

# 計量報告文獻整理

## Empirical results

### 4.1 地鐵網絡密度對污染影響的估計

OLS 回歸分析結果：

$$\ln(\text{Air Pollution}_{it}) = \beta_1(\text{Density}_{it} / \sigma) + \text{Monitor}_i + \text{Trend}_{it} + \beta_2 * \text{Weather}_t + \text{Monitor}_i \times \text{Driving}_t + \text{Year}_t + \text{Season}_t + \text{DoW}_t + \text{Holiday}_t + \varepsilon_{it}$$

表 7 顯示了基於公式 (1) 中連續密度指標的普通最小二乘法 (OLS) 回歸結果。核心變量是標準化的地鐵網絡密度。我們依次加入了天氣變量、風力條件、一組豐富的地區和時間固定效應，以及駕駛限制政策作為控制變量。

初步回歸：

在第 (1) 欄中，未包含監測站的固定效應，結果顯示地鐵網絡密度與空氣污染水平之間存在正相關。這可能是因為地鐵網絡較密集的地區通常位於城市中心，而城市中心的污染水平往往較高。

控制固定效應後：

從第 (2) 欄開始加入監測站固定效應，結果顯示地鐵密度較高的地區空氣污染水平較低，這種負相關在第 (2) 至第 (4) 欄中具有穩健性。

- 在第 (3) 欄中，監測站固定效應與駕駛限制政策進行了交互，進一步支持了地鐵擴展與空氣污染減少之間的負相關關係。
- 第 (4) 欄則進一步加入了監測站特定的時間趨勢。這有助於減輕地鐵線路布局內生性可能帶來的偏差。具體而言，地鐵線路通常優先建於經濟活動增長更快（因此空氣污染可能更高）的地區。如果不控制這些特徵，地鐵擴展對空氣質量的影響可能會被低估。

主要發現：

- 從完整模型（第 4 欄）的結果看，地鐵網絡密度每增加一個標準差，空氣污染水平降低1.5%。
- 這一估計利用了網絡密度和空氣污染在空間和時間上的變化，可被解釋為長期影響。
- 與文獻中基於差分法 (DID) 或回歸不連續法的研究相比，我們的估計影響較小，因為這些方法通常使用更短的時間窗口來處理潛在的混雜因

素。我們後續的 DID 分析也證實了這一點，估計的短期影響通常更大。

### 天氣變量的影響：

天氣條件的影響與直覺一致：

- 高溫和**高濕度**與更高的空氣污染水平相關，而**降雨/降雪和強風**則與更低的空氣污染相關。
  - 高溫會加速地面臭氧和細顆粒物的形成。
  - 高濕度（無降水情況下）會阻礙空氣的自然流動，難以驅散污染物。
  - 降雨或降雪以及強風有助於更快地消散污染物。

相比 Gendron-Carrier 等（2018）的研究，本研究估計的污染減少影響較小。這可能是因為 Gendron-Carrier 等研究中的大多數地鐵系統是所在城市的第一條地鐵線，影響較大。此外，使用 DID 或回歸不連續方法的研究（如 Chen 和 Whalley，2012；Zheng 等，2017）通常估計出的影響更大，因為這些方法更側重短期和局部影響。

本研究與文獻的結論一致，即長期影響通常小於短期影響，但仍顯著表明地鐵擴展對改善空氣質量具有重要作用。

## 4.2 差分法估計

$$\ln(\text{Air Pollution}_{it}) = \theta \text{Treated}_{it} \times 1(\text{Post}_t) + \text{Monitor}_i + \text{Trend}_{it} + \text{Weather}_t \beta + \text{Monitor}_i \times \text{Driving}_t + \text{Year}_t + \text{Season}_t + \text{DoW}_t + \text{Holiday}_t + \varepsilon_{it},$$

