

武汉市一次污染过程的局地流场和边界层结构的数值模拟¹

唐子珺¹, 陈龙², 覃军¹, 郑翔¹

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074; 2. 湖南省气象局, 湖南长沙 410118)

【摘要】: 利用 2013 年 11 月武汉市逐日空气质量资料、地面气象观测资料、NCEP/NCAR 再分析资料和 L 波段雷达探空资料, 通过 WRF 模式模拟空气污染生消过程中的局地气象条件变化, 探讨特殊地形条件下边界层结构变化和局地环流在污染物生消过程中的作用和影响。结果表明: (1) 武汉地区当背景环流场强的时候, 由地形引起的局地流场对污染物扩散的影响就弱, 反之当背景环流场弱的时候, 地形对流场影响明显: 夜间为山风, 白天为谷风。夜间山风与偏西北气流及偏东气流在武汉及周边地区辐合, 形成气流汇聚带, 在武汉地区形成一个反复污染带, 即由地形引起的局地流场对污染物扩散的贡献就大; (2) 武汉地区发生空气污染时, 地面湿度较高, 边界层呈上干下湿状态, 其特征为暖而干且有偏东小风, 这导致污染物不断堆积和重污染过程的形成。

【关键词】: 局地流场 边界层结构 数值模拟

【中图分类号】: P426 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2018) 11-2540-08

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201811015

近些年, 由于城市发展迅速, 城市热岛效应越来越显著, 局地流场也越发复杂, 边界层特征的地域性也越来越明显。受城市发展、地理位置、局地地形等因素影响, 我国不同区域的雾霾污染的产生、维持和消亡有各自不同的特点。20 世纪 80、90 年代, 邓家铨等^[1]、邱崇践等^[2]和韩志伟等^[3]分别对福州、兰州和重庆地区进行了局地环流的诊断及模式模拟分析, 发现地形风、山谷风等形成的局地环流是影响污染物堆积的重要因素之一, 风场存在显著的地域变化, 底层大气水平流场与地形、大气层结、下垫面属性等有关, 而垂直风场与热力层结关系密切。苏福庆等^[4]利用历史观测资料总结了北京及华北平原大气污染物输送汇聚带, 发现其不仅具有山地地形特点, 还具有城市热岛环流特点以及季节性摆动特征, 并探讨了其形成的原因。而仲跻芹等^[5]、游春华等^[6]、徐敏等^[7]、刘树华等^[8]分别采用不同的模式模拟了不同条件下京津冀地区的边界层风场, 结果表明京津冀地区存在海陆风、山谷风和城市热岛环流, 季节不同, 天气状况不同, 局地环流耦合位置发生变化, 对空气污染物的输送作用也有所不同。模拟研究局地环流和边界层的变化特点, 对弄清雾霾污染的生消规律尤为重要, 模式能否较好地模拟出边界层的热力、动力结构, 对雾霾污染特征的系统分析有重要的影响。在 WRF 模式模拟中, 不同边界层参数化方案对不同地区、不同时间的气象要素的变化模拟的效果不同。马媛媛等^[9]利用不同的边界层参数化方案(YSU、MYJ 和 ACM2)对新疆地区的大风过程进行模拟, 3 种方案均能模拟出风速、温度、比湿的变化趋势, MYJ 模拟的大风区域更大、受地形影响也更显著; 黄文彦等^[10]通过改变边界层方案对美国北部森林地区进行模拟对比, 结果表明不同的边界层方案均能对白天的边界层动力热力结构达到较好的模拟效

¹收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-05-02

基金项目: 湖北省自然科学基金(2013CFB409)

作者简介: 唐子珺(1992~), 女, 主要从事大气污染研究. E-mail: 847041589@qq.com

通讯作者 E-mail: qinjun@cug.edu.cn

果，模拟的好坏与各边界层参数化方案的湍流混合和卷挟模拟能力的不同而不同。非局地的 YSU、ACM2 方案白天模拟的温度、湿度、混合层高度等相较于 MYJ、UW 方案更接近于实测值，而夜间 YSU 方案高估了机械湍流。YSU、ACM2 方案对温度和水汽混合比模拟效果最好，而局地 MYJ 方案在对风速和风向上的模拟有一定优势。因此，对不同边界层方案在不同地区的适用性的检验是必要的。

