

区域空气质量数值预报系统 CAPPS3 在辽宁的应用

刘宁微 马雁军

(中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016)

提 要: 利用城市大气污染数值预报系统 CAPPS 的第三版(CAPPS3), 经过安装、调试和本地化、自动化处理, 建立起适合于辽宁的区域空气质量数值预报系统, 用于预报辽宁的城市污染指数和等级以及各污染物的日均浓度分布。通过模式预报结果与监测资料的对比, 发现辽宁 14 个主要城市 SO_2 、 NO_2 预报准确率的总体水平明显高于 PM_{10} 。区域污染物浓度分布位置和大小预报结果与实际情况相符, 污染物小时浓度的演变也与实际风场的变化趋势保持一致, 表明 CAPPS3 模式系统能够及时准确地预报出区域污染的形成和发展过程。

关键词: 空气质量数值预报 CAPPS3 区域污染物浓度

Establishment of Regional Air Quality Numerical Forecast System in Liaoning

Liu Ningwei Ma Yanjun

(Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110016)

Abstract: After processings of installation, adjustment, localization and automation, the 3rd version of city air pollution prediction system (CAPPS3) is used to establish the regional air quality numerical forecast system suited to Liaoning to forecast city pollution index, pollution level and the daily mean concentration distribution of pollutants in Liaoning. Comparisons between forecast results and observation data show that the forecast accuracy of SO_2 and NO_2 in the 14 main cities of Liaoning are higher than that of PM_{10} . The location and value of regional pollutant concentration are realistic and the change of hourly pollutant concentration is also consistent with the change of real wind, indicating that the CAPPS3 is able to exactly forecast the genesis and development of regional pollution in time.

Key Words: air quality numerical forecast CAPPS3 regional pollution concentration

资助项目: 国家自然科学基金(40575067), 2008年公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806020), 科技部社会公益性研究专项(2005DIB2J111), 2009年中国气象局沈阳大气环境研究所基本科研业务费项目(SYKYYW200901)资助

收稿日期: 2008年1月14日; 修定稿日期: 2009年8月6日

引 言

统计预报和数值预报是大气污染预报的两种有效技术方法。统计预报是将历史上的污染物浓度值与前期的气象条件(气象要素及其时空分布、天气类型)联系起来,建立有一定信度的统计关系,并利用该关系对未来的污染物浓度进行预报。数值预报由最简单的箱模式^[1]逐渐发展到基于大气边界层湍流运动方程组的大气扩散模式^[2-3]预报。

一般而言,在有长期监测数据的城市,应用统计方法进行预报并不困难,但前提是建立统计关系前后城市的大气污染物排放源强及其时空分布没有太大的变化,而且要有丰富经验积累的污染预报人员才可以使统计预报得出很好的效果。大气污染物浓度的数值预报,一般是在气象场预报模式的基础上求解污染物的有源汇传输扩散方程,需要较详尽的源强及其时空分布资料和时空分辨率很高的气象预报模式。由此可以看出,无论是大气污染浓度的统计预报还是数值预报,其预报效果都决定于源强资料的准确程度。因为,排放源本身具有很大的不确定性,此外,各种类型污染源的排放强度还会不同程度地随着天气变化及人们活动的变更而产生变化,这些变化有很强的随机性,取决于各类污染源的固有特性。源强的随机变化必然会大大增加空气质量预报难度和预报结果的离散性。

城市大气污染数值预报系统 CAPPS 是中国气象局享有自主知识产权的、在气象部门城市空气质量业务预报中广泛应用的数值模式系统^[4-7]。CAPPS 预报系统的创新点在于不依赖城市污染源排放清单,而是在使用监测浓度反算出排放源强的基础上,根据气象背景预报,计算出下一时刻的污染物浓度分布,解决了污染预报问题中长期存在的需要建立城市污染源排放清单的难题。此外,

用有限体积积分法求解大气平流扩散方程,避免了有限差分求解时存在的质量不守恒问题。CAPPS 预报系统可以同时预报多个城市的污染浓度值,无需过多的人力资源,特别适合空气质量预报的业务需要。

