

王颖, 隆霄, 余晔, 等. 2013. 复杂地形上气象场对空气质量数值模拟结果影响的研究 [J]. 大气科学, 37 (1): 14–22, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11089. Wang Ying, Long Xiao, Yu Ye, et al. 2013. The impacts of various meteorological conditions on air quality modeling results over complex terrain [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 14–22.

复杂地形上气象场对空气质量数值模拟 结果影响的研究

王颖¹ 隆霄¹ 余晔² 左洪超¹ 梁依玲¹

1 兰州大学半干旱气候变化教育部重点实验室/大气科学学院, 兰州 730000

2 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所寒区旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州 730000

摘 要 利用 WRF 模式三种边界层参数化方案 (YSU、MYJ、ACM2) 产生的气象场分别驱动多尺度空气质量模式 CMAQ, 对兰州市西固区冬季 2005 年 1 月 27 日至 2 月 2 日期间 SO₂ 和 NO₂ 浓度进行了数值模拟, 将模拟结果与同期监测的污染物浓度进行对比分析, 结果表明: WRF 模式不同边界层参数化方案模拟输出的气象场驱动 CMAQ 模式所模拟的 SO₂ 和 NO₂ 浓度均可以反映出污染物的时空变化特征, CMAQ 模式具有模拟复杂下垫面高分辨率污染物输送特征的能力; WRF 模式的边界层参数化方案选为局地与非局地闭合方案 (ACM2) 时, 模拟的气象场驱动 CMAQ 模式得到的空气污染物浓度分布特征最优, 这主要是由于 ACM2 的湍流输送机制较为合理, 模拟的边界层低层气象场更接近实际, 从而可以较好地模拟污染物的输送特征; 当 CMAQ 模式的垂直混合方案与 WRF 模式的湍流输送方案一致时 (均采用 ACM2 方案), 模式间的兼容性好。

关键词 CMAQ 模式 PBL 参数化方案 高分辨率 复杂地形

文章编号 1006-9895(2013)01-0014-09

中图分类号 X511

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11089

The Impacts of Various Meteorological Conditions on Air Quality Modeling Results over Complex Terrain

WANG Ying¹, LONG Xiao¹, YU Ye², ZUO Hongcao¹, and LIANG Yiling¹

1 Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education/College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000

Abstract Meteorological conditions are critical in the transport and final fate of air pollutants. In this paper, meteorological data simulated by three different planetary boundary layer (PBL) schemes in the Weather Research and Forecasting (WRF) model for the period January 27–February 2, 2005, were used to drive the Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) model. The results show that discrepancies in the turbulent closure method employed by the various PBL schemes in the WRF cause a significant impact on the wind and the temperature fields in the PBL and lead to differences in pollutant concentrations simulated by the CMAQ model. Compared with monitored pollutant concentration, the CMAQ model has been determined as suitable for obtaining high spatial and temporal resolution pollutant

收稿日期 2011-05-07, 2012-07-12 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2011CB706900, 自然科学基金资助项目 41205077, 中国科学院百人计划项目 290827631

作者简介 王颖, 女, 1975 年出生, 副教授, 主要从事大气边界层和空气污染模拟研究。E-mail: yingwang@lzu.edu.cn

characteristics in complex terrain areas. In addition, the results of WRF simulation with the Asymmetric Convective Model version 2 (ACM2) PBL scheme coupled with CMAQ yields more reasonable results than those of other two schemes. The local and non-local combined ACM2 scheme represents actual meteorological conditions more accurately due to its reasonable turbulence transport mechanism. Thus, usage of the same vertical turbulent mixing scheme in a coupled meteorological and air quality model would be advantageous. This tight coupling would improve mass conservation because air density and pollutants mix in the same manner, eliminating the risk of accruing mass error in mixing ratios of trace species in air mass.

Keywords CMAQ, PBL, Parameterization, High resolution, Complex terrain

1 引言

兰州市西固区是我国最早建成的重要石油化工基地之一，工业污染源排放量大，西固区也是我国最早发现光化学烟雾污染的地区；兰州市地处黄土、青藏、内蒙古三大高原交汇处，复杂的地形和特殊的气象条件使得兰州市的空气污染问题一直比较严重，给农业、林业、建筑物（包括历史文物）以及天气和气候等造成严重的影响，制约着兰州市的投资环境和经济发展，同时也危害着居民身体健康。因此，深入研究大气污染及其影响的预测和优化控制，是摆在大气科学工作者面前的紧迫任务之一（洪钟祥和胡非，1999）。大气环境问题的研究方法主要有外场观测、实验室研究和数值模拟。外场观测可以直接获得大气环境的相关数据资料，但观测点位密度小，且很难进行长期观测；实验室研究可以详细了解物质变化和运动规律，为理论研究提供基本和可信的参数；大气环境数值模拟可以综合物理、化学和数学等学科的最新进展，再现不同过程在大气中的作用，弥补观测站点不足的缺点，全面反映污染物的空间分布特征和时间变化特征，因此，数值模拟不仅能用于污染机理等科学问题的研究，还能应用于空气质量预报等实际业务工作，为环境质量控制和管理提供科学依据。数值模式是研究大气环境问题最有效、综合性比较强的重要方法之一（Kindap，2008）；与现场观测和实验室模拟相结合的大气环境数值模拟预测已经成为当前大气环境研究的主要手段（王自发等，2008）。

