

Study on the Numerical Simulation of a Heavy Smoggy Weather over Chengdu Region Based on WRF-Chem Model

Haixiang Ning^{1,2}, Shaobo Zhang¹, Peipei Han¹

¹School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Meteorology Center of Southwest Air Traffic Management Bureau, Chengdu Sichuan

Email: 734642630@qq.com

Received: May 5th, 2019; accepted: May 21st, 2019; published: May 28th, 2019

Abstract

This paper used the new generation of regional air quality model Weather Research and Forecasting with Chemistry V3.9 (WRF-Chem V3.9) to study on a heavy smoggy weather over Chengdu region from January 22 to January 28, 2017. After comparing the simulated results with observation data of 2 m temperature (T2), PM_{2.5} and AQI, the atmospheric chemical processes of smog were further discussed by comparing the results with and without chemical processes. The conclusions were as following: 1) The daily variation of the simulated T2 was less than the observed T2 by 3°C. The daily mean T2 was 2.5°C lower than the observed T2. In cold days, the result of simulated T2 was better. 2) The simulated value of PM_{2.5} was lower than the observed values by 80. 3) The daily variation of simulated AQI was obvious, but it was 50 lower than the observed data. 4) With chemical processes, the T2 of simulation center station was 0.5°C lower, and the planetary boundary layer height (PBLH) was reduced by 55 m. It showed that the atmospheric chemical processes was conducive to the reduction of temperature, the reduction of the PBLH, and the increase of atmospheric stability, leading to the increase of pollutants concentration. In other words, the results reflected the positive feedback relationship between the atmospheric chemical processes and the concentration of pollutants.

Keywords

PM_{2.5}, Smoggy Weather, Numerical Simulation, WRF-Chem Model, AQI

成都地区一次重度雾霾过程的数值模拟研究

宁浩翔^{1,2}, 张少波¹, 韩沛沛¹

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²民航西南空管局气象中心, 四川 成都

摘要

采用新一代区域空气质量预报模式(WRF-Chem V3.9)对2017年1月22~28日发生在成都地区的重度雾霾过程进行研究。将模拟结果中的2米气温(T2)、PM_{2.5}质量浓度指数和AQI评分与观测数据进行对比; 同时对比模拟结果中包含和不包含化学过程的结果, 探讨大气化学过程对雾霾过程的影响, 得出以下结论: 1) WRF-Chem模拟的2米气温日变化幅度小于实测值3℃, 日均值比实测值低2.5℃, 在低温日, 模拟结果与观测更为接近; 2) PM_{2.5}的模拟值较观测偏低80; 3) AQI模拟值日变化特征明显, 但较实测值偏低50; 4) 相较于不包含大气化学过程的模拟, 包含大气化学过程的模拟使模式中心站气温偏低0.5℃, 边界层高度降低55 m, 表明大气化学过程有利于温度降低, 边界层高度降低, 增加了大气稳定度, 促使近地层污染物浓度进一步增加, 反映了大气化学过程与污染物浓度的正反馈关系。

关键词

PM_{2.5}, 重度雾霾, 数值预报, WRF-Chem模式, AQI

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来城市雾霾天气已经成为社会所关注的热点话题, 位于四川盆地西部的成都地区, 是我国雾霾污染最严重的城市之一。特殊的盆地气候特点, 使成都地区大气层结稳定, 容易出现逆温和静风等气象特征, 不利于大气污染物的扩散[1]。邓利群[2]等指出气象条件在很大程度上影响着重度污染事件的发生、发展及消亡, 同时大气化学过程也参与到了大气物理过程中。从使用 WRF 模式开展数值模拟的研究中来看, 多数研究集中在 WRF 模式的物理过程参数化优化选取的方面, 如张颖[3]等人进行了四川盆地一次污染过程的 WRF 模式物理参数化方案最优配置的研究, 姚琳[4]等人进行了成都市空气质量预报中 WRF 的本地化物理参数选取的研究。在众多使用 WRF-Chem 模式研究污染事件的数值模拟中, 将化学过程有针对性地加入到模式过程中, 已经获得了较为理想的模拟结果。马欣[5]等人基于 WRF-Chem 模式探究了气溶胶污染对区域气象要素的影响一文中指出, 模式对华北和华南地区的 2 米温度模拟效果较好, 对 PM₁₀ 质量浓度分布情况在夏季和秋季的模拟效果最好。但对特殊地区的适用性方面的研究还不够完善, 所以有必要根据研究区域的差异性, 选择合适的排放源清单、物理参数化方案和化学机理方案, 从而得到更加符合区域特征的模拟参数配置。在此基础上, 对比分析各特征气象要素的差异, 为进一步探究大气化学过程对区域性的大气污染事件的发生和发展的影响的研究打下基础。

本文使用 NOAA 预报系统实验室(FSL)的新一代区域空气质量预报模式 WRF-Chem (V3.9)进行模拟, 选取的污染事件为 2017 年 1 月 22 日~28 日的重度污染周, 分别开展了包含和不包含化学过程的雾霾过程数值模拟的试验, 探讨大气化学过程对雾霾过程的影响。

2. 模式介绍及参数选取

2.1. WRF-Chem 模式介绍

WRF-Chem 模式是由美国国家大气研究中心(NCAR)等机构联合开发的新一代大气预报模式,真正实现了气象模式(WRF)与化学模式(Chem)在线完全耦合。它的化学过程和所设计的气象过程使用相同的水平和垂直坐标系,以及相同的物理参数化方案,没有时间插值,避免了时间插值带来的误差。并且使得化学对气象过程的反馈作用也能有机地考虑在模式过程中。能够模拟出更加贴近真实大气环境的输出结果。本文研究选用的是 WRF-Chem 3.9.1 版本,模拟区域的中心点位于温江站(30.7°N, 103.97°E),使用 27 km × 9 km × 3 km 的 3 层嵌套模式及 27 层垂直 σ 层,如图 1 所示。

