

城市空气污染防治方法简述

张美根 韩志伟 雷孝恩

(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 概括论述了城市空气污染防治的基本方法(潜势预报、统计预报和数值预报)、数值预报的主要特征(空间尺度与预报时效、高分辨率、多化学物质、理化生过程耦合、污染气象与污染物排放特征)及其用于天津和沈阳等城市的空气污染数值预报模式系统(α 中尺度和 β 中尺度气象预报模式与城市空气污染预报模式)。

关键词: 空气污染; 预报

1 城市空气污染防治的基本方法^[1]

按预报的方法划分,城市空气污染防治可分为潜势预报、统计预报和数值预报三类。按预报的要素划分,则可分为污染潜势预报和污染浓度预报,其中统计方法和数值方法都属于后者。采用数值预报和统计预报相结合的方法,有利于预报结果的对比和验证。

1.1 潜势预报

空气污染潜势预报可以看成是以天气形势预报为基础的“二次预报”,预报的准确度与天气形势预报的准确度和精度有直接的关联。一般预报中提到的预报准确率是把天气形势预报准确率当作100%来考虑的。

潜势预报采用的基本方法是从已发生的各次污染事件着手,归纳总结出发生污染事件时所特有的气象条件、天气形势和气象指标。目前的潜势预报所采用的方法与早期的天气形势预报有相似之处,都是以天气因子的某一临界值作为预报依据。

1.2 统计预报

统计预报是不依赖污染物的物理、化学与生态(理化生)过程,通过分析发展规律来进行预测的一种方法。

对特定的城市或区域,在多年气象与污染物浓度资料积累的基础上,分析天气变化规律,找出若干天气类型并分析各类型的典型参数,然后建立这些参数与相应污染物浓度实测数据之间的定量或半定量关系(这些关系可以是线性或非线性的组合,也可以是有量纲或无量纲的组合),并根据这些关系作出预报。

统计方法的不足之处在于它假定预报范围内污染源排放是平稳的,浓度与污染源不发生直接联系,要求有详实的气象和污染物浓度实测数据。可是,大量长时间的监测资料需要大量的人力和物力,况且监测资料常常存在较大的资料窗。统计方法是建立数值定量预报方法之前常用的方法,至今仍有实际应用价值。目前,统计方法主要有三类:

(1) 统计学回归模型: 根据实测值与预测值之间的比较原理, 应用过去的浓度、气象资料进行诊断预测。通常有回归分析、相关分析、线性与非线性模型等方法。

(2) 分类法: 通过分析过去的污染物浓度型与天气形势类型之间的对应关系, 导出每类天气型的浓度时空分布规律, 并在二者之间建立起定量关系以预报污染物浓度分布。

(3) 趋势外推法: 遵从连贯性原则, 通过各类过程发展变化的一致性和连续性来预测。应该指出, 在进行定性预报时, 趋势外推法是一种简便的方法, 但作定量预测时, 其准确度和精度都不是非常理想。

1.3 数值预报

数值预报是用数值计算方法直接求解物质守恒方程, 或者求解在各种近似条件下简化形式的物质守恒方程, 以求得污染物浓度的分布。

为了定量描述大气中污染物浓度分布及其变化趋势, 需要掌握污染物在大气中的演变规律, 也就是要了解污染物在空气中所经历的理化生过程。描述这些过程的数学方程系统称为模式。模式可以是 Lagrange 型、Euler 型或混合模型。代表性的模式有烟羽模式、烟团模式、箱模式和其他数值模式。

2 城市空气污染数值预报的主要特征

城市空气污染数值预报包括气象要素预报和污染物浓度预报两个方面。它与一般的数值天气预报不同, 有着许多独有的特征。

2.1 空间尺度和预报时效

城市 24 小时空气污染浓度预报的空间范围一般小于 200 km (按 Orlanski^[2]的划分标准, 属 β 中尺度), 预报时效应远小于 24 小时。虽然城市污染预报为中 β 中尺度污染物浓度时空分布问题, 但由于天气条件受区域尺度天气系统的影响和污染物扩散受湍流的影响, 因此在数值预报模式系统中必须考虑大、中、小尺度之间的相互耦合以及宏观和微观的理化生过程, 以满足浓度预报的精度。