武汉市是中国中部的特大城市，是中部地区重要的政治经济和文化中心。近年来，武汉市环境空气质量呈现下降趋势，2013 年年初和秋冬季节尤为突出，严重污染事件较 2012 年显著增加，引起民众和政府的极大关注。武汉位于中国中部的鄂东北大别山和鄂东南幕阜山之间，总的地形为北高南低，以丘陵和平原相间的波状起伏地形为主，中南部为长江、汉水冲积平原，地形平坦开阔。鄂东北大别山为海拔 1000m 以下的低山丘陵，地势东南高西北低，鄂东南幕布山、九宫山为平均海拔 1000m 左右东西走向的褶皱山地，主峰幕阜山海拔 1596m。武汉市全年及冬季（12 月~次年 2 月）主导方向为 NNE 和 NE，冬季的主导风向频率为 16%，静风频率为 11.1%。三面环山的特殊地形，极易造成污染物的堆积。

本文通过对再分析资料、污染物浓度观测资料和模式模拟结果的分析，分析武汉市一次严重污染过程中的污染物浓度变化特征以及局地地形所决定的流场对污染生消规律的影响，以期对武汉地区的空气污染预测预警提供科学依据。

1 资料来源

1.1 污染物浓度资料

污染物浓度资料来源于武汉市环保局，包括 2013 年 11 月日平均的 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 浓度，资料为武汉市 10 个国控点：沉湖七壕、东湖高新、东湖梨园、沌口新区、汉口花桥、汉口江滩、汉阳月湖、青山钢花、吴家山和武昌紫阳的平均值，称之为武汉城区污染物浓度值，并转化为各污染物浓度的分指数。

1.2 地面气象资料

观测资料来自于武汉基本气象站 2013 年 11 月地面观测资料，包括 2m 温度、2m 相对湿度和 10m 风速风向。

1.3 L 波段雷达资料

探空资料来自于武汉国家基本气象站的 GFE (L) 1 型二次测风雷达和 GTS1 型数字式探空仪数据，简称 L 波段雷达探空数据，观测点经纬度为 $114^\circ 03' \text{E}$, $30^\circ 36' \text{N}$ ，海拔高度 33m，观测时间为每日的北京时间 07 时和 19 时，探测温度、湿度、气压、风向和风速等气象要素随高度的变化。

1.4 再分析资料

大气环流形势分析选用资料分别为美国 NCEP/NCAR 再分析资料，变量选取包括海平面气压、各层风场、温度和湿度等，时间选取 2013 年 11 月逐日 4 个时次（已转化为北京时间），水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。

2 模式设置

WRF 模式采用 WRF3.5.1 版，初始场和边界条件的数据为全球数据同化系统 (GDAS) 的 FNL 数据，水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ，每 6h 一次，即每日的 00、06、12、18 时（世界时）。模式采用三层嵌套，第一层模拟区域为东亚地区，第二层为华中地区，第三层包括武汉地区及周边区域，模式中心点的坐标为 30°N 、 110°E 。三层分辨率分别为 $30\text{km} \times 30\text{km}$ 、 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 、 $2\text{km} \times 2\text{km}$ 。模

