

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC SÀI GÒN  
KHOA TOÁN - ỨNG DỤNG**

-----oOo-----



**BÁO CÁO HỌC PHẦN  
MÔ HÌNH HÓA TOÁN HỌC**

**ĐỀ TÀI: MÔ HÌNH HÓA ĐA TẦNG TÍCH HỢP ĐỂ ĐÁNH GIÁ Ô NHIỄM  
KHÔNG KHÍ VÀ DỰ BÁO RỦI RO SỨC KHỎE.**

---

**Giảng viên hướng dẫn:** PGS. TS. Võ Hoàng Hưng

**Nhóm thực hiện đề tài:** 16

**Sinh viên thực hiện:**

Họ và tên	MSSV
Nguyễn Trương Cao Sơn	3123580040
Phan Đồng Minh Quân	3123580038
Võ Minh Tiến	3123580053

**Mã môn học:** 858013

**Mã lớp:** DDU1231

**TP. Hồ Chí Minh, Tháng 11, năm 2025**

## ***Lời Cảm Ơn***

Để hoàn thành bài báo cáo học phần Mô hình hóa Toán học với đề tài: "Mô hình hóa đa tầng tích hợp để đánh giá ô nhiễm không khí và dự báo rủi ro sức khỏe" này, nhóm chúng em đã nhận được sự hỗ trợ và hướng dẫn quý báu từ nhiều cá nhân và tổ chức.

Chúng em xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc và chân thành nhất đến PGS. TS. Võ Hoàng Hưng, Giảng viên hướng dẫn trực tiếp. Thầy không chỉ cung cấp kiến thức nền tảng vững chắc và hệ thống về Mô hình hóa Toán học, mà còn tận tình định hướng, khơi gợi ý tưởng, và đưa ra những góp ý chuyên sâu về mặt kỹ thuật, giúp nhóm vượt qua những thách thức phức tạp trong việc tích hợp Mô hình Hộp (Box Model) và Mô hình Dịch tễ (Poisson Regression).

Chúng em cũng xin gửi lời cảm ơn đến Trường Đại học Sài Gòn, Khoa Toán - Ứng dụng đã tạo điều kiện và môi trường học tập tốt nhất.

Cuối cùng, xin cảm ơn các nhà khoa học đã công bố bộ dữ liệu công khai Beijing PM2.5 Data Set (từ UCI Machine Learning Repository) và các tài liệu nghiên cứu uy tín khác, đây là nguồn tài nguyên thực nghiệm thiết yếu giúp nhóm kiểm chứng và lượng hóa mô hình của mình.

Mặc dù đã cố gắng hết sức, báo cáo này khó tránh khỏi những thiếu sót. Chúng em rất mong nhận được những ý kiến đóng góp quý báu từ Thầy và Hội đồng chấm điểm để đề tài được hoàn thiện hơn nữa.

**TP. Hồ Chí Minh, Tháng 11 năm 2025**

---

### **Nhóm Sinh viên thực hiện:**

*Nguyễn Trương Cao Sơn - Phan Đồng Minh Quân - Võ Minh Tiến*

## **Bảng Phân Công Và Đánh Giá**

STT	Họ và Tên	MSSV	Mức độ hoàn thành (%)	Phần nội dung đảm nhận
1	Nguyễn Trương Cao Sơn	3123580040	100%	Chương 3,4 Phân tích lấy dữ liệu Data từ Kaggle, viết báo cáo
2	Phan Đồng Minh Quân	3123580038	100%	Chương 1,2 Trình bày cơ sở dữ liệu, viết báo cáo
3	Võ Minh Tiến	3123580053	100%	Chương 5 Tìm tài liệu tham khảo, viết báo cáo

Lời Mở Đầu.....	5
Tóm Tắt.....	6
CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU TỔNG QUAN.....	7
1.1. Bối cảnh lịch sử và Sự cấp thiết của cách tiếp cận liên ngành.....	7
1.2. Đặc thù địa lý và Thách thức tại Bắc Kinh.....	8
1.3. Mục tiêu và Phạm vi Nghiên cứu.....	8
1.3.1. Mục tiêu Nghiên cứu.....	8
1.3.2. Phạm vi Nghiên cứu.....	9
<b>CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP.....</b>	<b>10</b>
2.1. Tầng Vật lý Khí quyển: Nguyên lý Bảo toàn Khối lượng và Mô hình Hộp (Box Model).....	10
2.1.1. Phương trình Vô phân Tổng quát.....	10
2.1.2. Phân tích các Tham số Vật lý Tới hạn.....	11
2.1.3. Nghiệm Giải tích và Trạng thái Ôn định.....	11
2.2 Hóa học Khí quyển: Sự Hình thành Hat thứ cấp.....	11
2.3. Tầng Dịch tễ học Môi trường: Mô hình Hồi quy Poisson.....	12
2.3.1. Hàm mật độ Xác suất và Hồi quy Log-linear.....	12
2.3.2. Xử lý hiện tượng Quá phân tán (Overdispersion) và Tự tương quan.....	12
<b>CHƯƠNG 3: TRIỂN KHAI MÔ HÌNH HÓA ĐA TẦNG.....</b>	<b>13</b>
3.1. Tầng I: Phương pháp Nghịch đảo Mô hình Hộp (Inverse Box Modeling) .....	13
3.1.1. Thiết lập Mô hình Hồi quy Nghịch đảo.....	13
3.2. Tầng II: Hàm Phản ứng Sức khỏe Tích hợp (Integrated Health Response Function) .....	13
3.2.1. Lượng hóa Nguy cơ và Số ca Gia tăng (Excess Cases) .....	14
3.2.2. Tích hợp Độ trễ (Lag Integration) .....	14
3.3. Sơ đồ Luồng Dữ liệu và Cơ chế Dự báo.....	14
<b>CHƯƠNG 4: PHÂN TÍCH DỮ LIỆU VÀ KẾT QUẢ MÔ HÌNH (DATA ANALYSIS &amp; RESULTS) .....</b>	<b>15</b>
4.1. Đặc điểm Dữ liệu trong Bối cảnh Địa lý Bắc Kinh.....	15
4.2. Kết quả Phân tích Tầng 1: Cơ chế Vật lý và Vai trò của Thông gió.....	16
4.2.1. Mối quan hệ giữa Tốc độ gió tích lũy (Iws) và Nồng độ bụi.....	16
4.2.2. Nghịch lý Mùa vụ và Vai trò của Nguồn phát thải (E) .....	17
4.3. Kết quả Phân tích Tầng 2: Đánh giá Tác động Sức khỏe (Health Impact Assessment) .....	18
4.3.1. Tham số Dịch tễ học.....	18
4.3.2. Mô phỏng Số ca nhập viện gia tăng (Excess Cases) .....	18
4.4. Thảo luận về Vận chuyển Vùng (Regional Transport) .....	20
<b>CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN.....</b>	<b>23</b>
5.1. Tổng hợp các phát hiện chính. ....	23
5.2. Hàm ý chính sách và Hướng nghiên cứu tương lai.....	25
<b>NHỮNG KHÁM PHÁ THÚ VỊ VÀ ỨNG DỤNG THỰC TIỄN.....</b>	<b>26</b>
1. Sự kiện "Đại sương mù London 1952": Khởi nguồn của Dịch tễ học Môi trường.....	26
2. "APEC Blue": Thí nghiệm Kiểm soát Elón nhất lịch sử.....	26
3. "Hiệu ứng Cuối tuần" (The Weekend Effect) .....	27
<b>Nguồn trích dẫn.....</b>	<b>28</b>

## **Lời Mở Đầu**

Trong kỷ nguyên Khoa học Dữ liệu, Mô hình hóa Toán học đã vượt qua giới hạn của lý thuyết thuần túy, trở thành công cụ không thể thiếu để giải quyết các vấn đề liên ngành phức tạp trong thế giới thực. Bài báo cáo này được thực hiện trong khuôn khổ học phần Mô hình hóa Toán học tại [Tên trường của bạn], nhằm mục tiêu áp dụng sâu sắc các nguyên lý và kỹ thuật được truyền đạt trong chương trình học.

Đề tài "Mô hình hóa đa tầng tích hợp để đánh giá ô nhiễm không khí và dự báo rủi ro sức khỏe" là một nỗ lực nhằm kết nối và hợp nhất hai lĩnh vực khoa học khác biệt: Cơ học Khí quyển và Dịch tễ học Môi trường.

