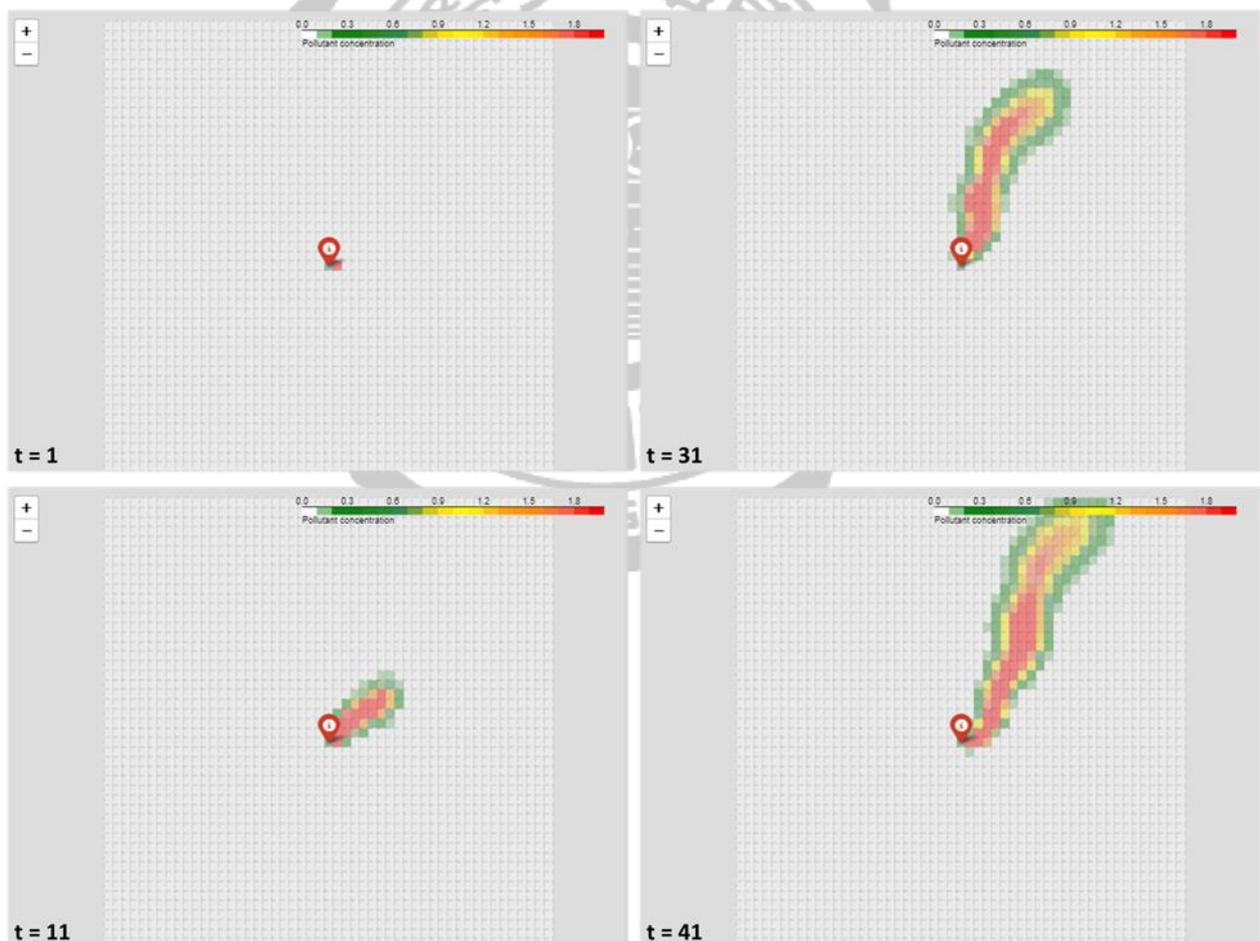


圖 4-2 情境 2-1 模擬結果

b. 情境 2-2

由下圖(圖 4-3)可以發現和情境 2-1 比較，因為設定的風向及權重相同，所以擴散的趨勢也大致相同，但在相同時間點(2-1 $t=12$ 和 2-2 $t=24$)，情境 2-2 的迭代次數為情境 2-1 的兩倍，濃度相較之下較低，且擴散距離較遠。

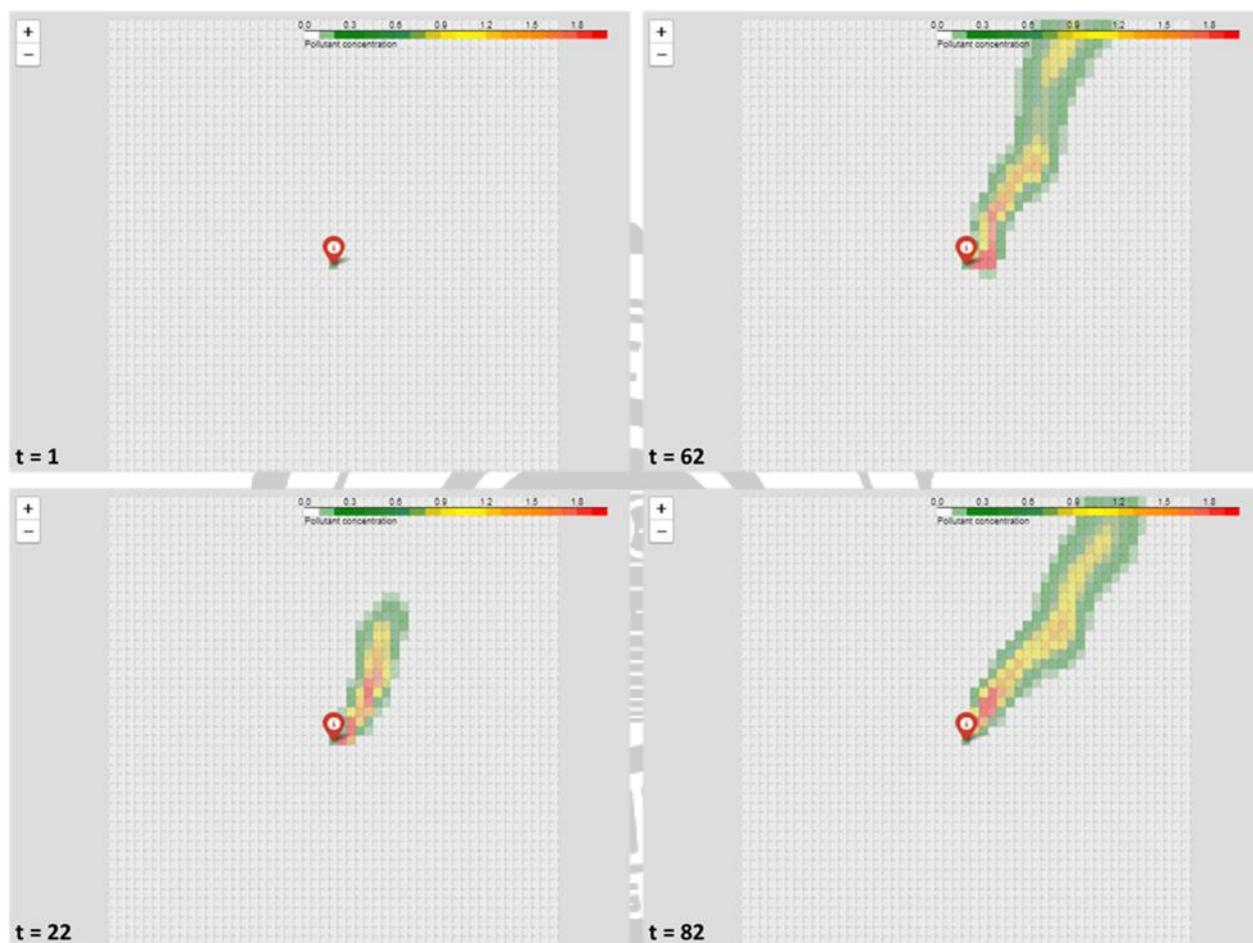


圖 4-3 情境 2-2 模擬結果

3. 情境 3 模擬結果

延續情境 1 模擬無風的擴散，增加一個污染源，觀察兩個污染源重疊部分的變化，且設置兩個不同的狀態最大值，情境 3-1 最大值為預設值 2，情境 3-2 最大值為 1。

a. 情境 3-1

由圖可以看到模擬兩點污染源在無風時的排放，污染範圍隨著時間擴大，雖然污染源周圍的濃度逐漸降低，但可以看到中心重疊的部分污染濃度有較沒有重疊的部分高，但在 $t=100$ 時情境 3-1 已經完全看不出重疊的部分(圖 4-4)。

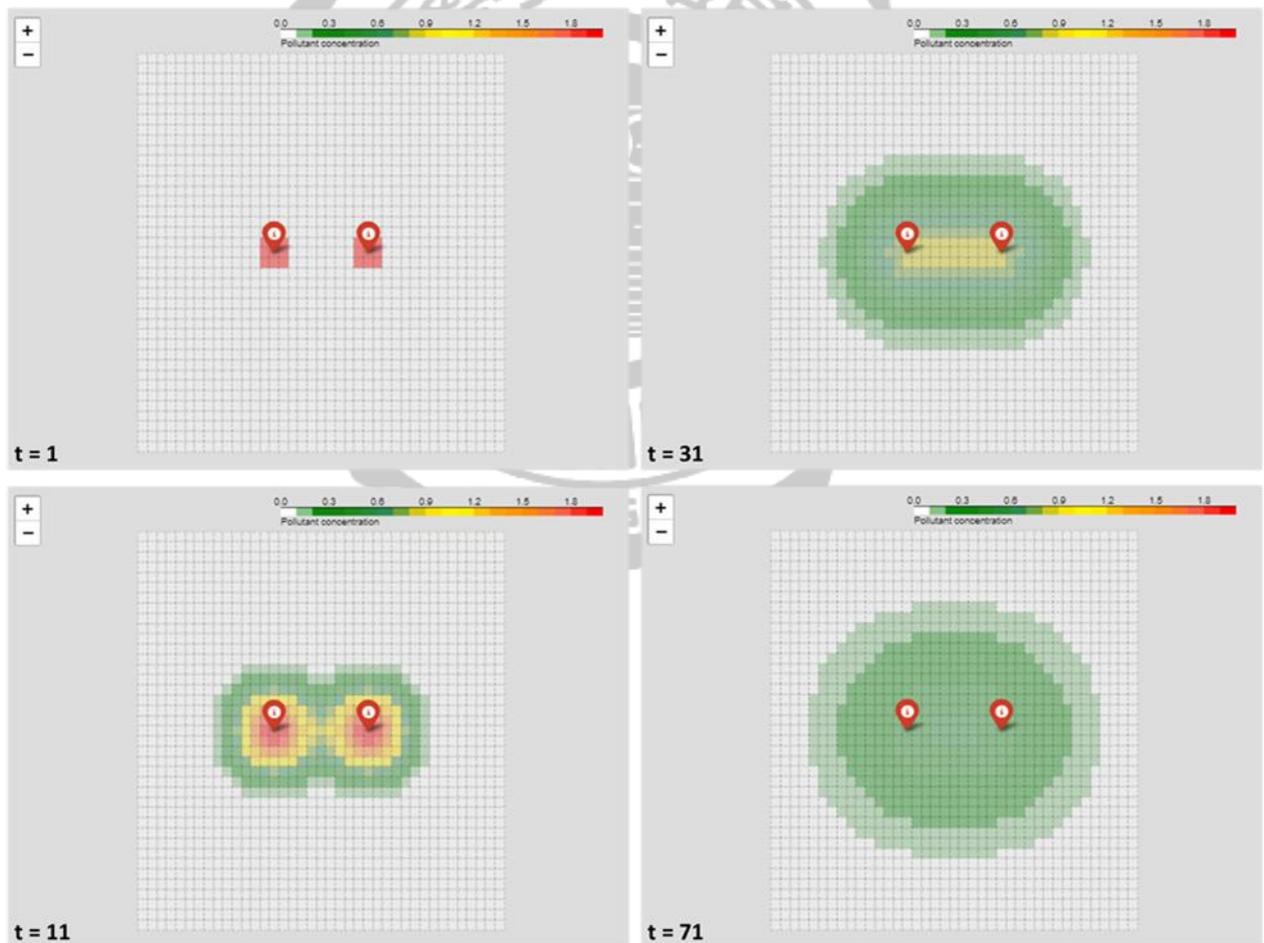


圖 4-4 情境 3-1 模擬結果

b.情境 3-2

和情境 3-1 相同的條件下，修改狀態的最大值(由 2 改為 1)，和情境 3-1 相比，在 $t=50$ 可以明顯的看到重疊部分濃度較高的地方，在 $t=100$ 時還是可以看到些微中間濃度較高的地方(圖 4-5)。