空气质量模式系统一般由气象模式、排放源处理模式和空气质量模式组成。模式系统的模拟预报效果不仅与模式本身的物理化学过程、参数化方案及边界条件等有关，而且受输入气象场的影响（Seaman，2000）。科研人员通过大量的模拟试验研究了气象场对空气质量模拟效果的影响，如 Gilliam

et al.（2006）详细介绍了气象模式对空气质量模拟效果影响评估的方法；Seaman（2000）分析了气象诊断模式和动力模式（如 MM5 和 RAMS）对空气质量模拟效果的影响；Sistla et al.（1996）研究了风场和混合层高度的不确定性对区域空气质量模式 UAM 模拟 O_3 、 NO_x 、VOCs 浓度的影响；Pirovano et al.（2007）评估了 RAMS 和 MM5 两种气象模式对区域空气质量模式 CAMX 模拟复杂地形 O_3 浓度的影响；de Meij et al.（2009）研究了 MM5 和 WRF 两种气象模式对化学传输模式 EHMERE 模拟复杂地形 PM_{10} 和 O_3 浓度的影响；Smyth et al.（2006）研究了 GEM（Global Environmental Multiscale）和 MM5 模式对 CMAQ 模拟的 O_3 和 PM_{10} 小时浓度的影响。

以上研究主要集中在不同气象模式输出的气象场对空气质量模式模拟效果的影响，而在诸多气象影响因素中，边界层高度、地面温度、风速、风向和湍流扩散等具有重要作用，因此分析气象模式不同边界层参数化方案对污染物扩散影响的研究也受到了广泛关注，如 Lee et al.（2007）评估了 MM5 陆面过程对 UAM-V 模拟 O_3 浓度的影响；Han and Zhang（2009）研究了中尺度数值模式（WRF）三种边界层参数化方案的垂直湍流扩散系数对区域空气质量模式 RAQM 模拟效果的影响，结果表明 G-S 方案计算的垂直扩散参数 K_z 最小，导致模拟的 SO_2 和 NO_x 浓度明显低于其它两个边界层方案，2 km 以下不同边界层（PBL）参数化方案模拟的 SO_2 和 O_3 浓度无明显差别，但 NO_x 的模拟结果存在很大差异；Ku et al.（2001）分析 MM5 的两种边界层参数化方案（Blackadder 和 G-S 方案）对 CMAQ 模拟 O_3 浓度的影响，认为合理的边界层参数化方案可以提高边界层高度模拟的准确度，从而提高空气质量模式模拟结果的精度；Pérez et al.（2006）分析了 MM5 的三个边界层方案（G-S、MRF、PC）在复杂地形条件下对高分辨率（1 km）

CMAQ 模拟 O_3 和 NO_x 浓度的影响,发现不同边界层方案模拟污染物最大浓度与位置差别很大;Borge et al. (2008) 研究了 WRF 模式的不同物理过程参数化方案(如 PBL 方案、微物理过程方案、辐射方案、陆面过程方案)对伊比利亚半岛空气质量模拟的影响,给出了适于空气质量模拟的最优物理参数化方案组合。这些研究工作主要集中在气象模式不同参数化方案对空气质量模式模拟区域污染物浓度(如 O_3 和颗粒物)的影响,对模式在高分辨率下常规污染物(如 SO_2 、 NO_2)浓度模拟效果影响的报道不多。

王颖等(2010)利用 WRF 模式三种边界层参数化方案对 2005 年 1 月 25~28 日兰州市西固区冬季地面温度和风速进行模拟,并与同期系留探空和自动气象站资料进行比较分析,结果表明不同边界层参数化方案对边界层气象要素分布特征有重要影响。本文利用 WRF 三种 PBL 参数化方案(YSU、MYJ、ACM2)模拟的气象场,分别驱动空气质量模式 CMAQ 对兰州市西固区 2005 年 1 月 27 日至 2 月 2 日期间空气质量进行数值模拟研究,通过与同期环境质量监测资料进行对比,客观评估 CMAQ 模式模拟复杂下垫面高分辨率污染物浓度时空分布特征的能力,分析 WRF 不同参数化方案产生的气象场对 CMAQ 模拟结果的影响。

2 模式设计

2.1 空气质量模式与监测

Models-3 模式系统是由美国环境保护局(EPA)和海洋大气局(NOAA)共同开发的三维欧拉多尺度空气质量模式,由美国 EPA 于 1998 年 6 月首次公布,以“一个大气”为设计理念,通过各种尺度的大气物理化学过程,模拟对流层臭氧、酸沉积、能见度和细粒子浓度。Models-3 模式系统由排放源模式、中尺度气象模式、通用多尺度空气质量模式(the Community Multi-scale Air Quality, 简称 CMAQ)三部分组成,CMAQ 模式是空气质量模式系统的核心部分,它可以模拟多种污染物的输送和转化过程,并且可以同时综合处理复杂的空气污染情况,如臭氧、颗粒物、毒化物、酸沉降和能见度的问题。模式中各种物理和化学过程的细致处理机理参见文献(Byun and Hanna, 1993; Robin et al., 1996; Byun et al., 1998)。

数值模拟中网格空间分辨率对模拟结果有很

大影响(Holtzlag, 2002; Borge et al., 2008; Lin and McElroy, 2010),为反映不同尺度天气过程对污染物浓度模拟的影响,本次模拟试验采用三重单向嵌套网格,区域设置基本与气象模式 WRF 一致,但为了减少气象模式侧边界条件对污染物浓度分布的影响,同时减少计算量,CMAQ 模拟区域中去掉了 WRF 区域四个边界的 5 个格点,第一重网格数为 67×43 ,网格距 25 km;第二重网格数 121×81 ,网格距 5 km;第三重网格数 75×34 ,网格距 1 km。垂直方向网格为不等距的 21 层,为降低插值引入的误差,最低的 15 层与 WRF 一致。

我们利用 2005 年西固区域环境影响后评估试验中空气质量监测资料来检验空气质量模拟效果,试验研究区域总面积约 99 km^2 ($11 \text{ km} \times 9 \text{ km}$),共布设了 12 个监测点位,具体的监测点位分布见图 1,这些监测点位可以反映西固区局地大气污染的空间分布特征。