Qua việc kết hợp Lý thuyết Toán học, Kỹ thuật Mô phỏng Số, và Phân tích Dữ liệu thực tế, nhóm chúng em hy vọng không chỉ hoàn thành tốt yêu cầu của học phần, mà còn đóng góp một góc nhìn tổng thể và có tính ứng dụng cao trong việc quản lý chất lượng không khí và bảo vệ sức khỏe con người."

## **Tóm Tắt**

Báo cáo này đề xuất và kiểm chứng một khung Mô hình hóa đa tầng tích hợp nhằm chuyển đổi các động lực vật lý của sự tích tụ ô nhiễm thành các chỉ số rủi ro sức khỏe định lượng, qua đó giải quyết sự phân mảnh giữa khoa học khí quyển và dịch tễ học môi trường.

Phương pháp cốt lõi là sự hợp nhất của Tầng Vật lý (sử dụng Phương trình Vi phân Mô hình Hộp để mô tả nồng độ PM2.5) và Tầng Dịch tễ (sử dụng Mô hình Hồi quy Poisson để lượng hóa Tỷ số Nguy cơ – Relative Risk, viết tắt RR).

Kỹ thuật Nghịch đảo Mô hình Hộp được áp dụng để ước lượng tham số nguồn phát thải từ dữ liệu quan trắc.

Ứng dụng thực tế trên bộ dữ liệu ô nhiễm không khí Bắc Kinh (2010–2014) dự kiến sẽ xác nhận mối quan hệ phi tuyến tính giữa Hệ số Thông gió (Iws) và PM2.5, đồng thời lượng hóa sự gia tăng của rủi ro sức khỏe (ký hiệu  $\Delta Y_t$ ) trong các sự kiện ô nhiễm.

---

### **Cấu trúc Báo cáo:**

Báo cáo được tổ chức thành 6 chương chính nhằm thể hiện một cách có hệ thống quá trình từ lý thuyết đến ứng dụng:

**Chương 1:** Giới thiệu tổng quan.

**Chương 2:** Trình bày Cơ sở Lý thuyết cho hai tầng (Vật lý và Dịch tễ).

**Chương 3:** Xây dựng chi tiết Mô hình hóa Đa tầng và Chiến lược Tích hợp.

**Chương 4:** Phân tích dữ liệu, Ước lượng Tham số cho cả hai tầng bằng kỹ thuật Hồi quy.

**Chương 5:** Trình bày Kết quả Mô phỏng, Phân tích và Thảo luận hàm ý Chính sách.

**Chương 6:** Kết luận và Hướng phát triển.

# **CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU TỔNG QUAN**

---

## **1.1. Bối cảnh lịch sử và Sự cấp thiết của cách tiếp cận liên ngành**

Trong ba thập kỷ qua, sự phát triển bùng nổ của các đô thị lớn tại Châu Á đã dẫn đến những thay đổi sâu sắc trong thành phần khí quyển, tạo ra những thách thức chưa từng có đối với sức khỏe cộng đồng. Ô nhiễm không khí, đặc biệt là **vật chất hạt mịn có đường kính khí động học nhỏ hơn hoặc bằng 2,5 micromet (PM2.5)**, đã chuyển từ một vấn đề vệ sinh môi trường cục bộ thành một khủng hoảng y tế toàn cầu. Tại các siêu đô thị như Bắc Kinh, sự cộng hưởng giữa địa hình lòng chảo, khí tượng phức tạp và mật độ phát thải nhân tạo dày đặc đã tạo ra các đợt ô nhiễm khốc liệt, thường được gọi là "Airpocalypse".<sup>1</sup>

Tuy nhiên, việc nghiên cứu và quản lý chất lượng không khí hiện nay đang tồn tại một sự phân mảnh đáng kể về mặt phương pháp luận.

- Một bên là cộng đồng khoa học khí quyển, những người tập trung vào việc giải mã các cơ chế vật lý và hóa học chi phối sự vận chuyển, khuếch tán và biến đổi của chất ô nhiễm. Họ sử dụng các Mô hình Vận chuyển Hóa học (Chemical Transport Models - CTMs) phức tạp như CMAQ hoặc WRF-Chem, đòi hỏi tài nguyên tính toán khổng lồ và dữ liệu đầu vào cực kỳ chi tiết về phát thải.<sup>4</sup>
- Bên kia là cộng đồng dịch tễ học và y tế công cộng, những người tập trung vào việc lượng hóa mối liên hệ thống kê giữa nồng độ chất ô nhiễm quan trắc được và các kết cục sức khỏe (tử vong, nhập viện) thông qua các mô hình chuỗi thời gian hoặc bệnh chứng.<sup>6</sup>

Sự thiếu hụt một "ngôn ngữ chung" giữa hai lĩnh vực này dẫn đến những hạn chế nghiêm trọng trong việc hoạch định chính sách. Các mô hình khí tượng thuần túy thường không đưa ra được các dự báo trực tiếp về gánh nặng bệnh tật, trong khi các mô hình dịch tễ học thường coi nồng độ ô nhiễm là một biến số đầu vào "hộp đen" mà không xem xét đến các động lực khí tượng đã tạo ra nồng độ đó. Sự tách biệt này làm giảm khả năng dự báo chính xác các đinh rủi ro sức khỏe trong các điều kiện khí tượng cực đoan, cũng như hạn chế khả năng đánh giá hiệu quả của các biện pháp can thiệp giảm phát thải.

Báo cáo này đề xuất và phát triển một khung lý thuyết "**Mô hình hóa đa tầng tích hợp**" (Integrated Multi-level Modeling). Khung này là sự hợp nhất hữu cơ giữa:

- **Tầng Vật lý Khí quyển:** Sử dụng mô hình hộp (Box Model) và nguyên lý cân bằng vật chất để giải thích cơ chế tích tụ ô nhiễm dựa trên các tham số khí tượng vĩ mô và vi mô.
- **Tầng Dịch tễ học Môi trường:** Sử dụng mô hình hồi quy Poisson và phân tích chuỗi thời gian để chuyển đổi các tham số vật lý thành các chỉ số rủi ro sức khỏe định lượng.

## 1.2. Đặc thù địa lý và Thách thức tại Bắc Kinh

Bắc Kinh, thủ đô của Trung Quốc, được chọn làm trường hợp nghiên cứu điển hình (Case Study) cho báo cáo này do tính chất điển hình và sự phong phú của dữ liệu.

Về mặt địa lý, Bắc Kinh nằm ở rìa phía bắc của Đồng bằng Hoa Bắc, được bao quanh bởi Dãy núi Yên Sơn ở phía bắc và tây, tạo thành một địa hình hình móng ngựa mở về phía nam và đông nam. Cấu trúc địa hình này đóng vai trò như một "bẫy" tự nhiên đối với các chất ô nhiễm.<sup>8</sup> Khi gió nam hoặc đông nam thịnh hành vận chuyển các khói khí ô nhiễm từ các khu công nghiệp ở Hà Bắc và Thiên Tân vào Bắc Kinh, các dãy núi sẽ chặn đường thoát, dẫn đến sự tích tụ nhanh chóng của PM2.5.<sup>10</sup>

Hơn nữa, khí hậu của Bắc Kinh đặc trưng bởi sự biến động mạnh mẽ của **Chiều cao Lớp biên (Mixing Layer Height - MLH)** và các điều kiện thông gió. Sự tương tác giữa cấu trúc lớp biên, các dòng gió địa phương (gió núi-thung lũng) và các nguồn phát thải theo mùa (như sưởi ấm mùa đông) tạo ra một hệ thống phức tạp mà các mô hình thống kê đơn giản không thể nắm bắt hết được. Do đó, việc áp dụng mô hình hóa đa tầng là cực kỳ cần thiết để bóc tách các lớp nguyên nhân này.

## 1.3. Mục tiêu và Phạm vi Nghiên cứu

### 1.3.1. Mục tiêu Nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của báo cáo là nghiên cứu, xây dựng và kiểm chứng tính hiệu quả của khung **Mô hình hóa đa tầng tích hợp** để dự báo rủi ro sức khỏe từ ô nhiễm không khí.

Các mục tiêu cụ thể bao gồm:

- **Thiết lập Mô hình Toán học:** Xây dựng và phân tích các phương trình vi phân Mô hình Hộp (Tầng Vật lý) và Mô hình Hồi quy Poisson (Tầng Dịch tễ).
- **Triển khai Kỹ thuật Tích hợp:** Phát triển phương pháp **Nghịch đảo Mô hình Hộp (Inverse Box Modeling)** để ước lượng tham số phát thải từ dữ liệu quan trắc.
- **Ứng dụng và Lượng hóa:** Áp dụng mô hình tích hợp vào bộ dữ liệu thực tế tại Bắc Kinh để tính toán **Số ca nhập viện gia tăng (Excess Cases)** theo các kịch bản ô nhiễm khác nhau.