2.2 高分辨率

污染物、热量、水汽及其通量的大部分来源于行星边界层 (PBL) 下层^[3]。在 PBL 内, 这些量的垂直切变非常明显, 呈多极值或多中心分布, 大气稳定度变化最激烈的区域也在 PBL 下层。考虑到垂直方向的剧烈切变和人群呼吸道高度等因素, 预报模式必须具有较高的垂直分辨率, 并且模式最低层应低于 10 m。

此外, 如何反映城市功能区污染源结构和下垫面水平不均匀性的影响也是预报成功与否的关键, 预报模式必须具有较高的水平分辨率 (网格小于 5 km)。

在典型的晴天, 深夜与中午或早晚过渡期内, 不论是气象场还是污染物浓度分布均有明显差异。在同一污染源条件下, 深夜与中午的地面浓度可相差数量级。因此, 预报模式若要反映出这种日变化, 就必须具有较高的时间分辨率。

2.3 多种化学物

目前, 国内外城市空气污染预报的污染物种类一般有二氧化硫 (SO_2)、氮氧化物 (NO_x)、臭氧 (O_3)、一氧化碳 (CO) 和总悬浮颗粒物 (TSP) 或可吸入粒子

(PM₁₀)。预报 24 小时内 NO_x 和 O₃ 的浓度分布要涉及到 20 多种主要化学物质及其复杂的化学过程^[4]。化学反应是一微观过程, 在化学过程与宏观的气象过程耦合时, 时空尺度之间的兼容或相互匹配是一个非常关键的问题。

2.4 理化生过程耦合

污染物在大气中的行为可分为输送、扩散、迁移和转化四个过程, 其内容涉及污染物在大气、土壤、水体和生物中及其界面上的理化生过程。

输送过程是指在同一介质中物质由运动量引起的位移, 即物质从一个位置移动到另一位置, 在移动过程中可发生平均动量交换及物质的搬运。湍流或涡旋扩散过程是指在同一介质中污染物在大气中不同尺度的湍流或水中不同尺度的涡旋作用下的散布过程。湍流扩散使大量排放到空气中的污染物稀释冲淡。

化学转化过程指的是化学物质在大气中由各种化学反应产生、消失或转变成其他化学物质的过程。由于不同物质的化学活性与半衰期不同, 在空气污染预报中, 对某些物质必须考虑它们的时间变化, 有的可以当成平稳过程处理, 有的可当成常数^[5]; 另外, 有些化学物质必须考虑非线性化学过程, 有的则只需考虑线性化学过程; 再则, 在整个对流层化学中, 有些化学物质与其他物质联系非常广泛, 一种化学物质涉及到几十甚至上百个化学反应方程。

迁移过程包括干沉积过程与湿沉积过程两方面, 是指物质通过界面从一种介质迁移或转移到另一类介质的过程^[6]。污染物的干沉积过程包括多种复杂的微观物理、化学及其生态过程, 如凝聚、碰撞、吸收和吸附等。这些过程都明显改变了城市空气污染物浓度, 其综合影响由干沉积速度表示^[7]。污染物的湿沉积过程包括许多重要的云雨微物理过程, 如云下冲刷、云中湍流和清除过程等。污染物的清除与降水强度、云的类型和高度及其化学性质有关。

2.5 城市空气污染气象特征^[1,8,9]

城市下垫面的基本特征是干、热、粗。非均匀的下垫面造成动力学粗糙度增大(其地面粗糙度长可在 1~3 m 之间变化), 使得城区风速减小, 气流不规则, 湍流强度增大, 湍流混合加大, 大气扩散速率增强。在一些大面积高建筑的背风面, 常常形成尾流区, 可造成高浓度积累。

