

「受體模式」與「排放源模式」之應用

Dr. John G. Watson,* 陳國衍**

壹、緒 言

近年來，環境科學家之注意力已漸漸貫注於探討污染物之起源、特徵，和大氣層懸浮微粒之持續性。本文的主旨旨在簡介目前歐美的最新空氣污染防治科技，也就是以「受體模式」(receptor model)去推測，鑑定污染微粒之點源，以及其影響力⁽¹⁾⁽²⁾。並對「污染源模式」(source model)之利弊有概略的討論。文中將解說模型試驗法之基本原理，以及與大氣層中微粒之基本特性之相關性。同時討論如何運用「受體」與「污染源」兩種模式，以達成最有效，最迅速，最完善的空氣污染防治之目標。文中將例舉美國近年來三大主要的「受體模式」研究報告(Portland Aerosol Characterization Study⁽³⁾⁽⁴⁾, Denver Winter Haze Study⁽⁵⁾, 和 St. Louis Study⁽⁶⁾)之一為引證，來說明此類電腦模式之實際運用方法。

貳、「污染源模式」與大氣層微粒

過去數十年來，美國環境保護局(United State Environmental Protection Agency)一直採用以「污染源模式」為主之「擴散模式」(dispersion model)去估計污染區(non-attainment area)的污染物之質量。此法在基本上是依據美國各州的工廠排放源調查(emission inventory)之數值為主，加上當地之氣象資料(如風速、風向、大氣層之穩定程度(stability class))，以及工廠煙囪之高度，排放物質之溫度、速度，和當地之地形特徵，為電腦程式之置入量，去估計受體在可能範圍內所受之影響程度，和最高污染濃度。一般而言，各機構所採用之電腦程式並不統一。最普遍的如：「PTPLU」，「PTMAX」，「CRSTER」，「CDM」，「VALLEY」模式，也各有利弊。各單位機構對於大氣層穩定程度之分類，濃煙的擴散角度之選擇，也大有差異。所以意見往往參雜不一。但是，「擴散模式」之基本原理是一致的。也就是在單位時間內，各污染源所排放之濃煙，在縱、橫、與垂直三座標方向都是成 Gaussian Distribution，也就是一般所謂之 Normal Distribution 以濃煙之中線(與地平面平行)為主，而向立體方向均勻擴散。「擴散模式」已普遍為一般工廠與環境研究機構採用。在進行更深入之環境監測之前，先對當地之粒狀污染物與氣態污染物(如二氧化硫，氮氧化物)作「掃描式」(screening)之估計。

以此類「污染源模式」(即是「擴散模式」)作為環境評估(environmental assessment)之依據，其缺點可分列於下：

(1)大氣層之懸浮微粒廣佈於各地，很難估計排放源之比例。然而，氣態排放源則有一定之據點

* Director of Air Resource Laboratory Atmospheric Sciences Center,
Desert Research Institute, Reno, NV.

**哈佛大學環境科學研究所

可追測，（例如車輛排氣管所排放之廢氣，即使是上百萬之車輛，還是可以追溯歸納於車道與停車場。）

(2)懸浮微粒之來源乃連續性的，每一平方公寸之面積，都可視為「可能性的排放源」(potential emitter)。因此，研究粒狀污染物之質量，點污染源 (point sources) 與區污染源 (area sources) 乃佔同等重要之份量。一般「污染源模式」只考慮「點污染源」（依據工廠排放源調查），但對於「區污染源」，則因無從估計而忽略。

(3)懸浮微粒的擴散範圍，是以粒狀物質之體積大小而定。體積較大之微粒（一般所謂之落塵），通常沈降在「點污染源」的附近。然而，較小之微粒質，則隨風飄落在各種縱切面上（如樹木，建築物等等）。問題是一般粒狀污染物之排放源之微粒體積分佔詳情並未驗證，所以很難估計它的擴散質量。

