

香港特別行政區政府  
環境保護署

## 改善珠三角空氣質素的 **PM<sub>2.5</sub>** 研究—可行性研究

合約編號：**CE 28/2014 (EP)**

研究摘要

**2018 年 12 月**

香港特別行政區政府  
環境保護署

## 改善珠三角空氣質素的 PM<sub>2.5</sub> 研究-可行性研究

合約編號：CE 28/2014 (EP)

### 研究摘要

2018 年 12 月

	人員	簽名
編寫：	孔平	
審核：	張振明	
校檢：	劉毅廷	
核准：	劉啟漢	

版本：	最終版	日期：	二零一八年十二月二十四日
<b>免責聲明</b> 本報告為香港特別行政區政府環境保護署而撰寫。該署為本報告之唯一受益人。除該署外，凡未得該署書面同意者，不得披露、引用或以本報告為據。除該署外，凡持有本報告者，須徵得該署書面同意，方可引用本報告。如非上述目的者，均不可利用本報告作其他用途。			
<b>香港科大研究開發有限公司</b> 地址：香港九龍清水灣香港科技大學新翼 3 樓 電話：(852) 2358 8060 傳真：(852) 2358 2751 網站： <a href="https://rdc.ust.hk/">https://rdc.ust.hk/</a>			

## 目錄

<b>1</b>	<b>簡介 .....</b>	<b>1</b>
	1.1 研究背景 .....	1
<b>2</b>	<b>研究目標和範圍 .....</b>	<b>2</b>
	2.1 研究目標 .....	2
	2.2 研究範圍 .....	2
<b>3</b>	<b>主要結果 .....</b>	<b>3</b>
	3.1 實地採樣和化學分析.....	3
	3.2 衛星遙感和激光雷達觀測 .....	3
	3.3 優化排放清單 .....	3
	3.4 受體模型和來源解析.....	4
	3.5 空氣質量模型 .....	5
	3.6 概念模型 .....	5
	3.7 綜合分析和相關政策建議 .....	6
<b>4</b>	<b>結論和建議 .....</b>	<b>8</b>
	4.1 結論.....	8
	4.2 建議.....	8

## 顧問團隊成員

香港科大研究開發有限公司（香港科技大學，主顧問）  
香港中文大學  
中國科學院大氣物理所王自發教授  
聖路易斯華盛頓大學 Jay Turner 教授  
培德國際有限公司  
艾奕康有限公司（AECOM）

## 鳴謝

特別感謝廣東省環境監測中心、澳門環境保護局和澳門地球物理暨氣象局對本研究的寶貴支持和貢獻。

我們還要感謝美國沙漠研究所 Judy Chow 教授和 John Watson 教授獨立審核本研究的 PM<sub>2.5</sub> 採樣。

## 1 簡介

### 1.1 研究背景

- 1.1.1 研究顯示，顆粒污染物 – 特別是微細懸浮粒子 (PM<sub>2.5</sub>) – 是損害健康和降低能見度的主要原因。然而，大部分顆粒污染物的問題是由外來污染導致，所以需要從區域層面量化污染來源，才能更有效針對問題所在，制定空氣污染控制策略。
- 1.1.2 本研究為粵港澳環保部門首次合作，以全面了解珠江三角洲地區（簡稱珠三角，也即粵港澳大灣區）區域性 PM<sub>2.5</sub> 的問題。空氣污染問題不分地域邊界，若沒有不同領域的科學家以及珠三角三地政府的共同努力，便不可能全面了解這區域的空氣污染問題。
- 1.1.3 香港環境保護署（環保署）於 2014 年 11 月 6 日委託香港科大研究開發有限公司（香港科技大學）開展《改善珠三角空氣質素的 PM<sub>2.5</sub> 研究-可行性研究》項目 [合約編號：CE 28/2014 (EP)]。
- 1.1.4 長遠而言，本研究能為珠三角地區以外的其他城市群樹立榜樣，展示有訂明目標的合作研究如何協助區內各政府制定環境政策。