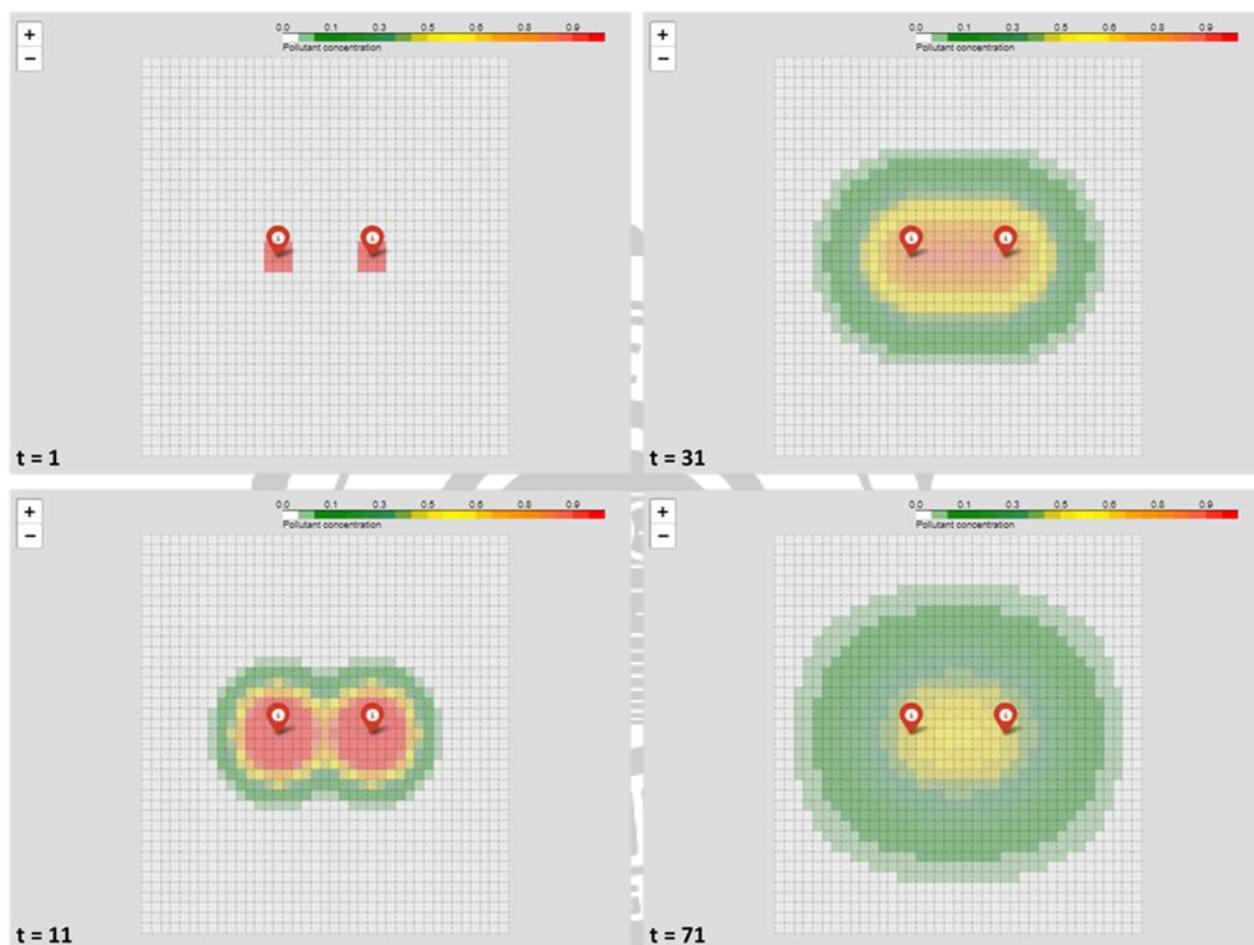


圖 4-5 情境 3-2 模擬結果

4. 情境 4 模擬結果

同時模擬不同的排放行為，右邊的污染源，從第三個小時才開始排放且持續兩小時，左邊的污染源於第四個小時停止排放，在 $t=41$ 時為排放中間重疊的一小時，此時兩邊的污染源是獨立的沒有任何重疊，左邊的污染源(污染源 1)已經停止排放後，隨著污染物的擴散兩邊的污染範圍逐漸靠近， $t=81$ 可以看到，兩邊的污染源已經有明顯的重疊。 $t=101$ 時兩邊污染源在中斷排放後，污染物團與先前排放的污染物團有明顯的分離，擴散到一定距離後，污染團雖然有重疊的部分，但高濃度部分還是分佈在兩側(圖 4-6)。



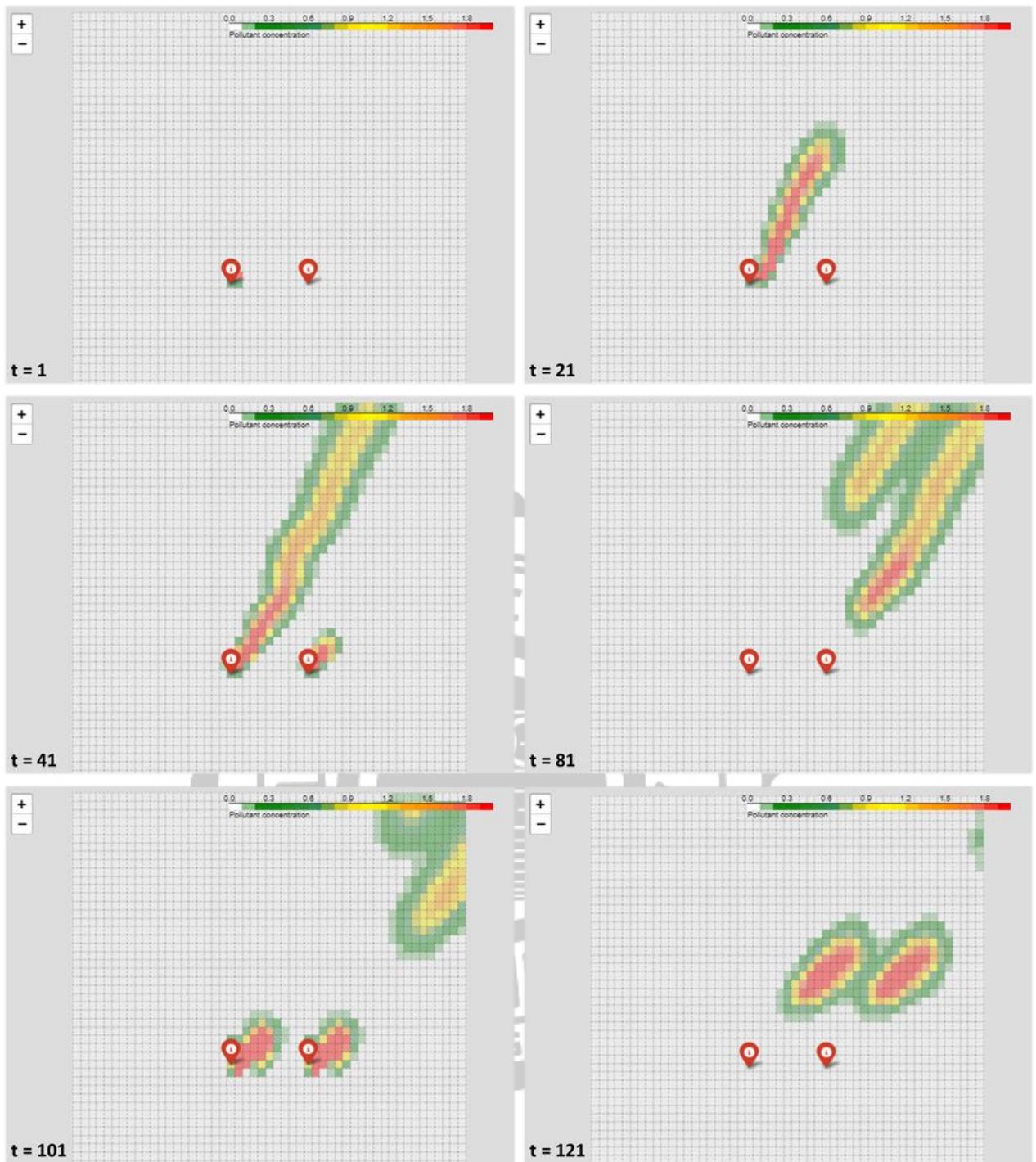


圖 4-6 情境 4 模擬結果

5. 情境 5 模擬結果

延伸情境 4 的模擬，在中間新增了一點污染源 3，由圖 4-7 t=11 可以看到，初始只有污染源 1 和污染源 3 有排放，兩者排放的污染物因風向的關係很快就重疊在一起，到 t=30 時，污染物擴散的距離已經變大，但中心的濃度並沒有看出明顯的降低，但只有排放一個小時，可以看到擴散濃度出現斷層。