1 CAPPS3 模式系统简介

到目前为止,CAPPS 已经有 3 个版本。本文使用的是第三版(CAPPS3),它是在 CAPPS 第一、二版的城市大气污染数值预报系统的基础上,改进了大气污染物平流扩散的计算方法,重新设计和编制了描述大气污染物在网格化区域范围内输送和湍流扩散过程的模式框架,将 CAPPS 大气平流扩散箱模式由原来的单城市模式升级为区域空气质量预报模式,实现了区域大气污染浓度分布的预报,可以给出未来 24~48 小时内逐小时的区域 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 浓度分布变化。考虑了 SO_2 、 NO_2 向硫酸盐、硝酸盐粒子化学转化,增添了污染物化学转化的参数化方案;估算了 2002 年、空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的中国大陆 SO_2 排放量的区域分布,对 CAPPS3 中大气污染源强反演结果进行补充,提高了模式运行的准确性和稳定性。

CAPPS3 模式系统主要分为两部分:气象模块(MM5)和污染模块。模式运行步骤为:

(1) 首先确定模式的运行区域,然后利用全球环流模式 T213 的预报场和常规地面、探空观测资料,经过解码和格式转换,在 MM5 模式中积分运算,生成数值预报物理量场。

(2) 利用 MM5 模式生成的数值预报场和当天各污染物日均监测浓度反演出各监测点的污染源强,再结合补充的 SO_2 排放源资料建立污染源强的网格分布,最后在污染模块中计算出第 2 天模式运行区域内各污染物

浓度分布以及城市污染指数和等级。图 1 为 模式的系统流程。

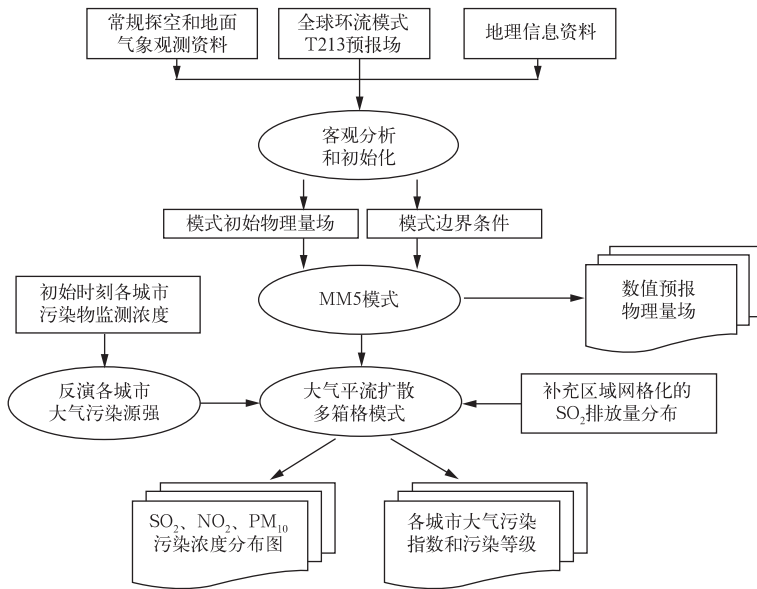


图 1 CAPPS3 系统流程

2 模式的安装和调试

沈阳大气环境研究所的 CAPPS3 模式运行是在曙光双 CPU 服务器上,以 Linux 为操作平台实现的。

模式系统的本地化工作首先是确定模式的运行区域。运行区域为 2 重套网格,中心点为 45°N、123°E。外网格覆盖东北三省,内网格以辽宁地区为主,内外重网格距分别为 9km 和 27km,格点数分别为 109×121 和 85×81(图 2),运行区域固定不变。其次,在污染模块中,使用了适合于辽宁及其周边地区的 SO₂ 源强数据。这是由于辽宁既有较大范围的海域,又与朝鲜接壤,因此需要利用标记海陆和国内外分界的文件强制规范 SO₂ 源强,以适应辽宁特殊的地理位置。最后,建立模式系统的自动化运行。由于 CAPPS3 的建立是为了满足区域空气质量数值预报的业务需要,因此要对模式系统进行自动化处

理,以便于节约人力、物力资源。我们编制了一些脚本文件,确保了模式运行所需数据的定时下载和模式的定时运算。具体步骤为:每天 08:00 开始在服务器上运行 MM5,运行时间为 4h 左右。13:30 左右开始接收辽宁 14 个主要城市(包括沈阳、大连、鞍山、抚顺、本溪、辽阳、营口、朝阳、锦州、铁岭、丹东、阜新、盘锦和葫芦岛)气象局上传的污染物日均监测浓度。然后,运行 CAPPS3 的污染模块,

