

Simulation of the Impacts of Regional Transport on Air Quality of Zhengzhou, Henan

Wending Zhang¹, Jie Li², Weiling Xiang², Zifa Wang², Ruiqin Zhang^{1*}

¹School of Chemistry and Molecular Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou

²Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: *zhangwending130@163.com

Received: Apr. 25th, 2013 revised: May 20th, 2013; accepted: May 28th, 2013

Copyright © 2013 Wending Zhang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: This paper uses the nested air quality prediction modeling system (NAQPMS) to simulate a pollution case in March 2011 and estimates the contribution ratio from other different regions with a tagged method of mass trajectory. The results show that the model can well represent the pollution process and transportation of the regions. The pollutants transportation varies dramatically from different weather conditions. The transportation of primary pollutants and secondary pollutants is also different. During the simulation the average contribution rate of Henan to Zhengzhou PM_{2.5} was 82%, while the average contribution rate of SO₂ and NO_x were 78% and 82% respectively. In heavy pollution days, because of the influence of the southeast wind, the contribution ratio to PM_{2.5} from other regions could reach 53%. For SO₂ and NO_x, the contribution ratio was 29% and 24%.

Keywords: Regional Transport; NAQPMS; Air Quality; Contribution Ratio

区域输送对河南郑州空气质量影响的数值模拟研究

张稳定¹, 李杰², 向伟玲², 王自发², 张瑞芹^{1*}

¹郑州大学化学与分子工程学院, 郑州

²中国科学院大气物理研究所, 北京

Email: *zhangwending130@163.com

收稿日期: 2013年4月25日; 修回日期: 2013年5月20日; 录用日期: 2013年5月28日

摘要: 本文利用嵌套网格空气质量模式系统(NAQPMS), 模拟了2011年3月份河南的一个污染个案, 并采用质量追踪法定量研究了外部排放源输送和河南本地源对河南空气质量的影响。结果表明, 模式系统可以较为合理的模拟出污染情况和输送过程; 污染物的输送随着天气条件的不同变化显著; 一次污染物和二次污染物的传输情况也不尽相同。模拟期间河南地区对郑州PM_{2.5}的平均贡献率为82%, 对SO₂和NO_x的平均贡献率分别为78%和82%。在重污染日, 由于东南风的影响, 外部地区对郑州PM_{2.5}的贡献率达到53%; 而在同段时间外部地区对SO₂和NO_x的贡献率分别为29%和24%。

关键词: 区域输送; 数值模拟; 空气质量; 贡献率

1. 引言

随着经济发展和产业结构的逐步转变, 影响大气

环境的主要污染物从传统的一次污染物逐渐向二次污染物转变。二次污染物生命周期长, 迁移的范围也更广, 因此区域间污染物输送对大气环境的影响也愈加显著^[1,2]。我国大气污染越来越呈现出复合型、区域

*通讯作者。

型的特征。对于城市和区域来说, 想要有效的控制灰霾、改善大气环境, 不但需要控制本地的污染, 也需要弄清楚其他区域的影响, 并采取相应的联防联控措施。研究人员对我国经济比较发达的地区如京津冀^[3]、珠三角^[4]以及长三角^[5]污染物区域输送问题有较多的研究。结果表明, 区域输送尤其是周边区域的输送对区域空气质量有很大影响。河南地区近年来经济发展迅速, 对空气质量的要求也越来越高, 区域性的大气环境问题日益突出^[6]。目前, 对河南与周边地区大气污染物的输送与相互影响尚缺乏相应的研究。

本文采用中国科学院大气物理研究所自主开发的空气质量模式研究河南地区空气污染的来源, 并且定量计算了不同地区在不同情况下对河南空气污染的贡献, 以期为河南及中原经济区大气污染防治规划提供参考。

2. 研究方法

2.1. 模式及方法介绍

本文所使用的空气质量模式是由中科院大气物理研究所自主研发的嵌套网格空气质量预报模式系统(NAQPMS, Nested Air Quality Prediction Modeling System), 该模式系统是基于一个三维欧拉硫化物输送模式发展的多尺度多物种模拟系统, 其不仅应用于区域和城市尺度污染问题的科学研究, 同时也已经实现了模式系统的业务化^[7]。