因為風的影響交替出現，可以看到在中間交替的時間(t=57、t=58)，污染物沒有明顯的移動，但低濃度的範圍有擴大的現象(圖 4-7)。



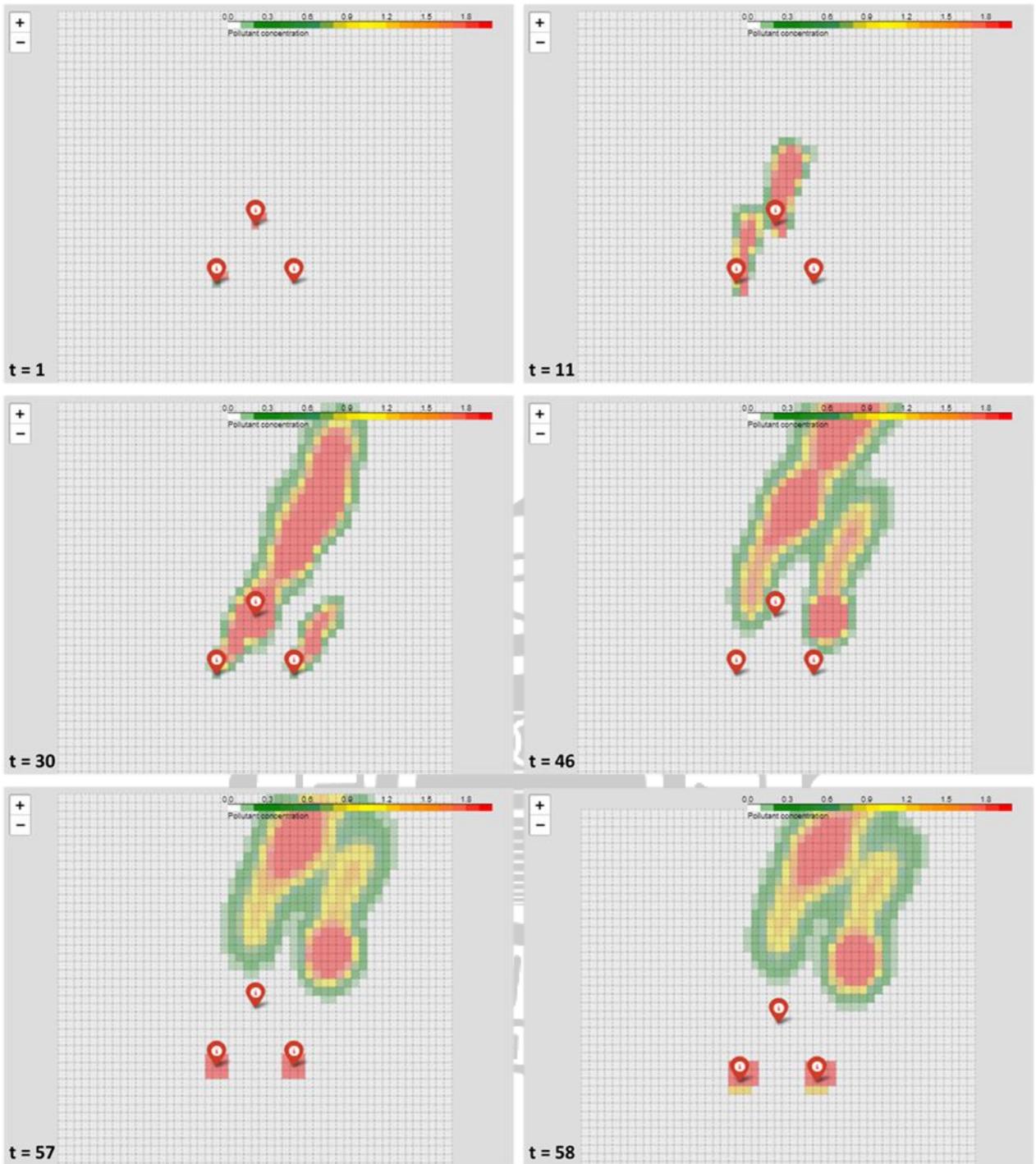


圖 4-7 情境 5 模擬結果

第五章 結論與建議

擴散現象為一個複雜的過程，本研究以細胞自動機為基礎建立空氣擴散模擬模型，以不同假設條件模擬污染物在空間中的擴散，獲得以下結論：

5.1 結論

1. 模型可以模擬無風時空氣污染物在中間中的擴散，加入風的影響後，風向跟比重會影響污染擴散的方向極影響範圍，可以調整風向的權重，做不同情況下的情境模擬。
2. 風速較大的時候污染物的中心濃度較低，且擴散距離較遠；風速較小時污染物的中心濃度較高，且擴散距離較近。
3. 修改狀態尺度會影響可視化結果。
4. 可以依照不同情況，同時模擬多筆污染排放和多種排放行為。

5.2 建議

1. 模擬空間的大小會影響本研究設定之網格數量，用此模擬來判讀污染影響標的時，則會因網格設定大小不同，而有不同的誤差。大網格對污染標的的判斷誤差較大，但網格切割縮小時會增加模型的運算速度的時間。建議依照不同的考量因素來決定合適的網格設置。
2. 本研究之模型未對風場進行實測，模擬的結果如能與實際風場測量結果進行比對、校正，進行模型運算的參數修正，應可能得到與實際擴散情況更為相符的結果。

3. 本研究之模型假設為地型一致，但實際上污染的擴散除了受到風速風向的影響之外，也會受到地形或是建築物的影響，若能加入可以將地形或建築物對風場的影響的數值模擬模式，再結合細胞演化的規則及狀態的設置，應可提升模式的準確性。



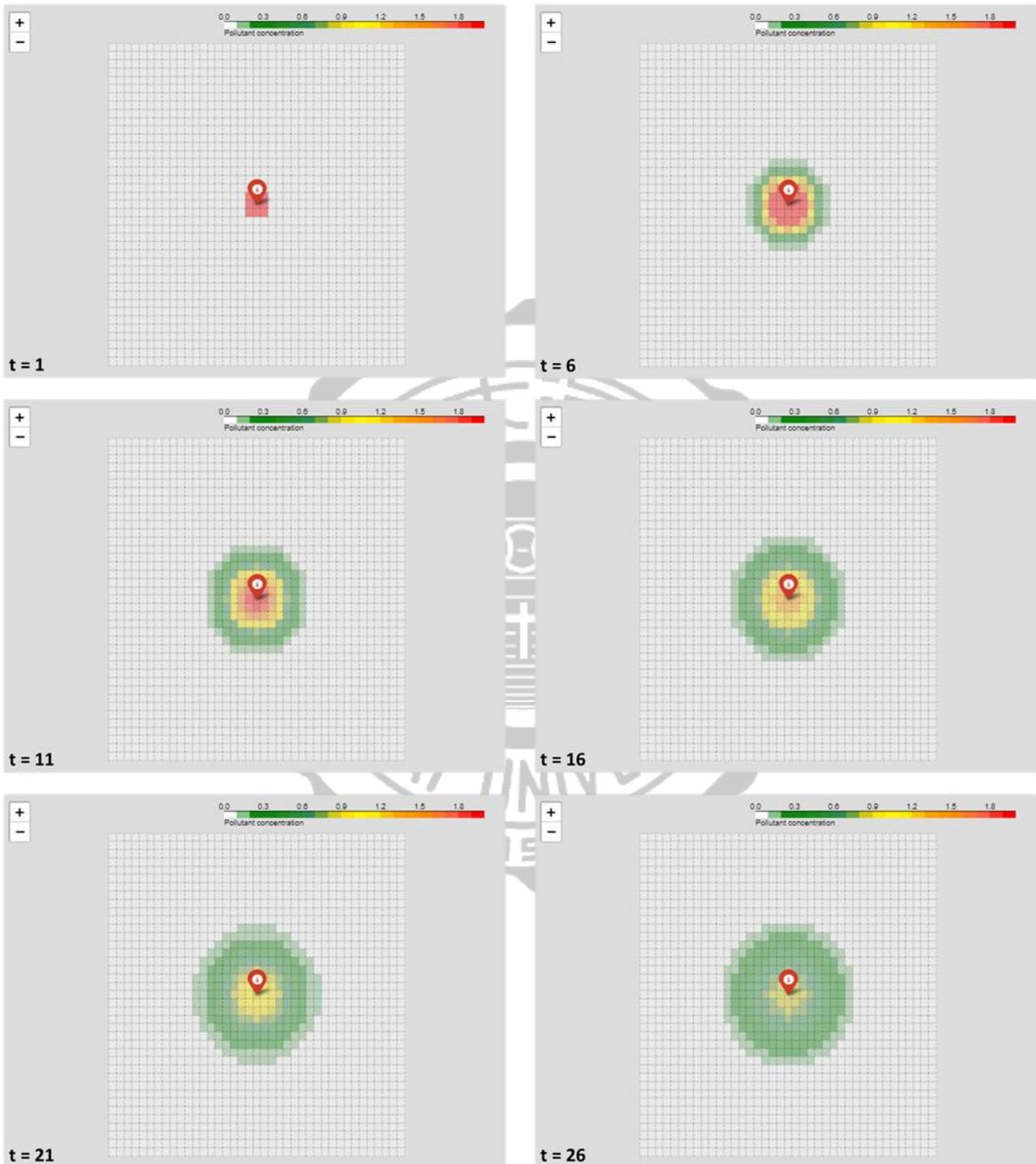
參考文獻

- Amorim JH, Rodrigues V, Tavares R, Valente J, Borrego C. (2013). CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion. *Science of The Total Environment* **461-462**,541-551.
- Bouaine A, Rachik M. (2018). Modeling the impact of immigration and climatic conditions on the epidemic spreading based on cellular automata approach. *Ecological Informatics* **46**,36-44.
- Bromberg PA, Koren HS. (1995). Ozone-induced human respiratory dysfunction and disease. *Toxicology Letters* **82-83**,307-316.
- Cannas SA, Marco DE, Páez SA. (2003). Modelling biological invasions: species traits, species interactions, and habitat heterogeneity. *Mathematical Biosciences* **183**,93-110.
- Dewdney AK. (2008). Cellular Automata. In *Encyclopedia of Ecology*. Jørgensen SE, Fath BD, eds. (Academic Press, Oxford). pp 541-550.
- Feng S, Ding N, Chen T, Zhang H. (2013). Simulation of pedestrian flow based on cellular automata: A case of pedestrian crossing street at section in China. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **392**,2847-2859.
- Hallberg H, Wallin M, Ristinmaa M. (2010). Simulation of discontinuous dynamic recrystallization in pure Cu using a probabilistic cellular automaton. *Computational Materials Science* **49**,25-34.
- Hernández Encinas L, Hoya White S, Martín del Rey A, Rodríguez Sánchez G. (2007). Modelling forest fire spread using hexagonal cellular automata. *Applied Mathematical Modelling* **31**,1213-1227.
- Holmes NS, Morawska L. (2006). A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment* **40**,5902-5928.
- Maté T, Guaita R, Pichiule M, Linares C, Díaz J. (2010). Short-term effect of fine particulate matter (PM_{2.5}) on daily mortality due to diseases of the circulatory system in Madrid (Spain). *Science of The Total Environment* **408**,5750-5757.
- Perez L, Dragicevic S. (2012). Landscape-level simulation of forest insect disturbance: Coupling swarm intelligent agents with GIS-based cellular automata model. *Ecological Modelling* **231**,53-64.
- Sirakoulis GC, Karafyllidis I, Mizas C, Mardiris V, Thanailakis A, Tsalides P. (2003). A cellular automaton model for the study of DNA sequence evolution. *Computers in Biology and Medicine* **33**,439-453.
- Stohl A. (1998). Computation, accuracy and applications of trajectories—A review and bibliography. *Atmospheric Environment* **32**,947-966.
- Strong J, Whyatt JD, Hewitt CN, Derwent RG. (2010). Development and application of a Lagrangian model to determine the origins of ozone episodes in the UK. *Atmospheric Environment* **44**,631-641.