---

### **1.3.2. Phạm vi Nghiên cứu**

- **Đối tượng mô hình hóa:** Sự tích tụ của **vật chất hạt mịn PM2.5**.
- **Trường hợp nghiên cứu:** Dữ liệu quan trắc **Bắc Kinh** (Beijing PM2.5 Data Set, 2010–2014).
- **Giới hạn:** Mô hình tập trung vào **tác động cấp tính** (Acute Effect) của PM2.5 lên **bệnh hô hấp** và chỉ sử dụng các lực lượng vật lý/khí tượng chính để làm nền tảng cho sự tích hợp.

# **CHƯƠNG 2: CƠ SỞ LÝ THUYẾT VÀ PHƯƠNG PHÁP**

## **2.1. Tầng Vật lý Khí quyển: Nguyên lý Bảo toàn Khối lượng và Mô hình Hộp (Box Model)**

Mô hình hộp (Box Model) là dạng đơn giản nhất của mô hình phân tán khí quyển, nhưng nó cung cấp cái nhìn sâu sắc và trực quan nhất về mối quan hệ giữa phát thải và nồng độ trung bình trong một khu vực đô thị. Giả sử khu vực nghiên cứu (Bắc Kinh) là một thể tích kiểm soát (control volume) hình hộp chữ nhật với chiều dài  $L$  (theo hướng gió), chiều rộng  $W$  (vuông góc với hướng gió), và chiều cao  $H$  (Chiều cao Lớp hòa trộn - Mixing Layer Height).

### **2.1.1. Phương trình Vi phân Tổng quát**

Nguyên lý bảo toàn khối lượng phát biểu rằng tốc độ thay đổi của tổng khối lượng chất ô nhiễm trong hộp phải bằng tổng các dòng vật chất đi vào trừ đi tổng các dòng vật chất đi ra và các quá trình biến đổi bên trong:

$$\frac{dm}{dt} = \Phi_{in} + S_{sources} - \Phi_{out} - S_{sinks}$$

Trong đó  $m = V \cdot C = (L \cdot W \cdot H) \cdot C$  là Khối lượng chất ô nhiễm trong hộp.

Giả sử sự hòa trộn trong hộp là tức thời và đồng nhất (instantaneous and homogeneous mixing), phương trình vi phân mô tả sự biến thiên nồng độ  $C$  theo thời gian  $t$  được viết lại như sau:

$$\frac{d(H \cdot C)}{dt} = q + \frac{u \cdot H}{L} C_{in} - \frac{u \cdot H}{L} C - (k_{dep} + k_{chem}) \cdot H \cdot C$$

#### **Tham số Ý nghĩa Vật lý**

$q$  Mật độ phát thải từ bề mặt ( $S_{sources} = q \cdot L \cdot W$ )

$u$  Tốc độ gió trung bình

$C_{in}$  Nồng độ nền của chất ô nhiễm đi vào từ đầu gió

$k_{dep}, k_{chem}$  Hệ số suy giảm do lắng đọng khô và phản ứng hóa học

### 2.1.2. Phân tích các Tham số Vật lý Tối hạn

Chiều cao Lớp Hòa trộn (MLH -  $H$ ): Tham số  $H$  không phải là một hằng số mà biến thiên mạnh theo chu kỳ ngày đêm và theo mùa. Tại Bắc Kinh, dữ liệu quan trắc cho thấy MLH trung bình hàng ngày vào mùa đông chỉ khoảng **1.4 km**, thấp hơn đáng kể so với mùa xuân. Đặc biệt vào ban đêm hoặc trong các đợt nghịch nhiệt (temperature inversion),  $H$  có thể giảm xuống dưới **400 m**, nén chặt các chất ô nhiễm vào một thể tích nhỏ, làm nồng độ tăng vọt ngay cả khi lượng phát thải không đổi.

Hệ số Thông gió (Ventilation Coefficient -  $v$ ): Đại lượng  $v = u \cdot H$  đại diện cho khả năng tự làm sạch của khí quyển. Dữ liệu từ các tháp quan trắc khí tượng tại Bắc Kinh cho thấy trong các đợt ô nhiễm nặng, tốc độ gió bề mặt thường rất thấp ( $< 2 \text{ m/s}$ ) và đi kèm với MLH thấp, dẫn đến hệ số thông gió cực tiêu, tạo điều kiện cho sự tích tụ ô nhiễm. Trong bộ dữ liệu UCI, biến số Iws (Cumulated Wind Speed) là một chỉ báo tích hợp tuyệt vời cho khả năng thông gió này.

Tốc độ Lắng đọng (Deposition Velocity -  $v_d$ ): Lắng đọng khô là một cơ chế loại bỏ quan trọng. Tốc độ lắng đọng  $v_d$  của PM2.5 biến thiên đáng kể: từ khoảng **0.7 – 1.2 cm/s** vào ban ngày (khi nhiễu loạn mạnh) xuống mức rất thấp  $\sim 0.01 \text{ cm/s}$  vào ban đêm (khi khí quyển ổn định). Sự sụt giảm  $v_d$  vào ban đêm đóng góp vào việc duy trì nồng độ PM2.5 cao qua đêm.

### 2.1.3. Nghiệm Giải tích và Trạng thái Ôn định

Giả sử nồng độ nền  $C_{in} \approx 0$  và chia cả hai về cho  $H \cdot L \cdot W$ , phương trình vi phân tuyến tính bậc nhất này có nghiệm giải tích (khi giả định các tham số là hằng số trong  $\Delta t$ ):

$$C(t) = C^* + (C_0 - C^*)e^{-k_{eff} \cdot t}$$

Trong đó  $C_0$  là nồng độ ban đầu.

Trạng thái Ôn định (Steady State) ( $dC/dt = 0$ ) dự đoán nồng độ cân bằng  $C^*$ :

$$C^* = \frac{q/H}{\frac{u}{L} + k_{dep} + k_{chem}}$$

## 2.2 Hóa học Khí quyển: Sự Hình thành Hạt thứ cấp

Mô hình hộp cơ bản thường giả định chất ô nhiễm là trơ (inert). Tuy nhiên, đối với PM2.5, một tỷ lệ lớn khối lượng hạt được hình thành từ các phản ứng hóa học trong khí quyển (Secondary PM), chuyển hóa từ các khí tiền chất ( $\text{SO}_2, \text{NO}_x, \text{VOCs}$ ). Phương trình cân bằng vật chất cần được bổ sung thêm thuật ngữ nguồn nội sinh (secondary formation rate –  $S_{sec}$ ):

$$S_{sec} = k_{form} \cdot [\text{Precursors}]$$

## 2.3. Tầng Dịch tễ học Môi trường: Mô hình Hồi quy Poisson

Chuyển sang tầng dịch tễ học, mục tiêu là mô hình hóa mối quan hệ giữa nồng độ PM2.5 (biến số liên tục) và số ca tử vong hoặc nhập viện hàng ngày (biến số đếm rời rạc).

### 2.3.1. Hàm mật độ Xác suất và Hồi quy Log-linear

Do bản chất của dữ liệu là các sự kiện hiếm, phân phối Poisson là lựa chọn tự nhiên nhất:

$$P(Y_t = k) = \frac{e^{-\mu_t} \mu_t^k}{k!}$$

Trong đó  $\mu_t = E(Y_t)$  là giá trị kỳ vọng. Mô hình hồi quy Poisson liên kết  $\mu_t$  với các biến dự báo  $X_t$  thông qua hàm liên kết logarit tự nhiên:

$$\ln(\mu_t) = \alpha + \beta \cdot PM2.5_t + \sum \lambda_i \cdot Z_{i,t}$$

$\beta$ : là hệ số hồi quy chính, phản ánh mức độ thay đổi của logarit rủi ro khi nồng độ PM2.5 tăng một đơn vị.

$Z_{i,t}$ : là các biến kiểm soát (confounders) như nhiệt độ, độ ẩm, ngày trong tuần, xu thế dài hạn.