(4)「污染源模式」，一般對於任何經氣層擴散而流失之物質欠加考慮。

(5)「污染源模式」無法估計大氣層之錯綜複雜之化學變化。所有的大氣層物質，是連續不斷的產生，同時，大氣中的壓力，溫度之變化，導致各種不同的連續性的化學反應，使氣態污染物改變成固態粒狀污染物，例如，氣態之有機物轉變成油狀微粒，二氧化硫，二氧化氮，與空氣中之氨氣 (ammonia) 產生硫化氮和硝酸鹽之微粒。

總之，「污染源模式」是具有提供有價值，可參考的資料之功能，但其準確度却不足以採信。在最佳情況下，「污染源模式」大約可估計以公因數為二之污染源之量。（例如計算值為「 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 」則其正確值在「5」與「 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 」之間⁽⁷⁾）。

參、「受體模式」與與大氣層微粒

運用經濟簡便和迅速確實的採樣與化學分析技術，去區分周圍環境與排放源之微粒，以及其所含成分，已邁進了一個新的里程——「受體模式」。「污染源模式」是以測量污染源的排放量為主，例如：工廠煙囪之排放率 (emission rate)，貯存堆 (storage pile) 在單位時間內之擴散率等等，去估計受體周圍環境氣層之濃度 (ambient concentration)，而「受體模式」則以反方向為出發點，從測量受體周遭之氣膠 (aerosol) 為主，以此為依據去估計各「點污染源」之排放量。

「受體模式」是以氣層中污染源與受體之共同特性為主要依據。對於特殊污染源，尤其便於追溯。污染源與受體間之共同特徵，可概括於物理與化學之組成成分，粒狀污染物之大小，形狀，和其變異性。每種污染源所排放之微粒，有其一定的化學上，物理上之大小與特性，也就是一般所稱之「指紋」(fingerprint)。任何一個受體之成分，是由各種不同之污染源所留下之「指紋」添加而成。因此，很難鑑定受體之組成是從某一污染源和含有某種分量。「受體模式」的本體，如同一個「探搜器」，它可將一個個不同之「指紋」區分清楚，同時，鑑定這些污染源究竟是從何而來，以及它對受體之影響力究竟有多大。

每種污染源之粒狀污染物之組成結構各有差異。譬如車輛所排之廢氣，含有高量之鉛 (Pb) 和溴 (Br)，這些特殊之化學元素，很難出現於其它污染源，同時，利用粒狀污染物之特殊形狀，及其對光之折射率之特性，可以鑑定某種特殊的礦物質，是起源於某類特殊之貯存堆，以此粒狀污染物之特性，可鑑定石灰與花崗石微粒之不同泉源。

一般而言，粒狀污染物之大小與其特殊之組成成分，具有特殊之聯繫性，可以其粒徑大小之不同，而鑑定其污染源。最普遍的方法是區分為（一）細微粒（fine particulate matter），此類微粒包括任何懸浮微粒之粒徑小於二微米（ $< 2 \mu\text{m}$ ）。（二）粗狀粒（coarse particulate matter）是指粒狀污染物大於 $2 \mu\text{m}$ 之微粒。通常以不超過 $15 \mu\text{m}$ 為限。粗狀粒（coarse）多在碾磨，和浸蝕性之操作情況下產生。大型的粒狀污染物在此情況下分裂成粗狀粒。地質類之粒狀物，為粗狀粒型之主要組成成分。細微粒（fine）的組成，則繫於一連串之化學反應，例如氣態物質之凝結（condensation）成固態微粒，氣態物質之化學反應而產生固態微粒，或由許多細微粒，在空間因撞擊或其它因素而凝聚（coagulation）成固態細微粒。總之，在細微粒型中，以污染源之污染物之燃燒氧化和化學反應為主要成因。