## 2 研究目標和範圍

### 2.1 研究目標

#### 2.1.1 本研究的研究目標是：

- 取得珠三角地區PM<sub>2.5</sub>污染物的時序及空間分佈，以及全面化學成份數據；
- 掌握珠三角地區PM<sub>2.5</sub>污染物、其前驅體和它們的主要成份於全年不同季節的變化的基線數據；
- 識別和量化PM<sub>2.5</sub>的主要污染源，包括一次源（直接排放）和二次源（在大氣中形成，非直接排放）產生污染的比重，氣溶膠的主要來源和作為二次有機顆粒物前驅體的主要揮發性有機化合物（VOC）；
- 編製珠三角地區的高解像PM<sub>2.5</sub>排放清單；
- 改善用於模擬PM<sub>2.5</sub>的空氣質量模型，以探討排放源頭和污染特徵、預測污染趨勢和嚴重污染事故，及以情景分析評估潛在控制排放措施的成效；
- 開發珠三角地區的PM<sub>2.5</sub>概念模型來鑒定PM<sub>2.5</sub>在不同區域的主要特徵；
- 建議有效及適當的污染控制策略；
- 識別珠三角地區現有和未來PM<sub>2.5</sub>監測技術潛在偏差的地方；
- 評估目前法規性及調研性的PM<sub>2.5</sub>監測，為PM<sub>2.5</sub>監測系統和個別監測站提出改善方案；
- 根據珠三角地區工業和經濟發展，預測PM<sub>2.5</sub>的成份趨勢（如硫酸鹽和硝酸鹽），以制定合適的空氣質素管理系統；及
- 開發綜合平台來儲存和展示本研究的數據和資訊，以促進學者、專家及政府官員交流、討論和聯手研究珠三角地區的空气污染問題。

### 2.2 研究範圍

#### 2.2.1 本研究的研究範圍為整個珠三角地區，包括香港特別行政區、澳門特別行政區和廣東珠三角地區（廣州、深圳、東莞、佛山、中山、珠海、江門、肇慶和惠州）。

### 3 主要結果

#### 3.1 實地採樣和化學分析

3.1.1 在香港所有一般（即非路邊）採樣點，PM<sub>2.5</sub> 內含量最高的是硫酸鹽、有機物質和氨離子。路邊採集的樣品中，有機物質、元素碳和硫酸鹽的含量最高。

3.1.2 香港不同地點的硫酸鹽和氨離子水平差別並不明顯，顯示這兩個物種主要是從其他地區傳輸到香港。元素碳水平則有相當明顯的次序：路邊>城市>新城區>郊區，與這些採樣點的一般環境特徵一致。有機物質和元素碳濃度在路邊較高，代表車輛廢氣為該地點碳顆粒的主要來源。

#### 3.2 衛星遙感和激光雷達觀測

3.2.1 從衛星遙感數據得出香港十五年（2000 年至 2014 年）的 PM<sub>2.5</sub> 平均濃度數據顯示，PM<sub>2.5</sub> 濃度在香港有很多高建築物和交通繁忙的市區中心地帶，以及與廣東省毗鄰、最容易受廣東省污染影響的西北部較高。

3.2.2 從衛星遙感數據得出的 2001 年至 2015 年珠三角地區 PM<sub>2.5</sub> 年平均濃度趨勢顯示，這上半段期間的 PM<sub>2.5</sub> 濃度總體上升，並在 2007 年達到最高值 44.1±16.8 微克/立方米<sup>1</sup>。區內 PM<sub>2.5</sub> 濃度自 2008 年起總體下降，2014 年至 2015 年的 PM<sub>2.5</sub> 濃度更大幅下降。PM<sub>2.5</sub> 濃度在 2015 年達到最低值 29.8±11.4 微克/立方米，低於世界衛生（世衛）組織中期目標-1（IT-1）的標準。然而，PM<sub>2.5</sub> 濃度仍然明顯高於世衛組織的中期目標-2（IT-2）、中期目標-3（IT-3）和《空氣質量準則》的標準，顯示該區空氣質素仍有待改善。

