

研究论文

石家庄市主要大气污染物的数值预报

范引琪

(河北省气象科学研究所, 石家庄 050021)

提 要

应用 CAPPS 城市大气污染潜势和污染指数预报系统, 对石家庄市主要大气污染物(SO_2 、 NO_x 、TSP)的污染指数(API)进行模拟分析。结果表明, 用 CAPPS 作城市大气污染预报时, 应加入污染物排放的时间系数(T_i)订正和经验系数(K_i)订正; 对北方城市而言, 还须加入扬尘百分率(F)订正。用加入 T_i 、 K_i 和 F 订正后的 CAPPS 预报系统, 对石家庄市大气污染物(SO_2 、 NO_x 、TSP)进行模拟, 结果 SO_2 、 NO_x 、TSP 三种污染物的预报值与其监测值的相关系数分别提高到 0.951、0.854 和 0.880。

关键词: CAPPS 系统 空气污染指数(API) 扬尘百分率(F) 污染物排放的时间系数(T_i) 经验系数(K_i)

引 言

根据对近年《石家庄市环境监测年鉴》的分析, 目前石家庄市大气污染状况比较严重。表现为: TSP 浓度的年平均值超过国家三级标准; 采暖期 SO_2 的平均浓度超过国家三级标准; NO_x 的年平均浓度虽然目前比较低(基本维持在国家二级标准以下, 冬季有时超

过二级标准), 但随着城市经济的发展, 机动车数量将成倍增长, NO_x 的污染不容忽视。由于污染物在大气中的散布受气象条件的支配, 所以利用气象资料和污染源分布资料可进行大气污染物的数值预报。准确的数值预报结果能正确地反映污染物的分布状况, 为大气污染的治理提供可靠依据。

城市中造成大气污染的污染源分布复杂,因此采用常用的扩散模式进行预测比较困难。本文应用城市大气污染潜势和污染指数预报系统^[1](以下简称 CAPPS,即 City Air Pollution Prediction System)对石家庄市 1998 年 10 月至 1999 年 6 月大气监测采样日主要大气污染物(SO₂、NO_x、TSP)的污染指数 API(Air Pollutant Index)进行了模拟和研究分析,并用 2000 年 6 月的资料进行了试预报。

1 CAPPS 预报系统简介

CAPPS 预报系统是在对大气平流扩散方程积分的基础上建立的对初始浓度有很好记忆且能感受非临近地区浓度的箱格积分模式。它最大的特点是空气污染指数的预报公式对源强和浓度监测的要求灵活,既可以使用源强进行预报,也可以使用浓度监测数据进行预报^[1]。因此,该系统适于进行源强分布复杂的城市大气污染物的数值预报。

CAPPS 包括三个主要模块:气象模块(中尺度气象模式,即 MM4)、大气污染潜势预报模块和大气污染指数预报模块。后两个模块由箱格积分模式导出。在大气污染潜势预报模块中,定义了物理意义明确的空气污染潜势指数 PPI(Pollutant Potential Index),以反映大气通风扩散稀释和干、湿沉降清除大气污染物的总能力,并将它与气象模块中的预报要素联系起来,利用气象模式的预报结果即可由该模块得出空气污染潜势指数。大气污染指数预报模块是在潜势预报的基础上发展出的由前期污染物浓度及气象模式预报值进行浓度预报的无源参数的箱格数值预报模式。它没有考虑扬尘对 TSP 浓度的影响,也未考虑气体污染物的排放量随时间的变化及其干沉积过程和物理-化学衰减。本文着重探讨 CAPPS 预报系统中的大气污染指数预报模式在石家庄市空气污染预报中的修正和应用。

在 CAPPS 的大气污染指数预报模块中,对某种污染物而言,污染指数 API 为真实源强在真实气象条件下产生的平均浓度 $\bar{c}$ 对标准浓度 $c_{\text{标准}}$ 的比值^[1]。即:

$$API = \frac{\bar{c}}{c_{\text{标准}}} \quad (1)$$

对大气平流扩散方程积分后得到公式(2)^[1]:

$$\bar{c} = \frac{Q_{\text{真实排放总量}}}{V_c} \left(1 - \exp\left(-\frac{V_c}{\tau} \delta T\right) \right) + \bar{c}_0 \exp\left(-\frac{V_c}{\tau} \delta T\right) \quad (2)$$