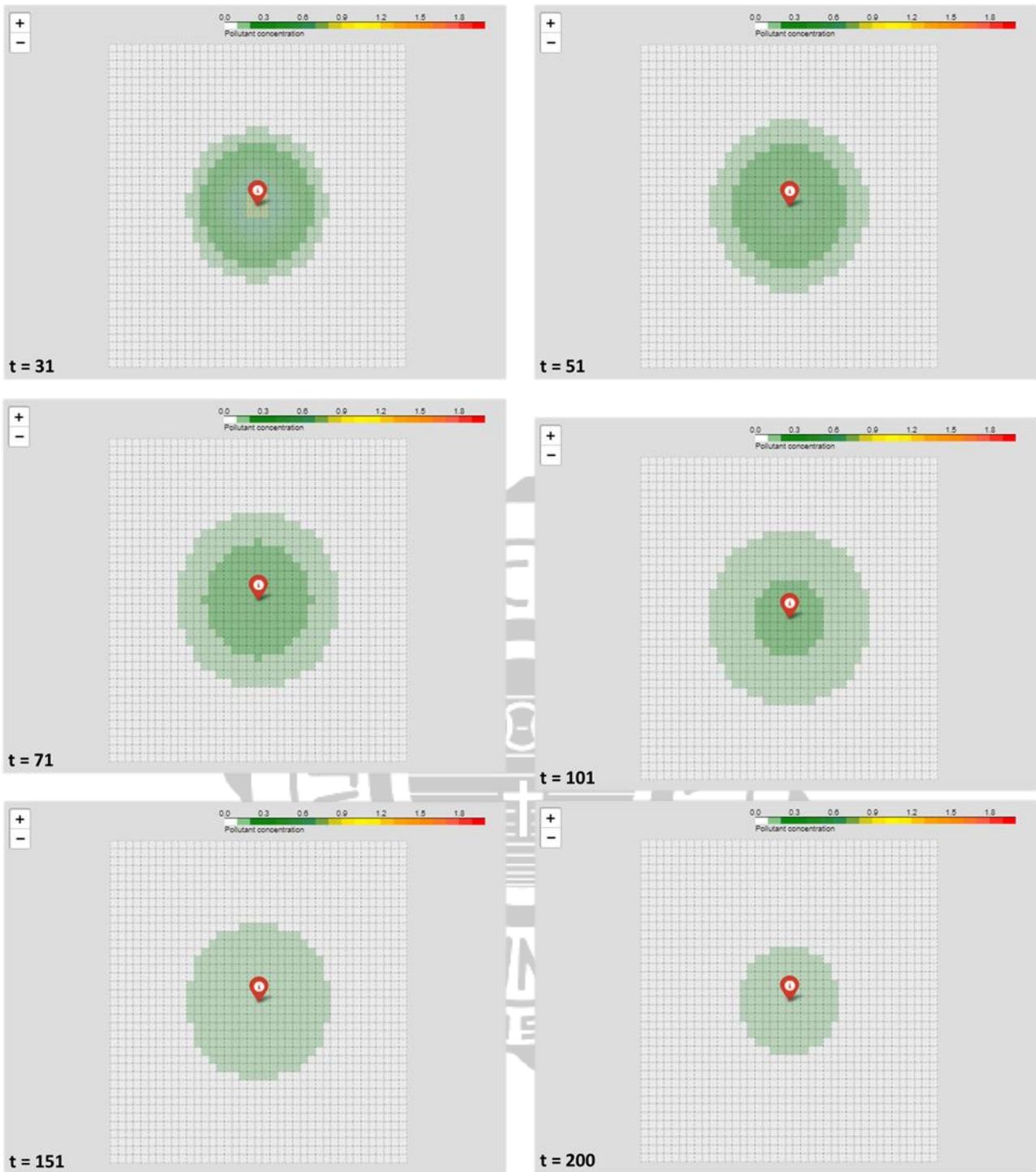
- Vallero D. (2014a). Chapter 3 - The Science of Air Pollution. In *Fundamentals of Air Pollution (Fifth Edition)*. Vallero D, ed. (Academic Press, Boston). pp 43-81.
- Vallero D. (2014b). Chapter 27 - Modeling Applications. In *Fundamentals of Air Pollution (Fifth Edition)*. Vallero D, ed. (Academic Press, Boston). pp 683-753.
- Vardoulakis S, Fisher BEA, Pericleous K, Gonzalez-Flesca N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment* **37**,155-182.
- Wen D, Lin JC, Millet DB, Stein AF, Draxler RR. (2012). A backward-time stochastic Lagrangian air quality model. *Atmospheric Environment* **54**,373-386.
- Zheng Z, Huang W, Li S, Zeng Y. (2017). Forest fire spread simulating model using cellular automaton with extreme learning machine. *Ecological Modelling* **348**,33-43.
- Zhong J, Cai X-M, Bloss WJ. (2016). Modelling photochemical pollutants in a deep urban street canyon: Application of a coupled two-box model approximation. *Atmospheric Environment* **143**,86-107.
- 宋鴻均(2005)，三維細胞自動機之研究-以海洋油污染擴散為例，碩士論文，國立中山大學海洋環境及工程學系研究所。
- 林淑靜(2017)，製作二氧化鈦奈米線材料應用於二氧化氮氣體感測器，碩士論文，靜宜大學應用化學系。
- 紀宗廷(2011)，應用 GPS 探討空氣品質測站測值與周圍微環境空氣污染物濃度之相關性，碩士論文，輔仁大學公共衛生學系碩士班。
- 高苙凱(2013)，以大氣擴散模式探討半導體業排放對區域性之影響-以中科三期后里園區為例，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所。
- 陳芄妤(2012)，應用細胞自動機模擬大台北地區都市擴張，碩士論文，中國文化大學地學研究所地理組碩士班。
- 曾國書(2006)，屏東都會區粗細懸浮微粒特性之研究，碩士論文，國立屏東科技大學環境工程與科學系。
- 程學儒(2016)，雲嘉南地區空氣污染物對腦血管疾病住院風險影響之探討，碩士論文，國防醫學院公共衛生學研究所。
- 劉漢琪(2012)，AERMOD 與 ISCST3 應用於國內空氣污染物面源排放模擬之比較研究，碩士論文，國立臺北科技大學環境工程與管理研究所。

附錄

附圖一 情境 1 完整模擬結果



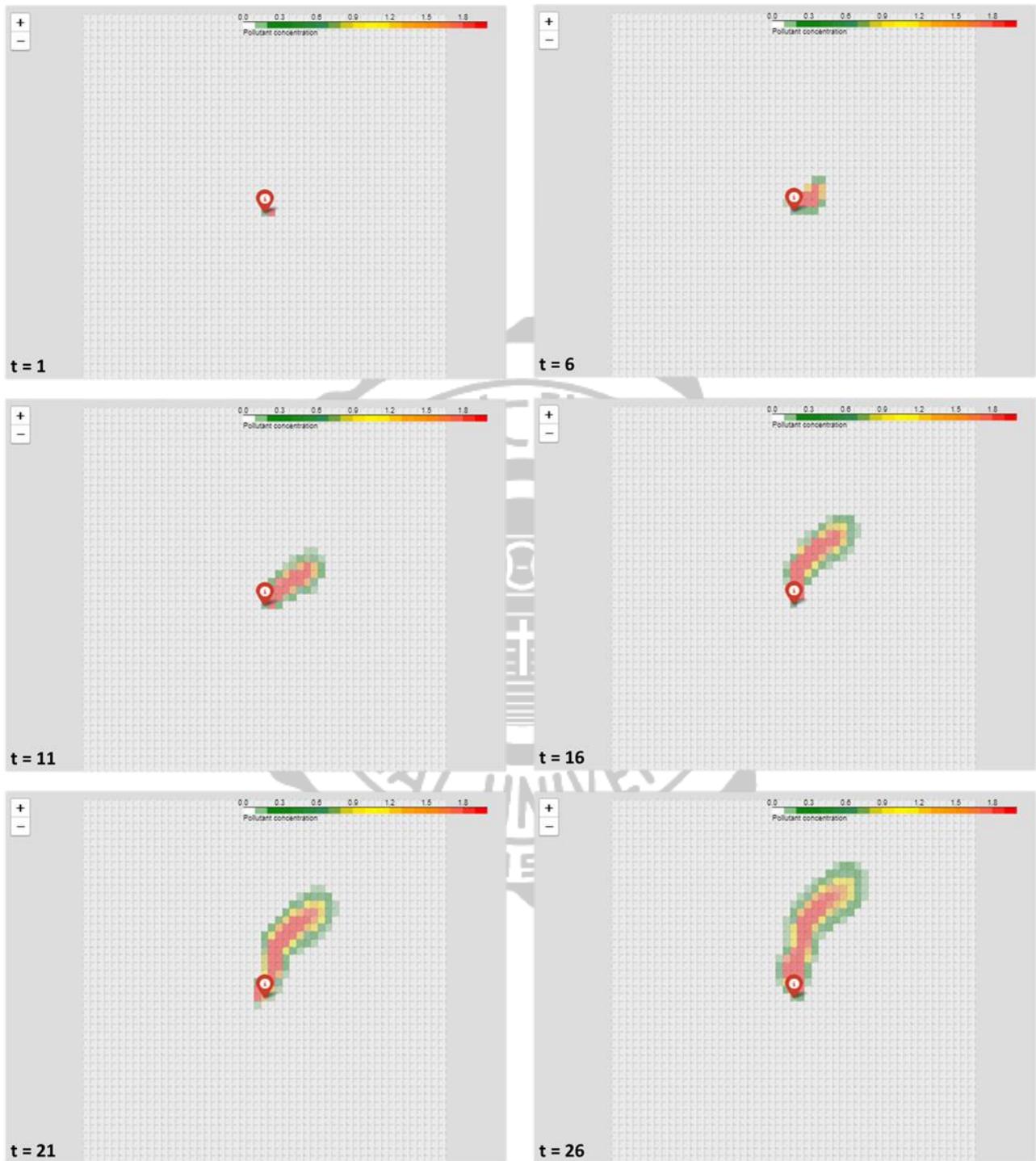
附圖 1-1 情境 1 完整模擬結果 (1/2)



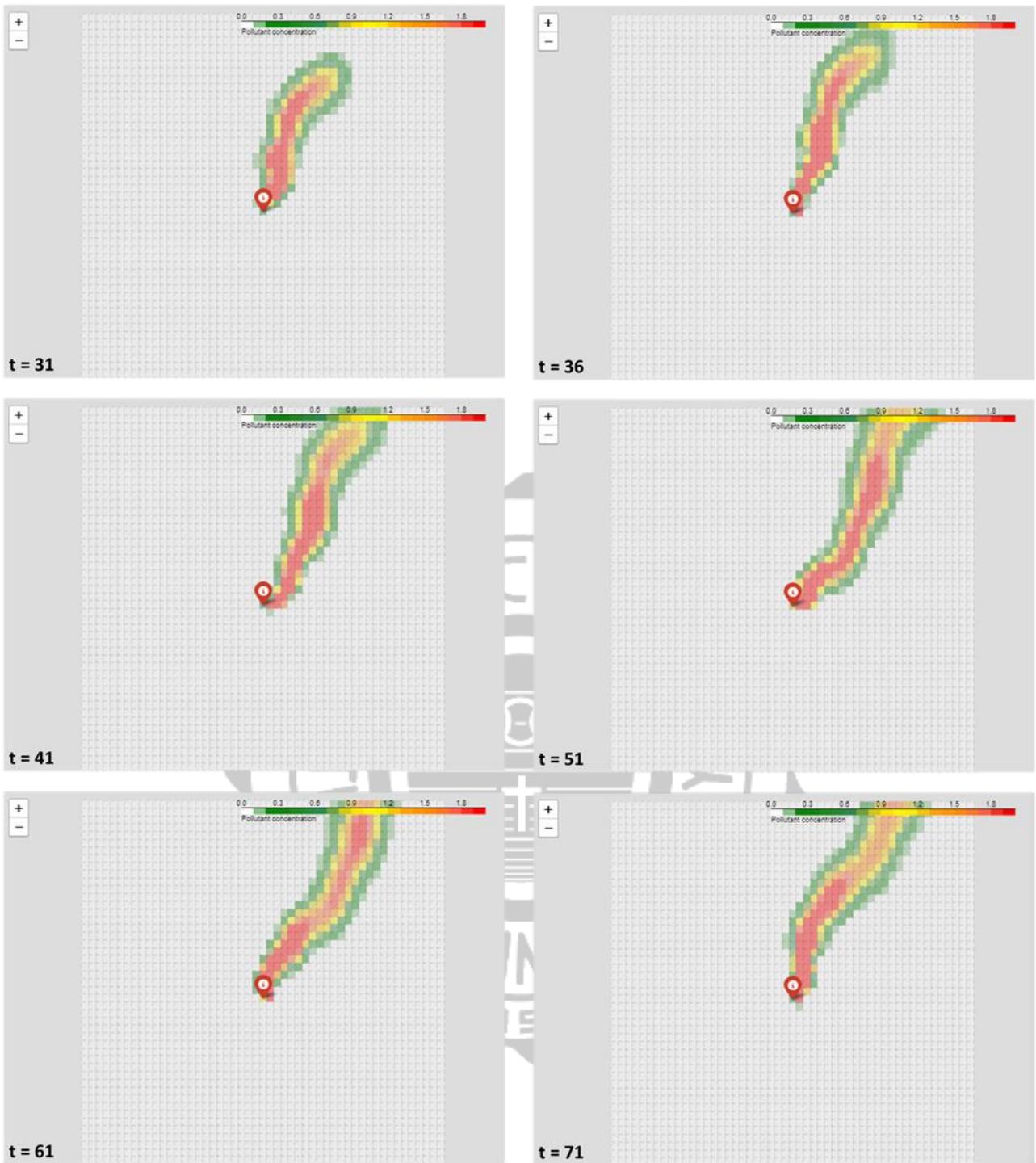
附圖 1-2 情境 1 完整模擬結果 (2/2)

