

協定: CE 27/2007 (EP) 升級區域空氣質素模擬系統
香港大氣污染物擴散模型(PATH)——可行性研究



行政摘要

協定: CE 27/2007 (EP) 升級區域空氣質素模擬系統香港大氣 污染物擴散模型(PATH)——可行性研究

Prepared for:
香港環境保護署

編纂:
英環香港有限公司

日期:
二零一一年十一月

項目編號:
HK1100066

報告編號:
R1810_V2.2

Table of Contents

1. 引言.....	1
2. 舊有的模擬系統與新的升級模擬系統.....	2
3. 模擬範圍與網格結構.....	4
4. 模擬氣象事件.....	7
5. 系統的組成部分.....	8
5.1 排放模型軟件.....	8
5.2 氣象模擬系統.....	9
5.3 化學物轉化模型.....	9
5.4 交通數據編輯與模擬.....	10
5.5 數據分析與視覺化軟件.....	10
6. 系統優化與論證.....	11
7. 應用檢討.....	11
8. 總結.....	11

1. 引言

為了應付香港所面臨的複雜空氣質量數問題，香港環境保護署(EPD)於 2000 年 (根據合約 CE46/95 號) 以當時已開發的電腦模擬系統技術，開發了一個綜合空氣質量數電腦模擬系統，名為 PATH (Pollutants in the Atmosphere and Their Transport over Hong Kong 香港大氣污染物擴散模型)。

根據環境保護署最近的研究指出，現有的電腦模擬系統需要進行升級，從而更深入地了解並解決某些香港與珠江三角洲地區的空气質量數問題。系統的升級包括對氣象模型，污染物排放模型，污染物擴散模型。本研究的目的包括：

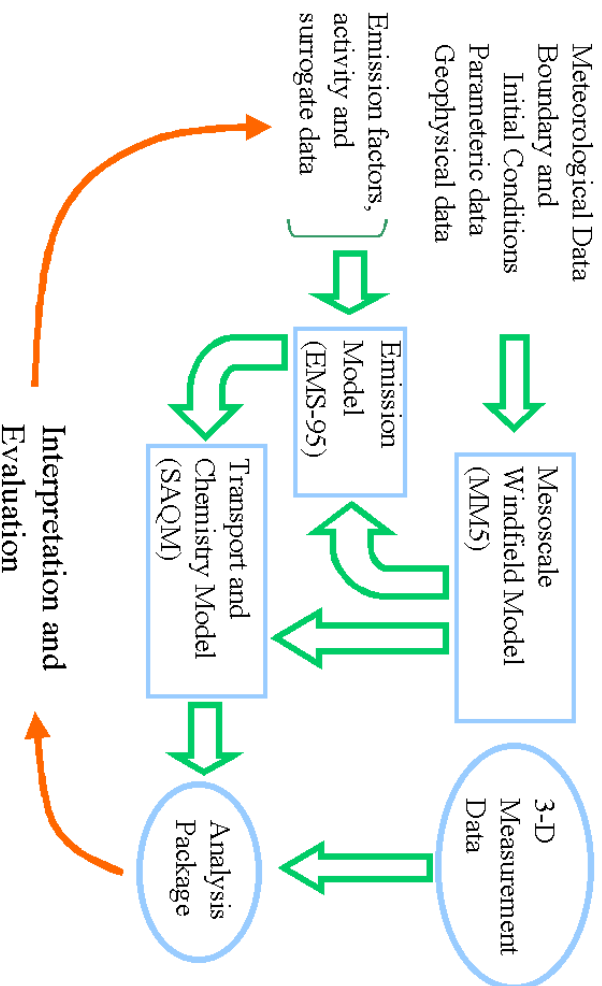
- 以市面最先進的軟件取代 PATH 電腦模擬系統的現有組件執行系統主要功能，並增加系統的功能。
- 釐訂系統進行每日空氣質量數預測時對電腦硬體的需求。
- 進行模擬系統敏感度測試，以決定每個子系統的最佳配置。
- 復審系統的性能，並提供系統對應未來新技術的發展方向。

合約並特別要求下列工作：

- 檢視有關污染物排放模型，氣象模型與區域性空氣質量數模型的最新科技與技術發展。
- 審視市場上技術最新的空氣質量數模型軟件。
- 審視現有的香港大氣污染物擴散模型(PATH)的系統結構與操作。
- 匯編香港與廣東省的交通數據，用於對車輛污染物排放的估量。
- 挑選市場上技術最新的軟件以取代現有的香港大氣污染物擴散模型(PATH)的核心組件。
- 裝置挑選的軟件於現有的香港大氣污染物擴散模型系統。
- 找出對已升級的系統模擬結果有明確影響的因素。
- 評估升級系統的性能。
- 對政府指派的人員提供系統操作裝配與操作的培訓，和
- 為系統對應未來新技術的後續發展作出見意。

2. 舊有的模擬系統與新的升級模擬系統

一套為針對空氣污染問題而建立的數值模型系統，必須能夠處理以下三種大氣中的物理生化過程，分別是氣象運轉、污染物排放模式和化學物轉化。圖一為舊有香港大氣污染物擴散模型(PATH)所採用的發展架構簡要圖解。