粒狀物在不同的時間與空間之變異程度，一般基於不同污染源所排放之污染物而差異，以及當時，當地之氣流與地形之不同，以確定污染物在這些特殊因素下如何擴散到受體。譬如美國當今所採用每兩小時到四小時之「自動連續採樣」（sequential sampling），旨在鑑定不同時間中空氣中成分之差異。比如空氣中鉛（Pb）和溴（Br）之含量，在下午四點到八點階段之採樣分析中，顯示其含量增加了50%以上。下午四點到八點，是交通最擁擠之尖峯階段，如此可證明鉛與溴之主要來源是由於車輛之排放廢氣。如果，在以各個以時間劃分之採樣中，鉛與溴之含量，並無顯著的區別，或者，鉛與溴之增加率不成一定的比率，很明顯的指示：鉛之熔煉所（lead smelter）或其他「點污染源」必然存在受體之周圍。藉此在日間、夜間；週末、週日；與各季節之不同而區分各種排放源在特定時間內之排放型式，以推測其「點污染源」，也是「受體模式」之一大特色。如住宅區之家用暖氣所排放之廢氣，顯而易見的，冬天之排放量，將有顯著的高升。此外，「點污染源」與受體之間之距離，風向之流動與趨勢，造成各個不同之受體所受排放源之不同的影響。譬如，採樣站如靠近未鋪柏油的馬路採樣，其所含馬路灰沙之成分，很可能比其它採樣站要高。否則，馬路的灰沙並非當地之主要污染源。

因此，同時鑑定與劃分受體與排放源之粒狀污染物之組成質量與特性，乃是編纂整個大氣層數據系統之最佳途徑。

（一）大氣層之組成（Aerosol Composition）

由實驗室分析可鑑定各種粒狀污染物之組成成分。可是，採樣與分析之技巧，則需審慎的選擇。在美國各市郊，可測量分析無盡數的化學合成物與各種不同形態結構之粒狀物。所以必先經過詳細的選取、過濾，以達成最有效之分析。所分析的結果，必須：

（1）同一樣品，總質量（total mass concentration）應等於或近乎相等於各項化學分析之總和。

而且，每種化學分析數值，都應具有精確程度（precision）之估計。譬如：樣品 A 的總質量是 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而其中各項分析之化學元素之總和質量是 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如此說明所差之 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 必須做更進一步之探討分析，去尋求其他之化學元素或合成物質。由經驗中顯示，雖然各種樣品依時間、空間、與地點之不同而異。概括而言，碳（carbon），硫酸鹽（sulfate），硝酸鹽（nitrate），鋁（aluminum），矽（silicon），氧（oxygen）和一些特定情況下之特殊元素，將佔總質量之80%以上。總之，化學分析之先決條件在於對粒狀污染物化學組成之「定量」。

（2）第二條件是在受體所採樣與分析之化學種類，必須與排放源的可能組成成分相符合。在決定

選擇對某項元素作分析前，必先鑑定排放源對受體侵襲的可能性之影響力。因為各種「點污染源」之「指紋」都很類似。若非特殊之科技，很難區分重重添加之「點污染源」。譬如，一般實驗室所分析出之碳含量，無法區分此碳素是源於燃燒木頭爐灶（woodstove，美加各地很普遍的一種家用壁爐），或是源由於燒煤之鍋爐（coal-fired boilers）。在此情況下，利用「碳—14」（carbon-14）之不同，可追溯其史蹟。如家庭燃燒木料，多取材於所砍木柴，其「碳—14」之含量將遠遠超過於煤礦中之成分。如此，進一步的分析，可明確的鑑定其來源。

(二) 粒狀污染物大小之測量

在採樣之前，使用各種不同的「擇體採樣器」（size-selective samplers）。可將不同粒徑大小的樣品分類。在美國一般經常使用之「擇體採樣器」如：「階式撞擊器」（cascade impactor），「stacked filter units」，「virtual impactor」和「cyclone」。大致而言，各有利弊。使用「階式撞擊器」，通常精確度會因粒子在高速度之採樣下所產生的撞擊力而反彈，重新進入採樣流量（flow）內，而造成採樣上之偏差⁽⁸⁾。經由實驗室，利用人工製造之「wind tunnels」實驗證明「virtual impactor」和「cyclone」粒徑分析器具有最佳之粒徑分類效果。可將粒狀污染物歸類為：(一)細微粒（fine particles，粒徑小於 $2 \mu\text{m}$ ）和(二)粗狀粒（coarse particles，粒徑介於 $2\mu\text{m}$ 與 $15 \mu\text{m}$ 之間）。美國環境保護局已在全國設立「可吸入粒狀物質之採樣網」（inhalable particulate matter network）⁽⁹⁾，並已全面使用「擇體採樣器」，以便對於人體健康有所危害之小於 $15 \mu\text{m}$ 之粒狀污染物做進一步的分析。