因此,API 的预报公式^[1]为:

$$API_{t=(n+1)\delta T} = \frac{Q_{\text{真实排放总量}}}{V_c c_{\text{标准}}} \left(1 - \exp\left(-\frac{V_c}{\tau} \delta T\right) \right) + API_{t=n\delta T} \exp\left(-\frac{V_c}{\tau} \delta T\right) \quad (3)$$

其中, $Q_{\text{真实排放总量}} = A_i \times \sqrt{S} \times \bar{c}$ (4)

A_i 为地理区域性总量控制系数,它对一个地区平均而言是一常数。 S 为城市的面积, $\bar{c}$ 为日平均监测浓度。

式中 V_c 表示某时段的大气通风扩散稀释和干、湿沉降总能量的平均值,由 CAPPS 的气象模块提供。 $API_{t=n\delta T}$ 可随时用相应时刻的实测值取代,无实测值时,则用前一步长的计算值迭代。

2 CAPPS 预报系统中的参数修正和结果分析

2.1 污染物排放的时间系数(T_i)和经验系数(K_i)

2.1.1 误差分析

CAPPS 系统将一日分为 8 个时段,每个时段 3 个小时。每 3 小时输出一次计算结果,24 小时后,将 8 个时段的计算结果进行平均得出各污染物日均污染指数。8 个时段分别为:08~11 时(第 1 时段)、11~14 时(第 2 时段)、……、05~08 时(第 8 时段)。计算各时段大气污染物排放源强时,用日平均监测浓度代入式(4)得出。可见,CAPPS 系统的源强模式没考虑污染物排放量随时间的变化情况。因此,所得出的预报值与监测值有一定出入。

另外,CAPPS 系统仅考虑了粒子污染物(TSP)的干沉积过程,系统模式中的 $\bar{v}_d$ 是粒子污染物(TSP)的干沉积速度,而气体污染物(SO₂、NO_x)的干沉积过程并未考虑。污染物在大气中的物理-化学衰减也未考虑。这些

未考虑的因素将造成预报值与监测值之间的误差。

2.1.2 T_i 、 K_i 的引入与确定

T_i 是污染物源强随时间变化的时间系数。要提高 CAPPS 系统的预报精度,应在系统中的源强预报模式中加入 T_i 即:

$$Q_i = T_i Q_{\text{真实排放总量}} \quad (5)$$

Q_i 为某一时段的排放量, T_i 为某一时段污染物排放的时间系数,且 $T_i < 1$, $\sum_{i=1}^8 T_i = 1$ 。

对气体污染物 SO_2 、 NO_x 来讲, CAPPS 系统中还应加入经验系数 K_i ,用以弥补干沉积、物理-化学衰减等其它未考虑因素所造成的误差。因此,源强模式最终修正为:

$$Q_i = T_i K_i Q_{\text{真实排放总量}} \quad (6)$$

本文没有分别给出 T_i 、 K_i 系数,只给出了 T_i 和 K_i 的乘积系数,它可根据一年中各地大气污染源的排放特点分季节确定。石家庄市采暖期(11月15日至次年3月15日)与非采暖期(3月16日至11月14日)的排放特点差别很大,因此根据大气污染物的排放规律,用 CAPPS 系统对石家庄市的监测资料进行模拟,分别确定了采暖期与非采暖期 SO_2 、 NO_x 的 $T_i \times K_i$ 系数见表1、表2。

采暖期,污染源多,排放量大。当 PPI 指数小于 0.5 时,往往天气恶劣、平均风速偏大,致使:①采暖源加大排放量,②大风使本地的高架源出现下洗现象,③相邻地区的高架源所排放的污染物随大风远距离输送到本地,结果造成本地地面浓度增加;因此, $T_i \times K_i$ 系数应相应增大。非采暖期,污染源数量