本文使用天气研究和预报模式 WRF (Weather Research and Forecasting Model)为 NAQPMS 提供逐时三维气象数据。WRF 模式是由美国国家大气研究中心(The National Center for Atmospheric Research, NCAR)、美国国家海洋大气管理局(The National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), 美国天气预报系统实验室(The Forecast Systems Laboratory, FSL)等多个科研机构联合开发的, 是一种完全可压非静力模式, 集数值天气预报大气模拟及数据同化于一体, 相对于此前广泛使用的第五代中尺度模式 MM5, WRF 模式模拟的气象要素更加准确, 具有一定的优越性^[8,9]。WRF 模式又分为研究用的 WRF-ARW 和业务用的 WRF-NMM, 本文使用的为 WRF-ARW 3.3。

NAQPMS 中使用的气相化学机制为 CBM-Z^[10]。CBM-Z 是基于 CBM-IV 发展起来的新的化学机制。

CBM-Z 的化学物种和反应更为全面, 同时还包含了 4 种不同的反应场景, 以适用于不同的要求。

为了定量研究区域输送的影响, 本文采用污染物在线实时追踪的方法, 即在各个区域的污染源上加以标记, 在整个污染及输送过程中进行实时追踪。这种方法可以避免非线性过程带来的误差, 与敏感性分析方法相比, 更适合用来研究目标源对大气污染的贡献^[11]。

2.2. 数据来源

气象模式 WRF 采用的气象粗估场和初始边界条件为每六小时一次分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCAR/NCEP FNL 再分析资料。

排放清单采用的是日本国立环境研究所(NIES)更新的 REAS 2.0 清单。与之前发布的 REAS 1.0 清单相比, REAS 2.0 使用的是 2007 年的计算值, 并且使用了更新的排放因子和统计数据。排放源中的物种包括 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、NO、NH₃ 等共 25 种污染物, 并且分为面源、点源、生物质燃烧源、天然源 4 类。

2.3. 模式设置

本文使用嵌套网格, 设置了从东亚到河南的三重嵌套区域。最大模拟区域为东亚地区, 水平分辨率 81 km; 第二重区域为华中、华南及华北地区, 水平分辨率 27 km; 第三重区域为河南及周边地区, 水平分辨率 9 km。在垂直分辨率方面, 模式设定采用追随地形坐标系, 从地面到海拔 20 km 处不均匀地分为 20 层; 其中在 1 km 以下包括 7 层, 使得模式可以更为准确的考虑边界层污染物的分布规律。

本文中的区域划分如下: 河南省为 D01, 河南周边的省份因为距离河南较近, 对河南的影响可能较为明显, 故而分别加以考虑。其中, 京津冀地区为 D02, 山东地区为 D03, 江苏为 D04, 安徽为 D05, 湖北为 D06, 陕西为 D07, 山西为 D08。对于国内其他地区, 分四个方向加以考虑, 其中, 东北地区为 D09, 包括东三省以及内蒙古; 西北地区为 D10, 包括新疆、西藏、青海、甘肃以及宁夏; 西南地区为 D11, 包括云南、贵州、四川以及重庆; 东南地区为 D12, 包括湖南、江西、浙江、两广、海南以及港澳地区。对于国

外地区的贡献则统一作为 D13 考虑。

2.4. 模式校验

为了检验 NAQPMS 模式的模拟性能, 选取郑州新郑机场观测的气象数据与 WRF 模拟的对应网格的风向、风速和地面气温进行对比。

如图 1 所示, 在模拟期间, 新郑机场所处网格与相应站点的观测值在变化趋势上能够较好的吻合, 基本可以反映风及温度随时间的变化特征。其中风向的模拟效果最好; 温度普遍偏低几度; 风速的模拟结果相对差别较大, 不过这可能和低风速时区域的差异性有关。使用 SPSS 统计软件计算模拟值和观测值的相关性, 得到, 温度: 0.571, 风向: 0.351, 风速: 0.254。