3.2.3 從衛星遙感數據得出的珠三角地區各個城市的 PM<sub>2.5</sub> 平均濃度長期趨勢一般與珠三角地區整體相似。此外，珠三角地區中心的 PM<sub>2.5</sub> 濃度特別高。儘管從 2014 年到 2015 年區內的 PM<sub>2.5</sub> 濃度普遍下降，所有城市的 PM<sub>2.5</sub> 濃度仍超出世衛組織 IT-2 的標準，並遠超世衛組織 IT-3 和《空氣質量準則》的標準。

#### 3.3 優化排放清單

3.3.1 本研究採用現有最可靠的本地源排放因子、排放活動資料及「由下而上」的估算方法，去編製 2012 年廣東珠三角地區的高解像排放清單。數據的收集和計算均遵循嚴格的質檢/質控程序，包括分析排放因子和排放量估算的不確定性，以確保清單數據質量。清單的主要排放源包括：電廠源、工業源、道路移動源、揚塵源、VOC 有關的民用源、生物質燃燒源、燃料儲存和運輸源、農牧業源、自然源和其它源。清單包括以下污染物：二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、可吸入懸浮粒子（PM<sub>10</sub>）、PM<sub>2.5</sub>、黑碳、有機碳、VOC 和氨氣。

3.3.2 在 2012 年，電廠排放和工業燃燒是廣東珠三角地區二氧化硫的主要來源，分別為總排放量的 27.3%和 49.4%。道路移動源是氮氧化物、一氧化碳和黑碳的最大來源，分別佔總排放量的 34.4%、45.4%和 41.4%。PM<sub>10</sub> 的最大來源是揚塵，佔總排放量的 47.1%。PM<sub>2.5</sub> 的主要排放源是電廠、揚塵和工業用燃燒，分別佔總排放量的 18.4%、17.4%和 15.1%。溶劑使用源和道路移動源是 VOC 的重要

<sup>1</sup> 此正負值顯示了整個珠三角地區年平均濃度的變化幅度。

來源，分別佔總排放量的 42.4%和 33.8%。農牧業源是氨氣的最大來源，佔排放總量的 78.3%。

3.3.3 與 2010 年相比，2012 年的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和氨氣排放量顯著下降，二氧化硫和氮氧化物排放量的跌幅一般。排放量下降的趨勢可歸因於該兩年執行的排放控制措施。而 VOC 排放量只有輕微下降，可能因為 VOC 源數量繁多及分散，所以控制排放並不容易。

3.3.4 本研究把廣東珠三角地區的空氣污染排放分佈於 3 公里 × 3 公里的網格中，以研究其空間特徵。高二氧化硫排放主要在廣州、東莞和佛山，這些地點均有大型燃燒點源，如發電廠和工業企業。氮氧化物排放主要在高耗能、工業發達、人口和道路網路密集的廣東珠三角地區中、南部。一氧化碳排放分佈大致上與珠三角地區工業企業和道路網的位置吻合。PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的排放分佈相似，主要是在廣東珠三角地區中、南部。人為排放的 VOC 源主要在佛山、廣州、東莞、深圳和中山等大量消耗含 VOC 溶劑的輕工業中心。氨氣排放主要在有畜牧業和農業施肥的鄉間。黑碳和有機碳排放的空間特徵與道路網吻合。

3.3.5 各污染源的排放在不同月份、週/天或小時有明顯差異，例如不同城市發電廠的排放每月都不同，主要是由於工業結構、工業企業數目、生產力和人口的差異。私家車等小型汽車的排放通常於工作天較低，但從週五開始增加，高峰值在週六，反映排放量與當地的生活習慣有關。而貨櫃車等大型汽車的排放量則於工作天較高，在週末則顯著下降。

### 3.4 受體模型和來源解析

3.4.1 本研究以「正矩陣因子分解模型」(PMF)推算珠三角地區 PM<sub>2.5</sub> 的來源和量化其影響。模型為廣東珠三角地區識別出的九個排放源因子為車輛尾氣、渣油、海鹽、地殼土壤、二次硫酸鹽、二次硝酸鹽、微量金屬、生物質燃燒和工業源。香港和澳門則識別出八個因子，其中七個因子跟廣東珠三角地區的相同，第八個因子是工業源和二次硝酸鹽的混合體。當香港和澳門加入了非極性有機化合物物種數據後，更識別出以煤炭燃燒為主的另一因子。這證明非極性有機化合物數據有助識別過往未能分辨的因子。