骤减,排放量相应减小;当 PPI 指数小于 0.65 时,由于平均风速大、水平混合均匀,造成各时段的排放量接近日均值,源强不加订正。

表1 各期每日各时段 SO_2 的 $T_i \times K_i$ 系数值

时段	采暖期			非采暖期	
	$PPI > 0.50$	$0.15 \leq PPI \leq 0.5$	$PPI < 0.15$	$PPI > 0.65$	$PPI \leq 0.65$
1	1.1	2.2	3.5	0.6	1.0
2	0.8	2.0	2.5	0.8	1.0
3	0.8	2.0	2.5	1.0	1.0
4	1.0	2.5	2.5	1.2	1.0
5	1.4	2.5	2.5	0.4	1.0
6	1.0	2.0	3.0	0.1	1.0
7	1.0	2.0	3.0	0.1	1.0
8	1.1	2.0	3.0	0.4	1.0

表2 各期每日各时段 NO_x 的 $T_i \times K_i$ 系数值

时段	采暖期			非采暖期	
	$PPI > 0.50$	$0.15 \leq PPI \leq 0.5$	$PPI < 0.15$	$PPI > 0.65$	$PPI \leq 0.65$
1	0.7	1.8	2.5	0.5	1.0
2	0.8	1.6	2.0	0.8	1.0
3	1.1	1.6	2.0	1.0	1.0
4	1.5	2.2	2.2	1.4	1.0
5	0.5	2.2	2.5	0.2	1.0
6	0.1	1.4	2.0	0.05	1.0
7	0.1	1.4	2.0	0.05	1.0
8	0.5	1.5	2.2	0.1	1.0

2.1.3 模拟结果和预报验证

分别用进行 T_i 、 K_i 订正和不进行订正的 CAPPS 预报系统,对石家庄市 1998 年 10 月至 1999 年 6 月有 SO_2 和 NO_x 监测值的日(日数为 107 天)进行日平均污染指数模拟,结果表明:加订正时 SO_2 和 NO_x 的预报值与其监测值的相关系数分别是 0.951 和 0.854,不加订正时 SO_2 和 NO_x 的预报值与监测值相关系数分别是 0.747 和 0.728。显然,加订正比不加订正的预报准确率有显著提高。图1、2 分别为加入 T_i 和 K_i 系数后, SO_2 、 NO_x 预报值与监测值的对比图。

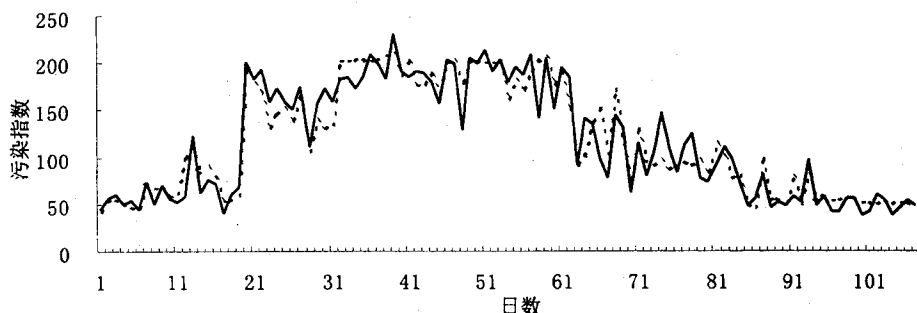


图1 加入 T_i 和 K_i 系数后 SO_2 的预报(实线)与监测(虚线)值的对比

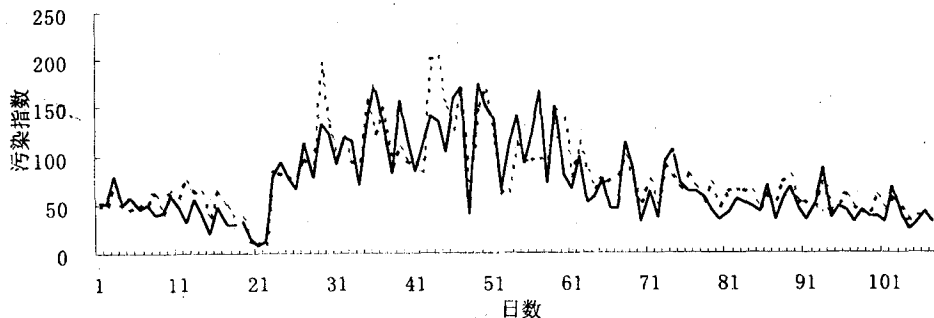


图2 加入 T_i 和 K_i 系数后 NO_x 的预报(实线)与监测(虚线)值的对比

2.2 扬尘百分率(F)