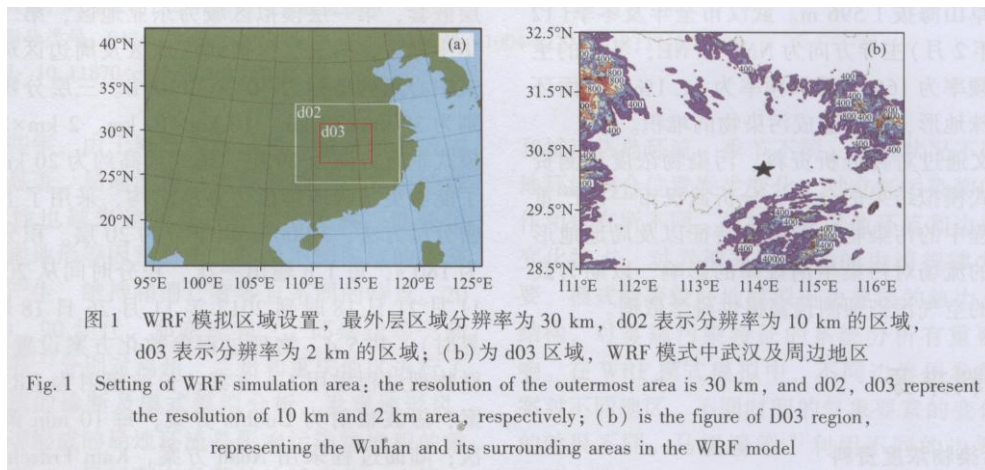
式垂直方向为 29 层，模式顶高约为 20km，为了能够更精确地模拟边界层结构，采用了上疏下密分层方法，3000m 以下分为 20 层。积分步长为 180s，每 1h 输出一次，积分时间从 2013 年 11 月 21 日 18 时到 2013 年 11 月 26 日 18 时（世界时），共 5d。物理过程参数化方案设置如下：微物理过程采用 Lin 方案；长波辐射为 RRTM 方案；短波辐射为 Dudhia 方案，每 10min 调用一次；陆面过程采用 Noah 方案，Kain Fritsch 积云对流参数化方案仅应用于第一、第二层嵌套区域；表面层方案与边界层方案相对应。为了检验 WRF 模式模拟气象要素场的准确性及各边界层方案的差异（YSU、MYJ 和 ACM2），利用武汉气象站地面观测资料和 L 波段雷达探空资料对模拟结果进行统计检验，运用 Pearson 相关系数（R）、平均偏差（MB）、平均误差（ME）、均方根误差（RMSE）等统计量衡量 WRF 模式对 2m 温度、2m 相对湿度、10m 风速风向和 5km 以下近地面的温度、湿度、风速的模拟能力。经过比较发现，3 种边界层方案 2m 温度露点差的模拟值都高于实测值，也就是说模拟的湿度普遍偏高，整体趋势与实测值较为一致，MYJ 平均偏差最小，均方根误差最小，模拟效果好于 YSU、ACM2。而在 10m 风速模拟中，YSU 的效果要好于 MYJ、ACM2。10m 风向模拟中，MYJ、YSU、ACM2 模拟结果较为一致，以偏北、偏东北、偏西北风为主，而实测风向以偏北风为主，模拟结果与观测结果有一定偏差。静风频率的高低影响污染物浓度的堆积效率，MYJ、YSU、ACM2 方案都低估了静风频率，YSU 方案更接近于实测值。综合而言，MYJ 方案在本文中综合模拟效果最好。MYJ 的统计检验的结果见表 1（其他检验结果略），因此本文的边界层参数化方案采用 MYJ 方案，MYJ 采用局地闭合方案，湍流闭合阶数为 1.5 阶闭合，预报湍流动能（TKE，311 出等^[11]）确定扩散系数。MYJ 白天边界层混合作用较弱，夹卷作用也较弱。

将前 6h 作为模式起始时间，不作分析，即从 11 月 22 日 08 时（北京时）到 27 日 02 时作为分析时段。分析区域为第三层模拟区域，该区域包含了武汉及周边地区，东北方向是大别山，东南方向是幕阜山，西边也是山地，武汉位于江汉平原东部。嵌套区域如图 1 所示。

表 1 MYJ 模拟的统计检验结果

Tab. 1 Results of statistical test of MYJ simulation

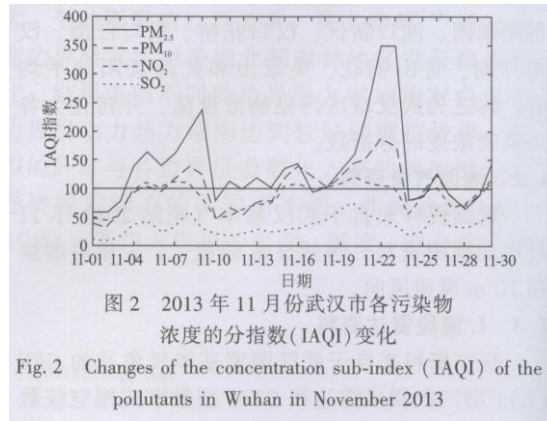
气象要素	T2/°C	T-Td(°C)	WSPD10 ($m \cdot s^{-1}$)	T (°C)	RH (%)	WSPD ($m \cdot s^{-1}$)
MB	1.04	3.61	1.99	-0.59	-3.73	1.63
ME	2.41	4.31	2.55	0.77	7.63	1.72
RMSE	2.00	3.71	2.03	0.85	8.76	1.89
R	0.82	0.71	0.77	0.995	0.839	0.975



3 结果与讨论

3.1 模拟时段的污染特征及天气形势分析

2013年11月份,武汉城区有20d为污染日,其中4d空气质量为重度污染以上等级。污染日的首要污染物为PM_{2.5},当空气质量为良好时首要污染物是NO₂,各污染物的时间变化趋势较为一致。本文所挑选的模拟个例日期为2013年11月22~26日,空气质量等级从严重污染到良好再到轻度污染。2013年11月22~23日,PM_{2.5}、PM₁₀浓度维持在较高水平,而NO₂、SO₂浓度变化平缓,在24日各污染物浓度急剧下降,空气质量等级从严重污染到良好,25日各污染物浓度再次增加,26日达到轻度污染(见图2)。