3.4.2 就不同排放因子的比重而言，二次硫酸鹽是珠三角地區最重要的因子，佔廣東珠三角地區和澳門 PM<sub>2.5</sub> 總量的 24.1%，香港的 27.4%。廣東珠三角地區和澳門的二次硝酸鹽很大部分於珠三角地區內產生。廣東珠三角地區和澳門汽車尾氣的比重較香港高。由於靠近船舶活動，渣油排放在香港和澳門的比重較高。廣東珠三角地區地殼土壤源排放比重較高，可能與大量土地開發活動有關。工業源對香港和澳門的影響微乎其微。

3.4.3 除海鹽和渣油兩個與船舶相關的因子外，所有因子均呈現冬季高、夏季低的規律。2015 年 8 月以後，渣油因子比重有下降趨勢，可能反映遠洋船隻燃料硫含量新規管的成效。因為較高溫不利硝酸鹽形成顆粒狀態，5 月至 9 月的二次硝酸鹽水



平幾乎為零。工業源排放在 3 月份出現高峰，或與中國農曆新年後追加生產有關。

**3.4.4 PM<sub>2.5</sub> 排放因子的空間分佈圖顯示** 1) 車輛尾氣排放在廣東珠三角地區的比重略高；2) 渣油排放在香港和澳門的比重較高；3) 海鹽的比重集中在香港和南沙港口附近；4) 二次硫酸鹽在肇慶的濃度最高；5) 二次硝酸鹽在肇慶和江門的比重較高；和 6) 作為近郊和鄉間，江門也是生物質燃燒的集中地。

### **3.5 空氣質量模型**

**3.5.1 本研究以更新的「香港大氣污染物擴散模型」(PATH) 分析污染物的傳輸、變化和擴散特徵，及識別珠三角地區的 PM<sub>2.5</sub> 排放源。模型設有四個空間解像度：27 公里、9 公里、3 公里和 1 公里的嵌套模型域，用於氣象模型和化學傳輸模型。模型系統採用「稀疏矩陣排放處理模型」(SMOKE) 來處理排放數據，加上「天氣研究和預報模型」(WRF) 作為氣象模型，並以「多尺度空氣質量模擬系統」(CMAQ)、「拓展綜合空氣質量模型系統」(CAMx) 和「嵌套空氣質量預測模擬系統」(NAQPMS) 作為化學傳輸模型。模擬時空包括 2012 年和本研究採樣年 2015 年。並用上述的排放清單輔以不同來源(香港天文台和互聯網)的氣象數據進行空氣質量模型運算。質檢/質控方面，本研究以不同化學傳輸模型結果的差異評估不同模型的優勢、能力和兼容性，並且以觀測數據校驗模擬結果。本研究亦以「顆粒物源解析技術」(PSAT) 跟蹤 2015 年模擬結果中在不同區域(即廣州、深圳、香港、澳門、模擬域中珠三角地區外的區域和模擬域外的區域)和不同排放源(發電廠點源、工業點源、面源、移動源、船舶源和生物源)引致的顆粒物濃度。此外，本研究更探討不同模型設置和方案，識別影響模型表現最大的設定，特別是 PM<sub>2.5</sub> 成份中被理解最少的二次有機氣溶膠。**

**3.5.2 WRF 模擬的 2015 年風向、風速、風向量和溫度與同年香港和廣東珠三角地區的觀測數據非常吻合。**

**3.5.3 CMAQ 模擬的 2015 年 PM<sub>2.5</sub> 濃度與香港和廣東珠三角地區的觀測數據匹配，該模擬重現 2015 年全年所有監測站的 PM<sub>2.5</sub> 趨勢，但持續低估約 3.5 微克/立方米，可能是某些未包括的本地、區域性和跨區域排放源造成。**

**3.5.4 雖然二次有機氣溶膠模擬結果仍有些不確定性，但 1-維和 1.5-維基於揮發性分級(VBS)之二次有機氣溶膠模型重現 PM<sub>2.5</sub> 濃度水平和時間變化的表現不錯，而傳統二次有機氣溶膠模型則無法得出合理的結果。**