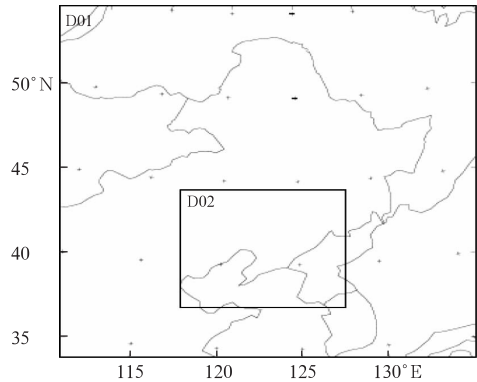


图 2 模式运行区域

生成辽宁地区各污染物浓度分布以及城市污染指数和等级。

CAPPS3 的污染模块充分考虑大气污染的持续效应,因此需要前一天模式生成的污染物日均浓度分布数据作为第 2 天的输入。在第 1 次运行该模式时,要运行污染模块中的主程序 api3-0. f。然而,在业务工作中,各种原因有时会导致模式中运行且无法补算。这种情况下,要把模式可以重新运行的那天再次利用 api3-0. f 计算污染预报场,此后的连续运行则可以利用主程序 api3. f 来计算。

3 模式应用结果

3.1 预报准确率统计

2007 年 4 月沈阳大气环境研究所开始安装、调试 CAPPS3 模式系统,到目前为止,

CAPPS3 运行十分稳定。本文选取了 2007 年 8 月 20 日至 11 月 20 日的模式运行结果,与监测资料进行了逐日对比,并统计了这 3 个月的模式预报准确率。图 3 为沈阳 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 浓度的模式预报与监测值结果对比。由图可见,模式预报结果的变化较大而监测结果的变化相对平缓,这可能是模式对气象场变化趋势的预测略有夸大的原因,其他城市的预报、监测结果对比也存在同样的现象。

污染指数预报准确率定义:

$$\text{预报准确率} = \frac{\text{污染等级准确预报天数}}{\text{有效预报天数}} \times 100\%$$

辽宁 14 个主要城市 3 种污染物的预报准确率统计见表 1。可以看出, SO_2 、 NO_2 预报准确率的总体水平明显高于 PM_{10} 。14 个城市 SO_2 预报准确率全部在 70% 以上, NO_2 预报准确率全部在 90% 以上,沈阳、锦州、盘