由于彼时尚未公布污染物监测数据, 本文使用郑州市空气污染指数(API)换算得到的 PM_{10} 作为对比数据。如图 2 所示, 模拟期间 PM_{10} 模拟值与观测值的变化趋势基本一致, 说明模式可以在一定程度上反映污染物浓度随时间的变化特征。

3. 结果与讨论

本次研究选取影响空气质量的几种主要污染物进行分析。先提取郑州所在网格的数据, 再进行日平均, 得到每天各个区域对于郑州污染物的贡献。本文对 $PM_{2.5}$ 和一次污染物 SO_2 和 NO_x 分别进行讨论。

本文以郑州为例, 分别计算河南本地及其他地区对郑州市 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_x 的污染贡献。

3.1. 各地区对郑州 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献

如图 3 所示, 一般情况下, $PM_{2.5}$ 的来源以河南本地的贡献为主, 模拟期间本地的总平均贡献率为 82%, 其他贡献率比较大的地区是山西和湖北, 总平均贡献率分别为 5.5% 和 4.8%。而在污染物浓度较高的时候, 其他地区会有比较明显的贡献, 在 12 日和 13 日两天外地的总贡献率均达到了 53%。由于东南风的影响, 这两日来自外地的贡献以湖北和东南为主。12 日和 13 日, 湖北的日平均贡献率分别为 31% 和 23%, 而东南地区的日平均贡献率分别为 10% 和 27%。由于天气条件的作用, 在 $PM_{2.5}$ 浓度同样较高的 20 日, 外地的贡献率则没有明显的增加。20 日当天河南本地的日平均贡献率为 82%, 与模拟期间的总平均贡献率