2.2 气象场

目前应用较为广泛并与 Models-3 模式相容的气象模式主要有 WRF 和 MM5, WRF 模式是美国多个科研结构和大学联合开发的新一代多尺度数值模式,适用的尺度范围非常广泛,从大涡(Large eddy)尺度一直到全球尺度,因此也适于模拟边界层气象场的特征。

WRF 模式开发前,MM5 模式一直为空气质量模式(包括 Models-3 模式)提供气象场,但随着 WRF 模式的开发,MM5 的开发基本停止。WRF 模式也是一个中尺度数值模式,与 MM5 模式相比,动力框架和物理过程处理(包括陆面过程、边界层过程、辐射和云过程等方面)上有明显改进。孙健和赵平(2003)、Kuaska et al. (2005)、赵洪等(2007)针对强降水、区域性暴雨及强冷空气过程,比较分析了 MM5 模式和 WRF 模式的模式性能,结果表明 WRF 模式的动力框架具有一定的优越性,模拟的中尺度天气系统的物理量场分布特征优于 MM5 模式。随着 WRF 模式各种物理过程的逐步改进和完善,越来越多的空气质量模拟采用 WRF 模式提供的气象场研究边界层污染物的输送扩散问题(Jimenez-Guerrero et al., 2008; Gonçalves et al., 2009),因此在本文研究中,我们采用 WRF 模式为 Models-3 空气质量模拟提供气象场。

利用 WRF 模式进行数值模拟时,模拟区域中心位于 (103.82°E , 36.05°N),采用三重网格嵌套,

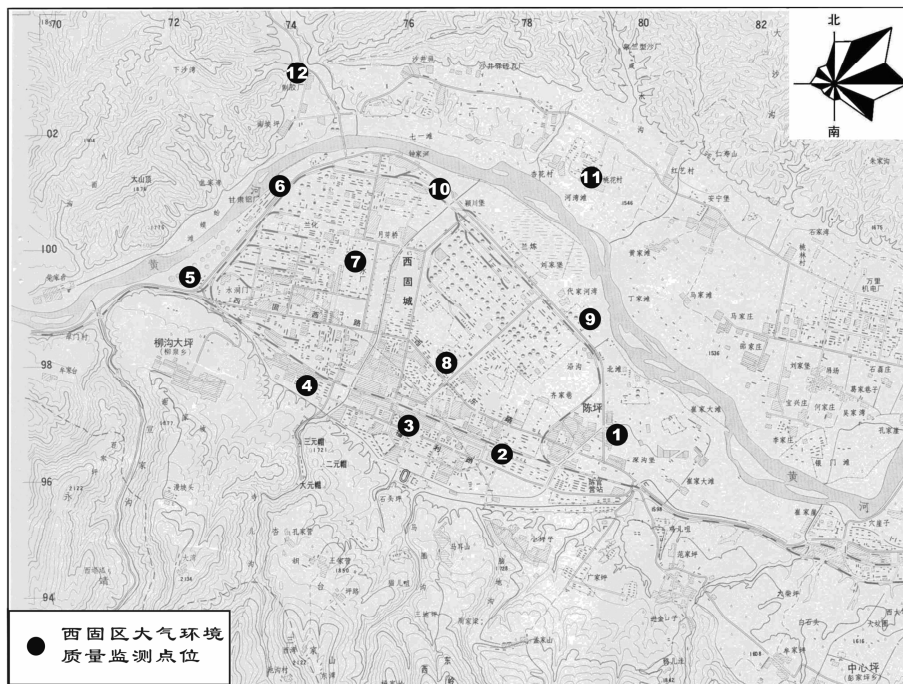


图1 兰州市西固区空气质量监测点分布示意图

Fig. 1 Distributions of atmospheric environment quality monitoring sites in Xigu District of Lanzhou City

模式的格点域分别为 77×53 、 131×91 、 85×44 ，格距分别为 25 km、5 km、1 km，垂直方向分为不等距的 35 层；微物理过程选取第 6 标准的 WSM 方案；积云对流参数化方案在第一、二重区域选取 Kain-Fritsch (new Eta) 方案，第三重模式域的水平分辨率较高 (1 km)，因而没有启动积云对流参数化方案；大气辐射方案选取 RRTM 短波辐射方案和 Dudhia 长波辐射方案；陆面过程为热扩散方案；边界层方案分别采用 YSU、MYJ 和 ACM2 三种 PBL 方案，以研究在这三种边界层参数方案下得到的气象场对空气质量模拟结果的影响。

2.3 污染源清单

排放源资料是空气质量模式重要的输入资料。本次研究利用 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions model) 排放源模式提供污染源排放清单，估算污染源的位置、产生量及随时间的变化。SMOKE 模式将污染源排放清单转换成空气质量模式需要的格式，从源特性、源属性、排放数据和数据属性等四个方面描述污染物特征，它可以处理 CO 、 NO_x 、 VOC 、 NH_3 、 SO_2 等气态污染物，也可以处理气溶胶和有毒物质 HAPs (Hazardous Air Pollutants)，如 Hg。SMOKE 模式将各种污染源的年排放量或日均排放量处理成网格上的小时排放量。排放处理过程包括污染源的时间分配、化学物质生成

和空间分配三部分内容。目前 SMOKE 模式可处理点源、线源和面源过程，同时也包括生物排放源。

利用 CMAQ 模式进行数值模拟时，背景污染源资料来自太平洋上空输送和化学演变试验 (TRACE-P 试验) 东亚地区 $1^\circ \times 1^\circ$ 污染源排放清单，兰州区域污染源排放采用 2000 年兰州市污染源分布和年排放量 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 网格资料。2000 年兰州市污染源总计 1834 个，其中工业源 502 个，占 27.4%；工业源排放的 SO_2 、 NO_2 占排放总量的 67% 和 56%，工业源和生活源的排放量分别按 366 d 和 151 d (采暖天数) 计，以获得污染源的瞬时排放率。