**3.5.5 PSAT 分析顯示，廣州、深圳、香港和澳門於 2 月、10 月和 12 月最重要的污染來源是跨區域污染，而在 7 月當本地和區域污染變得更重要時，跨區域比重顯著下降。本地和區域污染的比重在嚴重污染的日子也顯著上升。面源排放是這四個城市最重要的污染源，深圳的移動污染源和香港的船舶污染源佔 PM<sub>2.5</sub> 顯著的比重，點源排放相對不重要。**

### **3.6 概念模型**

**3.6.1 制定概念模型的數據包括上述優化的排放清單和空氣質量模型結果。概念模型採用 HYSPLIT 後向軌跡估算氣流來源，並將氣流來源聚類分析成不同的氣流簇，以區分不同空間尺度(本地、區域和跨區域尺度)的污染。軌跡分析的起點分佈**

在珠三角地區的五個監測站，包括肇慶、從化和南沙三個內陸站，及荃灣和大潭山兩個沿海站。

- 3.6.2 後向軌迹顯示五個監測站大部分時間都處於相同的空氣區域內，而影響珠三角地區的氣團大部分來自東北、東、南和西南方。
- 3.6.3 各監測站都識別出五個氣流簇，標記為「東北-長程」、「東北-短程」、「東南」、「西南-短程」和「西南-長程」。「東北-短程」簇在內陸站佔超過總軌跡數量 50%，在沿海站則佔超過 30%。「東北-長程」簇在沿海站的百分比比較內陸站高。大部分「東北-短程」簇發生在春、秋和冬季；而所有監測站於夏季都由「西南-長程」簇主導。
- 3.6.4 本研究結合後向軌跡與 PMF 排放源解析識別的因子，評估每個軌迹簇群裏各個因子產生污染的比重。結果顯示，二次硫酸鹽、汽車尾氣和生物質燃燒排放是兩個東北簇的主導因子；而二次硫酸鹽、渣油和汽車尾氣排放則是其餘三個簇的主導因子。
- 3.6.5 概念模型亦識別和分辨出每個監測站來自本地和外來相同因子產生的 PM<sub>2.5</sub>。二次硝酸鹽和微量金屬從外來較多。相反，海鹽較多由本地產生。總體來說，在沿海站的污染較多為外來產生。
- 3.6.6 整個珠三角地區有一半以上的時間都在同一空氣區域。當該地區分成兩個空氣區域時，一個在內陸形成，另一個沿海岸形成。不同空氣區域的本地和外來產生污染的比重截然不同。

### 3.7 綜合分析和相關政策建議

- 3.7.1 本研究以 2015 年 2 月（冬季）、7 月（颱風）、10 月（夏秋季過渡）和 12 月作為四個具代表性的月份，綜合分析其中四個典型嚴重污染事故和分析四個政策情景，探討氣象條件促成污染的比重和評估假設控制方案之成效，並根據分析結果提出相關的政策建議。
- 3.7.2 對嚴重污染事故影響最大的氣象條件，是位於珠三角地區東、東南或東北的熱帶氣旋所導致較穩定的地區性氣流。空氣污染物在此條件下快速積聚，特別在吹微弱北風或西北風時，香港及珠三角地區的南部沿海城市的污染物濃度快速升高，導致可長達一星期的高污染物水平（在夏季或秋季）。
- 3.7.3 除熱帶氣旋外，華南地區在夏季或秋季亦會有弱風情況，導致污染物積聚。當轉吹西北風，被困的污染物有機會傳到香港，往往令香港污染物的濃度上升。
- 3.7.4 在香港，空氣污染物水平在冬季亦會短暫上升，通常與增強的北或西北氣流有關。當較弱的東北風成為主導風向，加上較低溫度（即更穩定邊界層）和地表弱風，華南內陸的污染物會慢慢大量積聚。
- 3.7.5 本研究根據「十三五規劃」中有關改善珠三角地區區域空氣質素的近期措施（如改用更清潔的燃料種類等），通過四個假設情景，利用空氣質量模型評估他們對珠三角地區區域空氣質素的影響。情景包括基本情景（S1）、S1 加上加強控制交通和發電廠（S2）、在 S2 情景加上加強控制面源和工業源（S3），以及在 S3