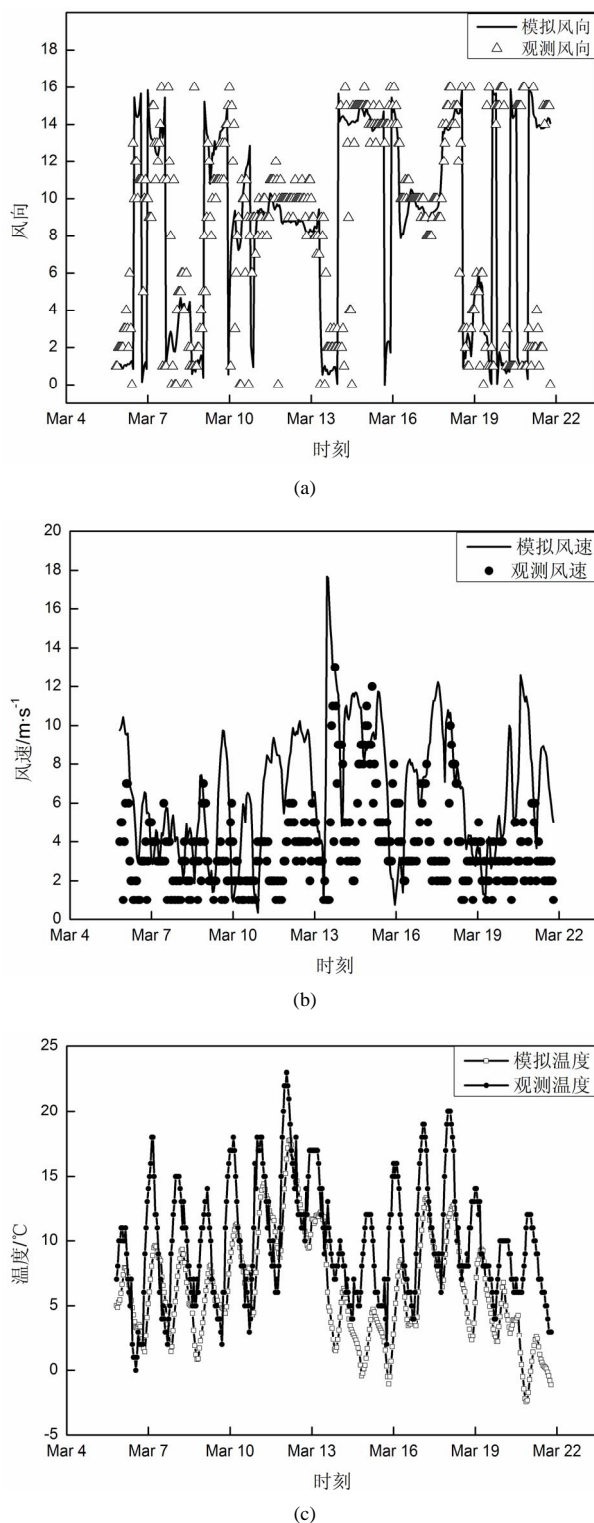


Figure 1. Comparison of the simulated wind (a), (b) and temperature (c) with the observed ones

图 1. 模拟与观测的风向(a)、风速(b)及温度(c)对比

相同。20 日比较明显的外地贡献来自山西, 为 10%。这主要是因为 20 日山西河南地区有局地的弱西北风。

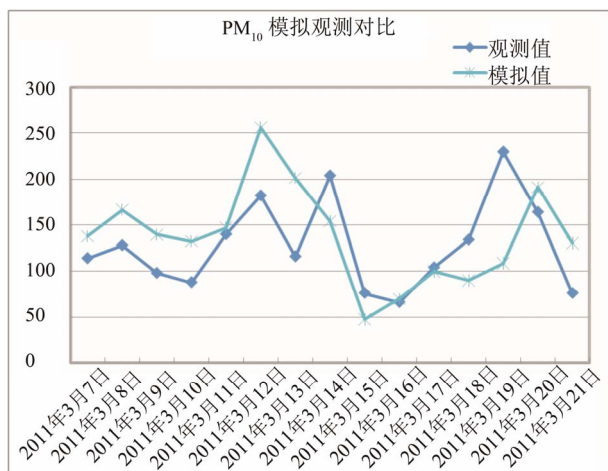


Figure 2. Comparison of the simulated PM₁₀ and the observed ones

图 2. PM₁₀ 模拟值与观测值对比

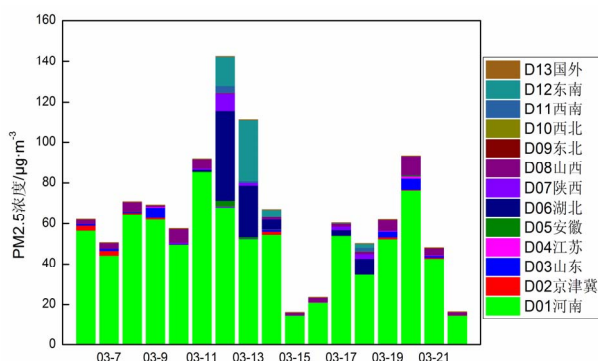


Figure 3. The average daily contribution of different regions to PM_{2.5} in Zhengzhou

图 3. 各个地区对郑州 PM_{2.5} 的日均浓度贡献

3.2. 各地区对郑州 SO₂ 及 NO_x 的浓度贡献

如图 4 及图 5 所示，二氧化硫和氮氧化物的浓度趋势和 PM_{2.5} 类似，但是不同的是，在高浓度时并没有很明显的外地输送。这是由于二氧化硫和氮氧化物是一次污染物，其生命周期较短，因此在这种跨度较大的区域输送过程中的输送并不是很显著。河南本地二氧化硫和氮氧化物的总平均贡献率分别为 78% 和 82%。在 12 日和 13 日污染较重的两天，外部地区对二氧化硫和氮氧化物的平均贡献分别为 29% 和 24%，来自湖北和东南地区的贡献同样比平均值要高，但是却不如 PM_{2.5} 显著。其中湖北对二氧化硫的日平均贡献率分别为 19% 和 18%，而东南地区则为 4.6% 和 9.2%；湖北对郑州氮氧化物的日平均贡献率分别为 14% 和 15%，东南地区为 3.3% 和 9.3%。与 PM_{2.5} 类似，