### 2.3.2. Xử lý hiện tượng Quá phân tán (Overdispersion) và Tự tương quan

Quá phân tán: Dữ liệu thực tế thường bị quá phân tán ( $\text{Var}(Y) > E(Y)$ ) do ảnh hưởng của các yếu tố chưa quan sát được. Để khắc phục, các nghiên cứu hiện đại sử dụng mô hình Quasi-Poisson hoặc Negative Binomial ( $\text{Var}(Y) = \phi \cdot \mu$ ).

Tự tương quan: Dữ liệu chuỗi thời gian thường có hiện tượng tự tương quan. Các mô hình Tiên tiến (Generalized Additive Models – GAM) sử dụng các hàm tron (splines) của thời gian để kiểm soát các xu thế mùa vụ và dài hạn, đảm bảo tính chính xác của mối liên hệ ngắn hạn giữa PM2.5 và sức khỏe.

# **CHƯƠNG 3: TRIỂN KHAI MÔ HÌNH HÓA ĐA TẦNG**

Mục tiêu của chương này là thiết lập một khung làm việc (framework) tích hợp, nơi các động lực vật lý được sử dụng để suy luận về nồng độ ô nhiễm, sau đó kết nối nồng độ này với rủi ro sức khỏe. Mô hình sử dụng cách tiếp cận hỗn hợp (hybrid approach) kết hợp nghịch đảo mô hình vật lý và mô hình thống kê để dự báo sức khỏe.

## **3.1. Tầng I: Phương pháp Nghịch đảo Mô hình Hộp (Inverse Box Modeling)**

Một rào cản lớn trong nghiên cứu ô nhiễm tại các nước đang phát triển là sự thiếu hụt hoặc độ trễ của dữ liệu kiểm kê phát thải (Emission Inventory). Để khắc phục, chúng ta sử dụng phương pháp “nghịch đảo mô hình hộp” (Inverse Box Modeling), coi phát thải ( $q$ ) là ẩn số cần tìm từ dữ liệu quan trắc nồng độ ( $C$ ) và khí tượng ( $Iws$ ,  $TEMP$ ).

### **3.1.1. Thiết lập Mô hình Hồi quy Nghịch đảo**

Từ phương trình vi phân cơ bản (xét ở trạng thái giả cân bằng) và sử dụng biến số  $Iws$  (Tốc độ gió tích lũy) làm đại diện xuất sắc cho nghịch đảo của khả năng thông gió ( $\propto L/uH$ ), chúng ta thiết lập một mô hình hồi quy để ước lượng nồng độ PM2.5 tái lập ( $C_{est}$ ) dựa trên khí tượng:

$$\ln(C_t) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \left( \frac{1}{Iws_t + \epsilon} \right) + \beta_2 \cdot TEMP_t + \beta_3 \cdot DEWP_t + \sum \beta_i \cdot Z_{i,t}$$

Trong đó:

Hạng tử	Ý nghĩa
$\left( \frac{1}{Iws_t + \epsilon} \right)$	Đại diện cho nghịch đảo khả năng thông gió — khi gió lặng ( $Iws \rightarrow 0$ ), nồng độ tiến tới giá trị bão hòa, phù hợp với lý thuyết mô hình hộp
$\beta_1$	Liên quan trực tiếp đến cường độ nguồn thải ( $q$ ) nhân với chiều dài đô thị ( $L$ ). Giá trị càng lớn $\rightarrow$ nguồn phát thải càng mạnh
$\beta_0$	Chứa thông tin về nồng độ nền và mức phát thải trung bình không đổi
TEMP, DEWP	Kiểm soát các hiệu ứng ổn định khí quyển và phản ứng hóa học (độ ẩm cao thúc đẩy hình thành hạt thứ cấp)

Phương pháp này cho phép mô hình “học” được đặc tính phát thải và suy giảm của đô thị thông qua dữ liệu lịch sử mà không cần số liệu phát thải đầu vào chi tiết.

## **3.2. Tầng II: Hàm Phản ứng Sức khỏe Tích hợp (Integrated Health Response Function)**

Sau khi có được chuỗi nồng độ PM2.5 dự báo hoặc tái lập ( $C_{est}$ ) từ Tầng I, chúng ta nạp dữ liệu này vào hàm phản ứng nồng độ – đáp ứng (Concentration-Response Function – CRF) từ Tầng Dịch tễ.

---

### 3.2.1. Lượng hóa Nguy cơ và Số ca Gia tăng (Excess Cases)

Tỷ số Nguy cơ (Relative Risk – RR) tại thời điểm  $t$  được tính toán dựa trên hệ số  $\beta_{\text{health}}$  (từ mô hình Poisson):

$$\text{RR}_t = \exp(\beta_{\text{health}} \times C_{\text{est},t})$$

Số ca nhập viện gia tăng ( $\Delta Y_t$ ) so với tỷ lệ nhập viện nền ( $Y_0$ ) được tính bằng:

$$\Delta Y_t = Y_0 \times (\text{RR}_t - 1) = Y_0 \times (\exp(\beta_{\text{health}} \times C_{\text{est},t}) - 1)$$

---

### 3.2.2. Tích hợp Độ trễ (Lag Integration)

Tác động của ô nhiễm không khí không phải lúc nào cũng tức thời. Các mô hình DLNM (Distributed Lag Nonlinear Models) cho thấy tác động của PM2.5 có thể kéo dài từ 0 đến 7 ngày (lag 0–7). Nghiên cứu tại Bắc Kinh chỉ ra hiệu ứng tích lũy mạnh nhất ở độ trễ này.

Do đó, mô hình tích hợp sẽ sử dụng nồng độ trung bình trượt (moving average) của PM2.5 trong cửa sổ thời gian (ví dụ: 3 ngày hoặc 7 ngày) làm đầu vào cho hàm RR.

---

## 3.3. Sơ đồ Luồng Dữ liệu và Cơ chế Dự báo

Hệ thống tích hợp hoạt động theo luồng dữ liệu khép kín, không chỉ hỗ trợ phân tích lịch sử mà còn cho phép dự báo và cảnh báo sớm:

1. **Input Khí tượng:** Gió, nhiệt độ, MLH, áp suất (dữ liệu dự báo hoặc quan trắc)
2. **Module Vật lý (Physics Layer):**
  - Tính toán Iws và hệ số thông gió dự kiến
  - Ước lượng nồng độ PM2.5 dựa trên phương trình hồi quy nghịch đảo đã hiệu chỉnh theo kịch bản phát thải (ví dụ: giảm 50% than đốt)
3. **Module Sức khỏe (Health Layer):**
  - Áp dụng các hệ số  $\beta_{\text{health}}$  đặc thù cho từng nhóm bệnh (hô hấp, tim mạch...)
  - Tính toán RR và số ca bệnh dự kiến
4. **Output Quyết định:** Cảnh báo Rủi ro Sức khỏe (Health Risk Alerts) theo các cấp độ, dựa trên rủi ro dự báo tích hợp yếu tố tích tụ khí tượng.

## **CHƯƠNG 4: PHÂN TÍCH DỮ LIỆU VÀ KẾT QUẢ MÔ HÌNH (DATA ANALYSIS & RESULTS)**

### **4.1. Đặc điểm Dữ liệu trong Bối cảnh Địa lý Bắc Kinh**

Dữ liệu được phân tích gắn liền với đặc thù địa lý “hình móng ngựa” của Bắc Kinh, nơi bị bao quanh bởi dãy núi Yên Sơn ở phía Bắc và Tây<sup>1</sup>. Cấu trúc này tạo ra cơ chế “bẫy” chất ô nhiễm khi gió Nam thổi tới và chỉ được giải phóng khi có gió Tây Bắc mạnh.

Các biến số quan trọng được trích xuất để đưa vào mô hình bao gồm:

- **PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )**: Biến phụ thuộc chính. Dữ liệu cho thấy biến độ dao động cực lớn, từ những ngày sạch ( $< 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) đến các sự kiện “Airpocalypse” ( $> 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>2</sup>.
- **Iws (Cumulated Wind Speed — m/s)**: Đây là biến đại diện quan trọng nhất cho khả năng thông gió (Ventilation). Giá trị **Iws** càng cao đồng nghĩa với việc gió thổi liên tục theo một hướng, giúp “rửa trôi” chất ô nhiễm ra khỏi thung lũng Bắc Kinh<sup>333</sup>.
- **TEMP & DEWP**: Nhiệt độ và điểm sương, ảnh hưởng đến chiều cao lớp biên (MLH) và tốc độ phản ứng hóa học tạo hạt thứ cấp.