3 试验期间天气形势分析

从 500 hPa 形势可知，2005 年 1 月 25~28 日期间，兰州上空一直为稳定的西风气流控制，天气晴好 (图 2a)。1 月 28 日 08:00 (北京时，下同) 的 500 hPa 高空图上，在新疆上空已经形成了一 30°C 低温闭合中心，该中心的温度槽与低压槽相配合，形成了一次影响兰州的强降温、降水过程。该过程引起的降温幅度达 10°C 左右 (图 2b)。30 日以后，气温开始缓慢回升 (图略)。

4 空气质量模拟结果分析

空气质量模式中对流层低层的混合过程对污

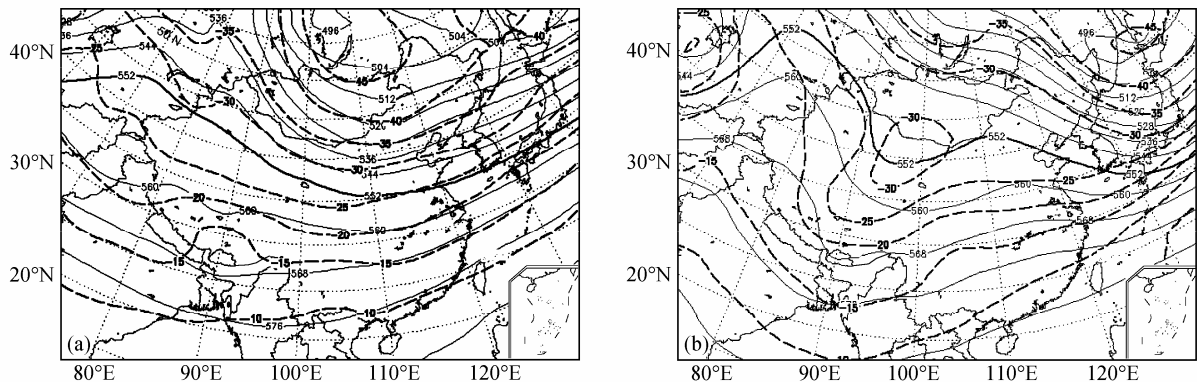


图2 试验期间2005年1月(a)27日20:00(北京时,下同)和(b)28日20:00的500 hPa的环流形势。实线为位势高度(单位: dagpm),虚线为等温线(单位: °C)

Fig. 2 Spatial distributions of geopotential height (solid line, units: dagpm) and temperature (dashed line, units: °C) at 500 hPa during the experiment period: (a) 2000 BT (Beijing time) 27 Jan 2005; (b) 2000 BT 28 Jan 2005

染物垂直分布具有重要影响(Holtstag, 2002),混合过程较强时,污染物分布比较均匀,反之污染物浓度梯度较大。CMAQ模式有两种垂直混合方案:局地混合eddy方案和局地与非局地混合ACM2方案,非局地闭合方法考虑了大涡作用引起的次网格混合过程,对污染物浓度的模拟更接近实际(Lin et al., 2008; Lin and McElroy, 2010),所以在本次空气质量模拟中,垂直扩散方案采用局地与非局地混合ACM2方案。

本研究中数值模拟试验方案如下:分别采用WRF模式三种边界层方案(YSU, MYJ和ACM2,以下简称三组方案)的高分辨模拟结果作为CMAQ模式的气象场,对西固区SO₂和NO₂浓度进行数值模拟,并与同期环境质量监测数据对比,采用相关分析和误差统计分析等手段,分析不同方案模拟结果的差异,给出空气质量模拟效果最优的边界层气象参数化方案,进而检验CMAQ模式模拟复杂下垫面高分辨率空气污染物时空变化特征的能力。

4.1 不同方案模拟SO₂和NO₂地面浓度对比分析

三组方案模拟的试验期间12个监测点SO₂和NO₂日均浓度值与监测值相关分析见图3。由图3可知:三组方案模拟的SO₂日均浓度与监测浓度的相关系数分别为0.50、0.51、0.61,NO₂的相关系数分别为0.43、0.49、0.57;相关性分析结果表明:方案三模拟的SO₂和NO₂日均浓度与监测值最为接近。三组方案模拟的SO₂和NO₂日均值浓度与监测值误差统计结果见表1,绝对误差、相对误差和均方根误差统计结果也进一步表明WRF模式PBL方案选为ACM2时,产生的气象场驱动CMAQ模式