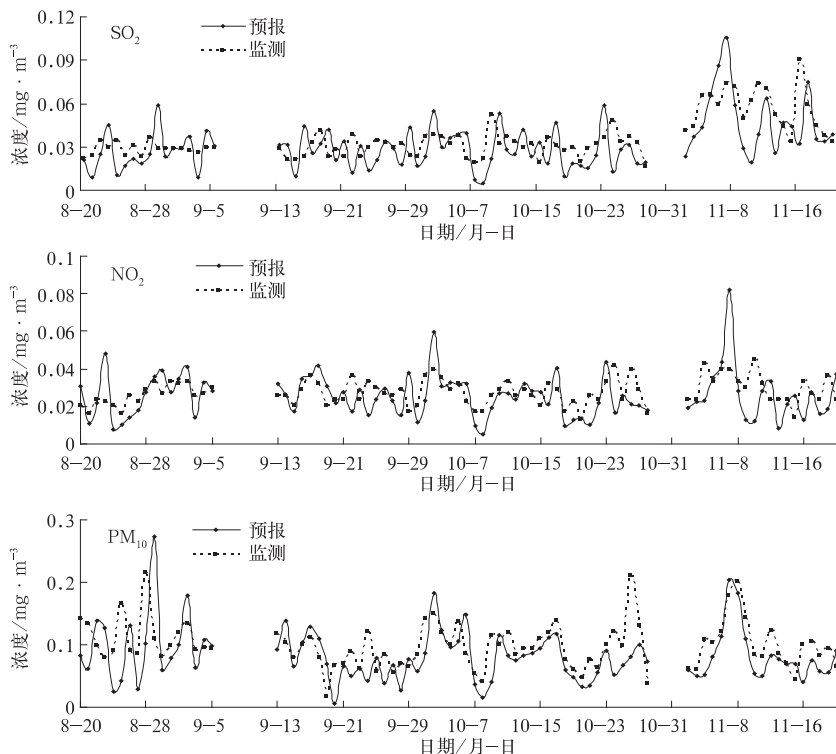


图 3 污染物浓度的模式预报与监测结果对比

表 1 辽宁 14 个主要城市污染物预报准确率

	有效预报天数/d			准确天数/d			准确率/%			
	报天数/d	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀	SO ₂	NO ₂	PM ₁₀
沈阳	82	74	80	61	87.1	100	74.4			
大连	82	72	76	59	87.8	92.7	72			
抚顺	76	64	73	56	84.2	96.1	73.7			
本溪	74	69	72	47	93.2	97.3	63.5			
丹东	80	77	79	53	96.3	98.9	66.3			
锦州	82	78	82	45	95.1	100	54.9			
营口	76	75	75	45	98.7	98.7	59.2			
阜新	79	56	70	49	70.9	88.6	62			
辽阳	64	57	63	49	89.1	98.4	76.6			
盘锦	80	75	80	50	93.8	100	62.5			
铁岭	76	64	75	39	84.2	98.7	51.3			
朝阳	74	68	73	39	91.8	98.6	52.7			
葫芦岛	68	51	67	40	75	98.5	58.8			

锦甚至达到 100%；PM₁₀ 的预报准确率辽阳最高，为 76.6%，铁岭最低，为 51.3%。事实上，PM₁₀ 比较难以准确预报是一种普遍现象^[6]，除模式自身和监测仪器造成的误差外，PM₁₀ 污染源本身也是一个重要的原因。与 SO₂、NO₂ 相比，颗粒物的污染源更为复杂多变，其组成为两部分：人为污染源，如以煤和石油为燃料的火力发电厂、工业锅炉、垃圾焚烧、生活取暖、各种工厂、柴油发动机等；自然污染源，如风吹起的灰尘或海盐，它们都难以被精确统计，尺度也不容易确定，这些在模式反算源强时往往无法准确计算，由此造成预报值和监测值的偏差较大。

3.2 污染物浓度分布

除了对城市污染指数的预报外，CAPPS3 模式还可以显示区域各污染物浓度分布，包括小时和日平均的情况。图 4 为 2007 年 11 月 2 日辽宁地区 SO₂ 和 PM₁₀ 日均浓度分布。可以看出，污染物浓度的分布与城市位置基本对应，其值都由城市市区向周围逐渐减小，模式预报的污染物浓度等值线位置和大小与实际情况相符。另外，污染物小时浓度的演变也与实际风场的变化趋势保持一致(图略)，这说明 CAPPS3 模式系统

能够较好地预报出辽宁地区的污染物浓度变化及其与气象场相关的输送过程。

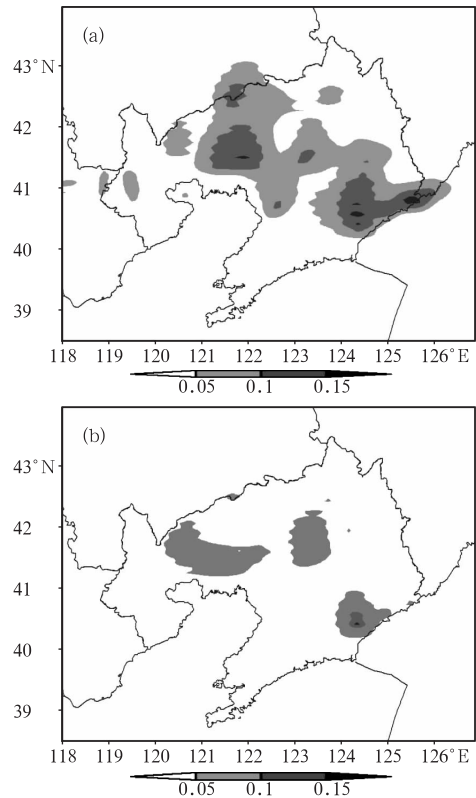


图 4 模式预报的 2007 年 11 月 2 日 SO₂ (a) 和 PM₁₀ (b) 日均浓度分布(单位:mg·m⁻³)

11 月 7 日，辽宁省中西部地区出现大雾，沈阳、鞍山、盘锦等地出现了能见度不足 500m 的浓雾，这次大雾过程持续到 8 日上午才结束。可吸入颗粒物的小时浓度监测结果显示，沈阳的 PM₁₀ 浓度从 7 日 16:00 开始就超过 0.15mg·m⁻³，并且不断升高，到 8 日 05:00PM₁₀ 浓度已达到 0.33mg·m⁻³，辽宁中部其他城市的颗粒物小时浓度变化趋势与沈阳基本一致。图 5 为 CAPPS3 模式预报的辽宁地区 PM₁₀ 的小时浓度分布。可以发现，对于这次大雾过程，除了城市污染物浓度的预报值略有偏差以外，CAPPS3 模式的预报结果准确地反映出了辽宁中、西部地区 PM₁₀ 浓度的演变趋势，预报效果较好。由此