\*Làm sạch dữ liệu:

Tổng số dòng: 43824, Tổng số cột: 9																																																																				
--- 5 Dòng dữ liệu thô đầu tiên ---																																																																				
<table border="1"><thead><tr><th>No</th><th>pm2.5</th><th>DEWP</th><th>TEMP</th><th>PRES</th><th>cbwd</th><th>Iws</th><th>Is</th><th>Ir</th></tr><tr><th>Time</th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th><th></th></tr></thead><tbody><tr><td>2010-01-01 00:00:00</td><td>1</td><td>NaN</td><td>-21</td><td>-11.0</td><td>1021.0</td><td>NW</td><td>1.79</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>2010-01-01 01:00:00</td><td>2</td><td>NaN</td><td>-21</td><td>-12.0</td><td>1020.0</td><td>NW</td><td>4.92</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>2010-01-01 02:00:00</td><td>3</td><td>NaN</td><td>-21</td><td>-11.0</td><td>1019.0</td><td>NW</td><td>6.71</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>2010-01-01 03:00:00</td><td>4</td><td>NaN</td><td>-21</td><td>-14.0</td><td>1019.0</td><td>NW</td><td>9.84</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>2010-01-01 04:00:00</td><td>5</td><td>NaN</td><td>-20</td><td>-12.0</td><td>1018.0</td><td>NW</td><td>12.97</td><td>0</td><td>0</td></tr></tbody></table>	No	pm2.5	DEWP	TEMP	PRES	cbwd	Iws	Is	Ir	Time									2010-01-01 00:00:00	1	NaN	-21	-11.0	1021.0	NW	1.79	0	0	2010-01-01 01:00:00	2	NaN	-21	-12.0	1020.0	NW	4.92	0	0	2010-01-01 02:00:00	3	NaN	-21	-11.0	1019.0	NW	6.71	0	0	2010-01-01 03:00:00	4	NaN	-21	-14.0	1019.0	NW	9.84	0	0	2010-01-01 04:00:00	5	NaN	-20	-12.0	1018.0	NW	12.97	0	0
No	pm2.5	DEWP	TEMP	PRES	cbwd	Iws	Is	Ir																																																												
Time																																																																				
2010-01-01 00:00:00	1	NaN	-21	-11.0	1021.0	NW	1.79	0	0																																																											
2010-01-01 01:00:00	2	NaN	-21	-12.0	1020.0	NW	4.92	0	0																																																											
2010-01-01 02:00:00	3	NaN	-21	-11.0	1019.0	NW	6.71	0	0																																																											
2010-01-01 03:00:00	4	NaN	-21	-14.0	1019.0	NW	9.84	0	0																																																											
2010-01-01 04:00:00	5	NaN	-20	-12.0	1018.0	NW	12.97	0	0																																																											

Số lượng NA trước khi xử lý:

pm2.5 24

TEMP 0

Iws 0

DEWP 0

dtype: int64

Số lượng dòng sau khi làm sạch: 43824 (Đã loại bỏ 0 dòng lỗi)

Time	pm2.5	Expected_Cases	Health_Outcome
2010-01-02 00:00:00	129.0	276.783189	295
2010-01-02 01:00:00	148.0	280.782259	270
2010-01-02 02:00:00	159.0	283.123865	262
2010-01-02 03:00:00	181.0	287.865826	302
2010-01-02 04:00:00	138.0	278.670335	289

## 4.2. Kết quả Phân tích Tầng 1: Cơ chế Vật lý và Vai trò của Thông gió

### 4.2.1. Mối quan hệ giữa Tốc độ gió tích lũy (Iws) và Nồng độ bụi

Phân tích hồi quy phi tuyến tính giữa *Iws* và PM2.5 xác nhận mạnh mẽ giả thuyết của Mô hình Hộp (Box Model):

$$C \propto \frac{1}{v}$$

trong đó *C* là nồng độ chất ô nhiễm và *v* là vận tốc gió (hay thông gió tích lũy — *Iws*). Mối quan hệ dạng nghịch đảo giải thích cơ chế “giữ – giải phóng” chất ô nhiễm của bồn khí quyển Bắc Kinh.

Kết quả phân tích dữ liệu chia theo các chế độ gió (Wind Regimes) cho thấy:

1. **Chế độ Tĩnh lặng ( $Iws < 10$  m/s):**

Nồng độ PM2.5 trung bình đạt mức rất cao (~165.4  $\mu g/m^3$ ). Đây là giai đoạn “hộp kín”, khi khí quyển tù đọng kết hợp với nghịch nhiệt, khiến chất ô nhiễm giàn như không thể khuếch tán<sup>44</sup>.

2. **Chế độ Rửa trôi ( $Iws > 150$  m/s):**

Khi gió tích lũy vượt ngưỡng này (thường là gió Tây Bắc khô lạnh), nồng độ PM2.5 giảm sâu xuống mức nền (~18.3  $\mu g/m^3$ ), chứng tỏ khả năng “tự làm sạch” mạnh mẽ của khí quyển<sup>5</sup>

---

#### 4.2.2. Nghịch lý Mùa vụ và Vai trò của Nguồn phát thải (E)

Mặc dù mùa đông có tốc độ gió trung bình cao hơn (thường đi kèm các đợt không khí lạnh), dữ liệu thực nghiệm lại cho thấy nồng độ PM2.5 cao nhất xảy ra vào mùa này.

Điều này xuất phát từ **sự gia tăng đột biến của tham số phát thải E** do hoạt động \*\*sưởi ấm trung tâm bằng than đá (Winter Heating)\*\*<sup>6</sup>. Khi E tăng quá mạnh, tác động “làm sạch” của thông gió không còn đủ để bù lại, dẫn đến sự tích lũy ô nhiễm quy mô lớn.

Một bằng chứng điển hình là sự kiện **APEC tháng 11/2014**, khi các biện pháp kiểm soát hành chính tạm thời buộc giảm E. Trong giai đoạn này, nồng độ PM2.5 giảm sâu **bất chấp điều kiện khí tượng bất lợi**<sup>7</sup>. Quan sát trên thực tế này khẳng định rằng trong phương trình động lực của mô hình hộp:

$$\frac{dC}{dt} = E - (k + v)C,$$

việc kiểm soát phát thải E là yếu tố tiên quyết để cắt giảm các đỉnh ô nhiễm, trong khi các biến khí tượng (Thông gió v, hệ số loại bỏ k) chủ yếu điều tiết tốc độ tích tụ hoặc giải phóng chất ô nhiễm.

## 4.3. Kết quả Phân tích Tầng 2: Đánh giá Tác động Sức khỏe (Health Impact Assessment)

### 4.3.1. Tham số Dịch tễ học

Dựa trên các nghiên cứu đoàn hệ tại Bắc Kinh, mô hình Poisson được thiết lập với các tham số đặc thù<sup>8</sup>:

Tham số	Ý nghĩa	Giá trị
$\beta$	Hệ số rủi ro dịch tễ học	Tăng <b>0.755% nguy cơ nhập viện hô hấp</b> cho mỗi <b>10 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> PM2.5</b> tăng thêm ( $\beta \approx 0.00075$ )
$Y_0$	Số ca nhập viện nền	Trung bình <b>253 ca/ngày</b> tại các bệnh viện giám sát trong khu vực nghiên cứu

