

空气污染气象条件预报评估技术与应用

许建明 瞿元昊 常炉予 周广强 马井会

(长三角环境气象预报预警中心, 上海 200030)

摘要: 空气污染气象条件的预报和评估是环境气象业务的重要内容, 对重污染天气预报预警、大气污染减排效果评估、重大活动空气质量保障具有重要意义。介绍了上海市气象局开展空气污染气象条件预报评估的主要思路、技术方法和工作实践, 讨论了空气污染气象条件预报评估业务中存在的问题和技术发展方向。

关键词: 空气污染气象条件, 大气化学模式, 预报评估

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.019

Practice on Forecast and Evaluation Technique of Meteorology for Air Pollution in Shanghai

Xu Jianming, Qu Yuanhao, Chang Luyu, Zhou Guangqiang, Ma Jinghui

(Yangtze River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Shanghai 200030)

Abstract: As the major component of the environmental meteorology, air pollution weather condition is an important role in severe air pollution forecast and warning, the effect evaluation on emission reduction, as well as the air quality guarantee for the important activities. In this article, we introduce to the technical framework and the methods developed and practiced in Shanghai to conduct air pollution weather forecast and evaluation, and discuss. The issues currently existed to limit the further development and the ways to improve the work in the future.

Keywords: air pollution, weather condition, atmospheric chemistry model, forecast and evaluation

0 引言

空气污染事件受污染排放(人为排放)和气象条件共同决定^[1]。气象条件直接影响污染物在大气中经历的各种物理过程, 包括传输、扩散和干湿沉降, 决定污染物的空间分布及其随时间变化的特征^[2], 对污染事件的形成、演变和消亡具有重要影响。例如, 2013年1月我国东部频繁出现的重污染天气和异常的环流形势(弱气压场维持、对流层低层逆温)密切相关^[3]; 局地小尺度天气系统(海陆风、山谷风)和边界层的演变对污染日变化具有重要影响^[4]。鉴于气象条件对大气污染的重要影响, 国内外学者针对大气传输和扩散能力开展了诸多研究。Allwine等^[5]提出滞留指数, 通过局地风场的时间变化反映大气污染物的水平扩散能力。Pasch等^[6]建立了通风指数, 将其定义为边界层内不同高度上的水平风速的积分, 用于描述边界层内大气的整体扩散能力。滞留和通风指数的适用性分别在长三角和珠三角进行了详细检验^[4,7]。

吴兑等^[8]提出矢量和的概念, 认为珠三角天气过程与静风、小风过程有关, 而清洁过程则与强平流输送有关。廖碧婷等^[9]基于天气预报中的K指数、沙氏指数和抬升指数建立了垂直交换系数, 若该系数小于1500则认为容易出现灰霾天气。杨元琴等^[10]引入适应度函数分级方法, 建立了PLAM指数对北京夏季空气污染气象条件进行定量诊断和分析。张恒德等^[11]利用近地面水平风速、逆温、混合层高度等9个因子建立了静稳天气综合指数(SWI)用于标准大气的静稳程度。花丛等^[12]将潜在源贡献因子分析方法和排放清单相结合建立了污染传输强度指数, 具有6 h的提前预报量。因此在评估大气污染减排效果时, 必须首先剔除气象条件变化对污染物变率的贡献, 这对于科学开展大气污染治理具有重要意义。

准确把握空气污染气象条件是预报污染事件持续时间和污染峰值的前提, 评估污染减排的成效也必须剔除气象条件变化对污染物变率的影响。因此, 空气污染气象条件的预报和评估对于重污染天气预报预警、大气污染治理具有重要意义, 是目前环境气象预报服务业务的重要内容。

收稿日期: 2017年7月12日; 修回日期: 2017年10月30日
第一作者: 许建明(1978—), Email: metxujm@163.com
资助信息: 上海市科学技术委员会科研项目(16DZ1204607)

1 研究思路

图1描述了一个理想箱体中污染物经历的主要过程，包括物理过程（水平传输 F 、垂直混合 D_v 、干湿沉降 D ）、化学过程（化学生成 P 和转化 L ）和污染排放 E ，它们共同决定了箱体中的污染浓度 X 。物理过程主要由气象条件决定，其中水平传输包含污染输入 F_{in} 和输出 F_{out} ，若净通量（ $F_{in} - F_{out}$ ）为正则有利于箱内污染物浓度升高，反之则有利于下降。水平传输主要与水平风（包括风速和风向）、上游污染水平有关。垂直混合 D_v 主要与湍流强度有关。根据经典边界层理论，湍流使得白天边界层内的物质在垂直方向充分混合，湍流越强，边界层发展越高，更多的污染物被抬升到高空，从而降低近地面的污染物浓度。由于湍流强度无法直接观测，一般用白天混合层最大高度表征湍流强弱。混合层越高表明污染物的垂直混合作用越强。沉降包括干、湿沉降，其中湿沉降（湿清除）作为大气污染物的主要清除机制，是大气自净的最重要过程之一。湿清除的机制非常复杂，以大气气溶胶为例，与气溶胶粒子谱、雨滴谱、雨滴下落末端速度、粒子荷电数等都有关系。一般将湿清除系数参数化表示为雨强的指数形式^[13]。