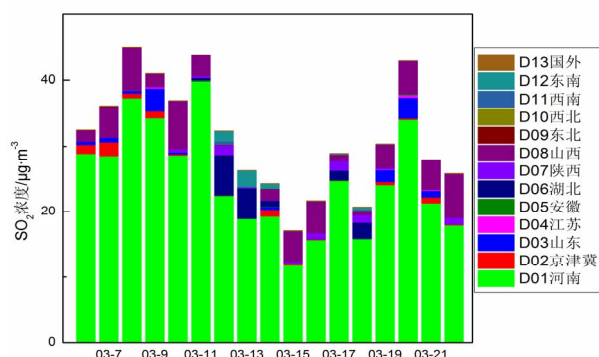


Figure 4. The average daily contribution of different regions to SO₂ in Zhengzhou

图 4. 各个地区对郑州 SO₂ 的日均浓度贡献

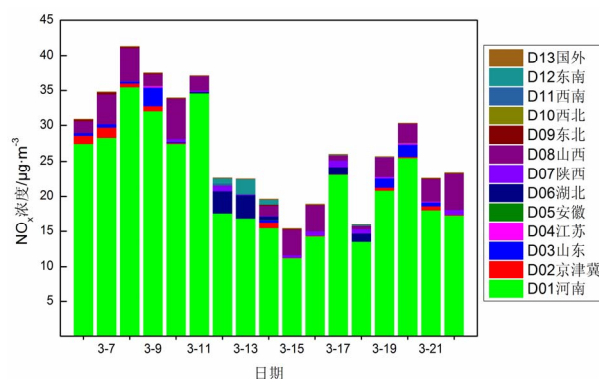


Figure 5. The average daily contribution of different regions to NO_x in Zhengzhou

图 5. 各个地区对郑州 NO_x 的日均浓度贡献

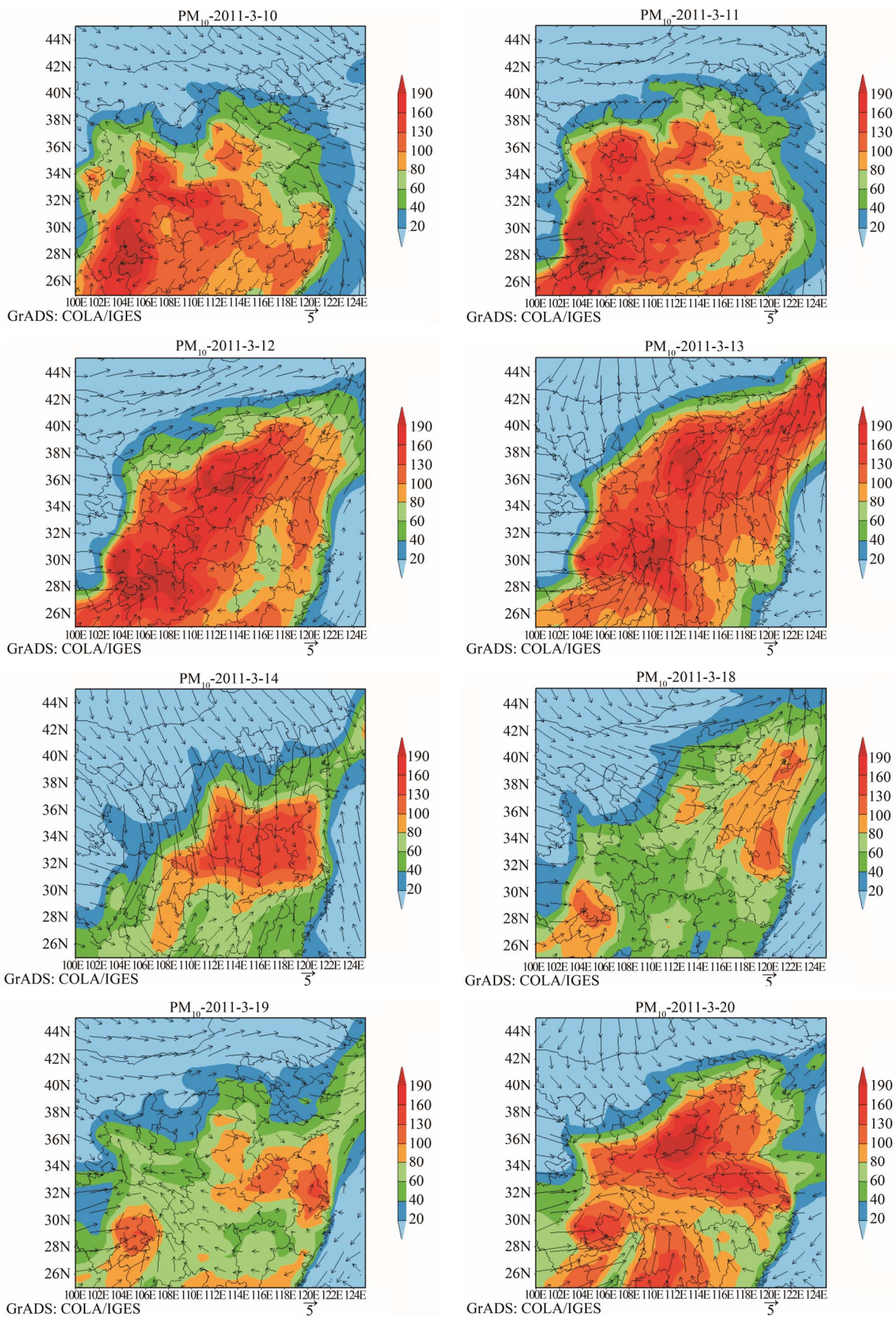
20 日当天，来自外地的贡献主要来自山西，对于二氧化硫和氮氧化物分别为 11% 和 9.9%。