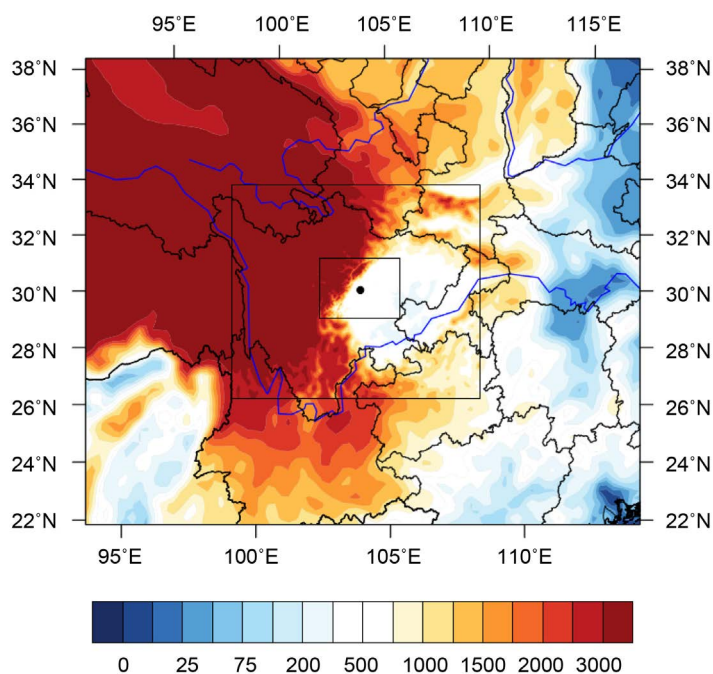


Figure 1. WRF-Chem simulation area grid nesting schematic
图 1. WRF-Chem 模拟区域网格嵌套示意图

气象模式初始场资料使用 FNL $1^\circ \times 1^\circ$ 的 6 小时再分析数据。为了减小气象初始场的驱动误差,模拟时间选取 2017 年 1 月 20 日到 1 月 29 日,对比时间为连续重度雾霾事件发生周 2017 年 1 月 22 日到 1 月 29 日。

2.2. 物理过程方案

WRF-Chem 模式中可以任意组合多个物理选项,其主要的参数化方案有:微物理方案、短波和长波辐射方案、积云对流参数化方案、陆面过程方案、边界层方案和近地面层方案。张颖[3]等通过对四川盆地的一次污染过程进行模拟,得到了从 2 m 气温评估最优的一组方案,其中微物理方案、陆面过程方案、边界层方案和积云对流参数化方案分别是: Purdue Lin 方案、热扩散方案 SLAB、Mellor-Yamada-Janjic (MYJ)方案和 Grell-Devenyi (GD)集合方案。姚琳[4]等通过对成都市一次空气质量较严重的一周进行模拟,得到最合适成都本地化的参数方案,其中微物理方案、陆面过程方案、边界层方案和积云对流参数化方案分别是: WRF Single-Moment3-class (WSM3)方案、Rapid Update Cycle (RUC)方案、Mellor-Yamada-Janjic

(MYJ)方案和 Grell-Devenyi (GD)集合方案方案。本文参考以上研究方案,采用的物理过程方案(表 1)及介绍如下:

1) 微物理方案选取 Lin [6] [7]等方案:该方案是 WRF 模式中一个成熟的微物理方案,在 CHEM 化学过程中也得到广泛的运用和研究,有水汽、云水、云冰、雨水、雪和霰等水成物,适合真实数据的高分辨率模拟。

2) 陆面过程方案选取 RUC 陆面过程模式:该方案对多层积雪和冻土进行计算,并考虑植被效应和冠层水分。

3) 边界层方案选取 MYJ 方案:该方案用局部的垂直混合理论做一维的断流动能预测,并调用 SLAB 薄层模式计算地面温度,用隐式扩散方案计算垂直通量。

4) 积云对流参数化方案选取 Grell-Devenyi 方案:该方案主要考虑云水和云冰的水分趋势,使用多闭包、多参数的集合方法,从而调用不同的上升、下沉、卷入、卷出和降水率等参数过程。

Table 1. Physical process parameter scheme

表 1. 物理过程参数方案

微物理方案	陆面过程方案	边界层方案	积云对流 参数化方案	微物理方案
Lin	RUC	MYJ	GD	Lin

2.3. 化学机理方案

化学方案的设计主要分为两部分,第一部分是排放源资料的选取,第二部分为化学方案的配置。

WRF-Chem 模式中排放源的加入是有无化学过程参与的主要区别。而排放源又分为:人为排放源和生物排放源。目前国内的排放清单数据较少,所以本文采用的人为排放源为包含近 40 年的对流层化学 RETRO ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$)的全球排放数据。通过将其分别水平插值到 $27 \text{ km} \times 27 \text{ km}$ 、 $9 \text{ km} \times 9 \text{ km}$ 、 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 的网格上,得到转换过的化学排放源数据。

Table 2. Ensemble prediction test group

表 2. 集合预报试验组

模拟区域	试验组	化学方案	初始场驱动时间	名称
区域中心 (30.7°N , 103.97°E)	包含化学过程	chem_opt = 11	2017-01-20_00:00	Chem00
			2017-01-20_06:00	Chem06
			2017-01-20_12:00	Chem12
			2017-01-20_18:00	Chem18
嵌套网格 $27 \text{ km} \times 9 \text{ km} \times 3 \text{ km}$	不包含化学过程	\	2017-01-20_00:00	00
			2017-01-20_06:00	06
			2017-01-20_12:00	12
			2017-01-20_18:00	18

WRF-Chem 模式的化学方案主要包括:干沉降、气相化学反应机制、气溶胶、光解作用等。本文研究选取的方案为化学过程中的第 11 套方案,其中气相化学反应机制采用的是目前较为成熟的 RADM2 方案。气溶胶方案则是采用的 MADE/SORGAM 方案,该方案中的气溶胶按埃根核模态、积聚模态和粗模

态三种分布来划分, 并且包含气溶胶液相反应。扬尘和海盐均选择 GOCART 方案。同时, 开启 progn 选项, 能够有效的对云滴数进行预测。使模式能综合考虑化学过程中的各种机制。

本文结合集合预报的思路, 开展了包含化学过程和不包含化学过程的模拟试验, 详细试验分组情况见表 2。

Table 3. Air pollution index and corresponding pollution levels

表 3. 各污染物浓度指数对应表

空气质量指数(AQI)	日平均浓度 1 小时平均($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM _{2.5}	PM ₁₀
0	0	0	0	0	0	0
50	150	100	5	160	35	50
100	500	200	10	200	75	150
150	600	700	35	300	115	250
200	800	1200	60	400	150	350
300		2340	90	800	250	420
400		3090	120	1000	350	500
500		3840	150	1200	500	600