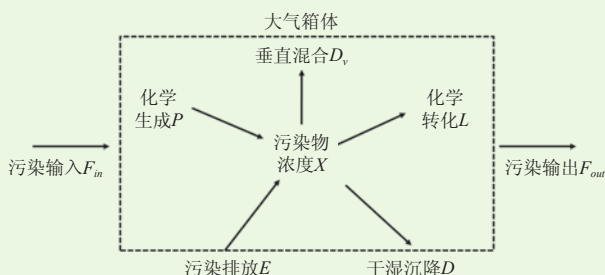


图1 理想大气箱体中影响污染物浓度的主要过程
Fig. 1 Major process affecting one atmospheric species concentration in an atmospheric box

预报和评估空气污染气象条件就是要找到关键的气象因子或者诊断量，表征气象条件对污染物传输、垂直混合和沉降过程的影响。若有利于污染物浓度降低，则空气污染气象条件较好，反之则较差。另外，局地气象条件由天气过程的演变决定，它们和大尺度天气形势密切相关。识别典型的污染天气形势、分析不同环流形势下污染物的物理化学过程也是空气污染气象条件预报评估的重要内容。

图2描述了上海市气象局开展空气污染气象条件预报的技术思路。首先，着眼于天气形势，根据历史污染个例开展大气环流分型研究，识别典型的污染环流类型，为污染潜势预测和类型判别提供依据；第二，着眼于预报指标，揭示能够表征污染物传输、

扩散和沉降过程的关键气象因子或者诊断量并建立阈值指标，为污染过程的判别提供依据；第三，着眼于大气化学数值模式，基于模式提供的主要污染物的空间分布及演变，以及定时、定点、定量的污染浓度预报，通过对模式预报的解释应用和修正，为污染事件的精细化预报特别是生消时段和污染峰值提供依据。

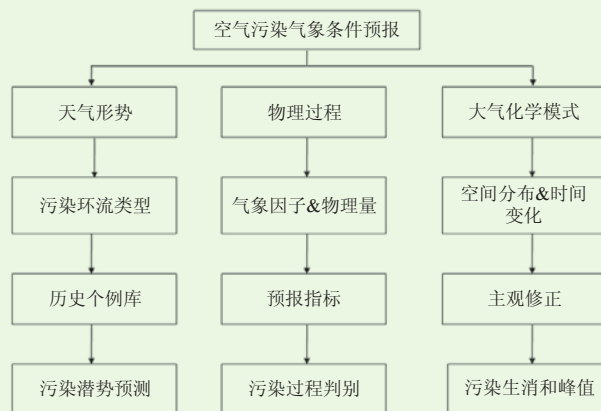


图2 空气污染气象预报的技术思路
Fig. 2 The technical frame to conduct forecasting air pollution weather condition

上述思路同样适用于空气污染气象条件的评估。首先，通过对比不同时段的环境形势和预报指标定性判别空气污染气象条件的差异；其次，利用大气化学模式设计数值试验，比如，采用相同排放清单、不同气象驱动场进行数值模拟，定量评估气象条件变化对污染物浓度的贡献。

2 方法

2.1 污染天气客观分型

天气分型通常是对大气环流进行分型，从而识别典型的环流形势配置，是开展灾害性天气预报的重要方法。由于大气污染事件通常和特定的天气过程相关，因此识别典型的污染天气环流形势成为开展空气污染气象条件预报的基础。本节主要介绍上海 $PM_{2.5}$ 污染天气分型的方法、结果和业务实践。分型方法采用Huth等^[14]推荐的T-mode斜交旋转主成分分析法（PCA）。客观分型具有处理大样本的优势，是未来应用和发展的方向。上海环境监测中心提供了2013—2015年上海冬季123个 $PM_{2.5}$ 污染日的地面观测资料（国控点的 $PM_{2.5}$ 小时平均浓度）。分型对象选择海平面气压场（SLP）和10 m水平风，采用的是NCAR/NCEP的FNL再分析资料，水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ ，研究范围为 $20^\circ - 50^\circ N$ 、 $10^\circ - 130^\circ E$ ，得到图3显示的5类影响上海的 $PM_{2.5}$ 污染天气环流类型^[15]：