附錄二 情境 2 完整模擬結果

a. 情境 2-1

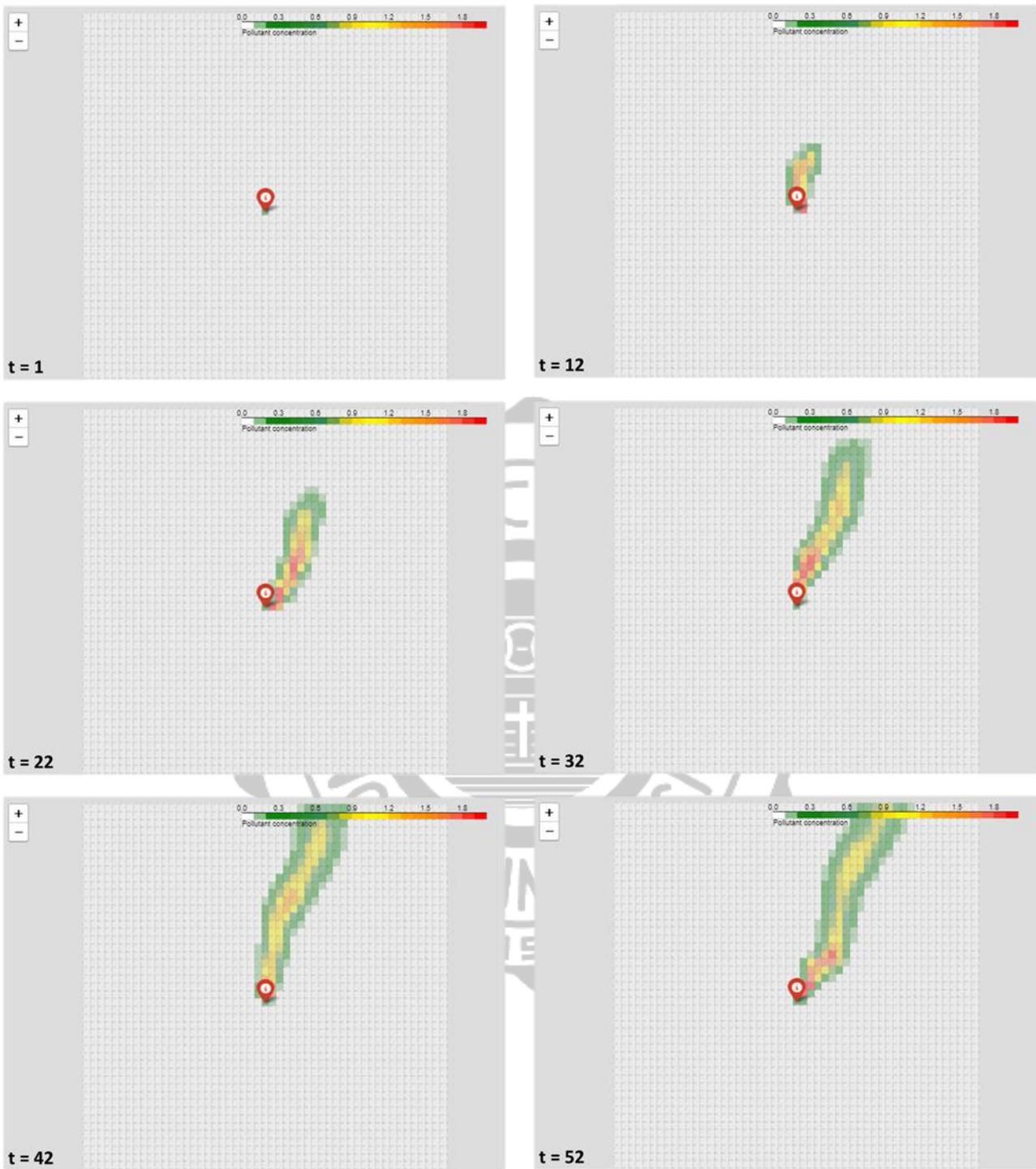


附圖 2-1 情境 2-1 完整模擬結果 (1/2)

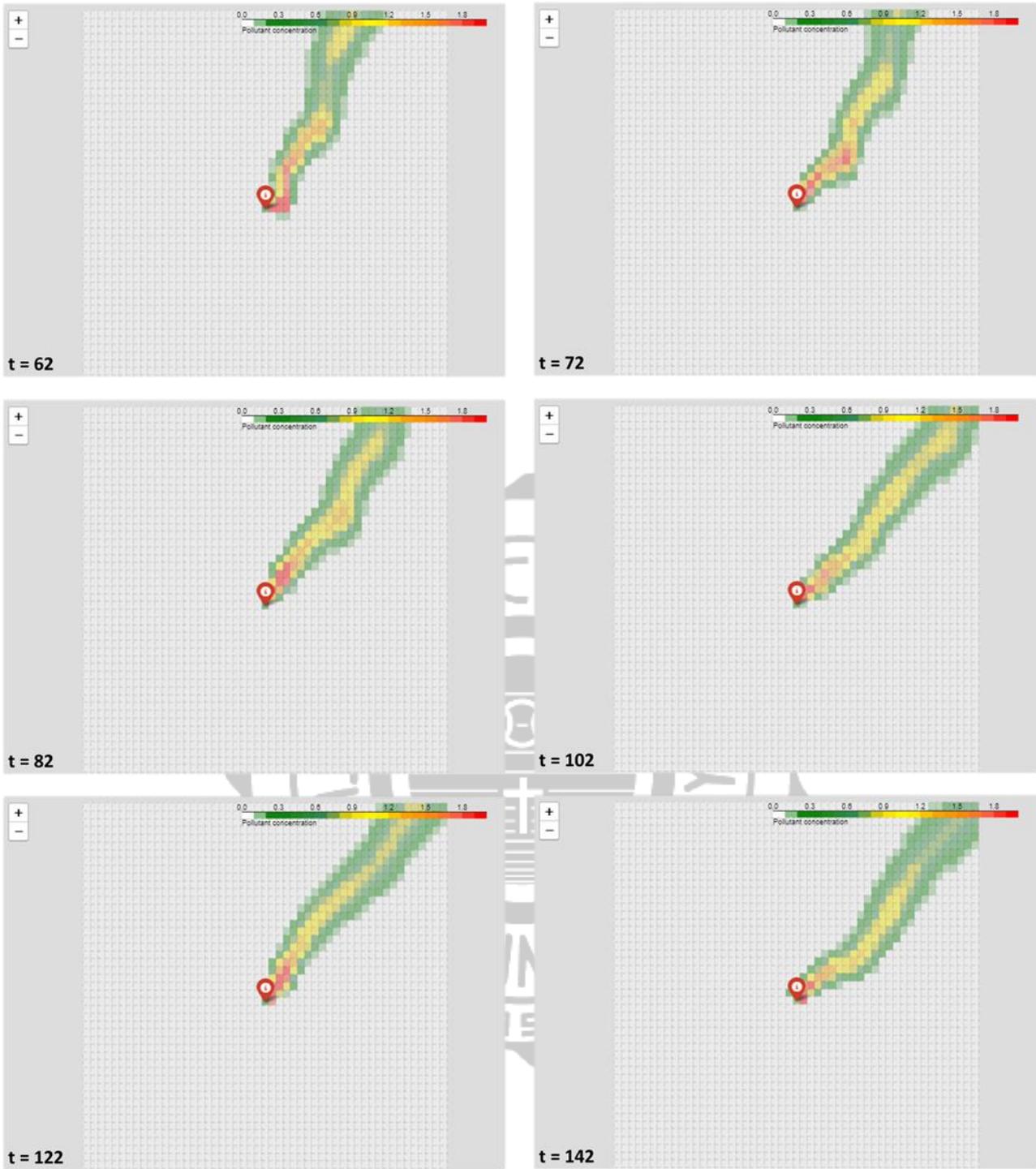


附圖 2-2 情境 2-1 完整模擬結果 (2/2)

b. 情境 2-2



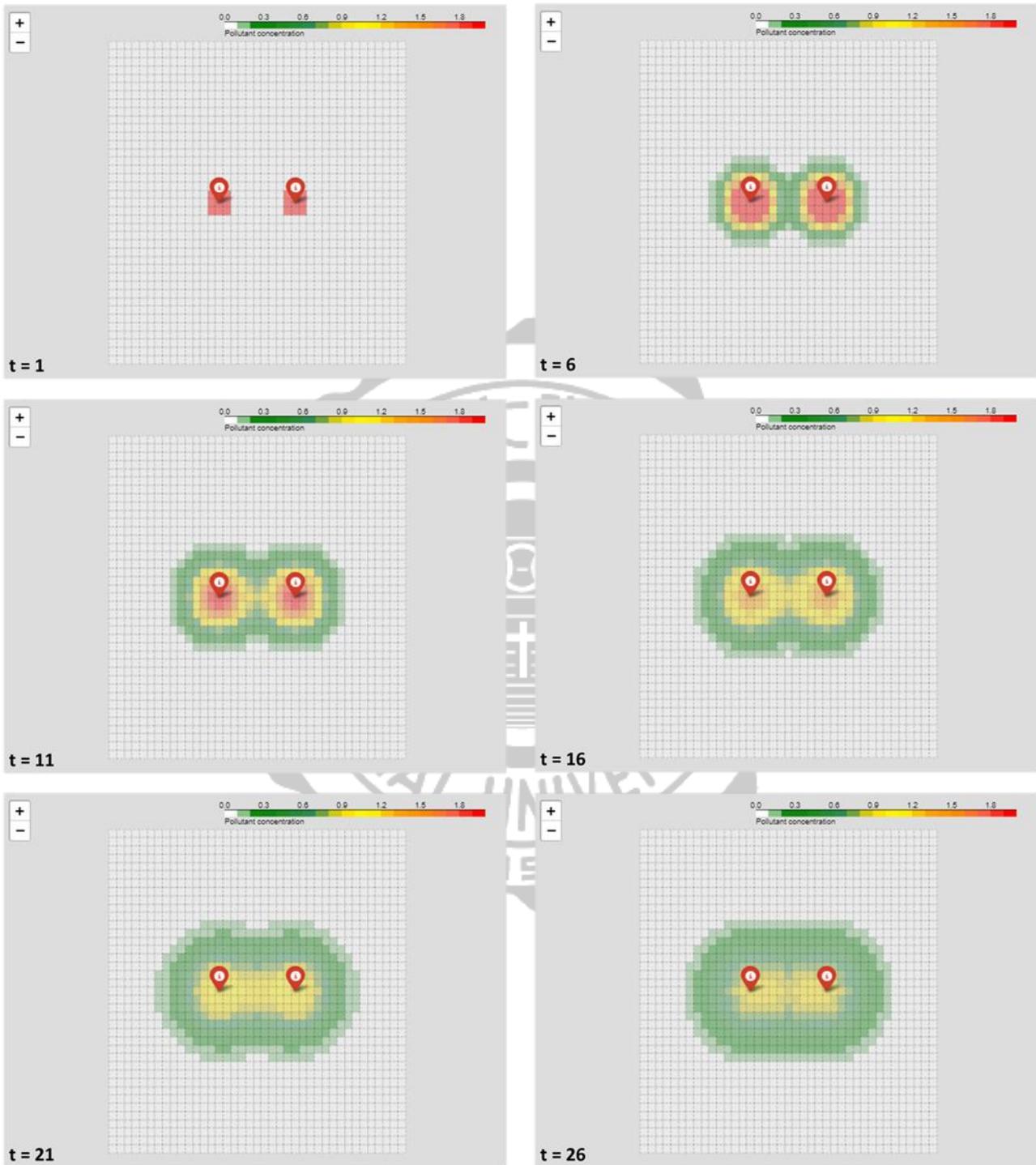
附圖 2-3 情境 2-2 完整模擬結果 (1/2)