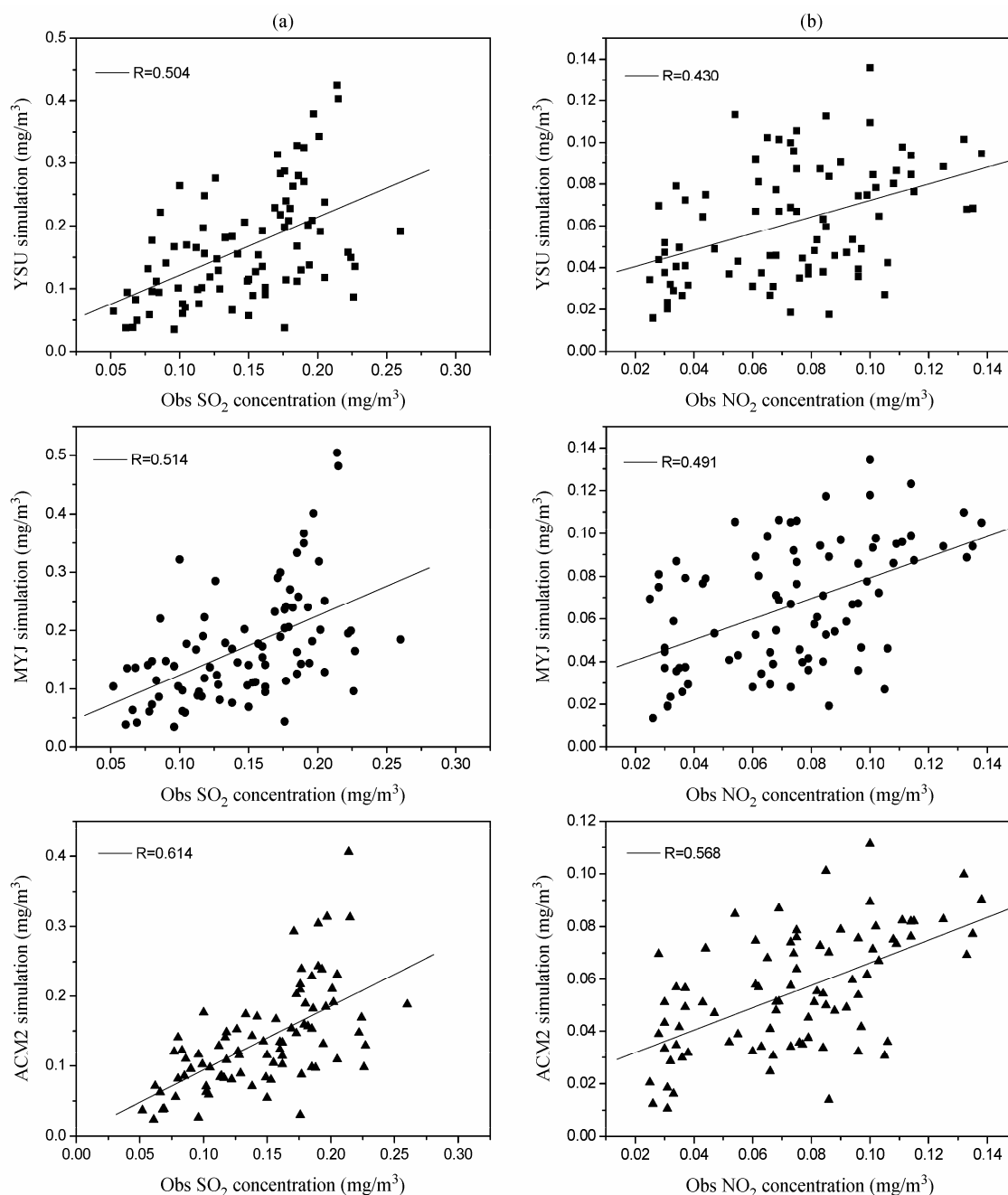
模拟效果最优。

表1 三组方案模拟的SO₂和NO₂浓度与监测值误差统计表
Table 1 Statistics of errors between simulated SO₂ and NO₂ concentration with three schemes and observed concentration

	SO ₂ 浓度			NO ₂ 浓度		
	YSU	MYJ	ACM2	YSU	MYJ	ACM2
绝对误差 (mg m ⁻³)	0.0619	0.0624	0.0445	0.0272	0.0253	0.0257
相对误差	43.1%	44.5%	30.1%	38.8%	40.4%	35.4%
均方根误差 (mg m ⁻³)	0.0783	0.0851	0.0576	0.0327	0.0304	0.0313

注:样本数n=84

ACM2方案产生的气象场驱动空气质量模式模拟效果较好的原因主要有两个方面:首先,边界层风场结构是影响污染物输送特征的重要因素,污染物的稀释则是湍流扩散作用的结果。由于闭合方法的差异,中尺度气象模式中不同边界层参数化方案对动量、热量和水汽通量的处理方法是不同的,从而导致边界层内风、温等气象要素随高度的变化特征存在较大差异。王颖等(2010)研究结果表明:由于ACM2方案既可以模拟湍流在浮力作用下向上的输送特征,也可以模拟局地湍流交换过程,所以在边界层低层,考虑局地和非局地闭合的ACM2方案模拟的位温廓线与系留探空观测结果比较一致,明显优于其它两种边界层参数化方案;第二,CMAQ模式的垂直混合方案为ACM2方案,当气象模式采用相同的湍流交换方案时,模式间兼容性好,模拟效果最优。这与Lee et al.(2009)的研究结果一致。

图3 三组方案模拟的 (a) SO_2 和 (b) NO_2 浓度与监测浓度相关分析Fig. 3 Correlativity between simulated (a) SO_2 and (b) NO_2 concentration with three schemes and observed concentration

4.2 不同方案模拟 SO_2 和 NO_2 空间分布特征

试验期间 (2005 年 1 月 27 日至 2 月 2 日), 三组方案模拟的各监测点 SO_2 和 NO_2 平均浓度与监测值对比见表 2 和图 4。

由图 4a 可知, 三组方案模拟 SO_2 的浓度均能较好地反映出 SO_2 的空间变化特征, 但模拟值普遍高于监测值, 注意到空气质量模拟的污染源排放清单是 2000 年兰州市污染物排放量资料, 而模拟的

时间是 2005 年, 随着近年来环保要求的提高和污染治理力度的加强, 污染物排放量有所降低, 因此模式输入的污染物排放量较模拟期间偏高, 这是导致模拟浓度偏高的一个主要原因。

由图 4b 可知, 三组方案模拟的 NO_2 浓度基本反映了 NO_2 的空间变化特征, 但较监测值普遍偏低, 特别是 5# 和 12# 监测点处模拟值与监测值偏差较大, 模式中没有考虑汽车尾气排放 NO_x 的影响是