1) 偏西冷空气（CM）：冷空气势力较强，路径

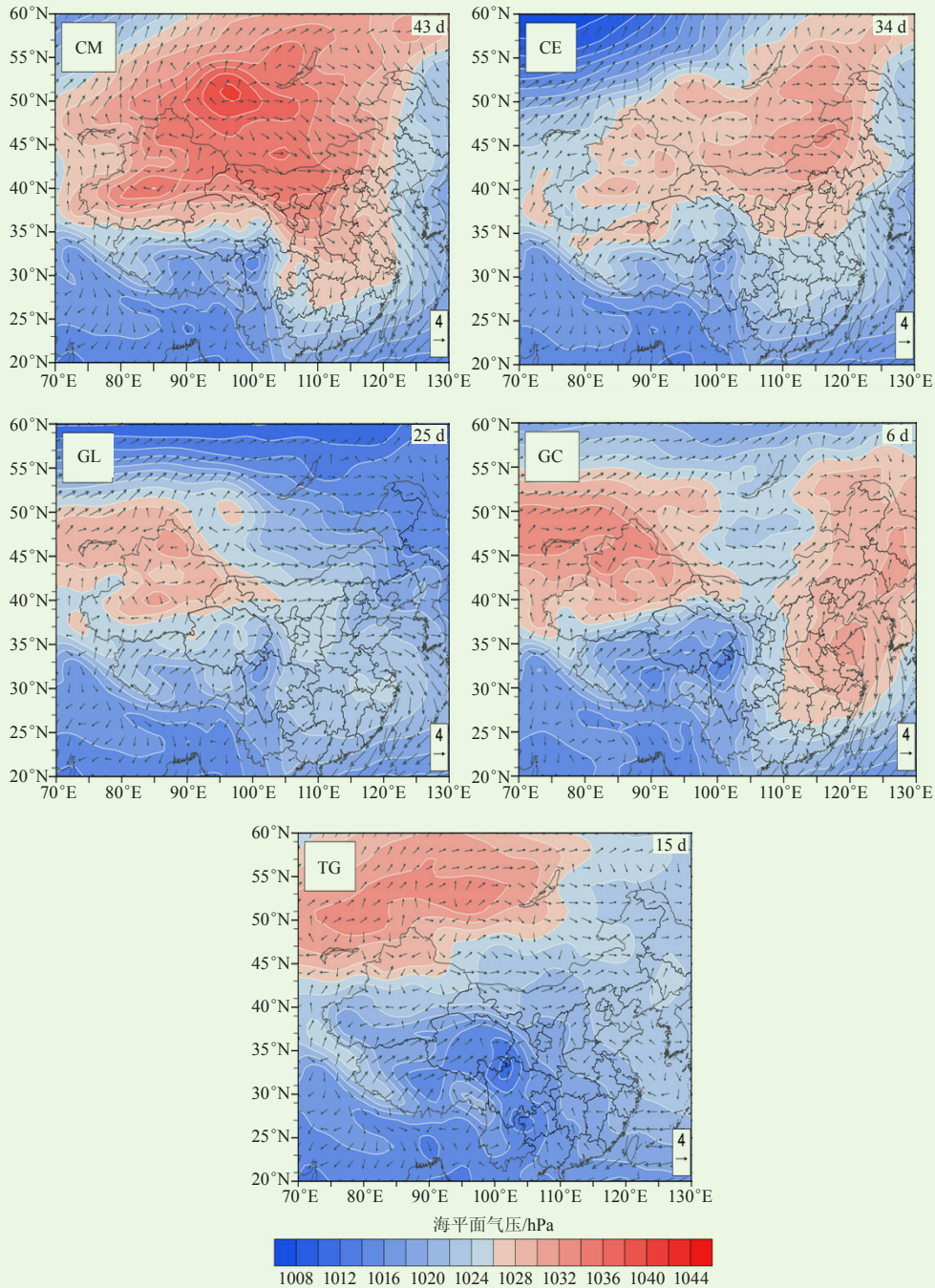


图3 上海PM_{2.5}污染天气环流类型 (CM、CE、GL、GC、TC分别代表偏西路冷空气、偏东路冷空气、L型高压、高压中心和倒槽, 图中填色等值线表示海平面气压, 箭头表示10 m高度的风矢量)

Fig. 3 The synoptic circulations classified by T-mode PCA method for PM_{2.5} pollution in Shanghai, shade (contour) and arrow denote SLP and 10m horizontal wind respectively. CM, CE, GL, GC and TC represent 5 synoptic patterns named as mid-ward path cold, eastward path cold, L-share high, near high center and inverted trough