22~23日武汉地区700hPa高度场上有弱脊波动,暖舌落后于脊,温度槽落后于高度槽,冷平流的加强使得槽在蒙新高地发展并东移,23日夜间冷平流加大,小槽发展成大槽,武汉地区由脊控制转为槽前控制,24日08时受槽控制,冷空气影响武汉地区,风速较大,25日,大槽东移入海,武汉由槽前转为受偏西北气流影响,26日受偏西风影响;22~23日武汉地区受地面高压系统控制,位于高压底部,受偏东气流影响,24日位于冷高压前部,受偏北气流影响,气温下降,25日重新受弱高压控制,26日位于高压底部(图略)。

3.2 近地面局地环流特征

WRF模式模拟时间从北京时11月22日02时开始,将模式模拟的前6个小时作为起始模拟时间,不作研究。白天山地接收太阳辐射较多升温快,夜间山地地面长波辐射冷却降温较快,平原的热力变化相对较慢,山地与平原存在明显的热力差异,这种差异引起了气压的变化,形成山谷风,进而影响到局地流场的变化。因此,武汉及周边地区特殊的地形对局地环流的形成有重要影响。图3是2013年11月22~26日02、08、14、20时的流场。22日08时,武汉地区东北向的大别山以偏北的越山气流和山风为主,东南向的幕阜山以偏东的绕流为主,在武汉东南部形成了气流汇聚带。22日08时后,沿113.5°~114.5°E,29.5°~30.5°N的气流汇聚带随着山风转为谷风而逐渐向东南移动,并在14时后消失,当日夜间谷风转为山风,气流汇聚带又重新出现。23日随着西北气流的加入,受幕阜山地形影响,武汉地区出现涡旋,整体水平风速偏弱,由偏北气流、偏东气流和局地环流共同作用造成了污染物的堆积,使得污染浓度维持在一个较高的水平。之后风向逐渐变化,涡旋朝东北方向移动,在23日14时后消失,而西北气流与偏东的绕山气流相遇,停滞在幕阜山与大别山之间。24日02时,随着大的环流形势的变化,偏西北冷空气入侵,风速明显增大,污染物浓度迅速下降。25日风速减小,大气对污染物的移除能力减弱,当日20时风向已经开始转变,由谷风转为山风,来自幕阜山与大别山的气流再次汇聚,随着西北弱气流的加入,在武汉地区形成涡旋,进而造成污染物的堆积。26日凌晨受山风的影响气流汇聚带又开始形成,白天局地环流消失,午夜偏北风加强,污染物加速扩散。可见武汉地区当背景环流场强的时候,由地形引起的局地流场对污染物扩散的影响就弱,反之当背景环流场弱的时候由地形引起的局地流场对污染物扩散的贡献就大。

02时、08时在幕阜山山地南部有明显的偏南山风,而北部是弱的偏北风,气流由北部的大别山吹向江汉平原。近地面有下沉运动,气流在30.5°~31.5°N附近辐合。23日14时,幕阜山山风转为谷风,950hPa高度有下沉的偏南气流,使得在30°N附近形成了垂直的局地环流。由于北部的大别山山脉海拔较低,形成越山气流,30.5°N附近有弱的上升运动,与950hPa的偏