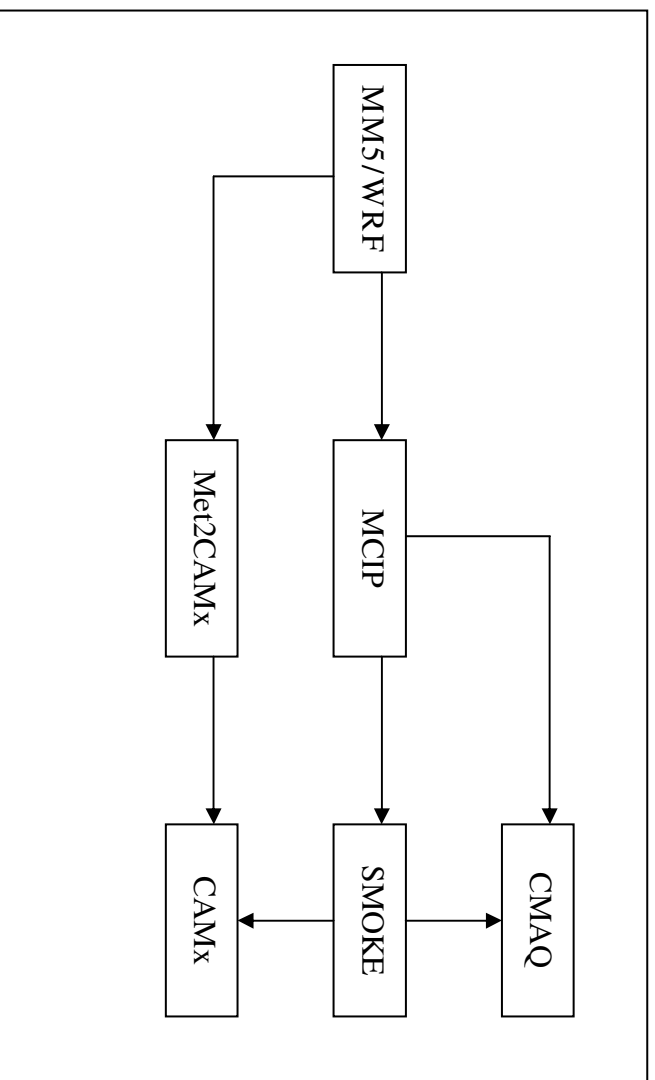


圖一：舊版 PATH 組件互動概要圖

舊有 PATH 以下列三個不同的模擬組件去計算不同的大氣過程：

- 用於模擬氣象的「中尺度氣象模式第五版本」
- 用於模擬污染源的「污染源模擬系統 1995 版本」
- 用於模擬污染物擴散和化學轉化的「SARMAP 空氣質素模型」

圖二展示了升級後的 PATH 系統中包含的數個獨立組件的執行流程圖。為了升級舊有的 PATH 模擬系統，各系統模組的主要組件均選擇應用了技術最新的軟件，包括：



圖二：新版 PATH 組件的互動概要圖

- 用於模擬氣象的「中尺度氣象模式第五版本」(Mesoscale Model Version 5, MMS5) 與「氣候研究預測」(Weather Research Forecast, WRF) 系統需要的資料包括：一) 日常對高空與地表的觀測, 包括風, 溫度, 相對濕度, 海平面氣壓與海平面溫度。二) 全球性模型和其他地區性模型的輸出資料。三) 地形與土地使用資料。而 SMOKE, CMAQ, and CAMx 模組亦需要 MMS5/WRF 軟件輸出的氣象數據作輸入資料。
- MCIP 是個數據轉換單元, 用以把 MMS5/WRF 的輸出的數據轉換成能被 CMAQ 與 SMOKE 使用的型式。
- Met2CAMx 是個數據轉換單元, 把 MMS5/WRF 的輸出的數據轉換成能被 CAMx 使用的型式。
- CMAQ (Community Multiscale Air Quality) 與 CAMx (Comprehensive Air-quality Model with extensions) 化學傳送模型被選用於模擬污染物擴散和化學轉化。這些模組需要 MMS5 或 WRF 模組輸出的數據, 亦需要 SMOKE, CONCEPT, MEGAN 和 BEIS 模組預先準備或即時模擬輸出的排放資料。之後 CMAQ 和 CAMx 便可以用作模擬空氣質素數據。

3. 模擬範圍與網絡結構

舊有的 PATH 模擬系統採用了一組分別為 40.5, 13.5, 4.5, 1.5 和 0.5 公里的網絡結構。而開發於十數年前的模擬範圍更表現了為模擬香港高密度排放跟對電腦運算能力的高需求間的妥協。隨電腦運算能力的提高，系統的網絡結構便存在著改良的空間以長期地應付現時空氣質素的問題。籍對現有 PATH 模擬系統模擬範圍進行研究分析，我們開發了新的網絡結構以升級 PATH 模擬系統。

一組包含四個網絡區域的模擬範圍會採用於模擬氣象系統，排放模型與化學傳送模型，它們的網絡間距分別為 27, 9, 3 至 1 公里。下面將詳述這四個網絡區域的特徵：