3.3. 污染过程分析

本次污染过程中 PM₁₀ 的时空分布如图 6 所示。

从模拟结果来看，首先在 3 月 9 日至 11 日期间，污染物逐步累积，河南以南大部分地区 PM₁₀ 的浓度开始增大，从 12 日开始，由于风向的影响，污染物开始由南向北的输送过程，整个华北 PM₁₀ 浓度都很高；13 日开始出现了北风；14 日北风风力加大，大范围的污染物被清除，不过河南地区的 PM₁₀ 浓度依然偏高，15 日之后才彻底清除；北风过境之后，污染物又开始了新一轮的累积，这一次并没有大范围的输送过程，不过从 18 日和 19 日的分布来看，京津冀地区的污染有向山东的一个短途输送，对河南及郑州地区影响不大；20 日天气形势持续稳定，污染物进一步累积；21 日北风开始出现，随后 22 日在北风的影响

区域输送对河南郑州空气质量影响的数值模拟研究



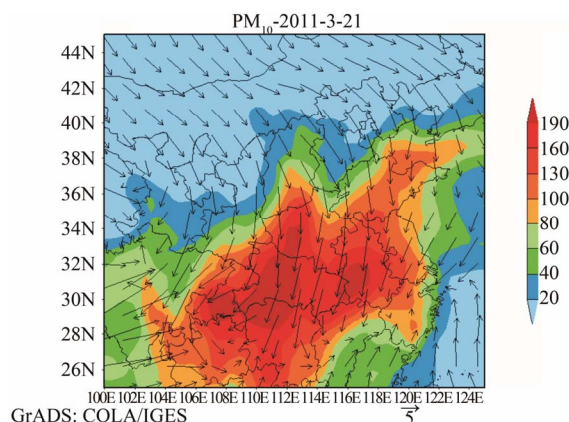


Figure 6. The spatial distribution variation of PM₁₀
图 6. PM₁₀ 空间分布变化

下污染物清除。

本次个例包括两个污染过程。

3月10日、11日，华中、华东地区处于高压后部，风力微弱，造成污染物的累积；12、13日，高压东移，华中、华东地区普遍出现东南风，造成污染物向北输送；14日西北高压南下，造成强西北风，污染物清除；