南气流形成垂直局地环流，使得在该区域内形成了复污染带。24日，由于强大的背景环流场，近地面受较强偏北风控制，污染物加速移除扩散（图略）。

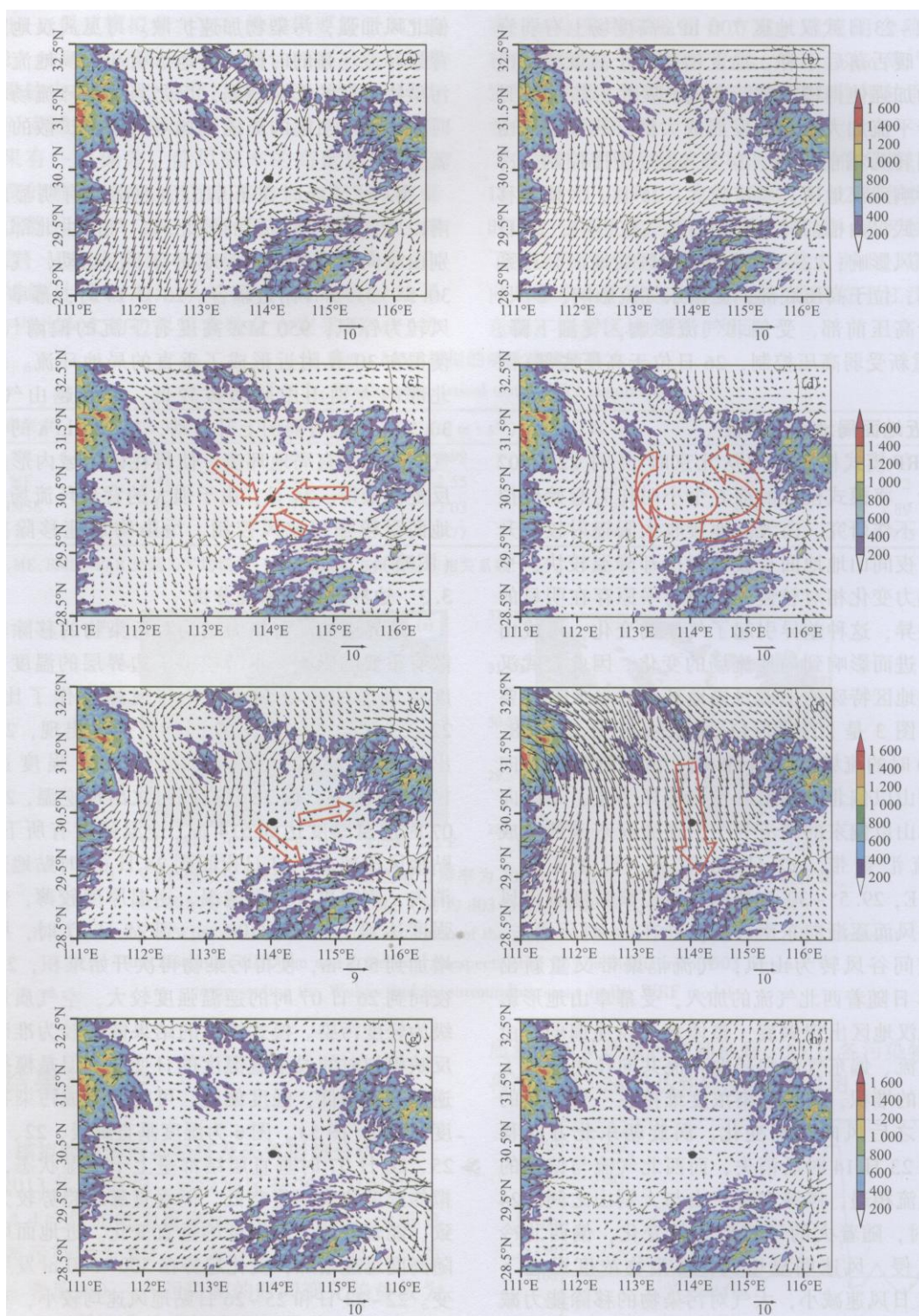


图3 2013年11月22日08时(a)、14时(b), 23日02时(c)、08时(d)、14时(e), 24日02时(f), 25日20时(g), 26日02时(h)的流场

Fig. 3 Flow field of 8 : 00(a) and 14 : 00(b) on the 22th, 02 : 00(c), 08 : 00(d), 14 : 00(e), 02 : 00(f) on the 24th, 20 : 00(g) on the 25th, and 02 : 00(h) on the 26th in November, 2013