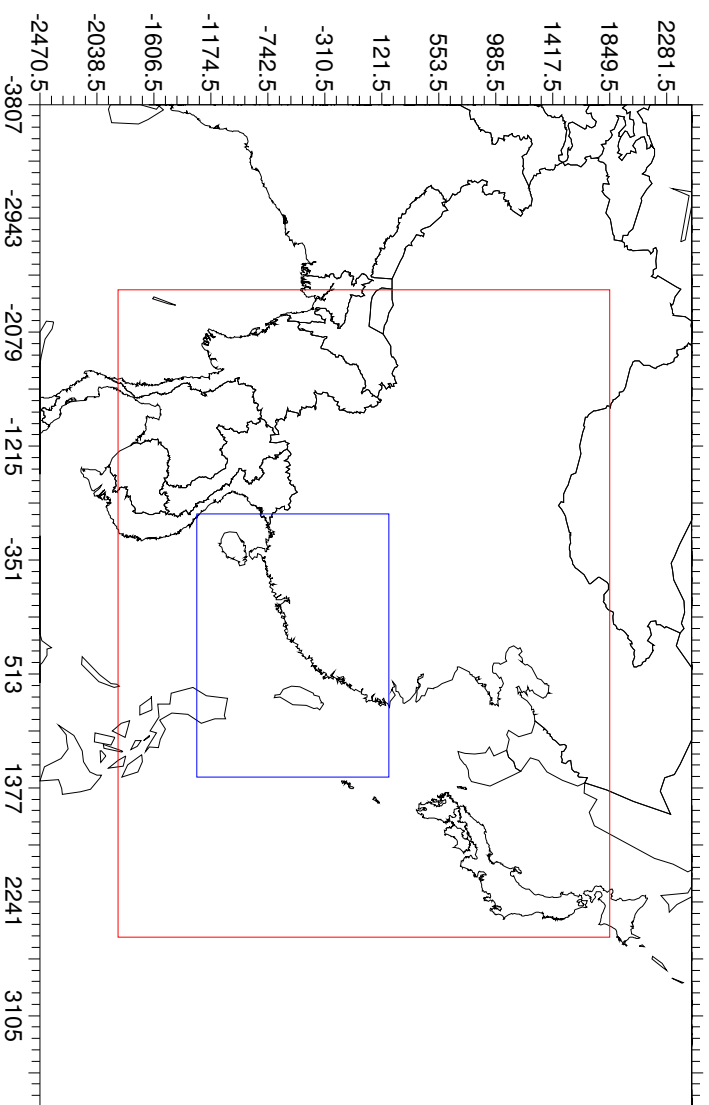
D1--網絡一(27公里): 這最粗糙的外圍網絡包括大概整個中國，日本，同時包括台灣，越南，寮國，柬埔寨，泰國等。這遠比舊有 PATH 模擬系統的外圍網絡(只覆蓋華南，台灣與越南北部)要大。

D2--網絡二(9公里): 網絡二覆蓋華南(包括廣東省，香港與澳門)。跟舊有 PATH 模擬系統不同，只覆蓋大半的廣東。

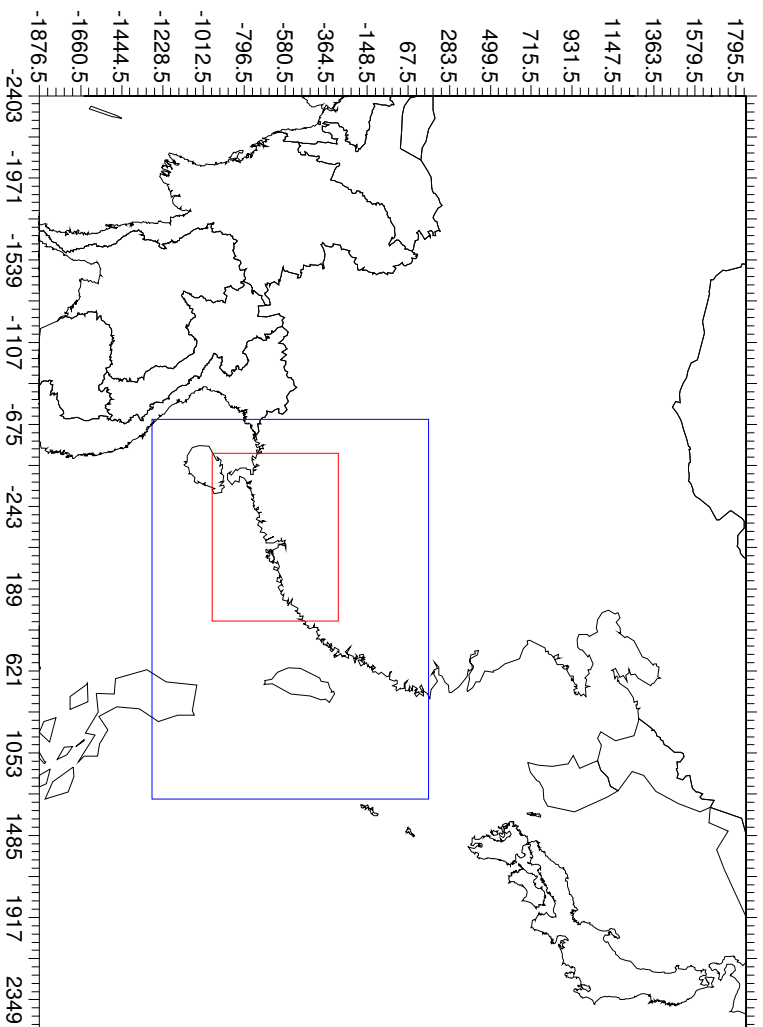
D3--網絡三(3公里): 網絡三覆蓋大部份的廣東省，香港與澳門，而舊有的 PATH 模擬系統則主要覆蓋香港與珠三角地區。