Table 4. Categories of AQI and health concerns

表 4. AQI 值对应污染水平和对健康影响程度

AQI	空气质量等级	空气质量等级	对健康影响
0~50	I	优	空气质量令人满意
51~100	II	良	极少数异常敏感人群有较弱影响
101~150	III	轻度污染	健康人群出现刺激症状
151~200	IV	中度污染	对健康人群心脏、呼吸系统有影响
201~300	V	重度污染	心脏病和肺病患者症状显著加剧, 健康人群普遍出现症状
301~500	VI	严重污染	健康人群有明显强烈症状, 提前出现某些疾病
大于 500	VII	爆表	

3. 资料概况与方法介绍

3.1. 资料介绍

用于 2 米气温对比的观测数据为温江站(站号 56,187) 5 分钟的观测数据。用于 PM 颗粒物以及 AQI 指数对比的观测数据为中华人民共和国环境保护部的中国国家环境监测信息中心对外公布的空气污染数据, 其中包括日常 AQI 的评分和主要污染物 SO₂、NO₂、CO、O₃、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的每小时质量浓度指数, 24 小时平均浓度以及 O₃ 8 小时平均浓度。本文研究选取的是成都地区的 6 个测站(金泉两河、十里店、三瓦窑、沙河铺、梁家巷、君平街) 2017 年 1 月 AQI 指数的评分以及影响 AQI 评分的大气污染物 SO₂、NO₂、CO、O₃、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 每小时质量浓度指数数据。

3.2. AQI 指数

空气质量以污染物浓度和空气污染指数(AQI)的形式报告。AQI 通过一组分段线性变换将六种标准空气污染物(PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, O₃)的浓度转换为单一指标。对于一个浓度为 R 的污染物的指数 I 被定义为两个指数类之间的线性内插:

$$I = \frac{I_u - I_l}{R_u - R_l} (R - R_l) + I_l \quad (1)$$

在这种形式下, R_u 和 R_l 是每个空气质量水平的浓度的上限和下限, I_u 和 I_l 是相应的上限和下限指数类别, 表 3 列出了对应阈值。每种污染物的标准化指数是根据其日均浓度计算的。指定日期的 AQI 由具有最高指数的污染物指数决定。相应的空气污染物被称为主要污染物。

$$AQI = \max \{ I_{SO_2}, I_{NO_2}, I_{CO}, I_{O_3}, I_{PM_{2.5}}, I_{PM_{10}} \} \quad (2)$$

AQI 指数在 0 和 500 之间变化, 数值越大表示空气质量越差。不同的 AQI 值对应有不同的污染水平和对健康的影响程度(见表 4)。

模式输出结果的各项污染物均以每小时为时间间隔, 所以 AQI 指数的计算大致可分四步实施: 首先, 计算每个站点的逐小时平均污染物浓度(3.3 中将介绍插值处理方法)。其次, 计算各污染物对应指数 I , 根据公式(1)。最后, 取相同时刻各污染物中指数最大的污染物指数作为 AQI 指数, 根据公式(2)。

3.3. 插值处理方法

本文对模拟结果中的 2 米气温数据使用线性插值到站点进行对比分析。

对于包含化学过程输出结果中的 PM_{2.5}, 使用与 2 米气温相同的插值函数处理, 将其分别插值到本研究选取的成都地区的 6 个测站(金泉两河、十里店、三瓦窑、沙河铺、梁家巷、君平街), 来进行时间序列的对比分析。

对于空间分布对比分析的 2 米气温和边界层高度, 将统一使用时间平均的方法来进行降维处理。得到包含化学过程的输出结果和不包含化学过程的输出结果, 从而进行对其空间分布变化的对比分析。

3.4. 天气形势概况

从 2017 年 1 月 21 日至 29 日的天气形势中可发现, 在 21 日到 23 日, 500 hPa 高空图显示, 四川盆地受高原脊前西北气流控制, 天气形势较好; 在 23 日夜间至 24 日白天, 伴随高原波动发展的小槽迅速东移, 影响四川盆地, 但影响时间短, 强度弱; 24 日夜间之后, 盆地受平直西风气流控制, 天气形势较为稳定; 27 日夜间, 受蒙古北部的低压系统影响, 冷空气从西北路径大范围入侵我国, 四川盆地受高原小槽东移和寒潮入侵影响, 28 日夜间, 天气形势转坏。850 hPa 低空图显示, 盆地 22 日到 23 日处于高压辐散区; 在 23 日到 24 日, 受小槽东移影响, 低空由辐散转为辐合, 但 24 日白天转为高压控制。从 27 日开始, 逐渐由高压脊控制转为低压影响, 低空受偏南气流控制, 28 日夜间受寒潮影响(图 2), 成都地区出现大风降温, 盆地有弱降水。

根据成都市 6 个监测站(金泉两河、十里店、三瓦窑、沙河铺、梁家巷、君平街)数据显示, 从 1 月 10 日起, 各项污染物浓度逐渐上升(图 3)。空气质量指数(AQI)显示, 在 14 日达到了轻度污染等级, 维持一周后, 在 23 日达到了重度污染等级, AQI 值为 234, 在 24 日有小幅下降但仍为重度污染, 之后再次连续上升, 在 26 日 AQI 值达到了 277。在 29 日 AQI 值回到较低水平, 空气质量等级为良。22 日到 28 日期间, 每日 AQI 都处于重度污染范围内, 平均值达到了 246。