### 基本 DID 模型結果：

表 10 展示了基於公式 (2) 的差分法 (DID) 模型的結果，各欄結果與表 7 展示的模式類似。

- 在**不包含監測站固定效應**的第 (1) 至第 (3) 欄中，地鐵的開通與空氣污染水平均值呈**正相關**。
- 在**加入監測站固定效應**後，第 (4) 至第 (6) 欄基於 DID 模型提供了地鐵開通對空氣污染影響的類似估計。（負相關）
- 第 (6) 欄的結果表明，在地鐵線開通後 60 天內，位於地鐵站周邊 2 公里範圍內的監測站，其空氣污染水平均值相比於距離地鐵站 20 公里以外的監測站，降低了**7.7%**。

相比於基於連續密度指標的框架，DID 模型估計的影響值較大，這可能有兩個原因：

1. **短期效應：**
  - DID 方法專注於較短的時間窗口，而密度指標方法使用了整個數據期間的變化，因此 DID 的估計結果應被視為短期影響。
2. **局部效應：**
  - DID 模型評估的是地鐵線開通後 2 公里範圍內的局部影響，而密度指標方法估計的是整個城市的影響，局部影響通常會更大。

**表 11 不同時間窗口下的回歸結果：**

表 11 展示了基於不同時間（從開通日前後 10 天至 180 天）進行的回歸結果。

- 在 40 至 100 天的窗口範圍內（第 4 至第 10 欄），**顯著的負相關**結果在統計上沒有明顯差異。
- 當窗口增加到 110 天及以上時，平均影響開始減弱。
  - 這與短期內通勤者需要時間調整其出行模式並使其對空氣污染的影響顯現一致。
  - 長期來看，交通擁堵的減少可能帶來額外的駕車需求，從而緩解了最初的空氣污染減少效果。
  - 這一動態反映了短期內交通分流效應與長期內誘導交通需求之間的平衡，與研究引言中的討論一致。

**表 12 時間變量的連續影響：**

表 12 分析了時間變量的連續影響，通過將處理組指標與開通日後的線性和二次項交互進行建模。結果顯示地鐵開通對空氣污染的影響**具有非線性特徵**：

1. 在開通後大約 15 至 20 天，地鐵開通開始對空氣污染產生顯著的負面影響。
2. 隨後影響的幅度逐漸增強，但增長速度放緩，並在 50 至 60 天左右達到峰值。
3. 超過此時點後，影響逐漸減弱。

**表 13 監測站周邊地鐵站數量的影響結果：**

表 13 基於 DID 規範分析了地鐵站數量對處理組監測站的影響，結果如下：

- **每新增一個地鐵站**，監測站周邊的空氣污染水平平均下降**2% 至 4.1%**，具體取決於模型規範。

- 與基於地鐵網絡密度的工具變量 (IV) 方法相比，DID 方法雖然質的結論一致，但給出的點估計值明顯更大。

這一比較揭示了地鐵投資的兩種相互作用的效應：

1. **交通分流效應 (Mohring 效應)：**  
公共交通基礎設施的改善減少了私家車使用。
2. **誘導需求效應：**  
在更長時間範圍內，交通便利性提升可能吸引更多人選擇駕車，從而抵消短期內的空氣質量改善。

本文利用分批開通 (staggered rollout) 設計獲得以下結論：

分批開通 (staggered rollout) 指地鐵線路在不同時間點分批投入運營，這種設計提供了天然實驗的特性，有助於識別地鐵開通對空氣污染的影響。

在本文中，分批開通的策略通過以下方式實現：

1. **動態效應識別：**比較地鐵開通前後的空氣污染變化，分析短期與長期影響。
2. **控制時間和空間的干擾：**透過分批次開通避免全市性政策或外部事件的干擾，加入時間固定效應進一步消除整體趨勢影響。
3. **組間對比：**將地鐵站周圍 (2 公里內) 與遠距離 (20 公里外) 的監測站進行比較，分析地鐵影響的空間分佈。

研究結果顯示：

- 地鐵新線開通對周邊空氣污染有顯著減少作用，但**影響在長期內可能因誘發需求效應而減弱**。
- 分批次分析提高了結果的穩健性，證明地鐵擴建對空氣污染的影響具有局部性與時間敏感性。

這一策略有效地揭示了地鐵擴建的短期與長期效益，並為政策評估提供了可靠的實證依據。