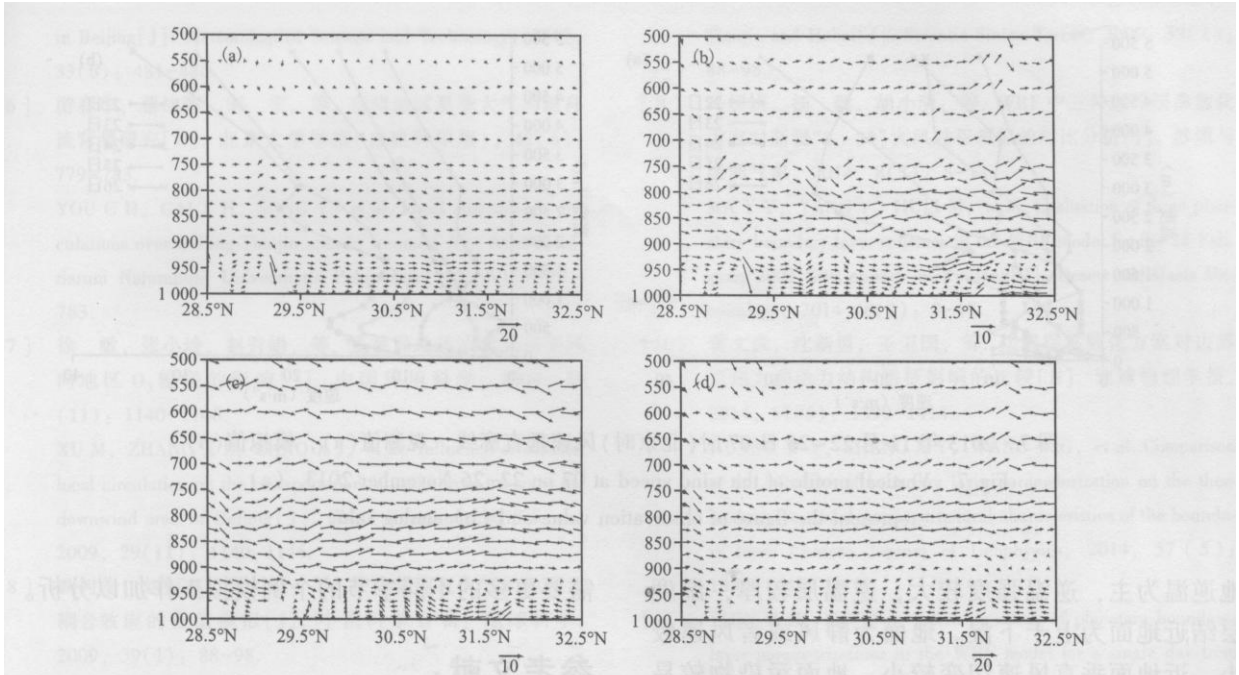


图4 北京时间2013年11月23日02时(a)、08时(b)、14时(c)、20时(d)的经向环流和垂直速度(扩大30倍)剖面图
 Fig. 4 Figure of meridional circulation and vertical velocity (30 times) profiles at 02(a), 08(b), 14(c) and 20(d) on November 23, 2013

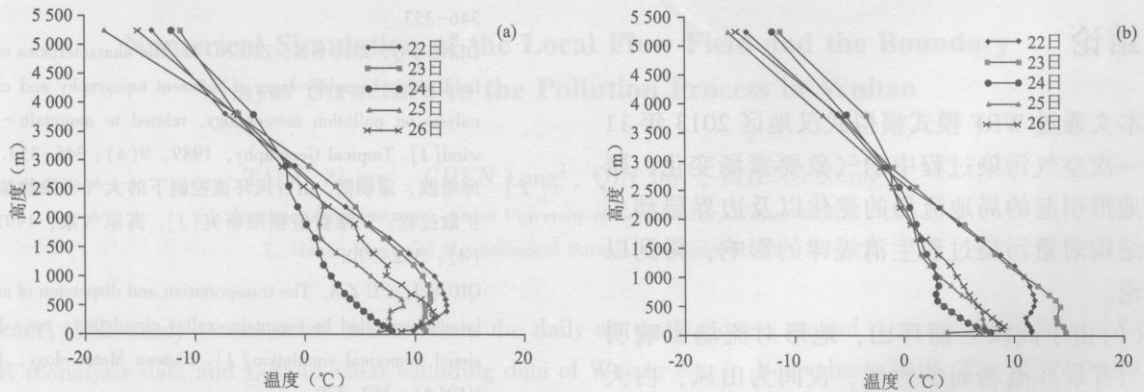


图5 2013年11月22~26日07时(北京时)温度垂直廓线, 观测值(a), 模拟值(b)
 Fig. 5 Vertical profile of the temperature at 07 on 22-26 November 2013. (a), (b) represent the figure of observation value and analog value