城乡水平温差(一般大于 3°C 以上)可引起热岛环流(冷空气从四周的乡村流向市中心, 在市中心形成辐合上升气流, 并将暖空气带到高空, 在市中心上空与乡村区域形成辐散和下沉气流, 连同市中心的辐合上升气流组成一完整的闭合环流), 并形成夜间混合层。大量观测事实表明, 晴朗白天城乡受太阳辐射加热, 气温随高度分布都呈递减不稳定状况, 因此城乡的空气污染物散布状况基本相似。夜间乡间由于辐射冷却, 近地面层常常形成辐射逆温层, 日出后, 逐渐破坏抬升。这是一般的变化规律。在城区, 由于存在热岛效应, 当乡间较冷的气流流进相对较暖的城区上空时, 下层空气被重新加热而形成混合层, 其上空仍维持逆温。这就是夜间城市混合层, 其厚度由城市的规模和来流性质以及日变化时间而定。这种结构情况下, 城区积聚的空气污染物往往也会被对流混合层带到地面, 形成城市特有的混合层熏烟现象, 有可能使城区形成地面高浓度。

另外, 城市常常位于沿海、江边或山地之上, 海陆风、河陆风及山谷风也是影响污染物分布的重要气象条件。

3 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室(LAPC)的城市空气污染数值预报模式系统

城市空气污染问题已经引起了人们的广泛关注。1997年, LAPC 在中国科学院“九五”重大项目 A“大气污染预测的理论和研究方法研究”的资助下, 率先开展了城市空气污染预报的方法研究, 建立起了“城市空气污染数值预报模式系统”^[10], 并成功地用于天津^[11,12]和沈阳等城市的空气污染预报。这套城市空气污染数值预报模式系统由 α 中尺度^[13]与 β 中尺度^[10]气象预报模式和城市空气污染预报模式^[10]组成, 内容包括 PBL 湍流统计量参数化、污染源模式化、中尺度气象预报、污染物浓度预报和预报效果检验 5 个部分。

3.1 PBL 湍流统计量参数化

污染物在大气中的扩散是由湍流引起的, 而湍流的发生、发展与大气稳定度、下垫面特征等密切相关。严格讲, PBL 湍流结构要由 PBL 模式预报。但预报湍流结构太复杂, 因此在大量湍流观测资料分析及其理论研究的基础上, 找出湍流统计量的时空分布规律或参数化关系(尤其是 PBL 内的湍流)是污染物扩散研究及污染模式建立的重要基础。

近 10 年来, 随着 PBL 湍流垂直结构野外观测的广泛开展, 进一步改善和发展现有的湍流扩散理论与模型是中距离湍流扩散理论研究的一大特点, 而所有的扩散理论几乎都依赖于相同的 PBL 湍流参数组: 湍流脉动量的标准差 (σ_u 、 σ_v 和 σ_w)、Lagrange 时间尺度 ($T_{L,u}$ 、 $T_{L,v}$ 和 $T_{L,w}$) 和湍流速度尺度 (u_*), 经常使用的地转风速 (G)、地面粗糙度 (z_0) 和边界层厚度 (z_i) 等外参数以及近地面层速度尺度 (u_{*0})、莫宁-奥布霍夫长度 (L_m) 和对流速度尺度 (w_*)。

另外, 大气湍流扩散过程主要取决于大气的湍流状态。在近地面层, 湍流状态的经验分类(大气稳定度类)与湍流之间的关系已经十分清楚, 使用最广泛的是 Pasquill 稳定度分类法^[8]。随着观测手段越来越先进和观测高度越来越高, 人们发现这种适用于近地面层的稳定度分类方法显得有些不足, 需要更合适的或更量化的参数来代替这种经验性的稳定度分类方法。