2.2.1 在CAPPS系统中加入扬尘百分率(F)

对于尘污染而言,大气中总悬浮颗粒物除来源于污染源排放的烟尘、粉尘外,还有来自地面的扬尘。大气中扬尘除来源于裸露的尘土外,也包含有再次扬起的所谓二次扬尘,情况复杂。平均浓度 $\bar{c}$ 包含有两部分,一部分由 $Q_{\text{烟、尘排放总量}}$ 造成,另一部分由扬尘造成^[2]。使用扬尘百分率(F)将大气总悬浮颗粒物与烟尘及粉尘结合起来。扬尘百分率定义为扬尘浓度对总悬浮颗粒物浓度的百分比,即:

$$F = c_f / c_{su} \quad (7)$$

$$c_f = c_{su} - c_{sm} \quad (8)$$

$$c_{sm} = (1 - F)c_{su} \quad (9)$$

F 表示扬尘百分率, c_{sm} 表示由污染源排放的烟尘、粉尘所造成的浓度, c_{su} 表示大气总悬浮颗粒物的浓度, c_f 表示由于扬尘产生的浓度。

将式(7)、(8)、(9)代入式(1)和(2)得到:

$$API = \frac{c_{su}}{c_{标准}} \quad (10)$$

$$API = \frac{c_{sm}}{(1 - F)c_{标准}} \quad (11)$$

$$c_{sm} = \frac{Q_{\text{烟、尘排放总量}}}{V_c} \left[1 - \exp\left(-\frac{V_c}{\tau} \delta T\right) \right] + \bar{c}_0 \exp\left(-\frac{V_c}{\tau} \delta T\right) \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),得到考虑扬尘后的TSP污染指数预报公式:

$$API_{t=(n+1)\delta T} = \frac{Q_{\text{烟、尘排放总量}}}{(1 - F)V_c c_{标准}} \left[1 - \exp\left(-\frac{V_c}{\tau} \delta T\right) \right] + API_{t=n\delta T} \exp\left(-\frac{V_c}{\tau} \delta T\right) \quad (13)$$

2.2.2 扬尘百分率的确定

扬尘百分率 F 值主要与平均风速和季节有关。根据刘海月的工作及对石家庄市TSP的大气监测资料进行模拟,确定出石家庄市不同月份以平均风速为变量的 F 值表达式(见表3)。

表3 扬尘百分率(F)表达式

时间	$PPI > 0.5$ 时	$PPI \leq 0.5$ 时
11月15日~30日	$F = (9.4 \times \bar{u} + 25)/100$	$F = (9.4 \times \bar{u} + 35)/100$
12月、1月、2月		
3月、4月	$F = (7 \times \bar{u} + 20)/100$	$F = (9.4 \times \bar{u} + 28)/100$
11月1日~14日		
5月、6月	$F = (4 \times \bar{u} + 20)/100$	$(PPI \leq 0.60 \text{ 时})$
7月、8月		$F = (9.4 \times \bar{u} + 35)/100$
9月、10月	$F = (4 \times \bar{u} + 30)/100$	$F = (9.2 \times \bar{u} + 20)/100$

注:有降水时, $F = 0$

由表3得出,冬季 F 值最大,春季次之,秋季较小,夏季最低。这与北方地区一年中的植被覆盖情况和风速、湿度变化情况相符。当 PPI 指数较小时,表示大气的稀释扩散能力大;当 PPI 指数较大时,表示大气的稀释扩散能力小。 $PPI \leq 0.5$ 时,平均风速偏大、湿度较小,对北方城市来讲易形成扬尘,大气中的总悬浮颗粒物浓度偏高。因此,在这种情况下,扬尘百分率的取值应大些。

2.2.3 模拟结果和预报验证

用加扬尘百分率订正后的CAPPS系统,对石家庄市1998年10月至1999年6月有TSP监测值的日(日数为107天)进行TSP的日平均污染指数模拟,并将加扬尘订正后的模拟结果与不加扬尘订正的模拟结果相比较。图3为加扬尘订正后TSP的预报值与监测值的曲线对比图。其中,加扬尘订正后