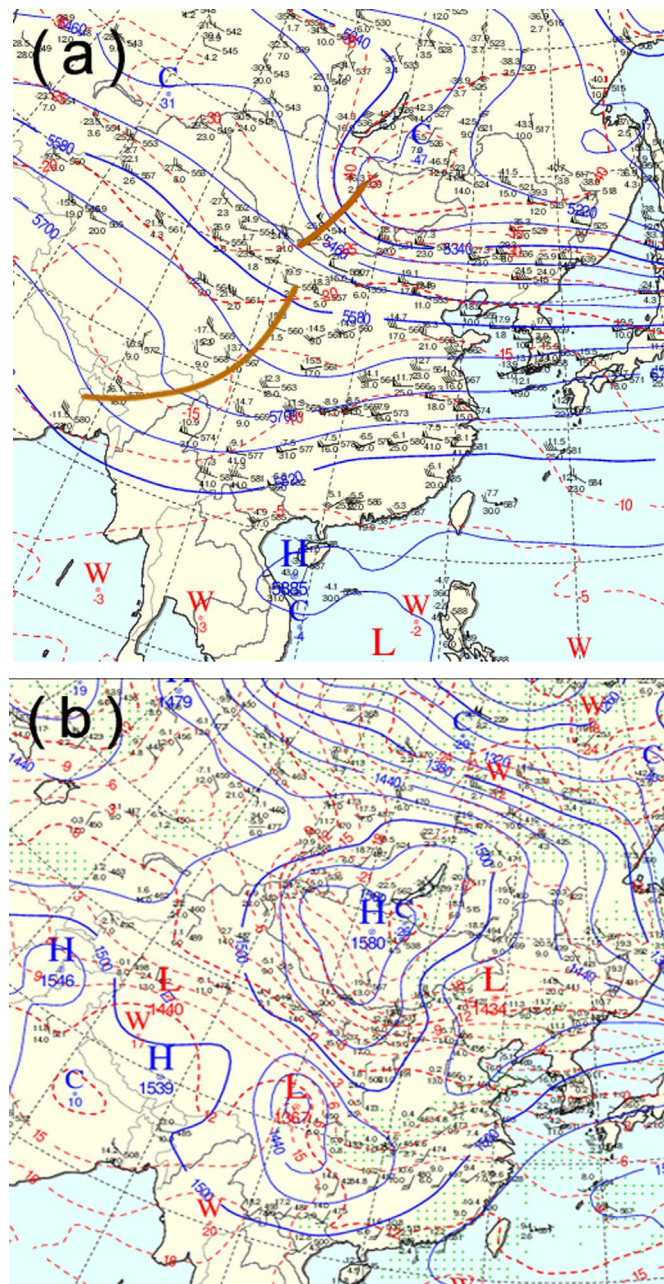


Figure 2. (a) 20:00 on January 28, 2017 (Beijing time) 500 hPa weather map; (b) At 20:00 on January 28, 2017 (Beijing time) 850 hPa weather map

图 2. (a) 2017 年 1 月 28 日 20 时(北京时) 500 hPa 天气图; (b) 2017 年 1 月 28 日 20 时(北京时) 850 hPa 天气图

4. 模拟值与实测值对比

4.1. 气温对比

图 4(a)显示的分别是 2 米气温观测值(obs)、包含化学过程的集合模拟结果和集合模拟结果的平均值的时间序列对比。从对比图可看出集合模拟结果变化幅度小于观测值，集合模拟平均值的日变化稳定，无明显波动变化。

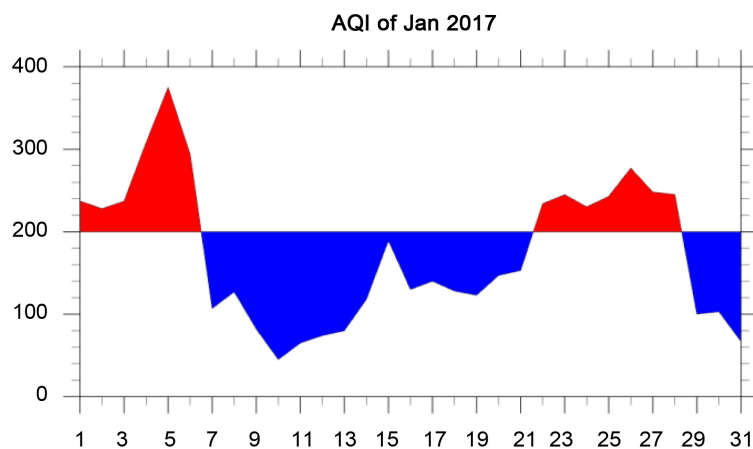


Figure 3. January 2017 AQI trends
图 3. 2017 年 1 月 AQI 变化趋势

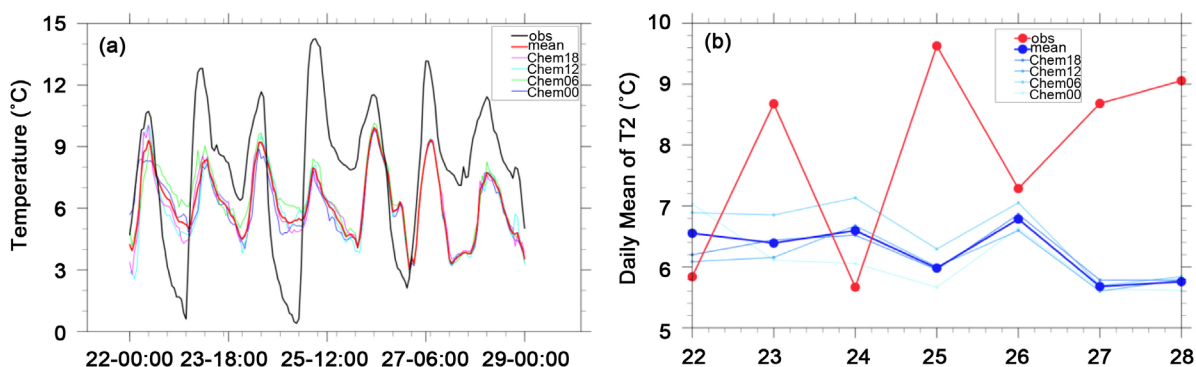


Figure 4. (a) Comparison of daily variation of simulated value and measured value of 2 meters. (b) Comparison of daily average change of simulated and measured values of 2 meters

图 4. (a) 2 米气温模拟值与实测值日变化对比图。(b) 2 米气温模拟值与实测值日均变化对比图

图 4(b)为集合模拟与观测值 2 米气温的日均值对比, 可明显看到模式输出值日均温度整体变化平稳且偏低。对低温日模拟效果较好, 对高温日模拟效果较差, 集合模拟日均值随模拟的时间变化, 趋于收敛。

结合 2 米气温日变化和日均变化的对比, 可发现集合模拟的气温日变化幅度较实测值小 3°C 左右, 这与模拟区域下垫面属性有关; 集合模拟的气温日均值较实测值偏低, 对低温日模拟效果较好, 对高温日模拟效果较差。

4.2. 颗粒物对比

通过对含化学过程集合模拟结果中 $PM_{2.5}$ 浓度按照公式(1)进行指数化处理后, 得到 6 个测站的 $PM_{2.5}$ 的模拟浓度指数, 将其与实测值进行时间序列的对比。