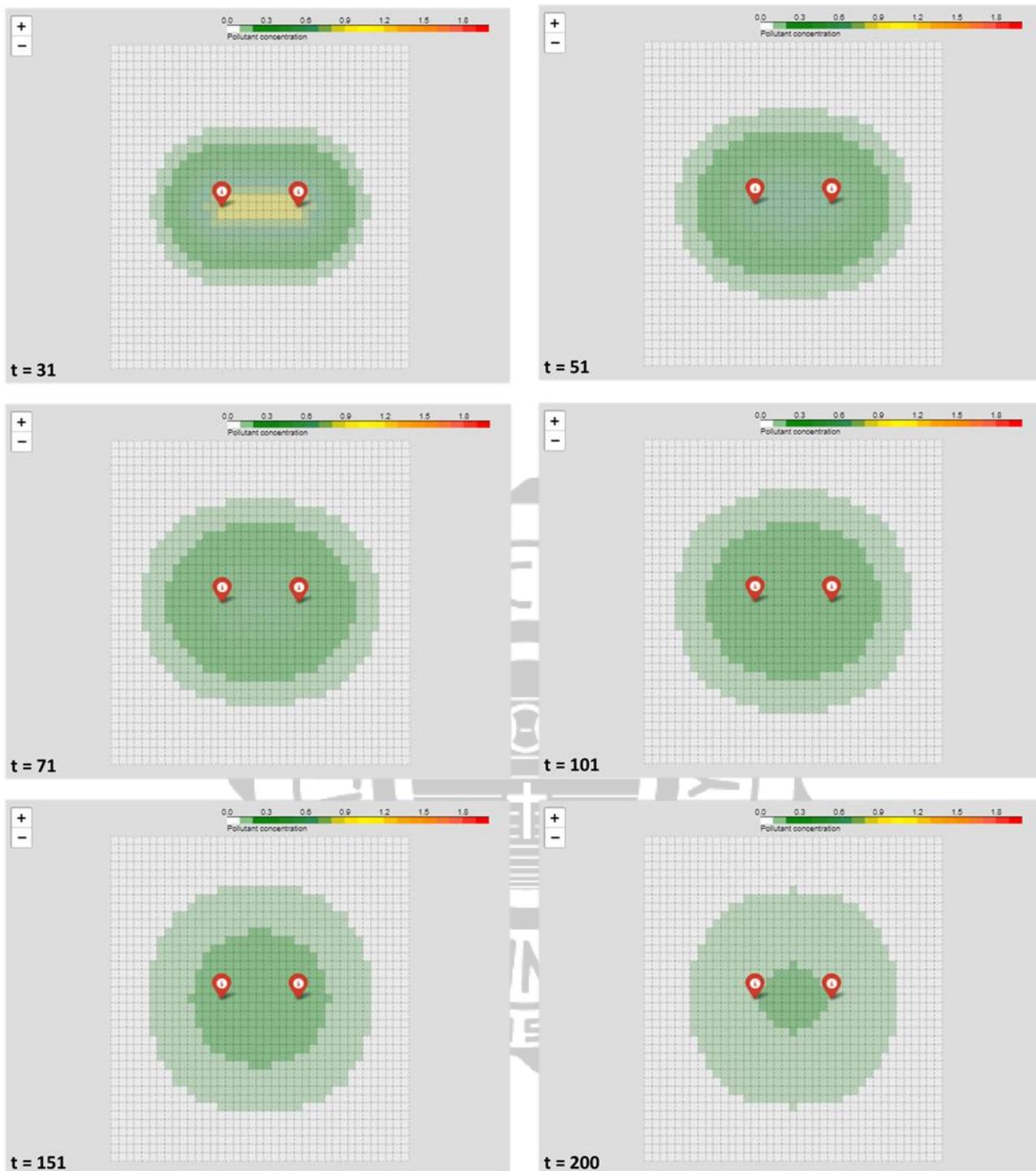
附圖 2-4 情境 2-2 完整模擬結果 (2/2)

附錄三 情境3 完整模擬結果

a. 情境3-1

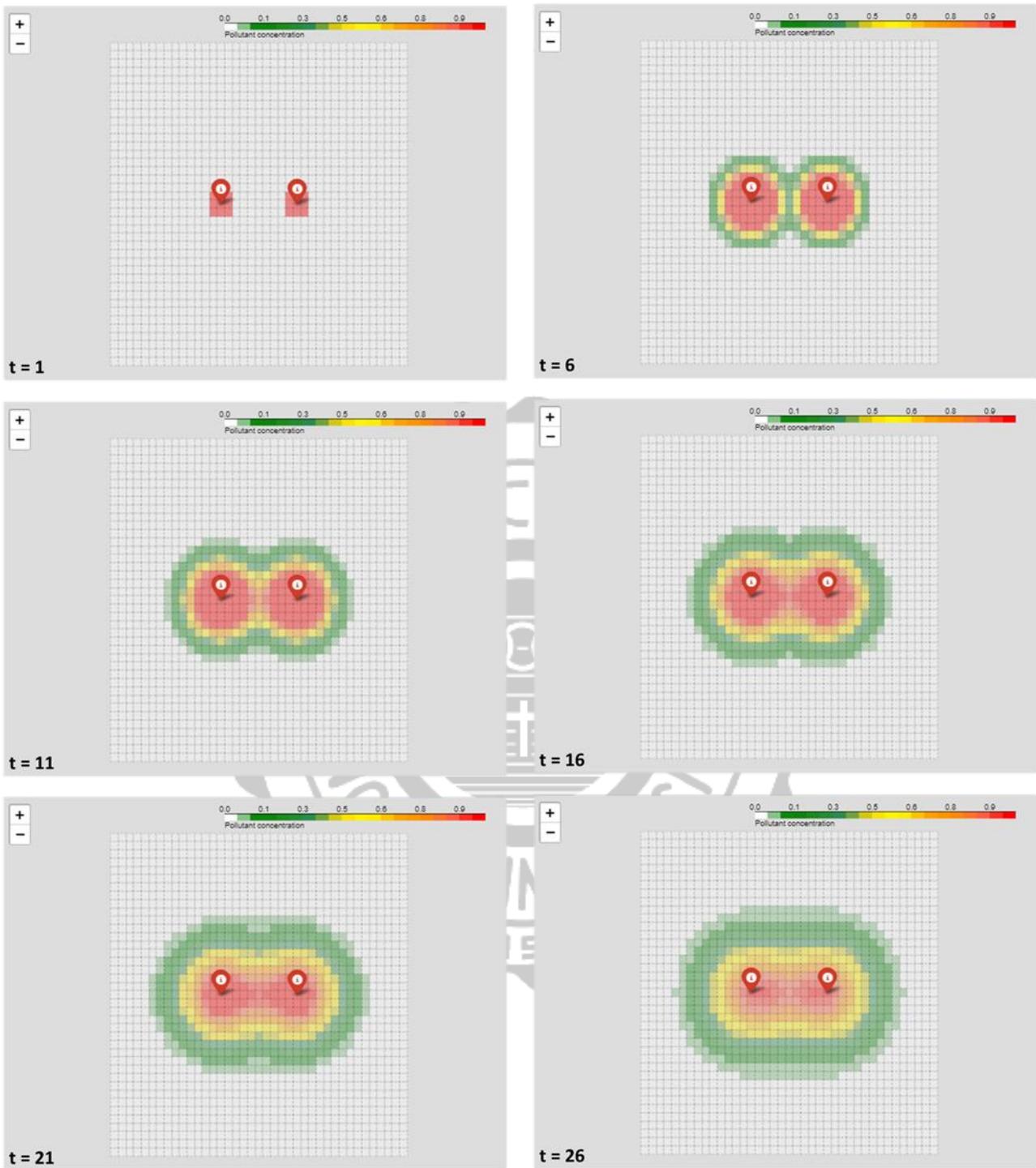


附圖 3-1 情境3-1 完整模擬結果 (1/2)

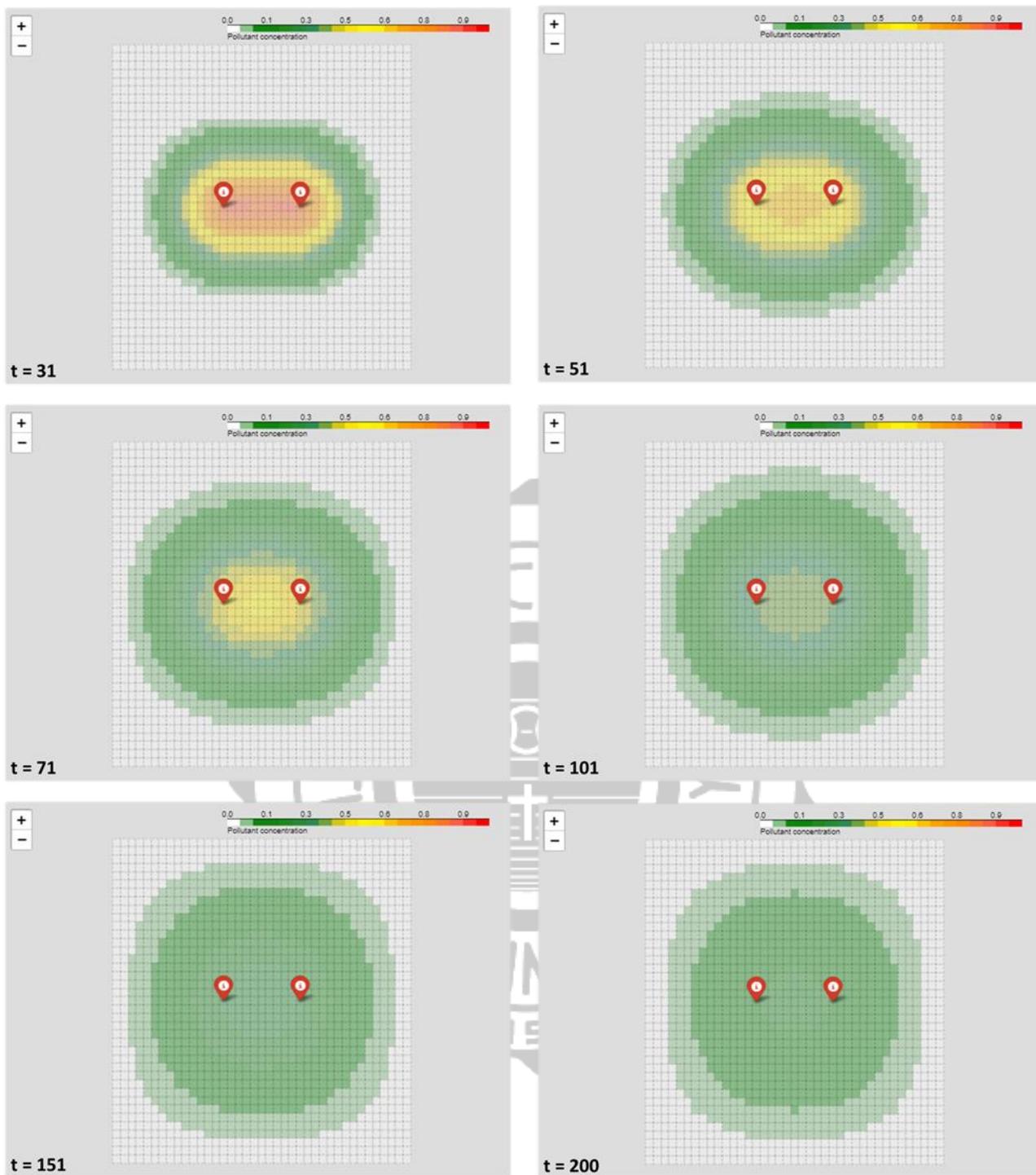


附圖 3-2 情境 3-1 完整模擬結果 (2/2)