偏西, 锋面呈东北-西南向经过上海, 主导风向为W和NW。局地PM_{2.5}主要受锋面过境产生的输送影响。影响上海的气团主要来自内蒙、山西、河南、安徽、江苏, 而不是污染严重的京津冀和山东。

2) 偏东冷空气 (CE): 冷空气主体路径偏东、

势力较弱。上海受冷空气外围气流扩散影响, 主导风向同样为W和NW。影响上海的气团主要来自华北和山东, 输送强度较高。

3) L型高压或高压前部 (GL): 华中-华东受大范围弱气压场控制, 风速最小 (1.77 m·s⁻¹)、静风频

数最高(16.6%)，扩散条件最差。主导风向为偏西风(SW、W和NW)，存在明显的污染输送。上海位于弱高压前部即污染区的下风向，小风和偏西风相叠加进一步加重污染水平。

4) 倒槽(TG)：冷空气在西伯利亚累积。长三角回暖明显，从珠三角-长三角沿海地区有倒槽发展，上海的平均温度和相对湿度最高有利于产生降水。主导风向为E和SE。

5) 高压中心(GC)：高压中心位于山东-江苏沿海，上海处于高压中心附近，天气静稳，风速较小仅为 $1.97 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，主导风向不明显，反应了高压系统下风频较乱的特征，空气质量主要受本地排放影响。

计算不同环流形势下的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度日变率(与前一天的浓度差)。平均浓度越高、上升幅度越大，表明越有利于污染事件的形成和加剧。5类环流形势对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别为120.8、127.2、142.8、111.6和 $108.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。平均变率分别为25.7、37.72、40.98、-30.1和 $15.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$ 。可见GL下的平均浓度最高、上升幅度最大，其原因是小风(扩散条件差)和偏西风(输送)两种不利的气象条件相叠加，定义为叠加型污染天气。其次是两种冷空气形势CW和CE，其特点是上游污染物随着锋面自北向南输送，定义为输送型污染天气。它们对上海空气质量的影响取决于上游气团的污染强度和输送持续时间。GC特点是风速小(扩散条件差)、风频乱，天气静稳，空气质量主要受本地排放影响，定义为静稳型污染天气。TG下虽然平均浓度较高为 $111.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，但是浓度变率却为负值($-30.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)，表明这种形势实际上有利于污染物浓度的降低。原因是TG下上海主导风向为E-SE风(海风)，并且有明显降水(降水日数占52%)，有利于气溶胶湿清除。

上述结果表明，上海的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染环流类型可归结为三类，分别为静稳型(高压中心附近)、输送型(冷空气)和叠加型(高压前部或者L型高压)。其中叠加型的环流形势对上海 $\text{PM}_{2.5}$ 环境质量影响最大，是出现重度及以上污染的主要原因^[16]。基于污染天气分型的结果，进一步建立了上海 $\text{PM}_{2.5}$ 污染天气个例库，实现了对历史污染个例环流形势配置、污染物浓度和气象要素变化的自动查询。预报员根据对未来形势场的预测开展污染天气潜势分析，通过在历史个例库中查找相似的环流类型，为空气污染气象条件预报尤其是中期-延伸期的潜势预测提供参考。

2.2 预报指标

空气污染气象条件预报指标的建立思路是着眼于

污染物的传输、垂直混合和湿清除过程，通过文献调研和多源资料分析确定影响上述过程的关键气象因子或诊断量，并建立指标阈值。本节以上海 $\text{PM}_{2.5}$ 污染气象条件为例，介绍几个预报指标的建立思路和方法。

2.2.1 平衡风速

水平风是影响局地空气质量最重要的气象条件。由于水平风同时产生污染输入和输出，因此它和污染物浓度一般呈非线性关系^[17]，不能直接作为预报指标。

表1显示了上海2013—2015年污染月8个风向区间的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度，计算时剔除了有降水时的数据。可见对上海而言，西向风区间(SW, W, NW)的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较其他风向区间明显偏高，呈现“两极分化”特点。2013—2015年西向风区间的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别为 125.2 、 89.6 和 $98.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，较其他风向区间分别偏高了53%、72%和68%。其中，西风时的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在2014和2015年甚至高于静风($<0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)时的平均浓度，表明存在明显的输送效应。2014年上海的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，较2013年下降了16.1%，污染日数减少了29 d，污染控制取得显著成效。但是2015年上海的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度没有继续下降反而出现反弹，较2014年上升了2.2%，污染日数增加了9 d。分析发现，空气污染气象条件对 $\text{PM}_{2.5}$ 的年际变化具有调节作用^[18]，2014年的空气污染气象条件最好，表现为西向风频数最少(35%)，明显少于2013年(42%)和2015年(45%)。因此，西向风频数可作为评估空气污染气象条件的指标之一。