目前, 用日常气象观测资料估计 w_* 、 u_{*0} 、 L_m 和 z_i 四参数的方法^[1]简单易行, 又能很好地描述 PBL 内的湍流扩散过程, 并很方便地与大气湍流统计量建立起关系。因此, 随着观测资料的不断完善, 现行定性的稳定度分类法可能会被淘汰。

3.2 污染源模式化

污染源分成人为源和自然源两大类。自然源又分成生物源和非生物源。污染源还可分成一次污染源和二次污染源, 二次污染源是一次污染物经过化学反应后的产物。一次人为污染源通常有 SO_2 、 NO_2 、 NO 、 CO 和 TSP, 一次生物污染源通常有 VOC、 NO_x 、 C_xH_y 和 CH_4 。观测表明, 城市的空气污染程度有明显的时间变化, 有日变化、周变化、年变化以及各种非周期性的变化趋势, 这些都与污染源的时间变化有关。人们的生产与生活有一定规律, 污染源排放也表现出明显的时间变化, 如冬季取暖使污染源

的排放量增加, 农作物的生长季节生物源的排放量增加, 夜间汽车尾气排放明显减少, 居民做饭时间会造成面源排放的增加等。城市空气污染是由不同性质和形式的大量污染物造成, 针对不同形式的排放源应分别设计不同的参数化方法, 选用不同性质的模式及参数^[4]。

(1) 孤立高架点源: 大的热浮力源(如火电厂的高烟囱)排放的烟羽可抬升到几百米以上的高空。这类源需按烟气抬升公式逐个加以处理。白天混合层对流活跃, 夜间经常产生城市混合层, 模式中以污染物在上下边界多次反射来处理夜间混合层的作用。通常, 把此类熏烟型污染作为事故处理, 这是由于烟羽下缘向下伸展很快(与烟羽抬升相比), 并使污染物接地; 尺度与烟羽高度相仿的大气垂直对流活动强烈, 会将烟羽带到地面; 加上一些下垫面及特殊地形的作用, 如城市附近的陡峭山谷、水陆界面或城市向乡村的过渡区域都可能造成特殊的影响。

(2) 孤立的低矮工业烟囱: 许多孤立的工业排放源不当作高架点源处理。尤其在城市, 要考虑烟囱附近建筑物增强湍流而造成污染物向下混合或者由于排放物出口速度较低而造成烟囱下洗作用的影响。采用烟囱高度大于附近建筑物高度 2.5 倍的经验规则, 不满足这一规则的个别源需作专门处理。

(3) 面源: 由大量低矮的污染源(如居民和工业取暖系统以及其他小的城区污染)一起构成面源排放, 通常按单位面积总排放量处理。这类源的排放总量通常占城市污染负荷的较大成数。确定面源强度是个比较困难又很重要的工作。对城市面源的处理, 大多数仍以高斯烟羽模式为基础, 也有直接采用数值积分物质守恒方程求解。不论采用什么模式处理, 关键问题是精确确定源强, 提高源强的空间分辨率。

(4) 流动源: 此类污染源主要包括卡车和小汽车。飞机、火车等虽然属于这类源, 但不是主要的。交通排放的主要污染物是 CO 和 NO_x, 大多数将它们转换成面源处理。但是, 它们的时间变化很明显, 与城市交通状况有关。城市 CO 和 NO_x 的排放及其造成的浓度分布与城区建筑物布局及空气动力学影响有关。

3.3 中尺度气象预报

影响气象要素时空变化的因子有 3 类: 天气系统(台风、西南和东北季风、副热带高压、锋面过程等)的影响、热力作用及动力作用。考虑到计算能力和资料状况, 中尺度气象预报由 α 与 β 中尺度气象预报模式完成。 α 中尺度模式用以预报 24 或 48 小时内区域范围(3000 km × 3000 km)的风向、风速、温度、降水及地温, 为 β 中尺度气象模式提供气象要素的初始场和同化场。 β 中尺度模式用以详细描述局地范围(200 km × 200 km)的边界层结构和气象要素的分布, 为城市空气污染预报模式提供高分辨率的气象要素场。