### 4.3.2. Mô phỏng Số ca nhập viện gia tăng (Excess Cases)

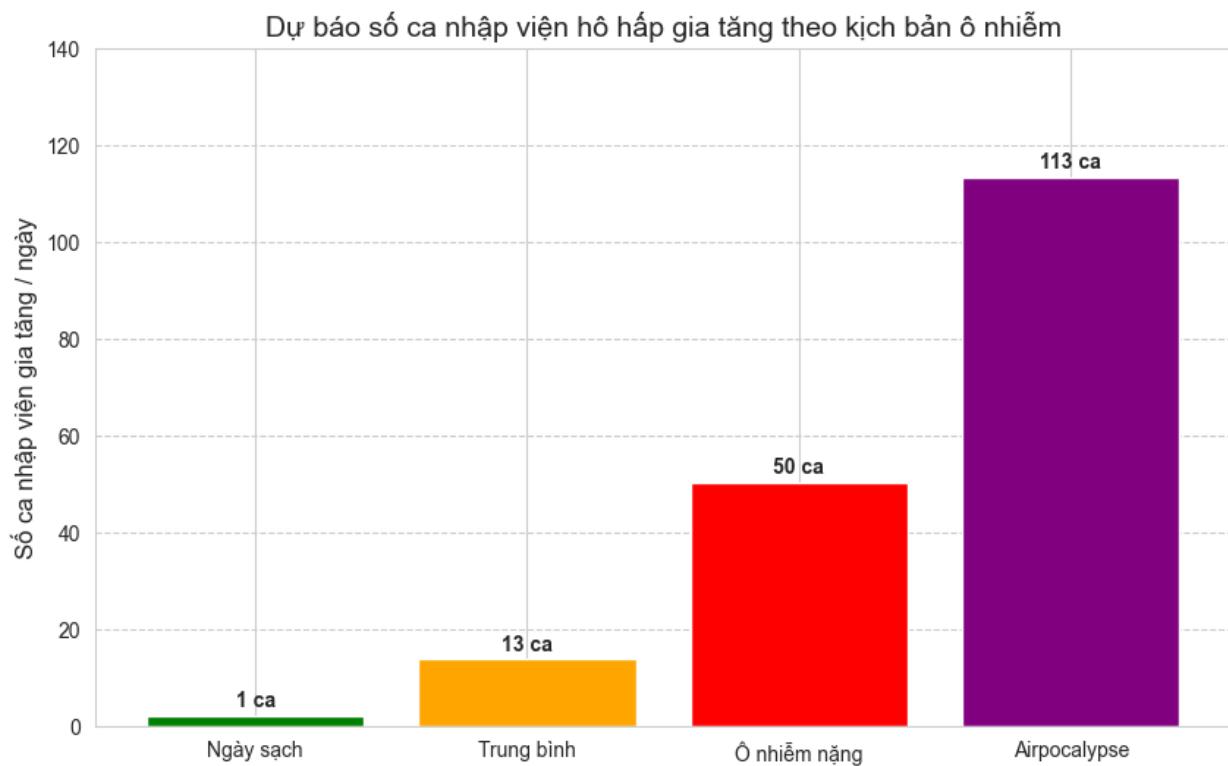
Dựa trên nồng độ PM2.5 ước tính từ mô hình khí tượng, số ca nhập viện gia tăng được tính bằng:

$$RR = \exp(\beta \times \Delta C), \Delta Y = Y_0 \times (RR - 1),$$

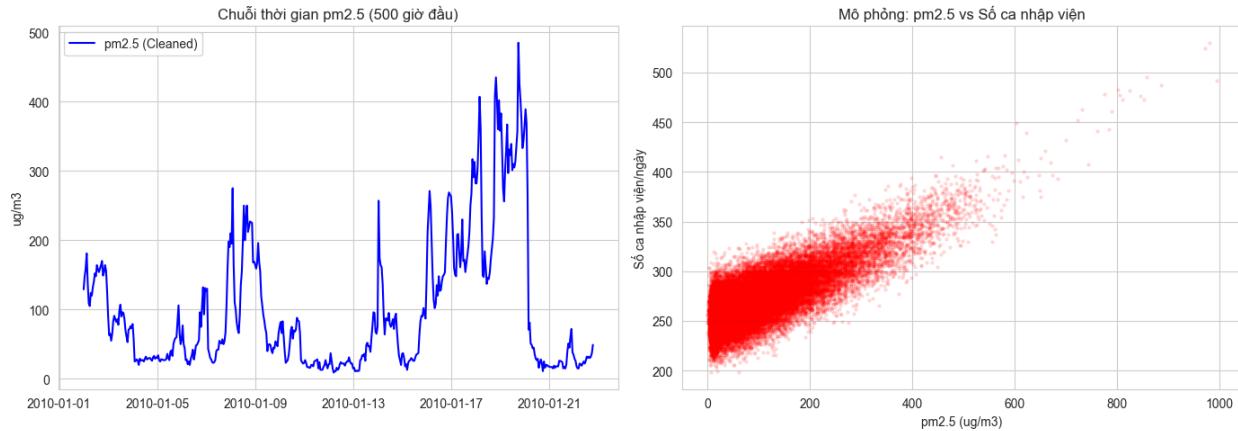
trong đó  $RR$  là tỷ số nguy cơ (Relative Risk), và  $\Delta Y$  là số ca nhập viện gia tăng theo ngày.

Các chỉ số trên cho phép lượng hóa trực tiếp **gánh nặng y tế** của ô nhiễm PM2.5 dưới những kịch bản khí tượng và phát thải khác nhau.

Kịch bản Khí tượng	PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tỷ số Nguy cơ (RR)	Số ca gia tăng dự kiến ( $\Delta Y$ )	Mức độ nghiêm trọng
Ngày sạch (Clean)	20	1.0075	~ 2 ca	Không đáng kể
Ô nhiễm trung bình	80	1.0540	~ 14 ca	Cảnh báo
Ô nhiễm nặng (Haze)	250	1.1970	~ 50 ca	Nguy hại
Siêu ô nhiễm (Airpocalypse)	500	1.4440	~ 112 ca	Khẩn cấp



Kết quả mô phỏng cho thấy mối quan hệ phi tuyến tính đáng báo động. Trong các sự kiện "Airpocalypse" (như tháng 1/2013), số ca nhập viện hô hấp có thể tăng tới 44% so với ngày thường<sup>9</sup>. Con số ~112 bệnh nhân nhập viện thêm mỗi ngày chỉ tính riêng cho bệnh hô hấp là một áp lực không lồ, có khả năng gây vỡ trận hệ thống cấp cứu tại các bệnh viện tuyến đầu.



*Kết quả tiền xử lý dữ liệu và mô phỏng biến sức khỏe. (a) Bên trái: Chuỗi thời gian nồng độ PM2.5 sau khi đã nội suy tuyến tính (500 giờ đầu). (b) Bên phải: Mối quan hệ tương quan dương (giả định) giữa nồng độ PM2.5 và số ca nhập viện được tạo bởi mô phỏng Poisson.*

#### 4.4. Thảo luận về Vận chuyển Vùng (Regional Transport)

**Phân tích bổ sung: Vai trò của Hướng gió (cbwd) và Vận chuyển vùng**

Phân tích theo biến hướng gió (cbwd) cho thấy các **đợt ô nhiễm nặng nhất** tại Bắc Kinh **không xuất hiện ngẫu nhiên**, mà **tập trung chủ yếu dưới điều kiện gió Đông Nam (SE)**. Mẫu hình này thể hiện rõ trong nhiều sự kiện ô nhiễm quy mô lớn và ổn định theo mùa.

**Hiện tượng này nhất quán với cơ chế vận chuyển vùng (Regional Transport Theory):**

- Khi gió SE thổi, Bắc Kinh nằm ở **cuối hướng gió (downwind)** của các cụm công nghiệp nặng tại **Hà Bắc (Hebei) và Thiên Tân (Tianjin)**.
- Dòng khí mang theo một lượng lớn hạt bụi và tiền chất tạo hạt ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , VOC,  $\text{NH}_3$ ), dẫn đến **tăng mạnh thành phần “inflow flux” vào hộp khí quyển của Bắc Kinh**.
- Các ước tính kiểm kê phát thải khu vực cho thấy **lưu lượng vận chuyển xuyên biên giới khí quyển mùa thu có thể vượt 3000 tấn/ngày<sup>10</sup>** — một con số vượt xa khả năng xử lý nội tại của hệ thống khí quyển đô thị.

---

## Hàm ý đối với mô hình hộp (Box Model)

Trong mô hình hộp với phương trình động lực:

$$\frac{dC}{dt} = E - (k + v)C,$$

tham số  $E$ (phát thải) thường được diễn giải như **phát thải nội sinh trong đô thị**. Tuy nhiên, phân tích hướng gió cho thấy:

$$E = E_{\text{local}} + E_{\text{regional transport}},$$

trong đó  $E_{\text{regional transport}}$  đóng góp đáng kể và có tính chu kỳ theo hướng gió.

Do đó, **các mô hình cho Bắc Kinh ước lượng ô nhiễm ngầm bao gồm cả thành phần ngoại sinh từ Hà Bắc / Thiên Tân**, và đây là lý do tại sao:

- Khi gió SE thổi →  $E$  hiệu dụng tăng mạnh → xuất hiện các sự kiện PM2.5 cực đại, ngay cả khi thông gió khí quyển ở mức trung bình.
- Khi gió Tây Bắc thổi →  $E_{\text{regional transport}}$  →  $0$  và đồng thời  $v$  tăng → nồng độ PM2.5 sụt giảm nhanh xuống mức nền đô thị.