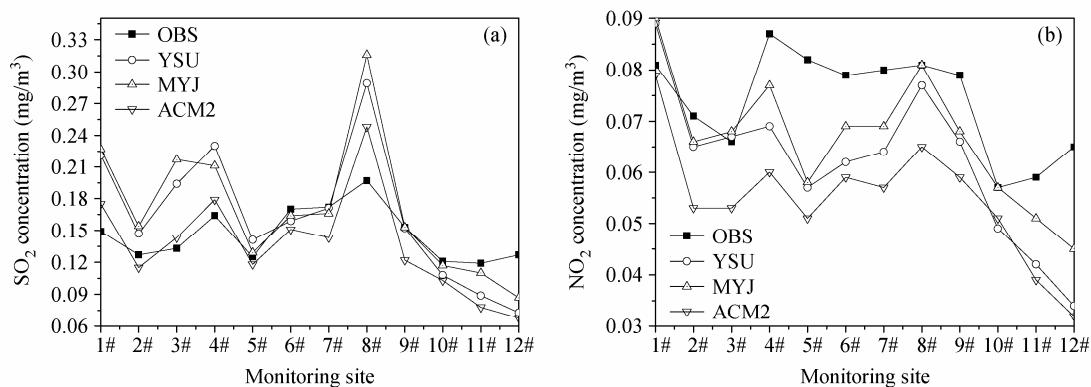


图4 三组方案模拟的与监测的 (a) SO₂ 和 (b) NO₂ 平均浓度随监测点位变化图

Fig. 4 Variations of the observed and simulated averaged (a) SO₂ and (b) NO₂ concentration with monitoring sites. The simulation results come from CMAQ model with three schemes

表2 三组方案模拟的与监测的各监测点SO₂和NO₂浓度对比表 (单位: mg m⁻³)

Table 2 Comparisons of the observed SO₂ and NO₂ concentration with the simulations from three schemes (units: mg/m³)

监测 点位	SO ₂ 浓度				NO ₂ 浓度			
	监测值	YSU	MYJ	ACM2	监测值	YSU	MYJ	ACM2
1	0.149	0.221	0.227	0.175	0.072	0.089	0.090	0.079
2	0.127	0.147	0.154	0.115	0.056	0.065	0.066	0.053
3	0.133	0.194	0.217	0.143	0.059	0.067	0.068	0.053
4	0.164	0.230	0.211	0.179	0.070	0.069	0.077	0.060
5	0.125	0.141	0.129	0.118	0.060	0.057	0.058	0.051
6	0.170	0.159	0.164	0.151	0.058	0.062	0.069	0.059
7	0.172	0.171	0.166	0.143	0.066	0.064	0.069	0.057
8	0.197	0.289	0.316	0.248	0.066	0.077	0.081	0.065
9	0.153	0.152	0.153	0.122	0.062	0.066	0.068	0.059
10	0.121	0.108	0.117	0.103	0.042	0.049	0.057	0.051
11	0.119	0.089	0.110	0.078	0.040	0.042	0.051	0.039
12	0.127	0.073	0.087	0.068	0.040	0.034	0.045	0.032
平均值	0.146	0.165	0.171	0.137	0.058	0.062	0.067	0.055

导致 NO₂ 模拟浓度偏低的一个重要原因。

4.3 不同方案模拟的污染物时间变化

三组方案模拟的污染物浓度随时间变化统计结果如表3和图5所示,可见各方案均能模拟出污染物随时间变化特征:27日污染物最高,28、29日两天污染物浓度降低,30日污染物浓度又上升;需要注意到监测的污染物浓度(SO₂和NO₂)1月30、31日呈降低趋势,但模拟的污染浓度却是增加的。

污染物浓度随时间变化的特征是气象场变化导

致污染扩散能力发生变化的结果。冷锋前, WRF不同方案模拟的温度廓线在200 m和400 m处均有逆温层,混合层高度较低(见图6a),气象条件不利于污染物扩散,使污染物累积,导致1月27日污染物浓度较高;28日冷锋过境产生强降温,低层逆温消失,混合层高度增加(见图6b),有利于污染物扩散,加之冷锋过境时伴有降水过程对空气污染物有净化作用(王式功等,1998),使28、29日浓度较低;30日后气温缓慢回升,污染物浓度开始

表3 三组方案模拟的与监测的SO₂和NO₂浓度随时间变化对比表

Table 3 Temporal variations of the simulated daily averaged SO₂ and NO₂ concentration with three schemes and the observations

污染物	时间 (月-日)	浓度 (mg m ⁻³)			
		监测值	YSU	MYJ	ACM2
SO ₂	01-27	0.185	0.24	0.27	0.237
	01-28	0.119	0.102	0.099	0.094
	01-29	0.113	0.09	0.082	0.079
	01-30	0.175	0.106	0.127	0.107
	01-31	0.137	0.21	0.21	0.155
	02-01	0.113	0.178	0.18	0.111
	02-02	0.183	0.225	0.229	0.174
	平均	0.146	0.164	0.171	0.137
NO ₂	01-27	0.115	0.078	0.092	0.077
	01-28	0.084	0.038	0.039	0.035
	01-29	0.035	0.035	0.030	0.031
	01-30	0.071	0.040	0.045	0.042
	01-31	0.065	0.082	0.087	0.071
	02-01	0.051	0.071	0.078	0.052
	02-02	0.096	0.088	0.096	0.077
	平均	0.074	0.062	0.067	0.055