D4--網絡四(1公里): 網絡四主要覆蓋珠三角地區，而舊有的 PATH 模擬系統則只覆蓋香港。

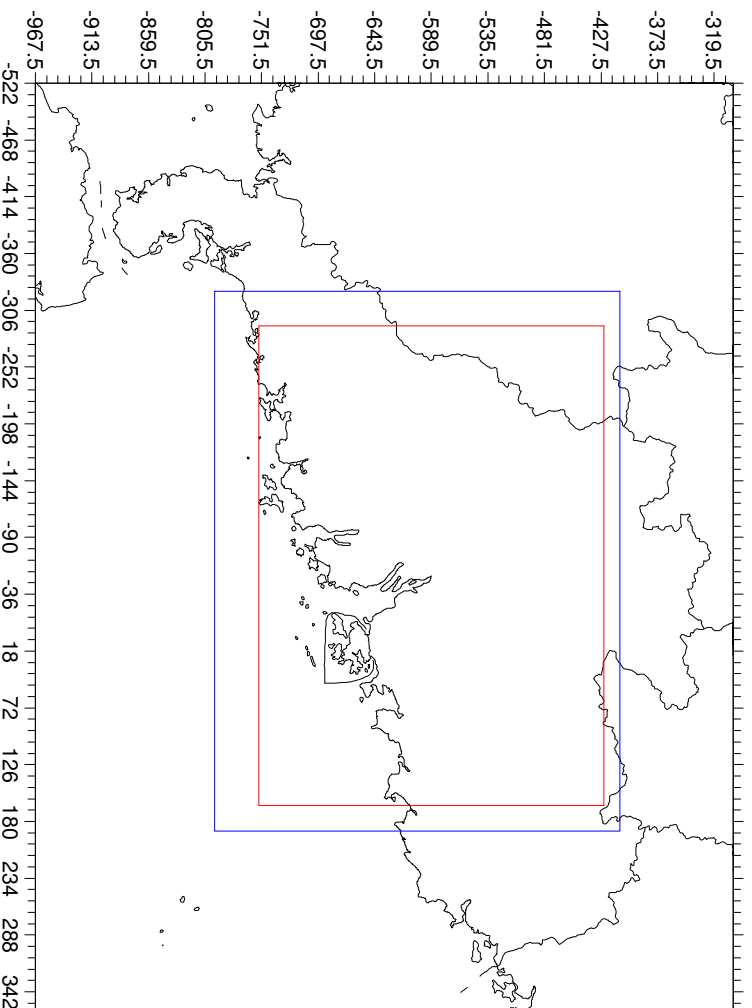
圖三至圖六顯示了四個網絡區域的水平模擬範圍。而化學物轉化模型(CTM)與排放模型的模擬範圍比模擬氣象模型的模擬範圍稍細，從而使化學物轉化模型能套入模擬氣象模型。



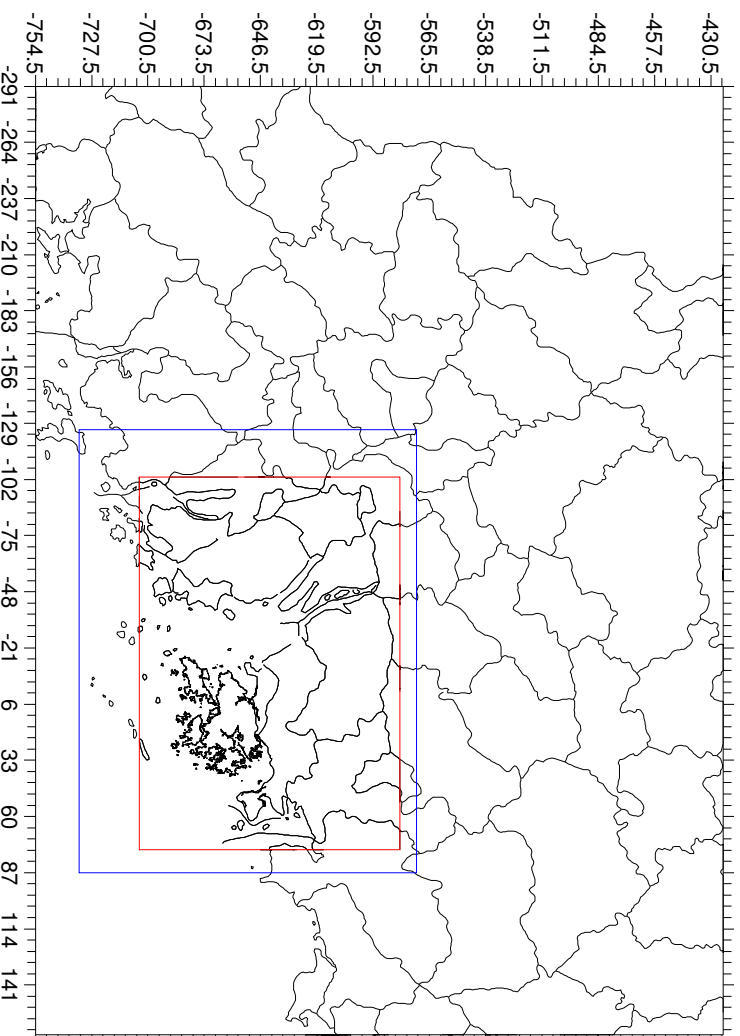
圖三： 27 公里 MMS/WRF 氣象模型網絡區域與 27 公里化學物轉化模型的網絡區域(紅色)與 9 公里 MMS 網絡區域(藍色)。