表1 2013—2015年污染月不同风向区间的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均质量浓度(单位： $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Table 1 Mean $\text{PM}_{2.5}$ level in different wind sectors during pollution months in 2013–2015 (unit: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	C	Mean
2013	71.1	82.1	90.1	85.0	81.5	121.8	133.6	109.5	139.8	104.2
2014	59.4	48.4	54.2	48.8	52.4	91.5	91.6	86.7	72.1	67.0
2015	55.3	53.6	63.1	65.3	68.6	92.4	104.0	88.4	90.5	78.8

Tie等^[19]提出了平衡风速(balance wind)的概念，认为当水平风速大于平衡风速时， $\text{PM}_{2.5}$ 的清除能力大于积聚能力，有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降；反之则有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升。根据上述思路，本文利用 $\text{PM}_{2.5}$ 和水平风速观测数据计算平衡风速。图4显示了在不同风速区间 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均变率(当前小时和前一小时的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度差)，风速区间设置为 $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，共6351个有效样本。由图可见，当水平风速小于 $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时， $\text{PM}_{2.5}$ 变率为正值，表明有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 上升；而当水平风速大于 $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后， $\text{PM}_{2.5}$ 变率转为负值，表明清除能力

大于积聚能力有利于其降低。因此上海的平衡风速约为 $1.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。此外，当水平风速位于 $1.8\sim 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区间时， $\text{PM}_{2.5}$ 下降速率很小，平均每小时为 $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，采取减排措施将会取得较好效果。而当水平风速大于 $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 后， $\text{PM}_{2.5}$ 下降速率明显增大，表明水平扩散能力显著增强，污染气团得到快速清除无需采取应急措施。因此可将“平衡风速”作为空气污染气象条件的预报指标。统计发现，平衡风持续时间越长， $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度越高，当达到 10 h 时，日平均浓度将达到 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

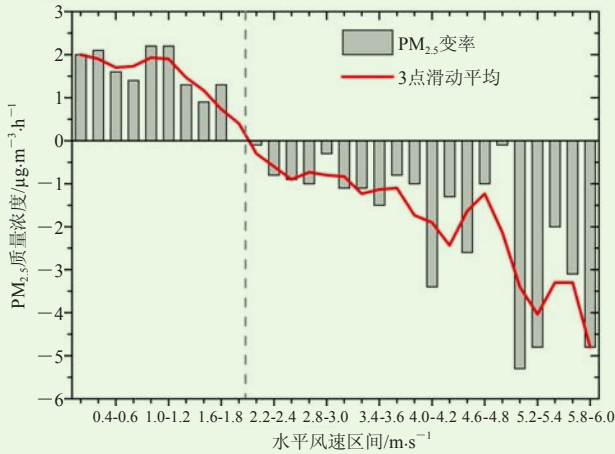


图4 不同水平风速区间的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变率
(单位: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$)

Fig. 4 Mean hourly $\text{PM}_{2.5}$ variability and 3-point smoothed curve with different wind speed sectors (unit: $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$)

2.2.2 大气扩散指数

国内外学者通过建立综合的气象指数表征大气扩散能力^[5-6, 8-12]，比如滞留指数 (RF) 反映了大气水平扩散能力。滞留指数越大，水平扩散条件越差，越容易形成污染事件。上海的检验结果表明，滞留指数和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈正相关 (样本数 $n=1468$ ，相关系数 $r=0.503$)，两者具有较好的对应关系。但是该指数在实际业务应用时存在以下问题：(1) 没有考虑大气的垂直扩散能力；(2) 没有考虑不同风向产生的输入气团的差异，比如当上海的主导风向为偏东风时，即使滞留指数较小，但海上清洁气团的输入仍然有利于空气质量改善；(3) 没有考虑输送的影响。本文将通风指数 VI 和通风指数相结合，建立了一个大气扩散指数 DI ，表示为：

$$DI = x \times VI_n, \quad (1)$$

式中， DI 同时包含了对水平扩散能力和垂直扩散能力的描述。其中， RF 为滞留指数， VI 为通风指数，计算 VI 时边界层高度采用罗氏法^[20]。由于 RF 在 $0\sim 1$ ，而 VI 的数值较大，因此根据公式(2)对其作归一化处理得到 VI_{norm} ，式中 Mid 为所有样本的中位数。

$$VI_{norm} = 1 \left| \frac{\arctan(\frac{VI}{Mid})}{\pi / 2} \right|, \quad (2)$$