(三) 變異之測量法

自動連續濾紙採樣器（sequential filter samplers）已改良發展到能够在一定的時間下，做連續的採樣，而無須任何人力操作。此類採樣器可選擇一定的採樣期間（sampling duration）（從 2 到 24 小時不等），作一連串之「定期」採樣。在採樣器中裝置一個定時器，和一連串之預先擬定採樣程序。有些儀器已進步到運用電腦遙控，作連續性之記錄。這類採樣器，可附加上前段敍及之「粒徑分析器」，作一連串之不同粒徑大小之並期採樣。

空間與時間的差異對於受體採樣具有同等的重要性。依據採樣站之距離不同，可將其分類⁽¹⁰⁾為：(一) regional scale，採樣站之間之距離約在 100 公里左右。(二) urban scale 採樣站之間距離約在 10 公里左右。(三) neighbourhood scale 採樣站之間距離約在 1 公里左右。(四) microscale 採樣站間距離僅相隔 0.1 公里左右。不同性質與不同距點之採樣，往往是「排放源」和「污染源」傳播之最佳引證。各種分析的濃度，若均勻的分佈在很大的區域，可證明此類大量散布之排放源，乃由「區污染源」擴散進入研究或採樣之「區域」。若在短距離之採樣站中，有顯著濃度上之差異，則可證明，在咫尺之內之周圍環境，必然有「點污染源」之存在而導致高濃度之產生⁽¹¹⁾。

(四) 如何運用「受體模式」

「受體模式」在基本上須要在物理上，對於排放源和周圍環境濃度之間，鑑明其因果關係（cause-effect relationship），「受體模式」的起點，乃是「排放源模式」。雖然前段已討論到有關「排放源模式」，不能在所有不同情況下，推測準確的結果，然而它的數學原理與公式，仍然擁有其代表性之價值，它可估計粒狀污染物如何由排放源傳播到受體。

一般而言，「排放源模式」註明，由排放源（ j ）對受體濃度所供之量， S_j ，排放源之總排放率， E_j ，和擴散因素， D_j ，可排一簡單公式：

$$S_j = D_j \cdot E_j \quad (1)$$

不同形式的擴散因素（ D_j ），已由各方研究人員提供，可致分為化學反應、消散程度，與特殊地理形勢。至今，並無一完善且精準之方法，去推算各種粒狀污染物在大氣層中之變幻異常和散播之本性。同樣的，排放率的本身（ E_j ），也很難加以準確之定量。慶幸的是，「受體模式」之評估法，並不須要精確之 D_j 與 E_j 。

在任一受體所採集之總粒狀污染物之質量（ C ），可視為個別污染源所分擔或貢獻污染量之線性總和。這是一種簡易且準確的估計法，所以：

$$C = \sum_{j=1}^p S_j \quad (2)$$

類似的，某粒狀污染物之質量濃度（mass concentration）， i ，其總質量， C_i ，將為：

$$C_i = \sum_{j=1}^p a_{ij} \cdot S_j \quad (3)$$

在此 a_{ij} 是受體 i 在所受排放源所供給之量 j ，所含之質量分數（mass fraction）。

(五) 質量平衡受體模式 (Mass Balance Models)

我們可測量大氣周圍之濃度， C_i ，和排放源之組成成分， a_{ij} ，而組成一系列的數學公式如公式(3)所示。然後，利用數學原理去解出方程式(3)中之 S_j 。每一組的排放源組合成分， a_{ij} ，乃是形成每一排放源之特殊「指紋」（特徵），而每一組之周圍濃度， C_i ，乃由一連串系列之「指紋」堆加而成。公式(3)和方程式之解法，乃是「質量平衡受體模式」之主要成分。它可將各個不同之「指紋」分類，同時解析出每一種不同排放源對於受體總質量之供給量。所以，在一連串之電腦程式中，「質量平衡受體模式」之置入量（input），是不同之周圍環境之形態和不同之排放源之特徵形態。而公式所解答的是，某一排放源在單位體積內，對受體之提供（或影響）之撞擊量。