b. 情境 3-2

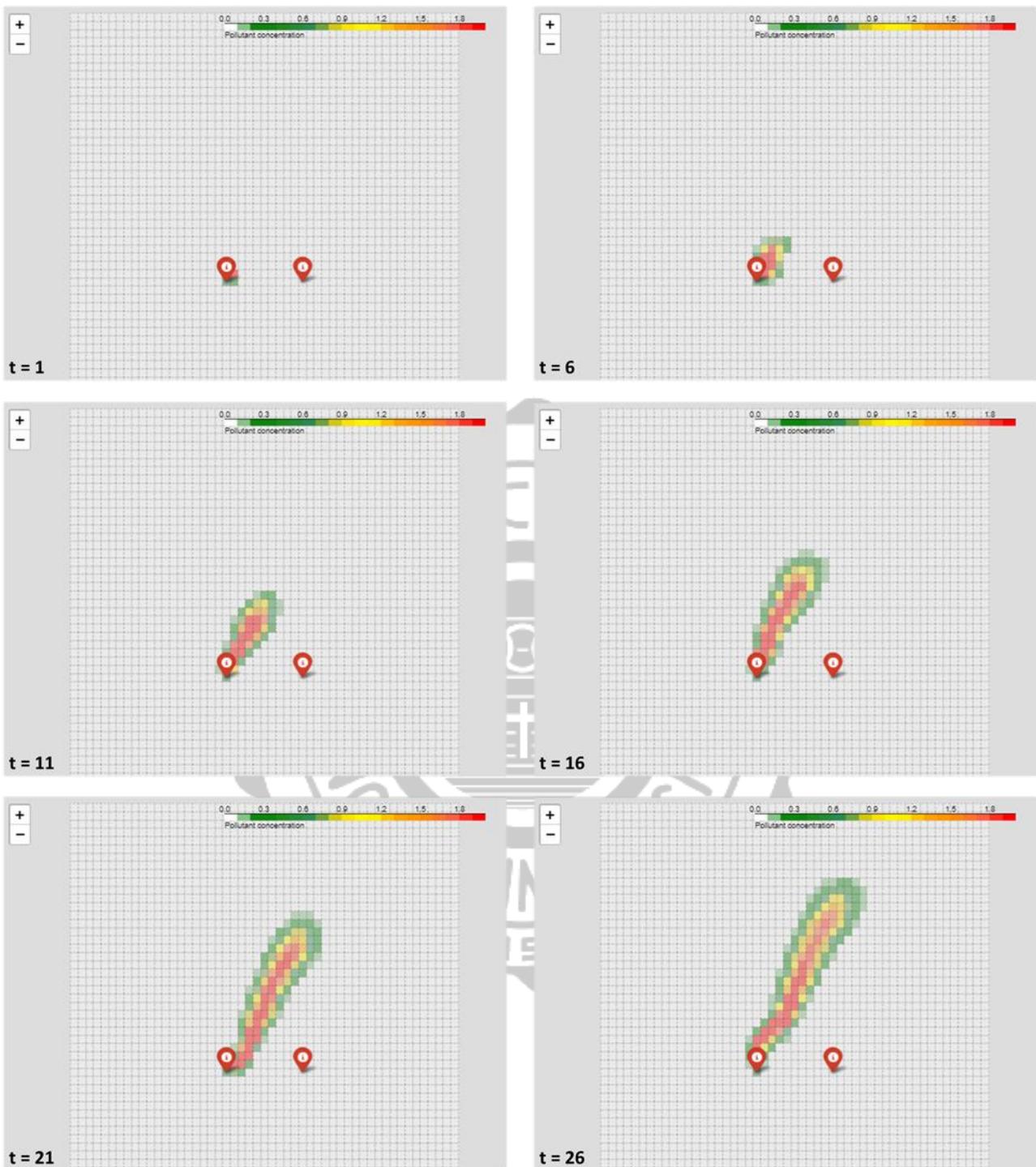


附圖 3-3 情境 3-2 完整模擬結果 (1/2)

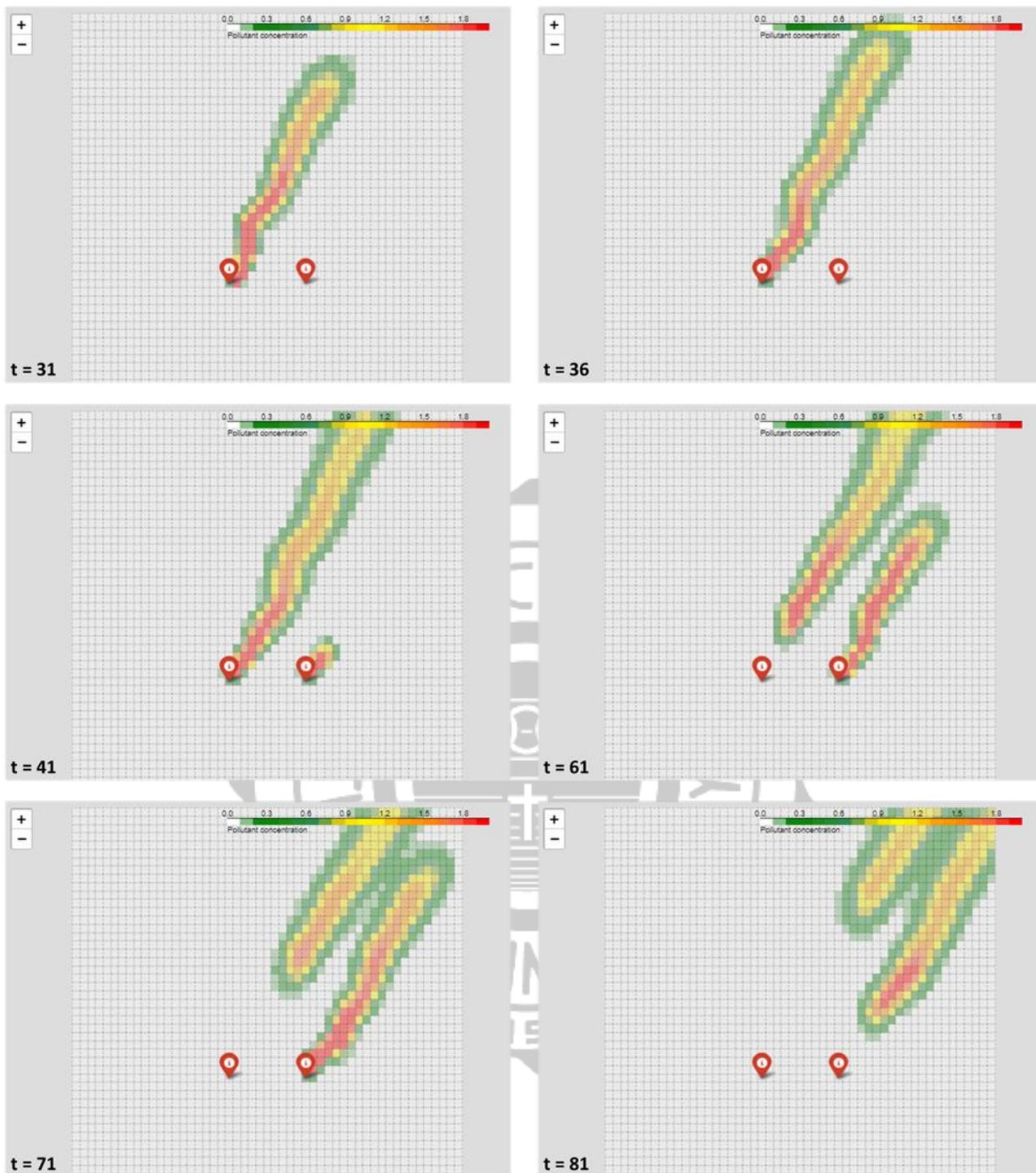


附圖 3-4 情境 3-4 完整模擬結果 (2/2)

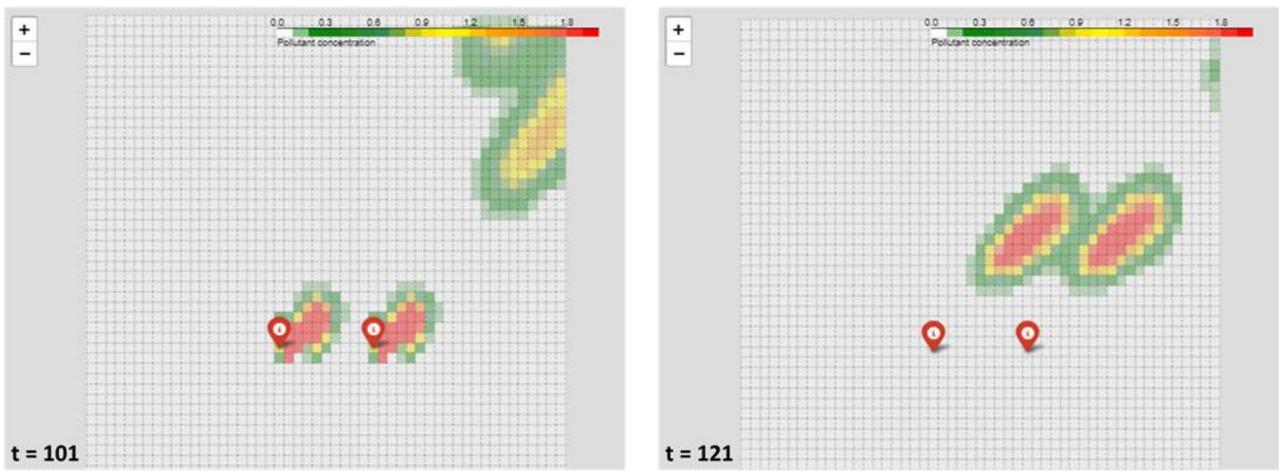
附錄四 情境 4 完整模擬結果



附圖 4-1 情境 4 完整模擬結果 (1/3)