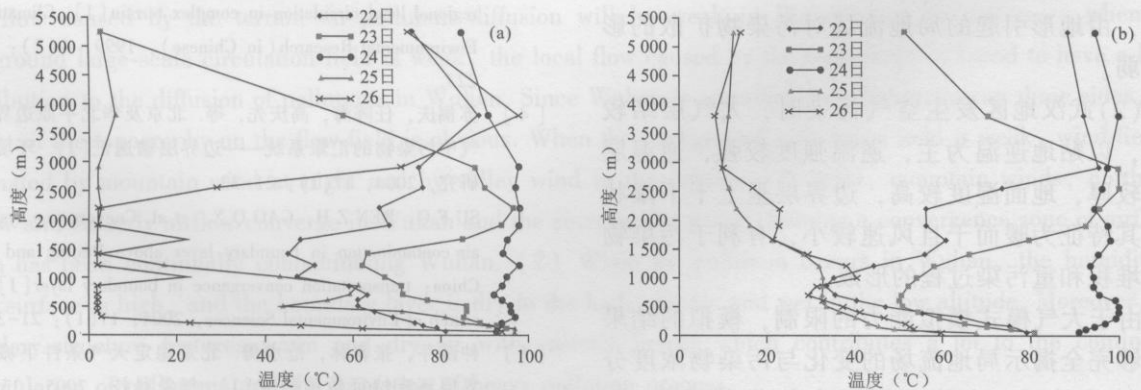
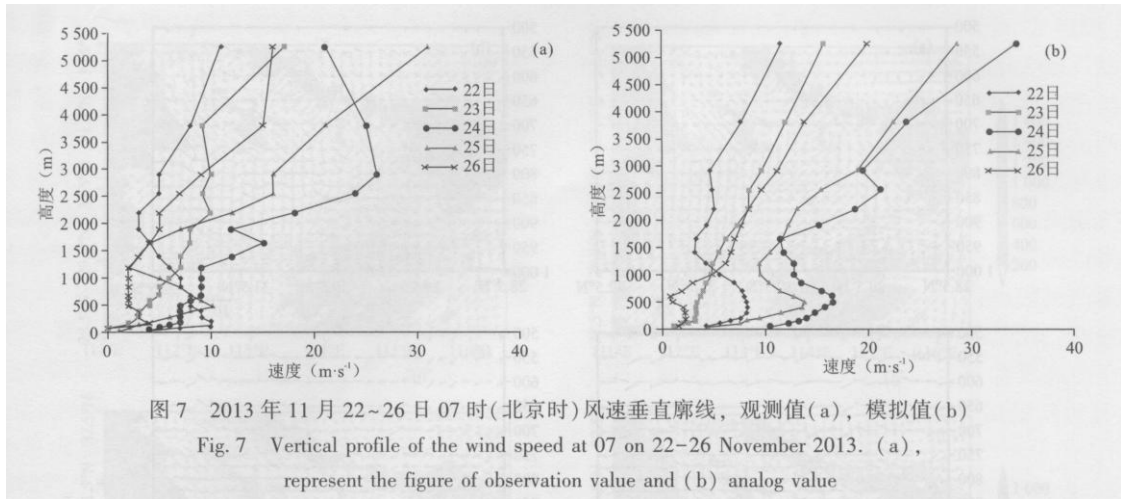


图6 2013年11月22~26日07时(北京时)湿度垂直廓线, 观测值(a), 模拟值(b)
 Fig. 6 Vertical profile of the humidity at 07 on 22-26 November 2013. (a), (b) represent the figure of observation value and analog value



3.3 边界层结构特征分析

边界层的动力热力结构对污染物的移除和扩散有重要的影响, 本节模拟了边界层的温度, 湿度和风速的垂直变化, 并与观测值作了比较。22~23 日、25~26 日 07 时均有逆温出现, 22 日出现贴地逆温, 其厚度达 377m, 强度达到 1.1 μ r/100m, 而 22 日夜间再次出现逆温, 23 日 07 时逆温厚度达到 514m, 逆温强度有所下降, 贴地风速减小。23 日夜间到 24 日 07 时贴地逆温消失, 夜间再次出现逆温, 逆温厚度较薄, 但是强度达到了 4.3T/100m, 到 25 日 07 时, 厚度增加到 505m, 使得污染物再次开始堆积, 25 日夜间到 26 日 07 时的逆温强度较大, 空气质量等级为轻度污染。模式模拟的结果能够较为准确地反映模拟时间段垂直温度的日变化, 但是模拟的逆温高度偏低, 强度偏弱, 可能会造成污染物浓度的低估(图 5)。图 6 为湿度垂直廓线, 22、23、25、26 日 07 时垂直层结都呈上干下湿状态, 模拟的湿度比实测值略低, 但垂直廓线趋势较为一致, 能较好地表现湿度的垂直变化。近地面风速随高度迅速增加, 变化趋势在 300-500m 发生改变。22~23 日和 25~26 日贴地风速均较小, 利于污染物的堆积。观测结果与模拟结果有较好的一致性, 模式能够很好地模拟垂直风速变化, 但地面风速模拟值偏大(图 7)。

当武汉地区发生空气污染时, 大气处于稳定状态, 近地层温度随高度增加而增加, 逆温以贴地逆温为主, 逆温强度较大, 逆温层较厚, 湿度层结近地面为上干下湿。地面为静风或者风速较小, 近地面垂直风速切变较小, 地面污染物较易堆积。不难发现污染日的边界层特征为暖而干且风速较小。

4 结论

本文通过 WRF 模式模拟武汉地区 2013 年 11 月的一次空气污染过程中的气象要素场变化, 研究了地形引起的局地流场的变化以及边界层动力热力结构对重污染过程生消规律的影响, 得到以下结论。

(1) 由于武汉三面环山, 地形对流场影响明显。当背景环流场弱的时候, 夜间为山风, 白天为谷风。夜间山风与偏西北气流及偏东气流在武汉及周边地区辐合, 形成气流汇聚带, 在武汉地区形成一个反复污染带, 反之当背景环流场强的时候, 由地形引起的局地流场对污染物扩散的影响就弱。