圖四：27 公里化學物轉化模型網格與 9 公里 MMS 網格區域(藍色)與 9 公里化學物轉化模型網格(紅色)。



圖五：9 公里化學物轉化模型網格與 3 公里 MMS 網格區域(藍色)與 3 公里化學物轉化模型網格(紅色)。



圖六： 3 公里化學物轉化模型網格與 1 公里 MMS5 網格區域(藍色)與 1 公里化學物轉化模型網格(紅色)。

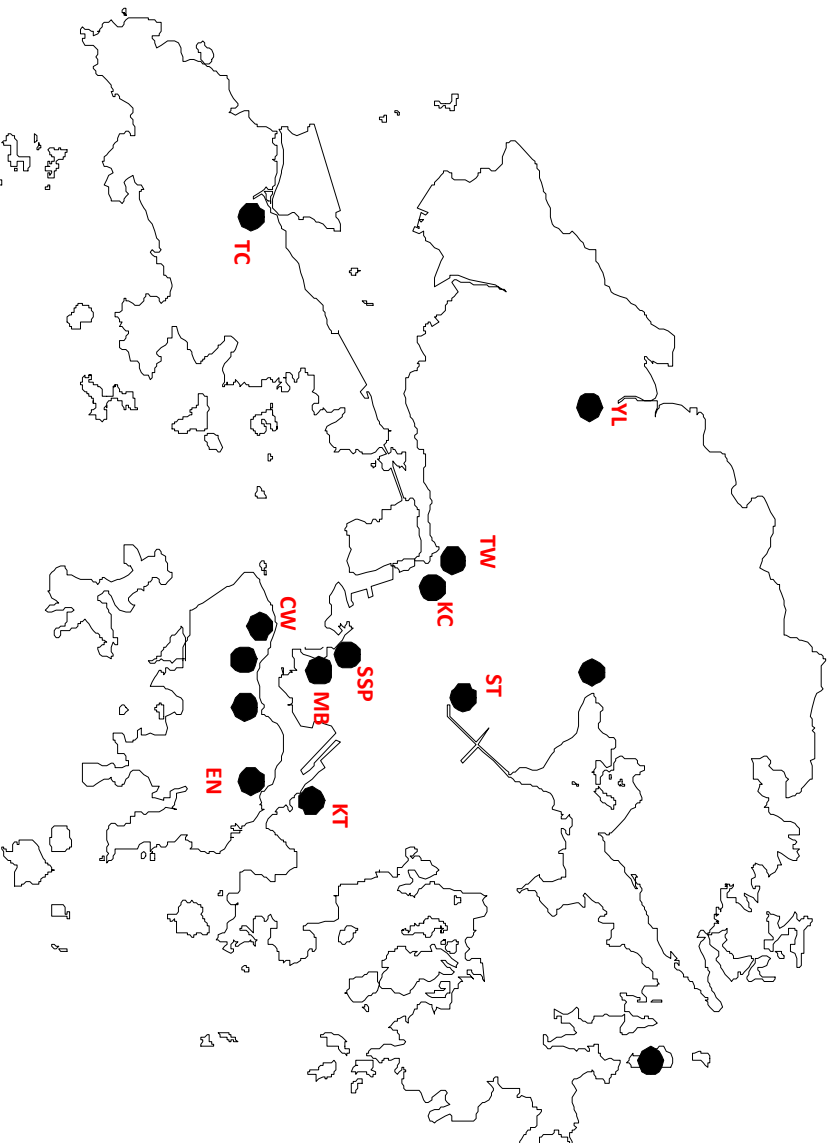
化學物轉化模型(CTM)的垂直結構跟隨 MMS/WRF 模型的垂直分層作界定。而 MMS/WRF 模型使用了一個以大氣壓力界定，跟隨地勢的坐標系統，包括了 38 層從地面伸延至 50 mb 氣壓高度(約 20 公里 AGL)的垂直分層。一種平均分層體制被使用作把 CTM 的 38 層分層壓縮至氣象模型的 26 層分層，用以減少化學物轉化模型(CTM)的計算時間。於大部分大氣程序發生的行星邊界層(PBL)內的大氣層底部，(1800 米 AGL 以下)，化學傳送模型(CTM)的垂直分層結構與氣象模型的分層結構完全配合。因此，化學物轉化模型(CTM) 分層結構跟 MMS5 垂直分層配合。當處理行星邊界層(PBL)外的分層界定時，化學物轉化模型(CTM)壓縮了氣象模型的分層，從而得到更高的運算效率。

4. 模擬氣象事件

香港環境保護署(EPD) 從過往的時間選擇了四個不同的氣象事件用作測試與論證升級後的香港大氣污染物擴散模型(PATH)。在 27 公里外圍網格測試的每一個氣象事件都於首日之前被加上了十天的啓始天數，而較小的網格則在每一個氣象事件的首日之前被加上相對較短的啓始天數。

- 氣象事件一：二零零四年九月十日至十月十二日；
- 氣象事件二：二零零三年十一月二日至三日；
- 氣象事件三：二零零六年七月二十四日至二十五日；與
- 氣象事件四：二零零六年三月十六日至十七日