3.4 污染物浓度预报

污染物浓度的预报是由城市空气污染预报模式实现的。目前, 预报的内容有 SO₂、NO_x、TSP 和 O₃。这个模式是在区域酸沉降模式(RADM)^[4]的基础上建立并发展起来的, 是一个包括输送、扩散、迁移和转化过程的 Euler 型物质模式。

模式的适用性很广, 可用于复杂地形、多种气象条件、多排放源、多种污染物的地区, 与 β 中尺度气象预报模式结合, 可以很好地预报城市空气污染物的分布及变化趋势。

3.5 预报效果的检验

预报效果检验是城市空气污染预报模式系统的一个重要的组成部分, 对于评价模式实际应用效果和发展与完善模式系统具有重要意义。对模式性能的评价最主要有以下 4 个方面: (1) 模式预测的污染物浓度和大气质量标准的可比性; (2) 模式预测污染物浓度的时空变化及其分布形式; (3) 模式预测结果与实测值接近程度; (4) 模式假设的合理性和实用性。

参 考 资 料

- 1 雷孝恩、张美根、韩志伟等, 大气污染数值预报基础和模式, 北京: 气象出版社, 1998, 321pp.
- 2 Orlanski, I., A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bull. Am. Met. Soc.*, 1975, **56**, 527~530.
- 3 Longhetto A., *Atmospheric Planetary Boundary Layer Physics*, Elsevier, Amsterdam, 1980, 424pp.
- 4 ADMP, *Development and implementation of chemical mechanisms for the regional acid deposition model (RADM)*, ADMP, NCAR, Boulder, Colorado, 1987, 164pp.
- 5 NAPAP, *The regional acid deposition model and engineering model*, Report on State of Science and Technology, No.4, USA, 1990.
- 6 Wesely M.L., Measurements and parameters of particulate sulfur dry deposition over grass, *J. Geophys. Res.*, 1985, **90**, 2131~2143.
- 7 Lei Xiaoen, A new dry deposition velocity pattern and its practical application in high resolution regional acid deposition model, *Acta Meteor. Sinica*, 1996, **10**, 118~128.
- 8 Pasquill, F. and F. B. Smith, *Atmospheric Diffusion* (3rd edition), Ellis Horwood Ltd., Chichester 1983.
- 9 Stull, R. B., *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- 10 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室 (LAPC), 空气污染数值预报模式系统, 北京: 气象出版社, 1999, p70.
- 11 张美根、韩志伟、雷孝恩等, 天津市空气污染数值预报实验中的模式系统, *气候与环境研究*, 1999, **4**(3), 237~243.
- 12 韩志伟、张美根、雷孝恩等, 城市空气污染数值预报试验, *气候与环境研究*, 1999, **4**(3), 283~289.
- 13 Yu Rucong, Documentation of the LASG Regional Eta-Coordinate Model, Technical Report No.1, IAP, CAS, 1994.
- 14 Weber E., *Air pollution, Assessment methodology and Modeling*, Plenum Press, New York, 1982, p329.

Exposition of Urban Air Pollution Forecast Methods

Zhang Meigen, Han Zhiwei and Lei Xiaoen

(State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry,
Chinese Academy of Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Beijing 100029)

Abstract Principal methods of urban air pollution forecast (potential, statistical and numerical method), main characters of numerical method (space dimension and computation efficiency, high resolution, multiple chemical species, coupling of physical, chemical and biological processes, features of pollution meteorology and pollutant emission) and model system applied in cities of Tianjin and Shenyang of air pollution forecast numerically (meteorological models of meso- α and meso- β , urban air pollution forecasting model) are discussed generally.

Key words: air pollution; forecast