16日又开始出现高压场，随着高压东移，天气形势逐渐变化，19日出现了典型的“鞍型场”，河南地区处于“鞍型场”的中部，天气形势较稳定，造成了污染物的累积，由于风力不强，污染物不易清除，也不易长距离传输，20日天气形势没有大的变化，山西河南地区出现了污染，并且由于存在局地弱西北风，山西地区的污染向河南有一定的传输。

不同的天气条件导致了两个污染过程区域输送影响不同。

4. 结论

本文利用中国科学院大气物理所开发的空气质量模式系统NAQPMS对2011年3月份河南的一次污染过程进行了模拟研究，并采用质量追踪法解析了污染物的来源，探讨其他地区的污染输送对河南空气质量的影响。结果如下：

1) 模式的模拟结果和实际情况具有较好的一致性，说明NAQPMS模式可以较为合理的反应区域污染物的浓度变化和输送过程。

2) 在本次模拟的过程中，不同时间的输送情况差异显著。污染物浓度不高时外部输送不显著，河南地区的污染物主要来自本地污染源的贡献，达到80%以

上。而当污染物浓度较高时，来自外地的污染贡献显著上升。以郑州为例，在东南风影响下，污染高峰时，其他地区对PM_{2.5}的贡献超过50%。

3) 不同污染物的区域输送情况有较大差异。本次模拟中PM_{2.5}受外部区域输送影响较大，一次污染物SO₂和NO_x受外部区域输送影响较小。这主要是因为PM_{2.5}中二次组分较多，而二次污染物的寿命更长，在远程传输的过程中影响更为显著。

4) 天气条件尤其是风场对区域间污染物的输送有很大影响。

由此可见，其他地区污染物的输送对河南的影响不可忽视，要改善河南的大气环境质量，不但要在河南采取污染控制措施，而且需要和周边地区实行联防联控，多方面采取措施。

参考文献 (References)

- [1] Y. J. He, I. Uno, Z. F. Wang, P. Pochanart, J. Li and H. Akimoto. Significant impact of the East Asia monsoon on ozone seasonal behavior in the boundary layer of Eastern China and the west Pacific region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8, 7543-7555.
- [2] R. Lall, and G. D. Thurston. Identifying and quantifying transported vs. local sources of New York City PM_{2.5} fine particulate matter air pollution. *Atmospheric Environment*, 2006, 40, S333-S346.
- [3] 安俊岭, 李健, 张伟等. 京津冀污染物跨界输送通量模拟[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(11): 2684-2692.
- [4] 王淑兰, 张远航, 钟流举等. 珠江三角洲城市间空气污染的相互影响[J]. *中国环境科学*, 2005, 133-137.
- [5] 王艳, 柴发合, 刘厚凤等. 长江三角洲地区大气污染物水平输送场特征分析[J]. *环境科学研究*, 2008, 22-29.
- [6] 赵乾杰, 张军, 于莉等. “十一五”河南省城市环境空气污染特征及原因分析[J]. *环境科学与管理*, 2012, 102-105, 121.
- [7] 王自发, 吴其重. 区域空气质量模式与我国的大气污染控制[J]. *科学对社会的影响*, 2009, 24-29.

- [8] Z. X. Liu, S. H. Liu, F. Hu, J. Li, Y. J. Ma and H. P. Liu. A comparison study of the simulation accuracy between WRF and MM5 in simulating local atmospheric circulations over Greater Beijing. *Science China-Earth Sciences*, 2012, 55, 418-427.
- [9] K. W. Appel, S. J. Roselle, R. C. Gilliam and J. E. Pleim. Sensitivity of the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model v4.7 results for the eastern United States to MM5 and WRF meteorological drivers. *Geoscientific Model Development*, 2010, 3, 169-188.
- [10] R. A. Zaveri, L. K. Peters. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1999, 104: 30387-30415.
- [11] 李杰, 王自发, 吴其重. 对流层 O₃ 区域输送的定量评估方法研究[J]. *气候与环境研究*, 2010, 529-540.