圖七展示了香港地區用於評估 CTM 化學物轉化模型與用於紀錄每個模擬氣象事件的空氣質素監控站位置與識別號。



圖七：香港的空氣質素監控站

5. 系統的組成部分

5.1 排放模型軟件

除了沒有被應用於模擬自然氣體排放與路上車輛排放, SMOKE 排放模型是香港大氣污染物擴散模型 (PATH) 升級研究中被用作模擬其他位於香港地區污染源的主要排放模型。而 CONCEPT 排放模型則於敏感度測試中被用作處理點, 面與車輛的排放的替代排放模型。與 SMOKE 排放模型相似, CONCEPT 排放模型的模擬結果能應用作化學物轉化模型 CTM 的輸入資料, 然而因 CONCEPT 的速度較慢, 所以最後的模擬系統採用了 SMOKE 排放模型。而 CONCEPT 排放模型亦跟用於香港路面車輛排放源的節線車輛移動資料一同被應用作得出高解析度的路上車輛源頭排放。而自然排放氣體和氣溶膠模式 (MEGAN) 主要被用作模擬生物源排放, 而敏感度測試則使用了生物源排放量推估模式 (BEIS) 生物源排放模擬系統。

SMOKE: SMOKE 排放模型每小時產出分格的車輛排放, 非公路排放, 點排放, 面排放, 火災排放與生物源排放資料用於光化學分格模型。與大部份排放模型相同, SMOKE 主要是個排放處理系統, 而並非一個真正的排放模型系統, 即排放量由“第一法則”模擬估計。亦即表示, 排除車輛與自然排放源後, SMOKE 排放模型是一個有效的工具把現有的排放資料清單轉化為空氣質量模擬系統所需的每小時分格的輸入格式。SMOKE 排放模型亦在所有模擬範圍中被使用於準備點, 面, 非路面車輛排放與非節線非路面車輛排放的排放輸入資料。

CONCEPT: CONCEPT (The Consolidated Community Emissions Processing Tool) 排放模型利用路段基礎交通需求模型 (TDM) 的香港數據, 模擬路上的車輛排放的新排放模型系統。CONCEPT 的路面車輛排放源的組成部分可以利用路段基礎每車行駛里程 (VKT) 資料代表, 包括: 速度的不同與車輛種類分佈。

MEGAN: 自然排放氣體和氣溶膠模式 (The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature, MEGAN) 模擬了自然排放。MEGAN 是美國國家大氣研究中心 (NCAR) 最新開發的自然排放模型, 包括考慮了各種形成臭氧與懸浮粒子的先驅物。再者, 最新開發的 MEGAN 包含了於最新版的 CAMx 二次有機溶膠單元使用了, 但其他生物源排放模型沒有包含的生物源排放種類。MEGAN 是一個相當新的生物源排放模型, 因此使用了被廣泛使用於敏感度測試的生物源排放量推估模式 (The Biogenic Emission Inventory System, BEIS) 模擬生物源排放。

BEIS: 生物源排放量推估模式 (The Biogenic Emission Inventory System, BEIS) 的第 3 版, BEIS3, 被採用作模擬生物源排放的模擬上。BEIS3 開發於 2001 年而且是 BEIS 家族的最新版本。所有 BEIS3 的版本均為了配合 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions) 系統而設計。而 SMOKE 現時預設使用的是 BEIS 3.09 版。而 BEIS 3.10 版是為了配合於二零零二年出版的 CMAQ (Community Multiscale Air Quality) 模擬系統而開發的。BEIS 3.10 包括了一個一公里植被數據庫用以得出不同樹木品種的樹冠覆蓋面; 三十四種化學物質的排放系數, 包括十四種單帖烯 (monoterpene) 與甲醇 (methanol); 以土壤水分計算泥土中一氧化氮含量的計算法; 農作物林冠覆蓋面與肥料使用的關係; 詳細載明的 CBIV, RADM2, 與 SAPRC99 的化學機制。BEIS3.10 使用的泥土一氧化氮含量計算法已在 BEIS3.11 版被更新, 使系統能更好的分辨農業用地與非農業用地, 而且可以把改動限制於溫度, 降雨, 肥料使用, 與農作物林冠覆蓋面跟生長季節與耕作面積的關係。一套葉片覆蓋面計算法亦被加入計算非林地的甲醇排放量。在二零零三年十一月出版的 BEIS3.12 是最新版本。這是一個獨立於 SMOKE 的單元, 用作產生與空氣質量模擬格式一致的每小時格網化排放。

5.2 氣象模擬系統

中尺度數值天氣模式 (MM5, Mesoscale Model version 5) 與天氣研究與預報模式(WRF, Weather Research Forecast)被用於氣象模型以發展每小時的三維空間多重尺度氣象範圍來支援光化學模型, 以應付香港環境保護署的空氣質素與眼空氣質素有關的計劃制訂。MM5 和 WRF 氣象模型被使用於不同的格網解析率(27 公里, 9 公里, 3 公里和 1 公里), 而模擬結果(例如: 風速, 風向, 溫度等)會於模型性能評估中跟現成的表面氣象觀測結果作比較。