图 5 中 6 个站的 $PM_{2.5}$ 时间序列图显示, 观测值浓度指数出现在 100 到 300 之间, 并且在 22 日开始就处于一个高值, 从 23 日到 25 日之前有所下降, 但仍处于 100 以上。从 25 日开始指数又呈现上升状态, 除金泉两河监测站外, 其他 5 站均在该时段出现了新一轮较高峰值。同时观测值浓度指数大致呈现每两天一周期的变化, 在污染周内出现 3 个周期波动。集合模拟均值的浓度指数, 除了三瓦窑监测站处于 50 到 100, 其他 5 站均处于 50 到 200 范围内。并且呈现日周期的变化, 日峰值出现在凌晨至中午时段。对

比观测值与模拟值,可明显看出集合模拟值整体偏低观测值 80 指数,集合模拟值日变化幅度均匀,大部分处于轻度污染范围,个别处于重度污染范围。在 24 日夜间,6 个站的集合模拟值中均出现超过观测值的情况,其余时段模拟值均低于观测值。在 26 日之后,集合模拟值峰值均无出现上升趋势。集合模拟的结果在变化情况与实测值无明显相关性,但质量浓度指数变化量级在可以对模式优化改进的范围之内。

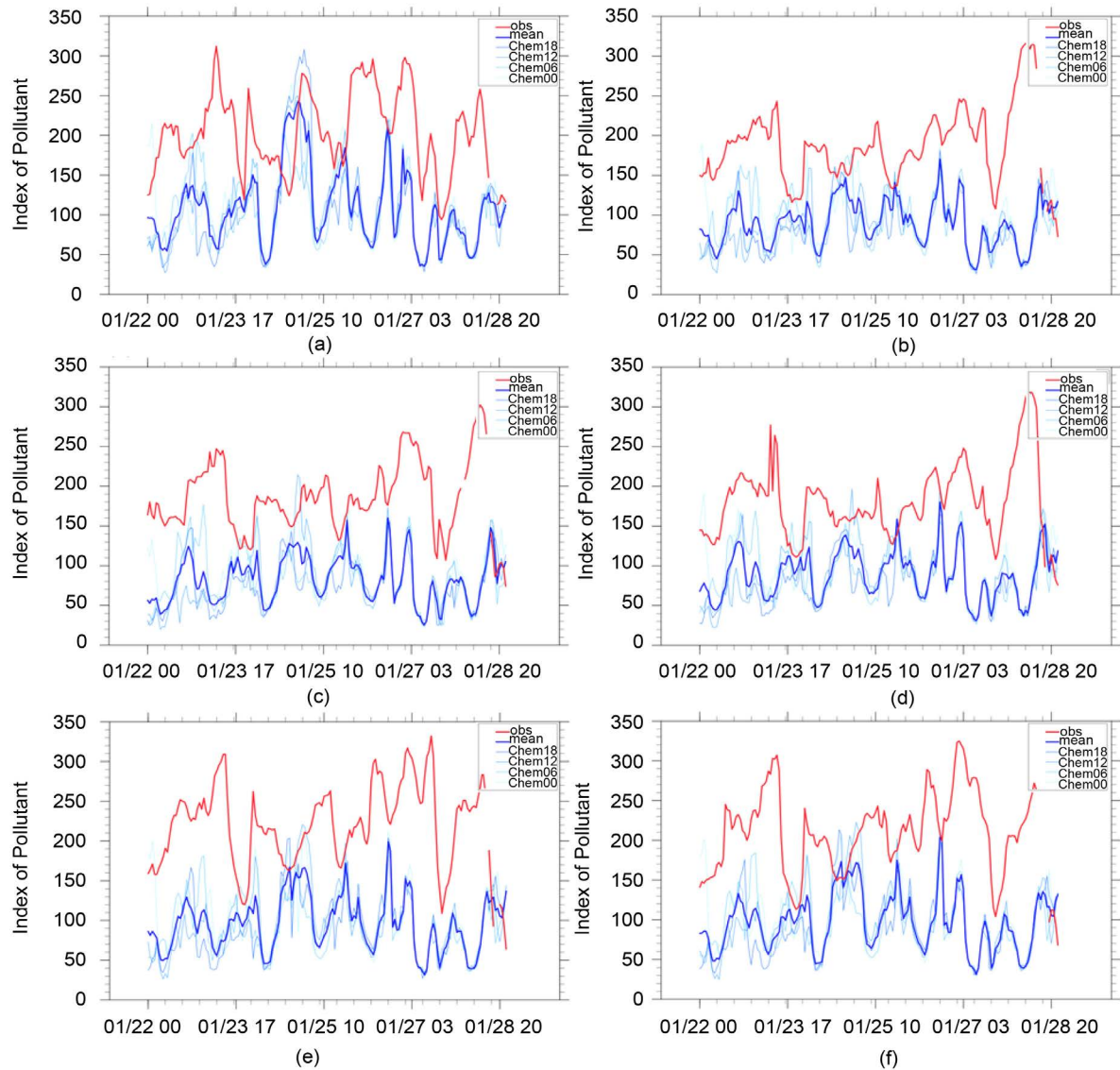


Figure 5. The simulated values of $PM_{2.5}$ mass concentration index of each monitoring station are compared with the measured values. In the figure, (a), (b), (c), (d), (e), and (f) respectively represent the monitoring stations Jinquan Lianghe, Shilidian, Sanwa Kiln, Shahepu, Liangjiaxiang, Junping Street

图 5. 各监测站 $PM_{2.5}$ 质量浓度指数模拟值与实测值对比。图中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别表示监测站金泉两河、十里店、三瓦窑、沙河铺、梁家巷、君平街

4.3. AQI 对比

图 6 中显示, AQI 观测值除君平街监测站出现了 440 的高峰值外,其余 5 个站均处于在 180 到 350 之间,并且从 22 日开始就出现较高峰值,分别为 350、340、300、310 和 360。从 24 日开始持续到 29 日峰值呈现上升状态,均在该时段出现了峰值逐步升高趋势。集合模式输出的 AQI 均值显示,6 个站在

每日 18 时(北京时)左右均出现了极大峰值, 其中超过对应时刻实测值的个数 6 个站分别为 3、2、3、5、2、3。查阅文献可推测, 冬季该时刻处于傍晚时段, 污染物浓度的增大与边界层高度的变化有相关关系 [8]。说明 WRF-Chem 模式对污染物扩散与边界层变化有较大敏感性。对比观测值与模拟值, 可看出集合模拟值是整体偏低于观测值 50 指数, 预报模拟更明显反应日变化特征, 与实测值的相关性偏低。