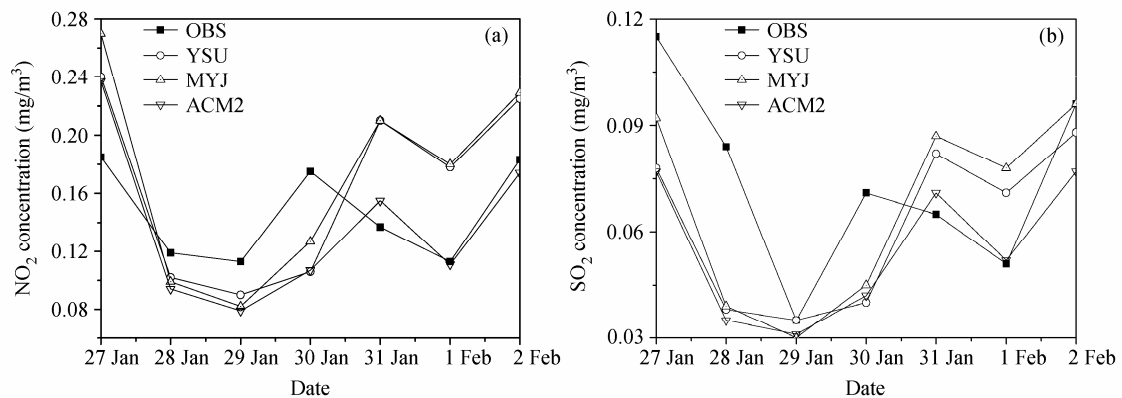
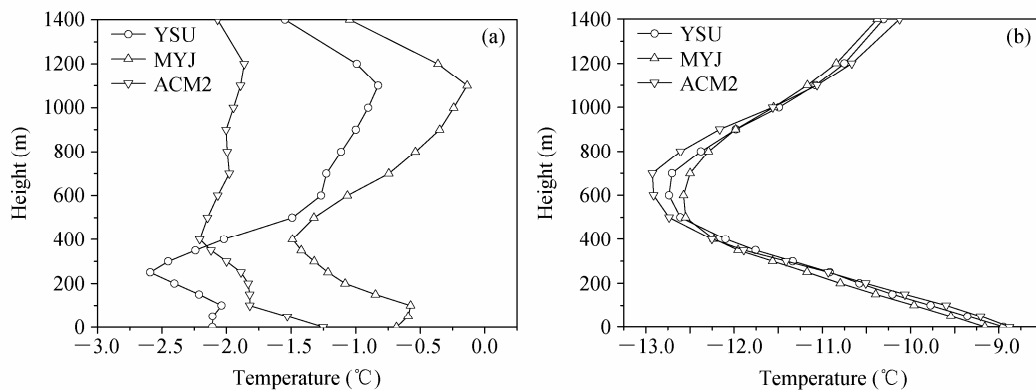
图5 三组方案模拟的与监测的 SO₂ 和 NO₂ 浓度随时间变化的对比Fig. 5 Comparison between time series of the observed (a) SO₂ and (b) NO₂ concentration and the simulations with three schemes

图6 WRF 三种边界层方案模拟的 2005 年 1 月 (a) 28 日 05:00 (系统过境前) 和 (b) 30 日 08:00 (系统过境后) 温度的垂直廓线

Fig. 6 Vertical profiles of temperature simulated with three PBL parameterization schemes in WRF at (a) 0500 BT 28 Jan and (b) 0800 BT 30 Jan in 2005, when the cold front passes through Lanzhou City

升高。造成模拟和监测的 30 日和 31 日污染物浓度随时间变化特征差异的原因可能是模式模拟边界层低层气象场误差引起的。

5 结论与讨论

本文利用 WRF 三种边界层参数化方案 (YSU、MYJ、ACM2) 产生的气象场分别驱动多尺度空气质量模式 CMAQ, 对兰州市西固区冬季 2005 年 1 月 27 日至 2 月 2 日期间 SO₂ 和 NO₂ 浓度进行数值模拟研究, 主要结论如下:

(1) 不同试验方案模拟的 SO₂ 和 NO₂ 浓度均能较好地反映污染物浓度的时空变化特征, CMAQ 模式具有模拟复杂下垫面高分辨率污染物输送扩散的能力。

(2) 不同边界层参数化方案产生的气象场驱动 CMAQ 模式模拟的污染物浓度与监测结果的对比分析表明: 对于常规气态污染物的模拟, ACM2 方案明显优于其它两个方案。主要原因有两个: 一是

边界层气象场对污染物输送扩散有重要作用。ACM2 方案采用局地与非局地闭合方法处理不同稳定度条件下的湍流输送过程, 因此采用该方案模拟的边界层风温廓线特征更接近实际大气; 另一方面, 当 CMAQ 模式与 WRF 模式的湍流输送方案一致时 (均采用 ACM2 方案), 模式间的兼容性较好。

(3) 与监测值相比, 模式模拟的 SO₂ 浓度偏高, 主要是由于 CMAQ 模式的污染源排放清单为兰州市 2000 年污染物排放资料, 而模拟的时间是 2005 年, 模式输入的污染物排放量较模拟期间实际排放量偏高; 模式中没有考虑机动车尾气排放对 NO₂ 浓度的影响是导致模拟 NO₂ 浓度偏低的一个原因。

参考文献 (References)

- Borge R, Alexandrov V, del Vas J J, et al. 2008. A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula [J]. Atmos. Environ., 42: 8560–8574.
- Byun D W, Hanna A, Coats C J, et al. 1995. Models-3 Air Quality Model