MM5/WRF:第五代的美國國家大氣研究中心(NCAR) 賓夕凡尼亞州(Penn State) 中尺度數值天氣模式 3.7 版(MM5)與進階版氣候研究與預測模型第 3 版(WRF-ARW)兩個氣象模型均被選擇應用於升級後的香港大氣污染物擴散模型(PATH)。中尺度數值天氣模式(MM5) 中被用作準備模型輸入資料的預處理程式包括 terrain, REGRID, LITTLE_R, 和 INTERPF。現時的天氣研究與預報模式(WRF)軟件架構支援兩組動力學解算器:進階版氣候研究與預測模型(WRF-ARW)和非流體靜力中尺度中尺度數值天氣模式。兩組解算器均是可壓縮的, 可使用歐拉坐標的, 非流體靜力, 純量變數不變的。考慮到國家大氣研究中心對 WRF-ARW 良好的支援, 最新發表的 WRF-ARW 第 3 版被選擇應用於香港大氣污染物擴散模型(PATH) 的升級項目。WRF 第 3 版的程式碼, 包括 WRF 軟件框架(WSF), 進階版氣候研究與預測模型的動力學解算器, WRF 的預處理程式(WPS), WRF 變分數據同化作用(WRF-Var)系統與大量由 WRF 合夥人與研究組織提供的組件。

評估 MM5/WRF 模型的目的為印證模型系統在提供三維的風資訊, 溫度與濕度作空氣質素模型資料的準確性。評估是通過對預測得出的氣象資料與全球通信系統(GTS)和香港天文台位於香港近的自動氣候站所能提供的資料進行圖像上與統計學上的比較。

5.3 化學物轉化模型

CMAQ 與 CAMx 模型被選用於升級香港大氣污染物擴散模型(PATH) 為化學物轉化模型。

CMAQ:美國國家環境保護局(EPA)花了多於十年的時間開發 CMAQ (Models-3 Community Multiscale Air Quality)模型系統, 希望能開發出一個“單一-大氣”空氣質素模型系統能夠於一個單一平台解決臭氧, 懸浮粒子, 能見度, 酸性沉降的問題。而最近發行的版本有於二零零一年六月發行的 CMAQ 4.7.1 版與二零零八年十月公開發行的 CMAQ 4.7 版, 雖然, 研究開始時使用了二零零六年十月發行的 CMAQ 4.6 版, 但現時三個版本均被應用於香港大氣污染物擴散模型(PATH) 的升級中。

CMAQ 的組成部分包括一個核心化學物轉化模型(CTM)與數個預處理器, 包括氣象-化學介面處理器(MCIP), 始初條件與約束條件處理器(ICON 與 BCON)和光解作用率處理器(JPROC), 而且在 CMAQ 的理論與技術應用上的數個特性使模型非常適合模擬臭氧與懸浮粒子(PM)的問題。

在研究開始時, CMAQ 4.6 版被用作香港與珠江三角洲地區的模擬。我們之後在部分敏感度測試中使用了發行於二零零八年十月的升級版 CMAQ 4.7。尤其是 CMAQ 4.7 版新增了許多在一般版本沒被考慮的二次有機氣膠(SOA)過程, 這些過程先於一直在美國被廣泛使用作區域性懸浮粒子(PM)與能見度模擬的二次有機氣膠模型的擴充中被提出。而在最後的系統優化與論證中便應用了 CMAQ 4.7 版。

CAMx: CAMx(The Comprehensive Air-quality Model with extensions)模擬系統是由英環國際公司發展的一套三維, 多重尺度的光化學/氣膠網格模擬系統。最新的版本是二零零一年十二月發表的 CAMx 5.3 版, 而香港大氣污染物擴散模型(PATH)的升級研究開始時使用的是二零零八年五月發行的 CAMx 4.51 版。

CAMx 4.51 版設定並使用於跟 CMAQ 相同的 27/9/3/1 公里網格。然而，CAMx 初始配置設定使用雙向嵌套網格於 27/9 公里模擬範圍，另使用單向嵌套網格於 9 公里與 3 公里間的模擬範圍與 3 公里與 1 公里間的模擬範圍(CMAQ 並不支援雙向嵌套網格)。由於整個 27/9/3/1 公里網格結構過大，典型的電腦記憶體不能對全部四組模擬範圍都使用雙向嵌套網格進行模擬。大部份敏感度測試只核對 3 公里與 1 公里模擬範圍的參數，因此執行單向嵌套網格在計算上比較有效率。CAMx 的基本配置設定了 26 層垂直分層至 50mb 高度(地平面上~20 公里高)，並跟 CMAQ 採用的基本配置設定完全相同。PPM 對流傳輸方程式數值方法被使用於空間多樣性水平擴散方法。CAMx 的垂直擴散模擬則使用了 K-理論(K-theory)。與 CMAQ MCIP3.3 的“pass through”選項類同，Met2CAMx 處理器的工作是處理中尺度數值天氣模式(MM5)和天氣研究與預報模式(WRF)的資料。在初始的配置中，CAMx 設定為與氣態 CB05，液態 RADM，氣溶膠 CMU/SORROPIA 組合共同運作。升級了的 SOAP 二次有機溶膠組合亦被使用為 CAMx 的基本配置。這版本包括了對處理從異戊二烯(isoprene)與倍半萜(sesquiterpenes)衍生的二次有機溶膠進行改良。而最後的優化與驗證模擬使用了最新的 CAMx V5.3 CTM。