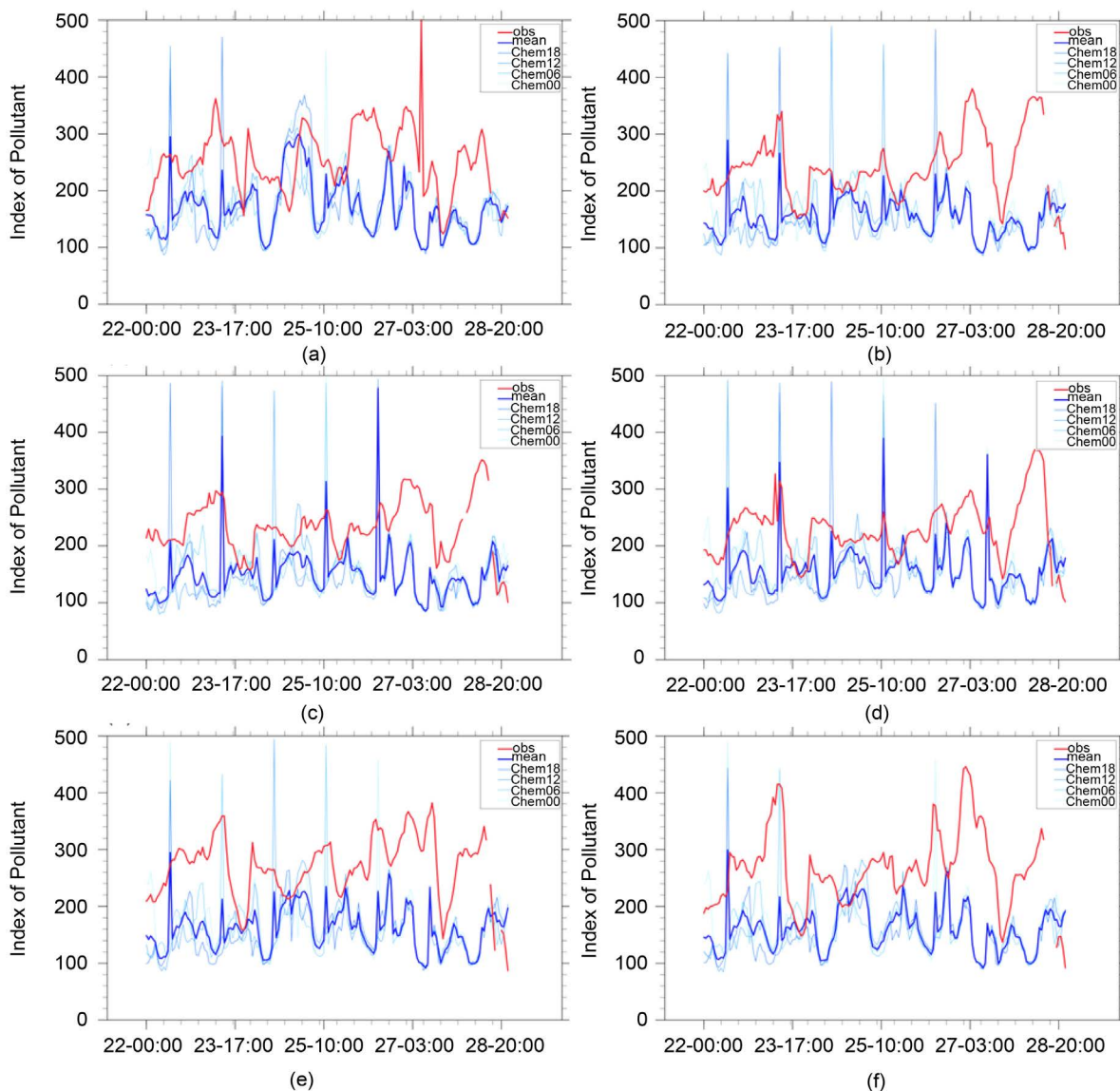


Figure 6. Curve: The AQI analog values of each monitoring station are compared with the measured values. In the figure, (a), (b), (c), (d), (e), and (f) respectively represent the monitoring stations Jinquan Lianghe, Shilidian, Sanwa Kiln, Shahepu, Liangjiaxiang, Junping Street

图 6. 各监测站 AQI 模拟值与实测值对比。图中(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)分别表示监测站金泉两河、十里店、三瓦窑、沙河铺、梁家巷、君平街

5. 有无化学过程对比

5.1. 气温空间分布对比

图 7 为 4 个时次开启化学过程和无化学过程 2 米气温差值的空间分布图((a), (b), (c), (d))以及 4 个时

次差值平均的空间分布图(e), 图中红色点为模式区域中心温江站(30.7°N, 103.97°E), 差值为有化学过程值减去无化学过程值。集合模拟差值平均图显示, 开启化学过程的集合模拟值普遍低于无化学过程参与的集合模拟值, 二者差值在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围之内。在温江站以南和东南分布小范围不连续负高值区, 在温江站东北区域负值较小, 而在西北区域, 出现了明显的东北-西南走向的 0 差值分界线, 分界线以西, 大部分差值在 $+0.15^\circ\text{C}$ 之内, 有个别小部分区域存在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 左右的正负高值区, 这可能与青藏高原的地形作用对模拟影响的情况有关。从 4 个时次的集合预报图中可看出 06 时图中负值较小, 均处于 -0.5°C 以内, 在温江站附近差值分布均匀, 为 -0.15°C 左右。00 时、12 时和 18 时都不同程度地出现了超过 -0.6°C 的负高值区, 其中 12 时分布范围最大, 00 时其次, 18 时最小。