式中， x 为权重系数。利用历史个例经过敏感性试验计算发现当 x 为0.15时， DI 与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关系数最大达到0.525，对污染过程的指示效果明显优于单一的滞留指数，在实际业务中更加实用。

2.2.3 输送指数

在区域性大气污染背景下，污染物随着气团运动造成城市之间的相互输送和影响。从前文的天气分型结果也可推论，上海中度以上的污染事件均和输送有关。污染输送主要和上游污染程度、本地的主导风向和水平风速有关。花丛等^[12]将输送指数 T 表示为：

$$T = R \times E \times W_d \times W_t \times PSCF, \quad (3)$$

式中， R 为输送概率， E 为排放强度 (根据排放清单确定)， W_d 为距离权重因子， W_t 为时间权重函数， $PSCF$ 为潜在源区贡献因子，各参数的计算方法详见文献^[12]。

计算输送指数的关键是确定潜在源区贡献因子。首先，筛选2013—2015年上海的 $\text{PM}_{2.5}$ 输送个例，对所有个例的过去48 h后向轨迹进行聚类分析，利用PSCF分析法计算发现上海的潜在源区主要分布在京津冀中南部地区和山东西北部地区，进而根据公式 (3) 计算输送指数 T 。但检验发现 T 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的关系并不显著，相关系数较小。可能的原因是式 (3) 中用排放强度表示上游的污染程度，排放强度基本不变，但实际上上游的污染程度还受天气过程影响。即使输送路径相似，但由于天气形势的差异会形成不同的输送影响。因此对式 (3) 进行修正得到输送指数 T 的计算公式：

$$T = R \times C \times W_d \times W_t \times PSCF, \quad (4)$$

式中，用上游的 $\text{PM}_{2.5}$ 实况浓度 C 替代排放强度 E 重新计算输送指数，发现和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的相关系数达到0.658，经过业务检验对影响上海的污染物输送过程具有较好的指示意义，在业务中得到较好应用。

2.2.4 大气化学数值模式

大气化学数值模式能够提供主要污染物的空间分布和逐小时演变过程，是开展空气污染气象条件预报评估最重要的技术方法。以动力化学耦合模式 WRF-Chem 为基础，建立了华东区域大气化学数值预报系统^[21]，模式区域覆盖我国东部地区 ($20^\circ\sim 40^\circ\text{N}$, $110^\circ\sim 140^\circ\text{E}$)，水平分辨率为 6 km。气象初始和边界条件采用 GFS 预报场，化学侧边界采用全球大气化学模式 MOZART 的月平均值。长三角排放清单水平分辨率 3 km，由上海市环保局提供。上海本地的排放清单采用 Tie 等^[22]的研究 (水平分辨率 1 km)。中国大陆其

他地区采用清华大学0.25°分辨率的清单MEIC^[23]。生物排放采用自然源排放模块(MEGAN2)在线计算。采用Xu等^[24]提出的“Nudging”方法对长三角重点城市的NO_x和SO₂进行了修正。模式采用RADM2气相化学机制、Madronich光解算法、ISORROPIA(V1.7)动力平衡无机气溶胶机制和SORGAM二次有机气溶胶机制。系统每天启报两次(UTC 00时、12时),预报时效96 h,其中UTC 12时启报时采用GSI同化地面观测的PM_{2.5}质量浓度数据^[25]。Zhou等^[26]检验了2014—2015年模式对15个省(上海、浙江、江苏、安徽、山东、江西、福建、北京、天津、河北、河南、山西、湖北、湖南、广东)130个城市的PM_{2.5}预报结果,发现模式对PM_{2.5}日均浓度的平均偏差约为-10 μg·m⁻³,均方根偏差约为36 μg·m⁻³,相关系数约为0.66。统计发现(表2),模式对PM_{2.5}轻度及以上污染日的捕获率为51.3%,漏报率为48.7%,空报率为29.9%;对重度及以上污染日的捕获率、漏报率、空报率分别为29.9%、70.1%和40.6%,表明模式对PM_{2.5}的预报总体偏低,对重污染事件的预报能力有待提高。

表2 WRF-CHEM对不同等级PM_{2.5}污染日的预报效果检验
Table 2 Effective tests of the WRF-CHEM performance for different PM_{2.5} exceedance levels

	轻度及以上污染日	中度及以上污染日	重度及以上污染日
捕获率(%)	51.3	38.1	29.9
漏报率(%)	48.7	61.9	70.1
空报率(%)	37.0	42.0	40.6

预报员基于长三角环境气象业务平台重点分析:

