

杨婷, 王喜全, 张伟, 等. 2017. 人为热排放的引入对北京地区精细模拟的改进 [J]. 气候与环境研究, 22 (1): 1-9. Yang Ting, Wang Xiquan, Zhang Wei, et al. 2017. The improvement in model simulations of the atmospheric condition in Beijing with consideration of anthropogenic heat [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (1): 1-9, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15185.

人为热排放的引入对北京地区精细模拟的改进

杨婷¹ 王喜全¹ 张伟² 王自发¹

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国民用航空局空中交通管理局航空气象中心, 北京 100021

摘要 将人为热排放纳入到已耦合城市模块 Urban Canopy Model (UCM)的中尺度气象模式 Weather Research and Forecasting (WRF) 中, 探讨了人为热排放对于北京地区精细化模拟的重要意义, 其影响主要体现在以下几个方面: 1) 可有效改善气象要素的模拟效果, 特别是对于大气边界层高度的显著性改善, 该变量是控制空气质量模式中污染物垂直扩散的关键因子; 2) 可较好地再现城区流场及温度场, 使热岛强度和中心配置更接近实况; 3) 可明显改善数值模式对于污染物垂直分布特征的模拟。

关键词 人为热 WRF 模式 热岛效应 大气边界层高度

文章编号 1006-9585 (2017) 01-0001-09

中图分类号 P45

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15185

The Improvement in Model Simulations of the Atmospheric Condition in Beijing with Consideration of Anthropogenic Heat

YANG Ting¹, WANG Xiquan¹, ZHANG Wei², and WANG Zifa¹

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Aviation Meteorological Center of China, Beijing 100021

Abstract Anthropogenic heat (AH) was considered in the Weather Research and Forecasting (WRF) model that is coupled with the urban canopy model (UCM) to investigate its effects on model simulations of the atmospheric condition in Beijing. Results indicated that: 1) The consideration of AH can significantly improve the simulation of meteorological variables, especially in the simulation of the boundary layer height, which is a key factor that determines the vertical dispersion of pollutants in air quality models; 2) The model can better reproduce the spatial patterns of wind and temperature fields with the consideration of AH; 3) The vertical distribution of pollutants in the model simulation is also improved with the consideration of AH.

Keywords Anthropogenic heat, WRF model, Heat islands effect, Boundary layer height

收稿日期 2015-08-11; 网络预出版日期 2016-05-24

作者简介 杨婷, 女, 1984 年出生, 博士, 主要从事大气边界层理化结构研究。E-mail: tingyang@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41305115, 环保公益性行业科研专项 201309011、201409001, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 2014CB447900, 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 2014AA06AA06A512

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41305115), Commonweal Project in Ministry of Environmental Protection (Grants 201309011 and 201409001), National Key Project of Basic Research (973 Program, Grant 2014CB447900), National High Technology Research and Development Program of China (863 Program, Grant 2014AA06AA06A512)

1 引言

数值模式是研究大气污染问题的重要手段，在大气污染时空变化规律、形成机理及控制措施等研究方面已取得了一系列的重要成果（王自发等，2006；郑飞等，2007），但现有模式对霾污染的预报效果仍不尽理想。

经济的加速腾飞发展使得大量人口涌入城市，人类活动使城区形成了独特的边界层结构和小尺度气候特征。城市化进程的加剧，导致人类向大气排放的热源逐年增加，人为热源已经成为不可忽略的因子（霍飞和陈海山，2010），人为热所包含的物理参数对于区域气象条件的精细化模拟有很大的敏感度，是山地平原风、热岛效应、污染南北两重天等边界层过程能否被解析（王喜全等，2008；董芬等，2013），以及模式能否正确处理近地面层的热量、动量以及水汽分布与变化特征的决定性因子之一。何晓凤等（2007）利用多尺度模式探讨了人为热的影响，发现人为热直接影响着区域气象模式的精细化模拟。Miao et al.(2009)利用 WRF-UCM 模式模拟北京城市气候的一些特性，并同观测资料进行了对比，发现考虑了人为热源模式能更好地模拟出城市热岛强度的日变化、空间分布，以及风速、风向的日变化。蒋维楣和陈燕（2007）针对南京人为热研究结果表明，人为热源引入可使气温、湍流动能增加，大气不稳定性增加，混合层高度明显升高。以往多数研究只探讨了人为热排放对气象因素的影响，对于污染物浓度垂直分布的影响研究较少涉及。