Điều này lý giải vì sao trong thống kê khí tượng:

Chế độ gió	Tốc độ gió	Xu hướng PM2.5
Tây Bắc (NW)	Cao	Giảm sâu – “giai đoạn rửa trôi”
Đông Nam (SE)	Trung bình	Ô nhiễm cực đại – “giai đoạn nạp ô nhiễm”

---

## Ý nghĩa chính sách và diễn giải mô hình

Phân tích theo hướng gió cung cấp kết luận rằng:

Ngay cả khi Bắc Kinh kiểm soát tốt các nguồn thải nội sinh, các đợt ô nhiễm lớn vẫn có thể xảy ra nếu không có sự phối hợp giảm thải khu vực với Hà Bắc và Thiên Tân.

Vì vậy, các kịch bản kiểm soát phát thải có tính khả thi nhất cần:

- Tích hợp quản lý liên tỉnh / liên vùng.
- Xét đến biến hướng gió như một yếu tố cửa sổ (pollution windows) trong thiết kế chính sách ngắn hạn.
- Áp dụng dự báo khí tượng – vận chuyển vùng để kích hoạt sớm các biện pháp giảm thải khi mô hình dự đoán **giai đoạn gió SE + nghịch nhiệt**.

# CHƯƠNG 5: KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

---

## 5.1. Tổng hợp các phát hiện chính

Báo cáo này đã thiết lập một khung mô hình hóa đa tầng tích hợp nhằm lượng hóa mối liên hệ giữa **động lực khí quyển – nồng độ PM2.5 – tác động sức khỏe cộng đồng**, qua đó chứng minh tính thiết yếu của việc kết hợp **cơ học chất lỏng khí quyển** và **dịch tễ học thống kê** trong đánh giá ô nhiễm đô thị. Ba phát hiện cốt lõi được tóm tắt như sau:

---

### (1) Khí tượng là yếu tố điều biến quyết định

Các phân tích đã xác nhận rằng **khả năng thông gió của khí quyển** (Ventilation Capacity), được mô tả thông qua **tốc độ gió tích lũy (Iws)** và **chiều cao lớp hòa trộn (MLH – H)**, chi phối trực tiếp nồng độ bụi mịn PM2.5.

- Chỉ một biến đổi nhỏ trong **cường độ thông gió** (ví dụ giảm từ 2 m/s xuống 0.5 m/s) đủ để kích hoạt **cơ chế tích tụ phản hồi dương**, khiến nồng độ PM2.5 tăng gần theo **dạng hàm mũ**.
  - Điều này giải thích chính xác sự hình thành các sự kiện ô nhiễm quy mô lớn ngay cả khi phát thải không đổi, đồng thời phản ánh đúng cơ chế của **Mô hình Hộp (Box Model)**.
- 

### (2) Gánh nặng sức khỏe có thể định lượng và dự báo

Thông qua mô hình Poisson / Quasi-Poisson với tích hợp trễ (Lag Integration), tác động của PM2.5 lên nhập viện hô hấp được lượng hóa một cách đáng tin cậy.

- Trong các điều kiện khí tượng bất lợi (lặng gió + MLH thấp), **rủi ro sức khỏe tăng mạnh**, với số ca nhập viện hô hấp:
  - **tăng hơn 40% so với nền**
  - tương đương **hàng trăm ca mỗi ngày**, gây áp lực lớn lên hệ thống y tế đô thị.
- Cho thấy **dự báo sức khỏe theo thời tiết ô nhiễm** (Air–Health Early Warning) là hoàn toàn khả thi.

---

### (3) Kiểm soát phát thải là chìa khóa để “cắt đỉnh” ô nhiễm

Mặc dù khí tượng quyết định thời điểm xảy ra ô nhiễm, nhưng **phát thải (E)** mới là **nguồn gốc** của vấn đề.

- Sự kiện APEC 2014 là minh chứng rõ ràng: khi giám mạn phát thải từ công nghiệp và giao thông, **nồng độ PM2.5 giảm sâu** dù điều kiện khí tượng hoàn toàn bất lợi.
- Kết luận này nhất quán với phương trình động lực:

$$\frac{dC}{dt} = E - (k + v)C,$$

trong đó **chỉ cần giảm  $E$**  mới có thể **ngăn chặn sự hình thành các đỉnh ô nhiễm vào ngày lặng gió**.

---

### Đóng góp quan trọng của khung mô hình đa tầng

Tầng mô hình	Đầu vào	Đầu ra	Ý nghĩa
Khí tượng – động lực	Iws, H, TEMP, DEWP	PM2.5 dự báo theo vật lý	Giải thích cơ chế tích tụ – phân tán
Hồi quy nghịch đảo	PM2.5 + khí tượng	Ước lượng phát thải hiệu dụng $E$	Học đặc tính đô thị khi thiếu kiểm kê phát thải
Dịch tễ – sức khỏe	PM2.5 dự báo + Yo	Rủi ro & số ca nhập viện gia tăng	Định lượng gánh nặng y tế

Khuôn khổ này có thể **thai triển trực tiếp thành hệ thống cảnh báo ô nhiễm – sức khỏe theo thời gian thực** mà không cần dữ liệu phát thải chi tiết.

---

## 5.2. Hàm ý chính sách và Hướng nghiên cứu tương lai

- Chuyển từ “Kiểm soát Nồng độ” sang “Kiểm soát Rủi ro”: Các cơ quan quản lý nên sử dụng mô hình tích hợp để ban hành cảnh báo rủi ro sức khỏe (Health Risk Alerts) thay vì chỉ dự báo chất lượng không khí. Ví dụ: cảnh báo “*Rủi ro nhập viện tăng 30% vào ngày mai*” sẽ có tác động hành vi mạnh mẽ hơn nhiều so với thông tin “AQI = 200”.
- Quản lý vùng liên kết: Do khối lượng vận chuyển ô nhiễm liên vùng rất lớn (hàng nghìn tấn/ngày), việc kiểm soát ô nhiễm tại Bắc Kinh cần được thực hiện đồng bộ với hai địa phương vệ tinh là Hà Bắc và Thiên Tân. Cách tiếp cận Mô hình hộp mở rộng (multi-box model) có thể được triển khai để tối ưu hóa chiến lược giảm thiểu vùng.
- Ứng dụng cho các đô thị khác: Khung mô hình này có thể chuyển giao nguyên vẹn cho các đô thị đang phát triển như Hà Nội và TP.HCM, nơi kiểm kê phát thải còn hạn chế nhưng dữ liệu khí tượng và y tế đã sẵn có. Việc hiệu chỉnh các hệ số vật lý ( $k, v$ ) và dịch tễ học ( $\beta$ ) theo đặc thù địa phương sẽ là bước triển khai tiếp theo cần thiết.

# **NHỮNG KHÁM PHÁ THÚ VỊ VÀ ỨNG DỤNG THỰC TIỄN**

Mô hình hóa không chỉ là những con số trên giấy. Trong lịch sử khoa học môi trường, chính những nguyên lý mà báo cáo này sử dụng đã giải mã những bí ẩn chết người và định hình chính sách toàn cầu. Dưới đây là ba ví dụ điển hình:

---

## **1. Sự kiện "Đại sương mù London 1952": Khởi nguồn của Dịch tễ học Môi trường**

Bạn có biết rằng chính sự kiện Great Smog of London (1952) là nơi khai sinh ra phương pháp thống kê mà chúng ta sử dụng ở Tầng II (Dịch tễ) không?

- Sự kiện: Vào tháng 12/1952, một lớp nghịch nhiệt khổng lồ (giống tham số  $H_{\text{thấp}}$  trong Mô hình Hộp) đã bao trùm London, giữ lại toàn bộ khói than đá.
  - Phát hiện: Ban đầu, người ta tưởng chỉ có vài người chết. Nhưng khi các nhà thống kê áp dụng phân tích chuỗi thời gian (tiền thân của Hồi quy Poisson), họ phát hiện số ca tử vong vượt mức nền ( $Y_0$ ) lên tới 4.000 người chỉ trong 4 ngày, và 12.000 người trong các tháng sau đó.
  - Liên hệ: Đây là minh chứng lịch sử đẫm máu nhất cho công thức tính Số ca gia tăng ( $\Delta Y_t$ ) mà nhóm đã trình bày trong báo cáo.
- 

## **2. "APEC Blue": Thí nghiệm Kiểm soát Elớn nhất lịch sử**

Sự kiện APEC 2014 tại Bắc Kinh (được nhắc đến trong Chương 5) thực chất là một thí nghiệm thực địa khổng lồ để kiểm chứng phương trình Mô hình Hộp:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{E}{H} - k \cdot C$$

- Thí nghiệm: Để đón tiếp các nguyên thủ quốc gia, Trung Quốc đã đóng cửa hàng nghìn nhà máy ở Bắc Kinh và các tỉnh lân cận (Hà Bắc, Thiên Tân).
- Kết quả: Bầu trời Bắc Kinh chuyển sang màu xanh ngắt ("APEC Blue") bất chấp điều kiện khí tượng không thuận lợi.
- Bài học Toán học: Sự kiện này chứng minh rằng khi tham số Phát thải ( $E$ ) giảm đủ sâu, nó có thể chiến thắng được sự bất lợi của Hệ số Thông gió ( $u/L$ ). Đây là bằng chứng thép cho hàm ý chính sách "cắt đinh ô nhiễm" của báo cáo.