(六) Multivariate 模式

「Multivariate 模式」的最大優點在其著重於粒狀污染物在空間與時間之變異性。大氣層中每一種粒狀污染物之特性， i ，在單一採樣時間或採樣站， k ，可成立一連串如公式(3)之公式。若假設 a_{ij} 的成分大致穩定，那麼，可在特定情況下估計出 S_j 在某採樣站與採樣期間內之含量。然而， a_{ij} 之質量因時，因地而變異多端。所以必須聯合運用「Multivariate 模式」和「質量平衡受體模式」同時去估計所得結果之變異程度。

(七) 排放源／受體之混合模式 (Source / Receptor Hybrid Model)

最近，「受體模式」才被一般環境科學家認為與「排放源模式」具有不同之實體與特性。實際上，並不須要分成兩類。最佳方法是聯合運用「受體模式」與「排放源模式」，以驅除兩種模式在單一存在下之缺點，而達成以模式法控制污染之最佳效能。「受體模式」之最大缺點在於很難在某一類似之污染物中，推斷其特殊之污染源。例如馬路上之飛揚塵灰，很可能是造成當地違規（落塵量超過許可濃度）之主因。在確定指認違規之馬路之前，是無法進一步的施行控制或防止策略的。而「排放源模式」最大的缺點，則在受限於對各種不同粒狀污染物之「排放率」

(emission rate) 之估計上之差異。若能綜合兩種模式之優點，利用「受體模式」而將排放源種類加以定量，再加上利用「排放源模式」，對每類排放源之特殊排放物之定質，而達成最精確之定質、定量效果。在使用「排放源模式」時，應著重於估計重要之「排放物」。將時間與經費集中於某些特殊之污染物之特性與排放量。而無須做全面的總估計。此種「混合模式」(hybrid model) 具有進一步研究發展之價值。

肆、運用「受實體模式」之實例研究

現在，以實例驗證運用「受體模式」，鑑定排放源對周圍環境濃度之分類與定量。以助於一般人對「受體模式」之實用價值有所了解。

波特蘭研究 (The Portland Study)

波特蘭地區（在美之奧瑞岡（Oregon）州），因當地連續地超溢美國空氣污染之標準濃度，而進行了一項「波特蘭大氣層特徵之研究」(Portland Aerosol Characterization Study)，此研究最主要的目的在⁽³⁾⁽⁴⁾：

- (1)指明波特蘭地區每年之年平均懸浮微粒量之特徵與成分。
- (2)加強改善以「排放源模式」為主之「擴散模式」之運用。
- (3)追究波特蘭地區違犯在美全國環境空氣品質標準 (National Ambient Air Quality Standard, NAAQS) 之成因。以便修定施行奧瑞岡州之 State Implementation Plan (SIP)，(即美國各州對其環境空氣品質標準所修定之特殊規章)。

受體環境之取樣，可分為在不同的時間和空間之下，測量不同之微粒大小。在波特蘭大氣層範圍內之排放源之污染微粒，如附近的製紙廠，鋁業公司，和玻璃纖維工業等等，都經鑑定和分類。同時以不同的粒徑組同時進行採樣。化學分析所得之各化學元素和化學合成物之總和，結果佔總質量之85%以上（其中包括了假定氧化物多由地質類之相關物質轉變而成）。