的日平均 API 模拟预报值与监测值的相关系数为 0.880;不加扬尘订正时两者的相关

系数为 0.740。显然,加扬尘订正后的模拟预报水平明显高于不加扬尘订正的预报水平。

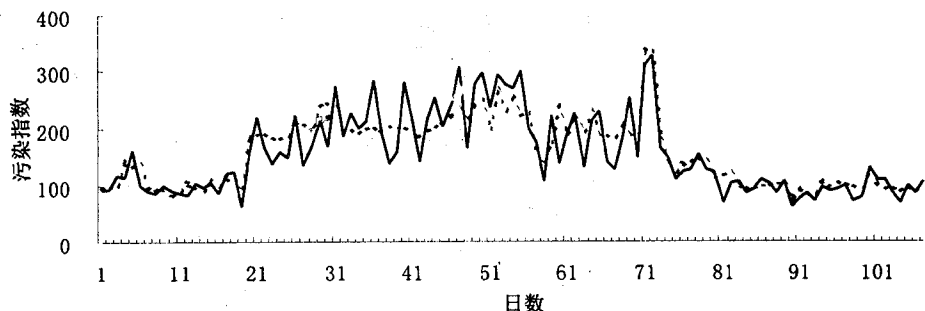


图3 2000年6月SO₂的预报(实线)与监测(虚线)值的对比

3 结论与讨论

(1)CAPPS 预报系统加入 SO₂ 和 NO_x 排放的时间系数 (T_i) 和经验系数 (K_i) 后,各时段源强预测更接近实际排放量,提高了 SO₂ 和 NO_x 的污染指数预报精度。 $T_i \times K_i$ 可根据当地 SO₂ 和 NO_x 的排放规律和特点分季节确定;采暖期,当 $PPI \leq 0.65$ 时, $T_i \times K_i$ 的系数应加大。

(2)北方城市,尤其在降水少、干燥、多风的季节,使用 CAPPS 系统进行 TSP 的污染指数预报时,加入扬尘百分率 (F) 订正可以较大幅度地提高预报准确率。

(3)当 $PPI \leq 0.5$ 时,大气的通风稀释、扩散能力强,大气的污染潜势小。对于其它的大气污染物 (SO₂、NO_x) 来讲,不易造成高浓

度污染。而就是在这种条件下,最易形成扬尘,以至造成 TSP 的高浓度污染。因此,在出现这种污染潜势时扬尘百分率的值应取得比一般条件下的值大。

(4)对 CAPPS 预报系统进行参数调整后,仍然有个别预报结果不太理想。这是由于天气要素出现转折时,系统中的大气污染指数预报模式不能快速响应造成的。这将是今后工作中需要解决的主要问题。

致谢: 本文承蒙徐大海研究员指导,并提宝贵意见,在此特表感谢。

参考文献

- 1 徐大海,朱蓉. 大气平流扩散的非静稳多箱模型与污染潜势指数预报. 应用气象学报, 2000, 11(1).
- 2 国家环境保护局、中国环境科学研究院. 城市大气污染质量控制典型范例. 北京: 中国环境科学出版社, 1993: 145~155.

Numerical Forecast of the Primary Air Pollutants in Shijiazhuang City

Fan Yinqi

(Hebei Meteorological Institute, Shijiazhuang 050021)

Abstract

The CAPPS (City Air Pollution Prediction System) was used to simulate the air pollutant index of the primary air pollutants (SO₂ NO_x TSP) in Shijiazhuang City. The results show that the modification of time coefficient of pollutant emission (T_i) and the experiential coefficient (K_i) should be added when it being used. It also needed to modify with the percent of raising dust (F) to the CAPPS in the cities of North China. The correlation coefficients between the predictions and the observations of SO₂, NO_x and TSP were raised to 0.951, 0.854 and 0.880 respectively after modifications by T_i , K_i and F .

Key Words: CAPPS air pollutant index (API) percent of raising dust (F) time's coefficient of pollutant emission (T_i) experiential coefficient (K_i)