(1) WRF-CHEM对天气形势预报的合理性;(2)模式对上游污染物预报的效果;(3)模式近期对本地污染强度预报的稳定性和偏差。基于以上分析开展对污染物的落区和峰值预报进行修正,制作未来3 d华东落区预报、上海未来72 h分时段预报、上海未来10 d预报产品。

除了支持污染天气预报,大气化学数值模拟也是开展空气污染气象条件评估的重要技术方法。在假设模式模拟偏差稳定的前提下,通过设计不同的数值试验评估气象条件变化对污染物浓度的影响。比如基于WRF-CHEM模式,采用相同的排放清单,模拟了2013—2015年冬季两类气象条件下的PM_{2.5}浓度^[18],结果表明,2014年上海的PM_{2.5}浓度较2013年下降了26%,而2015年较2014年上升了16%,气象条件对PM_{2.5}的年变率具有显著作用,2014年的气象条件较2013和2015年更加有利。但是需要指出的是,上述评估没有考虑周边排放变化对本地污染的影响,在以后的研究中应该进一步完善。

3 结论与讨论

空气质量预报和大气污染减排都离不开空气污染气象条件的预报评估,它是环境气象科研和业务的重要内容。本文介绍了上海市气象局开展空气污染气象条件预报和评估的业务实践,重点以上海为例,介绍了空气污染区气象条件预报的技术思路和主要方法,讨论空气污染气象条件预报业务存在的问题和未来的发展方向。

根据《预报司关于开展空气污染气象条件预报和重污染天气预警工作的通知》(气预函[2013]85号)的要求,近年来各省市气象局均建立了空气污染气象条件预报业务,在环境气象服务工作中发挥了重要作用。但是与其他天气预报业务相比,空气污染气象条件的预报技术非常薄弱,预报业务尚不完善和成熟,主要存在以下问题:(1)空气污染气象条件不能直接观测,因此无法检验和评估预报结果的准确性;(2)目前空气污染气象条件以定性描述为主,缺乏数理支撑。当不同的预报因子存在分歧时,比如扩散条件增强但湿清除能力下降,很难给出科学的评估结论;(3)对一些物理过程的机制认识还不甚清晰,特别是污染物的垂直混合过程和湿清除过程,由于缺少有效的观测技术支持,目前还没有建立科学的指标阈值;(4)排放清单难以实现动态更新,因此开展数值试验时不能体现周边排放变化对本地污染浓度的影响。

空气污染气象条件的预报评估是重污染天气预警和应急减排的重要需求,是开展环境空气质量预报、评估、治理的重要基础。开展空气污染气象条件预报的学科基础是大气物理、大气边界层和云雾物理,核心是提高对大气污染物理过程的科学认识。在理论层面,应完善空气污染气象条件的科学定义,建立能够描述大气污染物传输、扩散、干湿沉降和辐射光解的数学物理方程。尤其是针对目前不甚清晰的污染物垂直扩散和湿清除过程,开展气象和污染物的垂直协同观测,以及气溶胶数谱、粒径谱和雨滴谱的协同观测,加强气体和气溶胶垂直扩散和湿清除的机制研究,建立更加科学的参数化方法。

在技术层面,从定性预报向定量预报转变。首先,借鉴箱模式概念和CMAQ、WRF-CHEM等大气化学模式中的过程分析方法,发展空气污染气象条件数值模型,定量解析不同物理过程对污染物浓度变化的贡献,对重污染天气的预报预警提供科学支撑;其次,针对污染天气预报中排放清单、气象条件等关键因子不确定性较大的难题,发展空气污染气象条件的

智能预报方法, 基于数值预报, 通过引入机器深度学习方法和社会经济大数据挖掘分析技术, 提升空气污染气象条件的预报能力; 第三, 针对重大活动服务保障和秋冬季大气污染治理的需求, 发展中期-延伸期的空气污染气象条件预测技术, 特别是秋冬季重点区域的空气污染气象条件预测方法。在业务层面, 不断将天气气候业务相融合, 建立无缝隙、格点化的空气污染气象条件预报和评估业务。其中应优先考虑建立月尺度的空气污染气象条件预测业务和考核检验业务。此外, 随着我国气溶胶治理的不断深化, 重点区域的PM_{2.5}质量浓度持续下降, 空气质量明显改善。然而随着大气气溶胶的减少, 到达地面的太阳辐射不断增强, 有利于近地面臭氧的光化学生成, 珠三角、长三角、京津冀地区的臭氧污染问题不断凸显。虽然臭氧是光化学产物, 然而气象条件尤其是光辐射、风场、湍流对臭氧的生成、传输和扩散具有重要影响。此外作为温室气体, 臭氧本身对气候变化也具有重要作用。因此, 如何观测和预报影响臭氧的气象条件, 加深对高臭氧事件形成机制的科学理解, 开展臭氧和气候变化的相互作用也是未来环境气象的重要内容和目标。