- Prototype Science and Computational Concept Development [C]. Trans. TR-24 Regional Photochemical Measurement and Modeling Studies, San Diego, CA, Air and Waste Management Association, 197–212.
- Byun D W, Ching J K S, Novak J, et al. 1998. Development and Implementation of the EPA's Models-3 Initial Operating Version: Community Multi-scale Air Quality Model, Air Pollution Modeling and its Application [M]. New York: Plenum Publishing Corporation, 357–368.
- de Meij A, Gzella A, Cuvelier C, et al. 2009. The impact of MM5 and WRF meteorology over complex terrain on CHIMERE model calculations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9: 6611–6632.
- Gilliam R C, Hogrefe C, Rao S T. 2006. New methods for evaluating meteorological models used in air quality applications [J]. *Atmos. Environ.*, 40: 5073–5086.
- Gonçalves M, Jiménez-Guerrero P, Baldasano J M. 2009. High resolution modeling of the effects of alternative fuels use on urban air quality: Introduction of natural gas vehicles in Barcelona and Madrid Greater Areas (Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 407 (1): 776–790.
- Han Zhiwei, Zhang Meigen, An Junling. 2009. Sensitivity of air quality model prediction to parameterization of vertical eddy diffusivity [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 9 (1): 73–89.
- Holtzlag A A M. 2002. Atmospheric boundary layers: Modeling and parameterization [M]// *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. New York: Academic Press, 253–261.
- 洪钟祥, 胡非. 1999. 大气污染预测的理论和研究方法研究进展 [J]. *气候与环境研究*, 4 (3): 225–230. Hong Zhongxiang, Hu Fei. 1999. Advanced in research of the theory and method of air pollution prediction [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 4 (3): 225–230.
- Jimenez-Guerrero P, Jorba O, Baldasano J M, et al. 2008. The use of a modelling system as a tool for air quality management: Annual high-resolution simulations and evaluation [J]. *Science of the Total Environment*, 390: 323–340.
- Kindap T. 2008. Identifying the trans-boundary transport of air pollutants to the city of Istanbul under specific weather conditions [J]. *Water Air Soil Pollution*, 189: 279–289.
- Ku J Y, Mao H, Zhang K, et al. 2001. Numerical investigation of the effects of boundary-layer evolution on the predictions of ozone and the efficacy of emission control options in the northeastern United States [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 1: 209–233.
- Kuaska H, Crook A, Duhia J, et al. 2005. Comparison of the WRF and MM5 models for simulation of heavy rainfall along the baiu front [J]. *Scientific Online Letters on the Atmosphere (SOLA)*, 1: 197–200.
- Lee P, Tang Y H, Kang D W. 2009. Impact of consistent boundary layer mixing approaches between NAM and CMAQ [J]. *Environmental Fluid Mechanics*, 9: 23–42.
- Lee S H, Kim Y K, Kim H S, et al. 2007. Influence of dense surface meteorological data assimilation on the prediction accuracy of ozone pollution in the southeastern coastal area of the Korean Peninsula [J]. *Atmos. Environ.*, 41: 4451–4465.
- Lin J T, Youn D, Liang X Z, et al. 2008. Global model simulation of summertime U. S. ozone diurnal cycle and its sensitivity to PBL mixing, spatial resolution, and emissions. *Atmospheric Environment [J]. Atmos. Environ.*, 42: 8470–8483.
- Lin J T, McElroy M B. 2010. Impacts of boundary layer mixing on pollutant vertical profiles in the lower troposphere: Implications to satellite remote sensing [J]. *Atmos. Environ.*, 44: 1726–1739.
- Pérez C, Jiménez P, Jorba O, et al. 2006. Influence of the PBL scheme on high-resolution photochemical simulations in an urban coastal area over the Western Mediterranean [J]. *Atmos. Environ.*, 40: 5274–5297.
- Pirovano G, Coll I, Bedogni M, et al. 2007. On the influence of meteorological input on photochemical modelling of a severe episode over a coastal area [J]. *Atmos. Environ.*, 41: 6445–6464.
- Robin L D, Byun D W, Novak J H, et al. 1996. The next generation of integrated air quality modeling: EPA's models-3 [J]. *Atmos. Environ.*, 30 (2): 1925–1938.
- Seaman N L. 2000. Meteorological modeling for air-quality assessments [J]. *Atmos. Environ.*, 34: 2231–2259.
- Sistla G, Zhou N, Hao W, et al. 1996. Effects of uncertainties in meteorological inputs on urban airshed model predictions and ozone control strategies [J]. *Atmos. Environ.*, 30: 2011–2025.
- Smyth S C, Yin D Z, Roth H, et al. 2006. The impact of GEM and MM5 modeled meteorological conditions on CMAQ air quality modeling results in Eastern Canada and the Northeastern United States [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45: 1525–1541.
- 孙健, 赵平. 2003. 用 WRF 与 MM5 模拟 1998 年三次暴雨过程的对比分析 [J]. *气象学报*, 61 (6): 692–701. Sun Jian, Zhao Ping. 2003. Simulation and analysis of three heavy rainfall process in 1998 with WRF and MM5 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (6): 692–701.
- 王式功, 杨德保, 李腊平, 等. 1998. 兰州城区冬半年冷锋活动及其对空气污染的影响 [J]. *高原气象*, 17 (2): 142–149. Wang Shigong, Yang Debao, Li Laping, et al. 1998. A sensitivity experiment of primitive equation model with mixed p- σ coordinates to the exchange between land and air [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 17 (2): 142–149.
- 王颖, 张镭, 胡菊, 等. 2010. WRF 模式对山谷城市边界层模拟能力的检验及地面气象特征分析 [J]. *高原气象*, 29 (6): 1397–1407. Wang Ying, Zhang Lei, Hu Ju, et al. 2010. Verification of WRF simulation capacity on PBL characteristic and analysis of surface meteorological characteristic over complex terrain [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (6): 1397–1407.
- 王自发, 庞成明, 朱江, 等. 2008. 大气环境数值模拟研究新进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 987–995. Wang Zifa, Pang Chengming, Zhu Jiang, et al. 2008. IAP progress in atmospheric environment modeling research [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 987–995.
- 赵洪, 杨学联, 邢建勇, 等. 2007. WRF 与 MM5 对 2007 年 3 月初强冷空气数值预报结果的对比分析 [J]. *海洋预报*, 24 (2): 1–8. Zhao Hong, Yang Xuelian, Xing Jianyong, et al. 2007. The analysis of a Yellow Sea cyclone with WRF and MM5 [J]. *Marine Forecasts (in Chinese)*, 24 (2): 1–8.