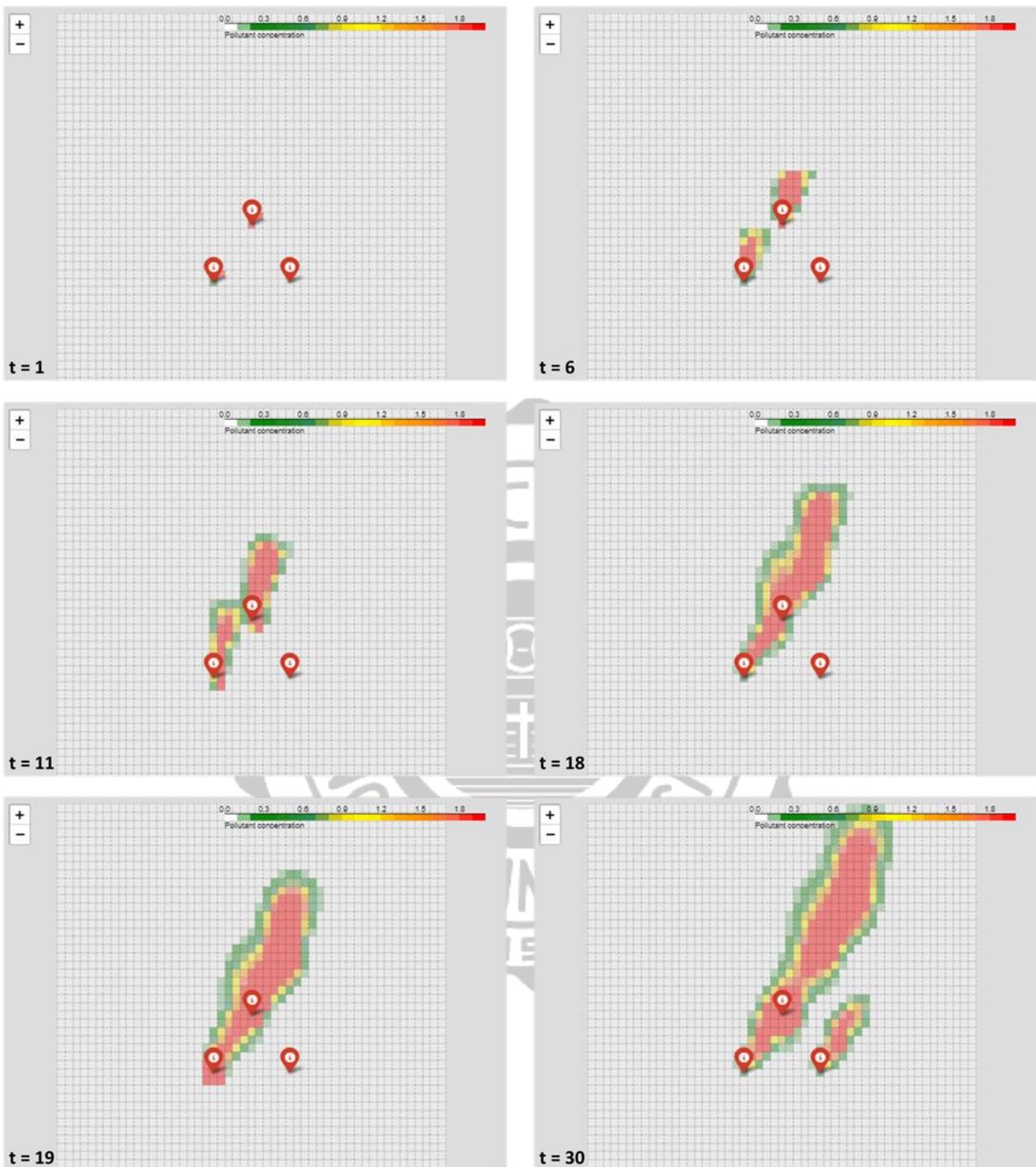
附圖 4-2 情境 4 完整模擬結果 (2/3)



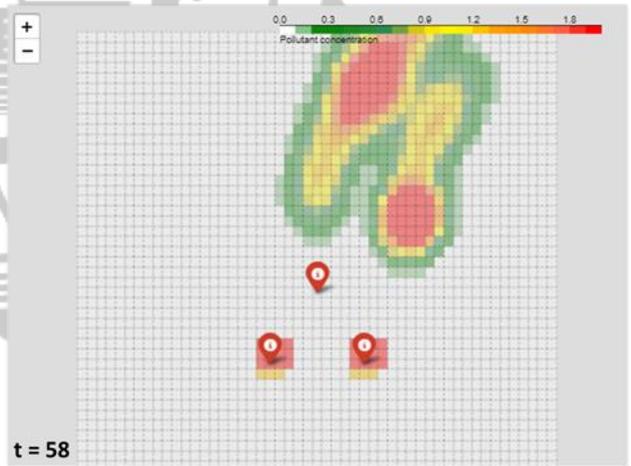
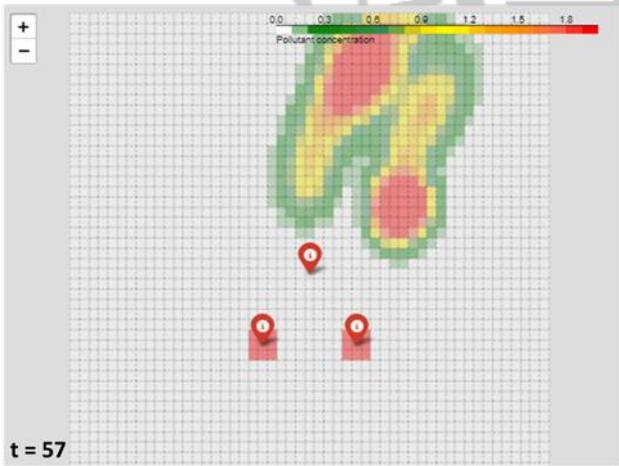
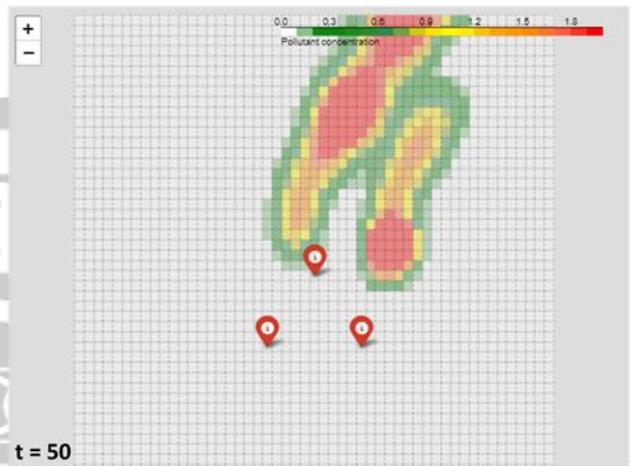
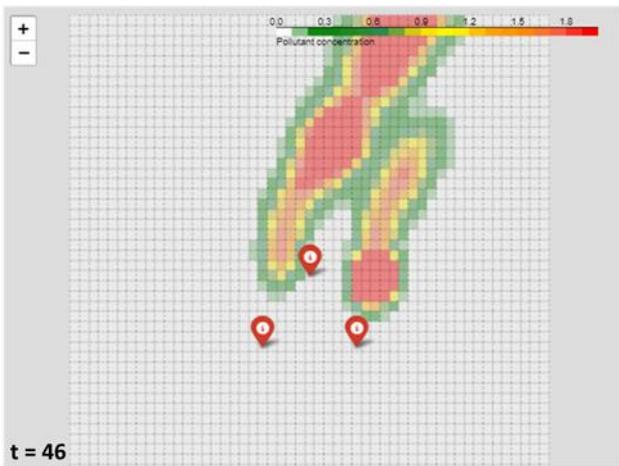
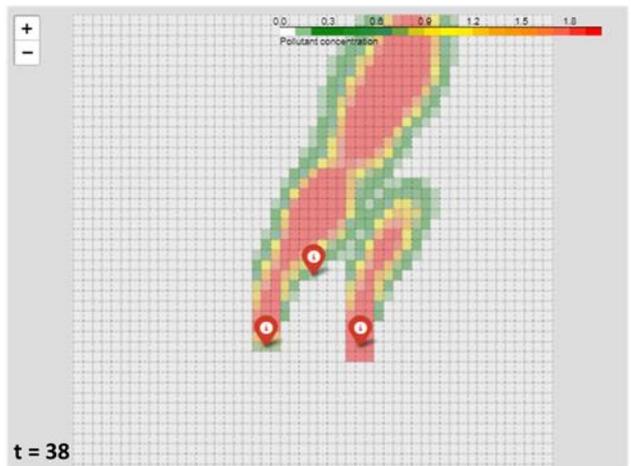
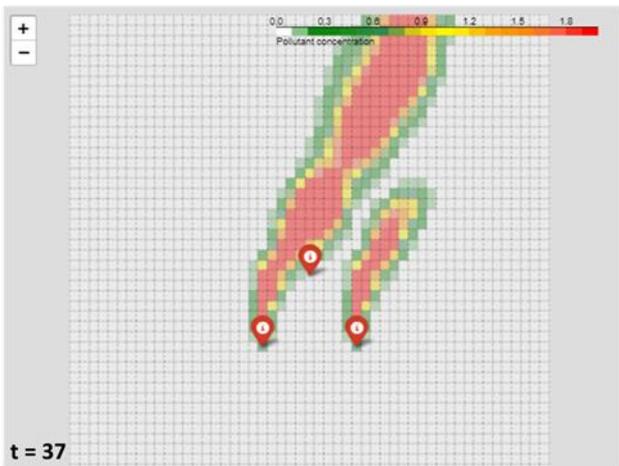
附圖 4-2 情境 4 完整模擬結果 (3/3)



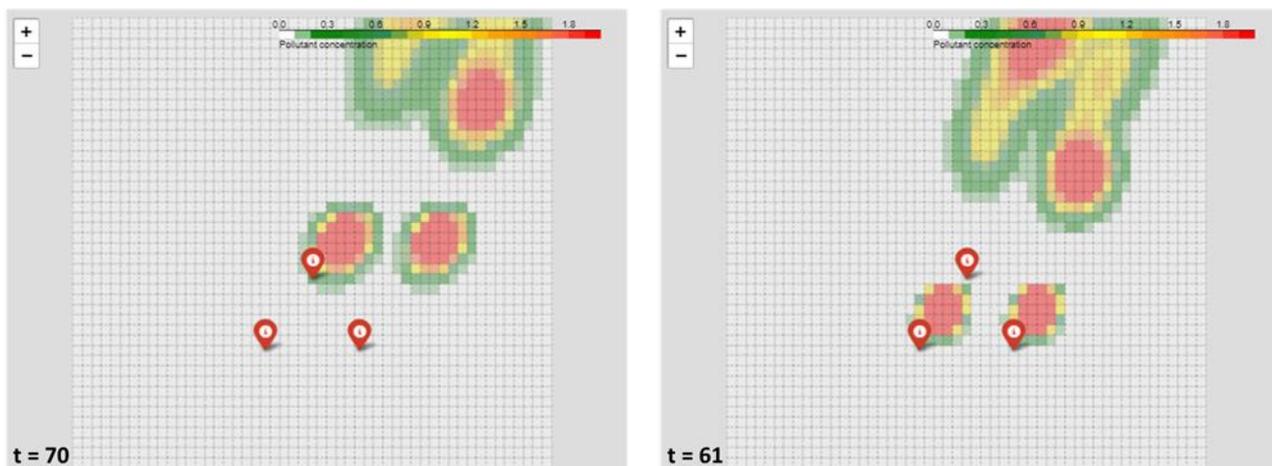
附錄五 情境 5 完整模擬結果



附圖 5-1 情境 5 完整模擬結果 (1/3)



附圖 5-1 情境 5 完整模擬結果 (2/3)



附圖 5-1 情境 5 完整模擬結果 (2/3)