5.4 交通數據編輯與模擬

環保署最近使用了 EMFAC-HK 車輛排放模型於空氣質量計劃與相關的工作。但 EMFAC-HK 並非非常適合與 Concept 一起進行排放的模擬，因此在 PATH 模擬系統的升級研究中同時需要處理這問題。EMFAC-HK 改編自應用於美國加利福尼亞州的 2002 EMFAC 軟件。美國環保局的 MOBILE6 模型是一個除了於加利福尼亞州外於美國大部份州分被廣泛應用作管理空氣質量的路面排放模型。根據概要中的要求，美國環保局的 MOBILE6 被使用於評估香港的車輛排放，而研究小組亦要開發適合香港使用的 MOBILE6 版本。

Concept MV 排放模型被用作結合 MOBILE6-HK 排放數據與年平均每車行駛里程(VKT)數據，以評估香港路上車輛排放的總量。年平均每車行駛里程與速度是從一套由香港弘達交通顧問有限公司(MVA Hong Kong Limited)開發的交通需求模型(TDM)取得。弘達交通顧問有限公司的模型以二零零五年為基年。其他研究年份(2003, 2004, 與 2006)的年平均每車行駛里程的數據是以運輸署年度交通統計數據分析得出的預測/回推系數進行預測或回推得出。Concept MV 使用了 MOBILE6-HK 排放模型和簡線特性 VKT 的數據製作出高降析度，時間性，空間性的路面車輛排放清單。從中尺度數值天氣模式(MM5)與天氣研究與預報模式(WRF)氣象模型模擬得出的格網化氣溫與濕度資料被用作對 Concept MV 內的 MOBILE6-HK 排放系數進行適當調節。

5.5 數據分析與視覺化軟件

研究小組應用了數據分析與視覺化軟件展示氣象，排放與化學傳送模型的結果。為了處理氣象，排放與化學傳送模型的結果，我們對數據分析工具進行專門化改進，使工具可以把模型的結果展示於散點圖，時間數列圖，模型性能統計與空間性地圖。再者，這些工具均進行了專門化改進以展示為了處理氣象，排放與化學傳送模型的輸入與輸出資料，更提供了二維與三維的互動視象功能。

6. 系統優化與論證

最終的優化與論證模擬使用了最新版本的 CMAQ (4.7.1 版本, 二零一零年七月發行)與 CAMx(5.3 版本, 二零一零年十二月發行)。而其中的三個用於測試的氣象事件中, 包括二零零四年九月, 二零零六年七月與二零零六年三月的氣象事件, 化學物轉化模型使用了中尺度數值天氣模式(MM5) 與天氣研究與預報模式(WRF)氣象模型的模擬結果。在進行最後的優化與論證模擬前, 我們進行了最後一系列的敏感度測試以解答以下二項問題:

1. 使用最新版本的 CMAQ 與 CAMx 化學物轉化模型界定用於最終的優化與論證模擬的最佳配置, 與
2. 對化學物轉化模型於二零零六年七月的氣象事件(氣象事件三)的表現得到更好的理解, 特別是為何當化學傳送模型使用天氣研究與預報模式(WRF)的氣象資料時, 系統的臭氧模擬表現會較使用中尺度數值天氣模式(MM5)氣象資料時好。

最新版本的 CMAQ 與 CAMx 化學物轉化模型成功地應用於三個過往的氣象事件以估計香港與珠江三角洲地區的空气質素。同時, 兩個化學物轉化模型的使用與使用了中尺度數值天氣模式 (MM5) 與天氣研究與預報模式 (WRF) 氣象模型的模擬結果作輸入資料的論證模擬都沒有遇到問題。最後的模擬驗證了兩個化學物轉化模型是可操作的, 而且準備好協助香港環境保護署處理空氣質素的問題。

7. 應用檢討

當升級了的香港大氣污染物擴散模型(PATH)被交到環境保護署, 安裝於環保署的電腦而環保署亦對其員工訓練使用系統, 環保署以模擬系統預測香港與周邊地區的氣象和空氣質素狀況後, 我們進行了應用檢討, 對環保署就二零一零年八月至十一月這四個月的預測結果進行檢討與評估。而另一個由環保署對 MM5/CAMx 就全年的附加預測論證亦收錄於本次研究的總結報告。

8. 總結

一個新的氣象, 排放與空氣質素模型系統被開發與裝配作香港與珠三角州地區的空氣質素模擬。這新的模型系統應用了從 2003 至 2006 共四組過往的氣象事件作論證。模型系統已被送交往香港環境保護署(EPD)並就系統的使用對環保署人員進行了培訓。環保署已使用本模擬系統就香港與珠三角區域進行了對 2010 整年的氣象與空氣質素預測。

在發展新的空氣質素模型系統的過程中, 研究團隊一直致力於更新模型系統, 使模型系統應用了最新的模型組件。而在最後的優化與論證模擬使用了最新版本的 CMAQ (於二零一零年六月發行的 CMAQ 4.7.1 版)和 CAMx 化學傳送模型(於二零一零年十二月發行的 CAMx 5.3 版)。

當應用化學物轉化模型於模擬 2003 年至 2006 年的氣象事件與預測 2010 整年的氣象與空氣質素預測驗證了新空氣質素模型系統於香港與珠三角地區制定空氣質素管理計劃的效用。模型系統現時已經全面運作並準備好作日常的應用。