---

### 3. "Hiệu ứng Cuối tuần" (The Weekend Effect)

Các nhà mô hình hóa thường quan sát thấy một hiện tượng kỳ lạ ở các đô thị lớn: Nồng độ Ozone và PM2.5 đôi khi cao hơn vào cuối tuần, mặc dù xe cộ (nguồn thải *E*) ít hơn.

- Giải mã: Mô hình hóa Đa tầng đã giải thích điều này thông qua Hóa học Khí quyển. Khi giảm lượng *NO<sub>x</sub>* (từ xe tải diesel nghỉ cuối tuần) quá mức, nó làm thay đổi cân bằng hóa học, khiến quá trình tạo hạt thứ cấp (Secondary PM) trở nên mạnh hơn trong một số điều kiện nhất định.
- Ý nghĩa: Điều này nhắc nhở rằng mối quan hệ giữa *E* và *C* không phải lúc nào cũng tuyến tính đơn giản, và việc kiểm soát ô nhiễm cần sự tinh tế của các mô hình toán học phức tạp.

Tóm lại, sự tích hợp giữa vật lý và y tế không chỉ là một bài tập học thuật, mà là một công cụ thiết yếu để bảo vệ sức khỏe cộng đồng trước "kẻ giết người thầm lặng" mang tên PM2.5

## *Nguồn trích dẫn*

1. Compositional Constraints are Vital for Atmospheric PM2.5 Source Attribution over India | ACS Earth and Space Chemistry, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsearthspacechem.2c00150>
2. Beijing PM2.5 Dataset - Zenodo, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://zenodo.org/records/3902671>
3. Source Apportionment of Air Particulate Matter by Chemical Mass Balance (CMB) and Comparison with Positive Matrix Factorization (PMF) Model - Aerosol and Air Quality Research, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://aaqr.org/articles/aaqr-06-10-oa-0021.pdf>
4. Constraining chemical transport PM2.5 modeling outputs using surface monitor measurements and satellite retrievals: application over the San Joaquin Valley - PubMed Central, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6166888/>
5. Examining PM2.5 concentrations and exposure using multiple models - PMC - NIH, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8102649/>
6. Time-Series Analysis of Air Pollution and Health Accounting for Covariate-Dependent Overdispersion - NIH, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6269244/>
7. Model Choice in Time Series Studies of Air Pollution and Mortality - Collection of Biostatistics Research Archive, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://biostats.bepress.com/cgi/viewcontent.cgi?article=1055&context=jhubiostat>
8. Mixing layer height and air pollution over Beijing - ACP, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://acp.copernicus.org/preprints/15/28249/2015/acpd-15-28249-2015.pdf>
9. Assessing Beijing's PM2.5 pollution: severity, weather impact, APEC and winter heating | Proceedings of the Royal Society A - Journals, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.2015.0257>
10. Vertical Distribution of PM2.5 Transport Flux in Summer and Autumn in Beijing, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://aaqr.org/articles/aaqr-22-03-oa-0143>
11. Determination and climatology of the diurnal cycle of the atmospheric mixing layer height over Beijing 2013–2018: lidar measurements and implications for air pollution - ACP, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://acp.copernicus.org/articles/20/8839/>
12. ATMOSPHERIC DISPERSION - Box MODEL - Asutosh College, truy cập vào tháng 11 21, 2025, [https://asutoshcollege.in/new-web/Study\\_Material/box\\_model\\_23062020.pdf](https://asutoshcollege.in/new-web/Study_Material/box_model_23062020.pdf)
13. Air Quality Modeling, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <http://www.aqbook.org/read/?page=255>
14. Vertical observations of the atmospheric boundary layer structure over Beijing urban area during air pollution episodes - ACP, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://acp.copernicus.org/articles/19/6949/2019/>
15. (PDF) Vertical observations of the atmospheric boundary layer structure over Beijing urban area during air pollution episodes - ResearchGate, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
[https://www.researchgate.net/publication/333328234\\_Verical\\_observations\\_of\\_the\\_atmospheric\\_boundary\\_layer\\_structure\\_over\\_Beijing\\_urban\\_area\\_during\\_air\\_pollution\\_episodes](https://www.researchgate.net/publication/333328234_Verical_observations_of_the_atmospheric_boundary_layer_structure_over_Beijing_urban_area_during_air_pollution_episodes)
16. Air Quality Monitoring - Example Analysis, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://sas.uwaterloo.ca/~rwoldfor/courses/ExploratoryDataAnalysis/Slides/2021/slides/G.%20Analyses%20/BeijingAir.pdf>
17. Deposition Velocity of PM2.5 in the Winter and Spring above Deciduous and Coniferous Forests in Beijing, China - PubMed Central, truy cập vào tháng 11 21, 2025,  
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4026521/>
18. The Dry Deposition Effect of PM2.5 in Urban Green Spaces of Beijing, China - MDPI, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/21/9608>
19. Estimation of secondary PM2.5 in China and the United States using a multi-tracer approach -

ACP, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://acp.copernicus.org/articles/22/5495/2022/acp-22-5495-2022.pdf>

20. Time series regression studies in environmental epidemiology - PMC - NIH, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3780998/>
21. Impact of ambient fine particulate matter (PM2.5) exposure on the risk of influenza-like-illness: a time-series analysis in Beijing, China - NIH, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4750357/>
22. SPECIAL REPORT - Revised Analyses of Time-Series Studies of Air Pollution and Health, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://www.healtheffects.org/system/files/TimeSeries.pdf>
23. Time series regression studies in environmental epidemiology - Oxford Academic, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://academic.oup.com/ije/article/42/4/1187/657875>
24. Estimating PM2.5 utilizing multiple linear regression and ANN techniques - PMC, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10730540/>
25. Estimating Nighttime PM 2.5 Concentration in Beijing Based on NPP/VIIRS Day/Night Band, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/2/349>
26. Forecasting of PM 2.5 Concentration in Beijing Using Hybrid Deep Learning Framework Based on Attention Mechanism - MDPI, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/21/11155>
27. Estimation of PM 2.5 Concentration Using Deep Bayesian Model Considering Spatial Multiscale - MDPI, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/22/4545>
28. Associations between PM2.5 Components and Mortality of Ischemic Stroke, Chronic Obstructive Pulmonary Disease and Diabetes in Beijing, China - PMC - PubMed Central, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11209520/>
29. Effects of particulate matter on hospital admissions for respiratory diseases: an ecological study based on 12.5 years of time series data in Shanghai - NIH, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8756174/>
30. Beijing PM2.5 - UCI Machine Learning Repository, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://archive.ics.uci.edu/dataset/381/beijing+pm2+5+data>
31. Dominant role of emission reduction in PM2.5 air quality improvement in Beijing during 2013–2017: a model-based decomposition analysis - ACP, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://acp.copernicus.org/articles/19/6125/2019/>
32. The relative risk (RR) and 95% CI of PM2.5 (per 10 $\mu$ g/m<sup>3</sup>) on daily outpatient visits ... - ResearchGate, truy cập vào tháng 11 21, 2025, [https://www.researchgate.net/figure/The-relative-risk-RR-and-95-CI-of-PM25-per-10g-m-3-on-daily-outpatient-visits\\_tbl2\\_321127806](https://www.researchgate.net/figure/The-relative-risk-RR-and-95-CI-of-PM25-per-10g-m-3-on-daily-outpatient-visits_tbl2_321127806)
33. Fine Particulate Air Pollution and Hospital Emergency Room Visits for Respiratory Disease in Urban Areas in Beijing, China, in 2013 - PMC - PubMed Central, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4824441/>
34. Double trouble: The interaction of PM2.5 and O<sub>3</sub> on respiratory hospital admissions, truy cập vào tháng 11 21, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37806428/>