情景加上珠三角地區以外的中國地區實施相同程度的措施 (S4)。通過已校正的 WRF/CMAQ 模型模擬區域空氣質素在這四種情景中的變化。

3.7.6 模擬結果顯示這四種假設情景有助降低整個珠三角地區的 PM<sub>2.5</sub> 濃度，尤其是珠三角西北部地區。這些假設情景能使香港所有監測站的 PM<sub>2.5</sub> 濃度降低 2 至 5 微克/立方米。

3.7.7 基於上述分析，政策建議如下：

- 加強區域空氣質素管理的合作
- 建立綜合區域空氣監測網絡
- 建立全面的動態區域空氣污染物排放清單
- 為重大空氣污染事故制定區域預報和預警系統
- 優化工業區的空間佈局，以助管理區域性二次污染物
- 加強流動污染源的防治，鼓勵非機動車運輸
- 收緊控制重點污染源，減少空氣污染物排放量
- 優化能源結構，減少煤炭消耗量
- 加強控制氨氣排放和露天燃燒
- 通過跨區域科學研究加深了解空氣污染過程

## 4 結論和建議

### 4.1 結論

- 4.1.1 遙感分析顯示地區大氣中的 PM<sub>2.5</sub> 自 2008 年顯著減少，其中 2012 年的下調幅度尤其觸目。然而，珠三角地區各城市的年均 PM<sub>2.5</sub> 濃度依然高於世衛組織《空氣質量準則》的建議，為保障公眾健康免受珠三角地區的空气污染侵害，珠三角三地政府需要進一步開展工作以改善區域的空氣質素。
- 4.1.2 2015 年珠三角地區 PMF 源解析的結果非常穩定及可靠。PMF 為廣東珠三角地區識別出九個排放源因子，香港和澳門則識別出八個源因子，各組結果有七個共同因子，廣東珠三角地區餘下兩個因子（工業源和二次硝酸鹽）混合為香港和澳門的第八個因子。當香港和澳門加入非極性有機化合物物種的數據，PMF 便能識別煤炭燃燒為另一因子。這突顯非極性有機化合物物種數據有助識別過往未能分辨的因子。
- 4.1.3 二次硫酸鹽和汽車尾氣是廣東珠三角地區、香港和澳門首兩位的 PM<sub>2.5</sub> 來源。二次硝酸鹽是廣東珠三角地區和澳門的第三大源，而渣油則是香港的第三大源。地殼土壤、生物質燃燒和工業源的比重在廣東珠三角地區最高，渣油在澳門最高，而海鹽在三個地區的影響相若。
- 4.1.4 概念模型識別和分辨本地和外來源對珠三角地區 PM<sub>2.5</sub> 污染的影響。本地污染比重一般較外來污染低。本地污染對內陸的影響會較沿海地區高。除此以外，本地污染的影響在夏季較冬季高。
- 4.1.5 珠三角各地區在一年中超過一半時間會處於同一空氣區域內，當它被分成兩個空氣區域時，內陸往往在春季和夏季形成一個獨立的空氣區域，而沿海地區則在秋季和冬季形成一個獨立的空氣區域。
- 4.1.6 珠三角地區的 PM<sub>2.5</sub> 水平主要受氣象條件帶動。在一些不利的氣象條件下，嚴格的排放控制可減輕該地區的污染。
- 4.1.7 隨著珠三角地區多年來實施更嚴格的管制政策，空氣污染物排放量由 2012 年至 2015 年已有所下降。在不久的將來，如 2020 年，若中國和珠三角地區落實「十三五規劃」和「香港空氣污染管制策略」等近期控制措施，污染水平將進一步下降。除船舶排放外，所有排放源的排放將會減少。

### 4.2 建議

- 4.2.1 所有的政策建議都要盡可能有數據支持和說明。特別是上述十個建議的政策，當中強調加強珠三角地區跨區域科學及政策層面的合作。