可见,CAPPS3 模式可以及时准确地预报出区域污染的形成和发展过程,提醒公众采取防护措施。

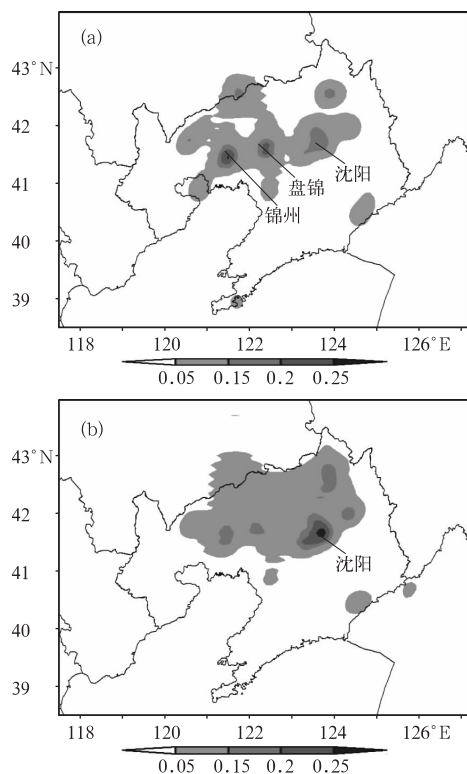


图 5 2007 年 11 月一次大雾过程中 PM_{10} 小时浓度分布的预报结果(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
(a) 7 日 16:00; (b) 8 日 05:00

4 小结

(1) 2007 年 4 月沈阳大气环境研究所引进城市大气污染数值预报系统 CAPPS 的第三版(CAPPS3),经过安装、调试和本地化、自动化处理,建立起适合于辽宁的区域空气质量数值预报系统,用于预报辽宁的城市污染指数和等级以及 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 日均浓度分布。CAPPS3 已经连续稳定运行。

(2) 通过 8 月 20 日至 11 月 20 日这 3 个月模式预报结果与监测资料的对比,发现辽宁 14 个主要城市 SO_2 、 NO_2 预报准确率的总体水平明显高于 PM_{10} 的预报准确率。区域污染物浓度分布位置和大小预报结果与实际情况相符,同时可以较好地反映出了辽宁中、西部地区 PM_{10} 浓度的演变趋势,及时准确地预报出区域污染的形成和发展过程,提醒公众采取防护措施。

(3) 出现的问题。在模式系统正式运行的最初 3 个月,区域污染物浓度小时分布预报结果经常显示污染物在内网格边界有堆积现象,经分析是由内网格区域略小导致的,将内网格区域在东西、南北向均增加了格点数后,解决了模式中污染物扩散输送不利的问题。

参考文献

- [1] Ragland K. W. Multiple box model for dispersion of air pollution from area sources[J]. Atmospheric Environment, 1973, 7: 1017-1032.
- [2] Shir C C, Shieh L J. A generalized urban air pollution model and its application to the study of SO_2 distributions in the St. Louis Metropolitan area[J]. Journal of Applied Meteorology, 1974, 13: 185-204.
- [3] Liu C Y, Goodin W R. A two-dimensional model for the transport of pollutants in an urban basin[J]. Atmospheric Environment, 1976, 10: 513-526.
- [4] 王益柏, 费建芳, 黄小刚. 应用 Models-3/ CMAQ 模式对华北地区一次强沙尘天气的研究初探[J]. 气象, 2009, 35(6): 46-53.
- [5] 朱蓉, 徐大海, 孙明华. CAPPS 预报方法研究[J]. 气象, 2001, 27(6): 10-16.
- [6] 朱蓉, 徐大海, 周朝东, 等. CAPPS 在国家气象中心多城市污染指数数值预报业务系统中的应用[J]. 应用气象学报, 2002, 13, 特刊: 204-213.
- [7] 朱玉强. 几种空气质量预报方法的预报效果对比分析[J]. 气象, 2004, 30(10).