(2) 武汉地区发生空气污染时, 大气层结较稳定, 以贴地逆温为主, 逆温强度较强, 逆温层厚度较厚, 地面湿度较高, 边界层呈上干下湿状态, 其特征为暖而干且风速较小, 有利于污染物不断堆积和重污染过程的形成。

由于大气模式模拟能力的限制, 模拟的结果不能够完全揭示局地流场的变化与污染物浓度分布的精确关系, 有待于利用大气化学模式(如 WRF-chem 模式)对相关研究做进一步完善, 此外本文只做了一个个例的模拟研究, 下一步工作仍需要更多的不同

季节的个例模拟工作加以分析。

参考文献:

[1] 邓家铨, 朱赛霞, 郑敏. 不同地形边界层风场特性及山谷风污染气象个例分析[J]. 热带地理, 1989, 9(4): 346-353.

DENG J Q, ZHU S X, ZHENG M. The characteristics of wind field within boundary layer of different topography and case analysis on pollution meteorology, related to mountain - valley wind [J]. Tropical Geography, 1989, 9(4) : 346-353.

[2] 邱崇践, 蒲朝霞. 山谷风环流控制下的大气污染物输送和扩散过程: 二维数值模拟研究[J]. 高原气象, 1991, 10 (4) : 362-370.

QIU C J, PU Z X. The transportation and dispersion of air pollutants controlled by mountain - valley circulation: two - dimensional numerical simulation [J] • Plateau Meteorology, 1991, V10(4) : 362-370.

[3] 韩志伟, 张美根, 雷孝恩. 复杂地形局地环流的数值模拟研究[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(2): 210-223.

ZHANG M G, HAN Z W, LEI X E. Numerical simulation of regional local circulation in complex terrain [J] • Climatic and Environmental Research(in Chinese) , 1999, 4(2): 210- 223.

[4] 苏福庆, 任阵海, 高庆先, 等. 北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇[J]. 环境科学研究, 2004, 17(1) : 21-33.

SU F Q, REN Z H, GAO Q X, et al. Convergence system of air contamination in boundary layer above Beijing and North China: transportation convergence in boundary layer[J]. Re-search of Environmental Sciences, 2004, 17(1) : 21 -33.

[5] 仲跻芹, 张朝林, 范水勇. 北京稳定天气条件下城市边界层环流特征数值研究[J]. 气象科技, 2005, 33(6): 481-486.

ZHONG J Q, ZHANG Z L, FAN S Y. Numerical study of circulation characteristics in urban boundary layer in stable weather in Beijing[J]. Meteorological Science and Technology, 2005 , 33(6): 481-486.

[6] 游春华, 蔡旭晖, 宋宇, 等. 京津地区夏季大气局地环流背景研究[N]. 北京大学学报(自然科学版), 42(6): 779-783.

YOU C H, CAI X H, SONG Y, et al. Local atmospheric circulations over Beijing-Tianjin area in summer[N]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 42 (6): 779 - 783.

[7] 徐敏, 张小玲, 赵秀娟, 等. 夏季局地环流对北京下风向地区O₃输送的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29 (11) : 1140-1146.

XU M, ZHANG X L, ZHAO X J, et al. Influence of summer local circulation on the transportation of ozone from urban to the downwind area in Beijing [J]. China Environmental Science, 2009, 29(11) : 1140-1146.

[8] 刘树华, 刘振鑫, 李炬, 等. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟[J]. 中国科学D辑: 地球科学, 2009, 39(1) :

88-98.

LIU S H, LIU Z X, LI J, et al. Numerical simulation of the coupling effect of local circulation in the atmosphere of Beijing, Tianjin and Hebei[J]. Scientia Sinica Terrae, 2009, 39(1): 88-98.

[9] 马媛媛, 杨毅, 胡小明, 等. WRF 中三种边界层参数化 方案对新疆“2·28”大风过程模拟的对比分析[J]. 沙漠与 绿洲气象, 2014, 8(3): 8-18.

MA Y Y, YANG Y, HU X M, et al. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model for the 28 February 2007 Gust episode in Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2014, 8(3): 8-18.

[10] 黄文彦, 沈新勇, 王卫国, 等. 边界层参数化方案对边界 层热力和动力结构特征影响的比较[N]. 地球物理学报, 2014, 57(5) : 1399-1414.

HUANG W Y, SHENG X Y, WANG WG, et al. Comparison of the influence of boundary layer parameterization on the thermodynamic and dynamic structural characteristics of the boundary layer Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57 (5): 1399-1414.

[11] SHIN H H, HONG S. Intercomparison of planetary boundary- layer parametrizations in the WRF model for a single day from CASES-99[J]. Bound. Layer Meteor, 2011, 139(2): 261 - 281.