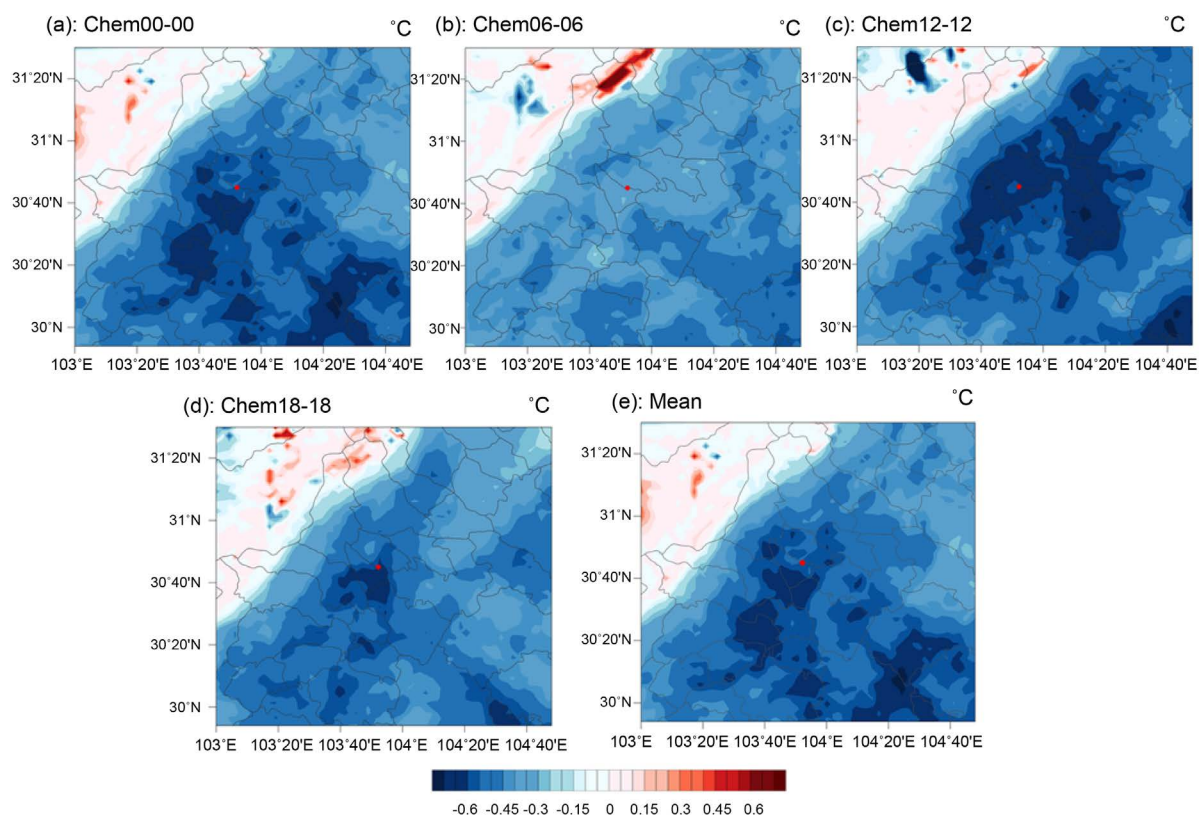


Figure 7. 2m temperature (T2) difference distribution map with chemical process and no chemical process

图 7. 含化学过程与不含化学过程 2 米温度(T2)差值分布图

综上所述, 包含化学过程的模拟有使模式 2 米气温值普遍偏低实测值, 但偏低程度较小, 在 1°C 范围内, 温江站偏低 0.5°C 。其中 06 时为驱动场初始时刻的模式结果偏差最小。

5.2. 边界层高度空间分布对比对比

图 8 为开启化学过程和无化学过程边界层高度差值的空间分布图((a), (b), (c), (d))以及 4 个时次差值平均的空间分布图(e), 图中红色点为模式区域中心温江站(30.7°N, 103.97°E), 差值为有化学过程值减去无化学过程值。图中显示, 在温江站附近, 开启化学过程的集合模拟值低于无化学过程参与的集合模拟值, 二者差值在 $\pm 80\text{ m}$ 之内, 并且负值呈现东北-西南走向的分布, 这可能与温江站地形情况有关, 川西高原地形阻挡, 使边界层差值在测站西面出现明显 0 差值分界。在温江站东南区域, 大部分为正值, 且值较小, 多集中于 $+10\text{ m}$ 以内。从 4 个时次的集合预报图中可看出, 在温江站附近, 06 时图中负值较

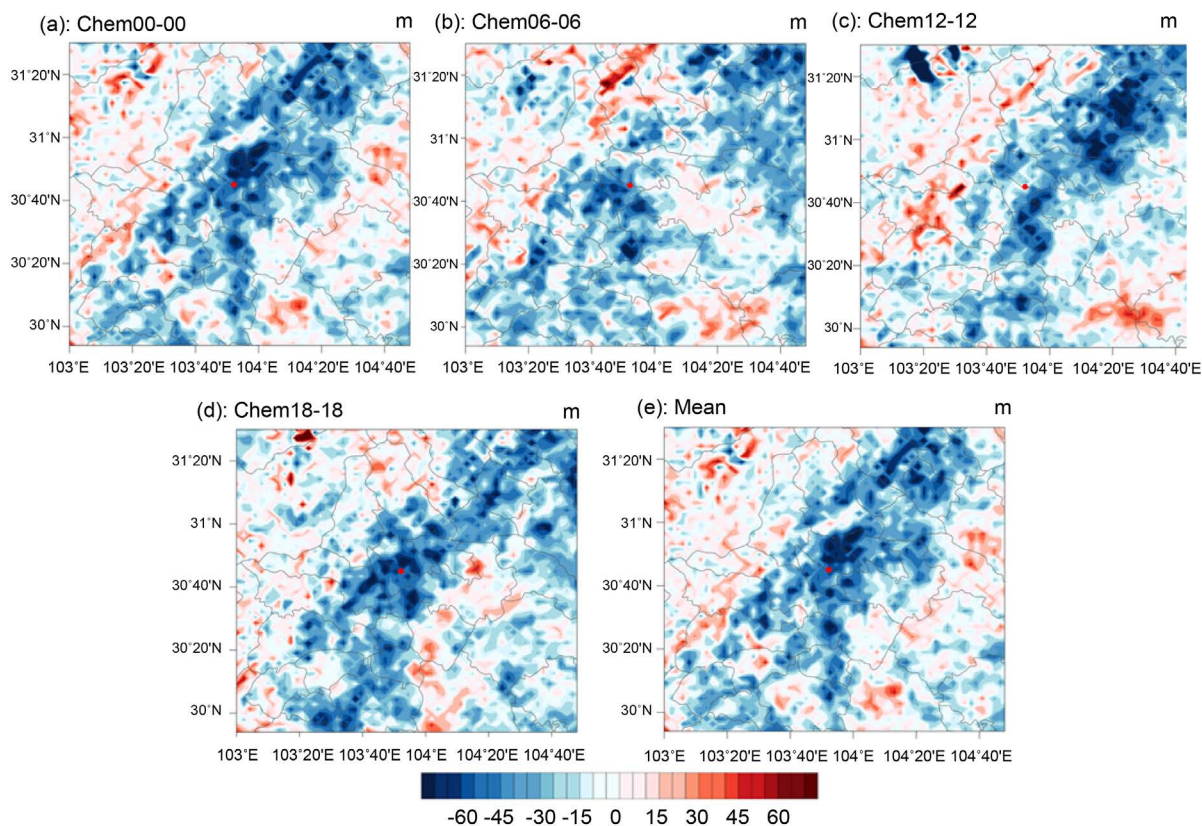


Figure 8. Difference map of chemical layer and chemical process boundary layer height (PBLH)