参考文献

- [1] Elminir H K. Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of the Total Environment*, 2005, 350(1-3): 225-237.
- [2] 徐祥德, 丁国安, 周丽, 等. 北京城市冬季大气污染动力化学过程区域性三维结构特征. *科学通报*, 2003, 48(5): 496-501.
- [3] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 27-36.
- [4] Xu J M, Yan F X, Xie Y, et al. Impact of meteorological conditions on a nine-day particulate matter pollution event observed in December 2013, Shanghai, China. *Particulogy*, 2015, 20(3): 69-79.
- [5] Allwine K J, Whiteman C D. Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation. *Atmospheric Environment*, 1994, 28(4): 213-724.
- [6] Pasch A N, Macdonald C P, Gilliam R C, et al. Meteorological characteristics associated with PM_{2.5} air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009-2010 Cleveland multiple air pollutants study. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(39): 7026-7035.
- [7] Wu M, Wu D, Fan Q, et al. Observational studies of the meteorological characteristics associated with poor air quality over the Pearl River Delta in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13(21): 10755-10766.
- [8] 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究. *热带气象学报*, 2008, 19(1): 1-9.
- [9] 廖碧婷, 吴兑, 陈静, 等. 灰霾天气变化特征及垂直交换系数的预报应用. *热带气象学报*, 2012, 28(3): 417-424.
- [10] 杨元琴, 王继志, 候青, 等. 北京夏季空气质量的气象指数预报. *应用气象学报*, 2009, 20(6): 649-655.
- [11] 张恒德, 吕梦瑶, 张碧辉, 等. 2014年2月下旬京津冀持续重污染过程的静稳天气及传输条件分析. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4340-4351.
- [12] 花丛, 张恒德, 张碧辉. 2013-2014冬半年北京重污染天气气象传输条件分析及预报指数初建. *气象*, 2016, 42(3): 314-321.
- [13] 彭红, 秦瑜. 降水对气溶胶粒子清除的参数化. *大气科学*, 1992, 16(5): 622-630.
- [14] Huth R, Beck C, Philipp A, et al. Classifications of atmospheric circulation patterns. *Ann NY Acad Sci*, 2008, 1146(1): 105-152.
- [15] 许建明, 常炉予, 马井会, 等. 上海秋冬季PM_{2.5}污染天气形势的客观分型研究. *环境科学学报*, 2016, 36(12): 4303-4314.
- [16] 张国珪, 甄新蓉, 谈建国, 等. 影响上海市空气质量的地面天气类型及气象要素分析. *热带气象学报*, 2010, 26(1): 124-128.
- [17] Li Y, Lau A, Wong A, et al. Decomposition of the wind and nonwind effects on observed year-to-year air quality variation. *J Geophys Res-Atmos*, 2013, 119(10): 6207-6220.
- [18] Xu J M, Chang L Y, Qu Y H, et al. The meteorological modulation on PM_{2.5} interannual oscillation during 2013 to 2015 in Shanghai, China. *Science of Total Environment*, 2016, 572: 1138-1149.
- [19] Tie X X, Zhang Q, He H, et al. A budget analysis of the formation of haze in Beijing. *Atmos Environ*, 2015, 100: 25-36.
- [20] 程水源, 席德利, 张宝宇, 等. 大气混合层高度的确定于计算方法研究. *中国环境科学*, 1997, 17(6): 512-516.
- [21] 常炉予, 许建明, 周广强, 等. 上海典型持续性PM_{2.5}重度污染的数值模拟. *环境科学*, 2016, 37(3): 825-833.
- [22] Tie X X, Geng F H, Peng L, et al. Measurement and modeling of O₃ variability in Shanghai, China: application of the WRF-Chem model. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(28): 1989-2008.
- [23] Li M, Zhang Q, Streets D, et al. Mapping Asian anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds to multiple chemical mechanisms. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(11): 5617-5638.
- [24] Xu X D, Xie L A, Cheng X H, et al. Application of an adaptive nudging scheme in air quality forecasting in China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(8): 2105-2114.
- [25] Wu J B, Xu J M, Pagowski M, et al. Modeling study of a severe aerosol pollution event in December 2013 over Shanghai China: An application of chemical data assimilation. *Particulogy*, 2015, 20(3): 41-51.
- [26] Zhou G Q, Xu J M, Xie Y, et al. Numerical air quality forecasting over eastern China: An operational application of WRF-Chem. *Atmospheric Environment*, 2017, 153: 94-108.