以「受體模式」研討「波特蘭」大氣層之結果，可歸類於下列幾項擇要：

- (1)在連續五年的研究過程中，證明波特蘭當地的大氣層污染物濃度之所以超過美國全國環境空氣品質標準 (NAAQS)，與當地林木之工廠所排放之排放源無關。
- (2)研究結果顯示，一般生長植物之燃燒（通常指家用火爐之燃燒木材），是造成當地空氣污染違規之主因。而此類住宅區之家用燃料所排放之廢氣，一般並無詳細之記載。因此，波特蘭地區對當地之工廠排放源調查 (emission inventory)，做了更進一步的整理與記錄。
- (3)由研究的結果，環境科學家發現一般人對於馬路上之塵土飛灰，缺乏記載與重視。因此，重新訂立以土地分制區 (land-use area) 為主，去估計「排放率」之大小，如此可增進「擴散模式」所對環境估評推算之準確性。
- (4)經由波特蘭之「受體模式」之研究結果，對於當地之「residual oil-fired boiler」之「排放源模式」之應用，作了妥善之改進。
- (5)由於波特蘭當地對於「工廠排放源調查」(emission inventory) 之重新整理編輯，而促進之「擴散模式」之推算精確性。同時，由「擴散模式」所估計對受體影響力之大小，也用來與實際之「受體模式」結論相比較。
- (6)波特蘭當地，用此實例研究的結果而籌畫各種空氣污染防治之策略，以求達到全國環境空氣

品質標準 (NAAOS) 之濃度。

此實例研究，可謂成功的提供了科技的方針。對於當地州政府，也提供了實施空氣污染防治工作之指標。花費共計美金一百萬元。這是因為一半以上的費用，消耗在試探新科技上。若能正確的擬定統一化的程序，可節省一半以上的費用。

伍、結論

由實例研究之結果，已明確的證實「受體模式」對空氣污染防治之可靠性。當今，「受體模式」已發展到可明確的對粒狀污染物加以定質與定量。美西各地，更進一步的運用「受體模式」去鑑定造成大氣層視覺程度 (visibility) 減低之污染物與其成因。「受體模式」之本位，正不斷的在發展改善中，希望能在不久之將來，可發展成一種經濟、有效，和普遍化之環境污染防治模式之捷徑⁽¹²⁾。

參考文獻：

1. Gorden, G. E. (1980). "Receptor Model", *Environmental Science & Technology*, **14**, 795.
2. Cooper, J. A. and Watson J. G. (1980), "Receptor Oriented Methods of Air Particulate Source Apportionment" *Journal of the Air Pollution Control Association*, **30**, 10.
3. Watson, J. G. (1979). *Chemical Element Balance Receptor Model Methodology for Assessing the Source of Fine and Total Suspended Particulate Matter in Portland, Oregon*, PhD. Dissertation, Oregon Graduate Center, Beaverton, Oregon.
4. Cooper, J. A, Watson, J. G, and Huntzicker J. J. (1979). "Summary of the Portland Aerosol Characterization Study", presented at APCA meeting, Cincinnati OH.
5. Heisler, S. L, Henry, R. C. and Watson, J. G. (1980). "The Sources of the Denver Haze in November and December of 1978", Presented at APCA meeting, Montreal.
6. Alpert, D. J. (1980). *Quantitative Apportionment of Urban Aerosol Mass by Factor Analysis*, Ph D. Dissertation, University of Illinois.
7. Turner, D. B, (1970). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*, U.S. Dept of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, National Air Pollution Control Administration, Cincinnati OH.
8. Hinds, W. C. (1982) *Aerosol Technology, Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*, John Wiley & Sons, N.Y. 119-124.
9. Watson, J. G., Chow J. C. and Shah J. J. (1981). "Analysis of Inhalable and Fine Particulate Matter Measurements, EAP-45014-81-035.
10. Federal Register (1979) "EPA Rules and Regulations: SLAMS Monitoring Objectives and Spatial Scales", *Federal Register*, **44**, (92), 27586, May 10, 1979.
11. Chow, J. C, Shortell V., Collins, J., Watson, J. G, Pace, T. G. and Burton B (1981) "A neighborhood Scale Study of Inhalable and Fine Suspended Particulate Matter Source Contributions to an Industrial Area in Philadelphia, PA" APCA meeting, philadelphia, PA.
12. Watson, J. G. and Chow, J. C. (1981) "An Overview of Source-Receptor Source Apportionment" presented at 74th Annual meeting of the Air Pollution Control Association, Philadelphia, PA.