图 8. 含化学过程与不含化学过程边界层高度(PBLH)差值分布图

小，且分布较均匀，主要集中在温江站以南；00 时、12 时和 18 时的负值分布范围较 06 时大，且负值分布范围不同，分别集中于温江站以北、东北和本站附近。

综上所述，包含化学过程的模拟有使模式边界层高度在模拟中心附近低于实测值，偏低程度在 80 m 范围内，温江站偏低 55 m。其中以 06 时为驱动场初始时刻的模式结果偏差最小。

对于出现模拟值偏低的情况，周广强[9]等人在对华东地区 $PM_{2.5}$ 的数值预报和偏差原因分析后指出，数值预报有一定的偏低预报趋势，约 3/4 呈现负偏差，平均偏低 20%~30%。对于边界层高度的变化情况，朱育雷[10]等人在对成都市污染边界层高度的演变特征一文中指出，污染时段内的污染边界层高度偏低。杜川利[8]等人在对城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析中指出，边界层日变化与颗粒物浓度呈显著负相关关系，即冬季边界层顶高度低，三中粒径颗粒物质量浓度高。本文模式结果也进一步验证了这一观点。同时污染物浓度的升高，一定程度上气溶胶导致大气顶太阳辐射强迫下降，从而导致地表入射太阳辐射减弱且大气加热增强，这将导致大气稳定度增加[11]。这使得处于静稳气象条件下的区域的污染事件继续加重，反映出污染物浓度与边界层高度的正反馈关系，污染物浓度增加，导致大气稳定度增加，边界层高度下降，又促使污染物浓度进一步增加。

6. 结论

采用 WRF-Chem 模式，针对 2017 年 1 月 22 至 28 日发生在成都地区的重度雾霾过程，开展了包含化学过程和不含化学过程的集合模拟，将模拟结果与观测资料进行对比验证，同时对有无化学过程的 2 米气温和边界层高度值进行了空间分布对比分析，得出如下结论：

1) 含化学过程的集合模拟中: 2 米气温模拟值日变化幅度小于观测值 3°C , 模拟平均值的日变化稳定, 无明显波动变化。2 米气温模拟值的日均值比实测值低 2.5°C , 对低温日模拟效果较好, 对高温日模拟效果较差。

2) 含化学过程的集合模拟中: $\text{PM}_{2.5}$ 浓度指数的模拟值整体低于观测值 80 指数。呈日周期变化, 变化幅度均匀, 无明显周期波动。AQI 模拟值整体低于观测值 50 指数, 模拟值可明显反映日变化特征, 但与实测值的相关性偏低。

3) 包含化学过程 2 米气温模拟值较不含化学过程普遍偏低, 但偏低程度较小, 在 1°C 范围内, 模式中心站偏低 0.5°C 。包含化学过程边界层高度值较不含化学过程有部分降低的作用, 且降低区域集中于模式中心附近, 降低程度不大, 在 80 m 范围内, 模式中心站降低 55 m。

4) 大气化学过程可以降低 2 米气温和边界层高度, 增加了大气稳定度, 促使污染物浓度进一步增加, 反映了大气化学过程与污染物浓度的正反馈关系。

本文仅对 WRF-Chem 模式输出的 2 米气温、边界层高度以及主要大气污染物的时空分布规律进行了一些对比验证分析, 但这些特征的形成机理以及造成化学过程模拟值偏低的原因还有待进一步分析和探索。同时, 为了使成都地区污染事件的预报更精准, 还需更多依赖于对排放源清单的选取, 以及对污染和气象二者之间相互作用的进一步研究。

基金项目

四川省教育厅重点项目(18ZA0095), 成都信息工程大学引进人才启动项目(KYTZ201737)的共同资助。

参考文献

- [1] 郭晓梅. 四川盆地空气质量气候特征及其大地形影响效应的观测模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
- [2] 邓利群, 钱骏, 廖瑞雪, 等. 2009 年 8-9 月程度市颗粒物污染及其与气象条件的关系[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1433-1438.
- [3] 张颖, 刘志红, 吕晓彤, 等. 四川盆地一次污染过程的 WRF 模式参数化方案最优配置[J]. 环境科学学报, 2016, 36(8): 2819-2826.
- [4] 姚琳, 叶芝祥, 等. 成都市空气质量预报中 WRF 的本地化参数选取[J]. 成都信息工程学院学报, 2012, 27(5): 485-489.
- [5] 马欣, 陈东升, 温维, 等. 应用 WRF-Chem 探究气溶胶污染对区域气象要素的影响[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(2): 285-295.
- [6] Lin, Y., et al. (1983) Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **22**, 1065-1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2)
- [7] Rutledge, S.A. and Hobbs, P.V. (1984) The Mesoscale and Microscale Structure and Organization of Clouds and Precipitation in Midlatitude Cyclones. XII: A Diagnostic Modeling Study of Precipitation Development in Narrow Cloud-Frontal Rainbands. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**, 2949-2972. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<2949:TMAMSA>2.0.CO;2)
- [8] 杜川利, 唐晓, 李星敏, 等. 城市边界层高度变化特征与颗粒物浓度影响分析[J]. 高原气象, 2014, 33(5): 1383-1392.
- [9] 周广强, 谢英, 等. 基于 WRF-Chem 模式的华东区域 $\text{PM}_{2.5}$ 预报及偏差原因[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2251-2259.
- [10] 朱育雷, 倪长健, 崔蕾. 成都市污染边界层高度的演变特征分析[J]. 环境工程, 2017, 35(1): 98-102.
- [11] 张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 等. 区域污染对本底地区气溶胶光学特性强迫影响的地基和卫星遥感观测研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2439-2448.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2168-5711，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ccrl@hanspub.org