作为一个人口超千万的超大城市，北京受到了明显的人为热排放影响，且呈现逐年加剧的趋势（李兴荣等，2006；王郁和胡非，2006）。而与其它超大城市相比，北京三面环山，复杂地形与超大人口的叠加效应更是为区域气象模式的精细化模拟提出了进一步的挑战。为改善北京地区区域模式的精细化模拟精度，本文将人为热排放纳入到已耦合城市冠层模型 UCM (Urban Canopy Model) 的中尺度气象模型 WRF (Weather Research Forecast) 中，探讨了人为热排放对于北京地区精细化模拟的影响，特别是对城市群相互影响息息相关的污染物垂直分布特征的重要影响，该研究可为后续霾污染的准确预报奠定重要基础。

2 资料与试验方案

2.1 数值模式及区域设置

本文使用 WRFV3.3 进行模拟研究，各参数化方案选择详见表 1。为更好地评估城市热岛效应，在 WRF 中耦合了高级的 Noah 模型 (Ek et al., 2003) 以及陆面模型 LSM (Chen and Dudhia, 2001)，Noah-LSM 模型可提供陆表感热与潜热、陆表与边界层下层的温度 (Chen and Dudhia, 2001; Ek et al., 2003)，除此以外，为了更好地表征热量、动量以及水汽在中尺度模型中的交换过程，在 WRF 模型中同时耦合了单层城市冠层模型 UCM (Kusaka and Kimura, 2004)，它考虑了城市中建筑物以及冠层的影子、太阳高度角的日变化、短波与长波辐射效应、冠层中的风廓线、由于人类活动引起的人为热、来自于屋顶、墙面以及路面的多层热量交换方程。

表 1 物理过程及参数化方案

Table 1 Physical processes and parameterization schemes

物理过程	参数化方案
微物理	WRF Single-Moment 3-class
积云对流	No Cumulus
长波辐射	RRTM
短波辐射	Dudhia
陆面过程	Noah Land Surface Model
近地层	MM5 similarity
边界层	Yonsei University Scheme (YSU)

本研究模式系统设定为 4 层嵌套网格（见图 1），第一层网格中心设定为（35°N，110°E），覆盖东亚地区，水平分辨率为 81 km，水平网格数为 83×65；第二层网格为华北地区，水平分辨率为 27 km，水平网格数为 61×58；第三层网格为京津冀地区，水平分辨率为 9 km，水平网格数为 79×70；第四层网格为北京地区，水平分辨率为 3 km，水平网格数为 73×64。模式垂直方向分为 28 层，其中 1.5 km 以内有 10 层，第四重网格区域为本研究的重点。研究中所采用的资料包括 NCEP/NCAR 每 6 小时一次的 1°（纬度）×1°（经度）的 FNL 再分析资料作为 WRF 模式初始场，模拟时间为 2008 年 7 月 22 日 08:00（北京时间，下同）至 29 日 23:00，其中 2008 年 7 月 22 日 08:00 至 24:00 为热启动时段。

2.2 人为热排放资料介绍

本文在考虑人为热排放时，参考了佟华等

(2004)对北京市人为热源的估算,认为北京市人为热源最大值为 170 W/m^2 ,主要来源于汽车尾气排放的废热、工业生产的能源消耗以及城市建筑物的各种能量消耗,总量排放日排放曲线存在早晨(约 09:00)和傍晚(约 17:00)两个峰值。

2.3 试验方案设计

为探讨人为热排放对数值模式精细化模拟的影响,本小节共设置了两组敏感性试验(具体方案见表 2)。试验 A、B 都采用 UCM 城市冠层模型,及可以代表北京地区城市化情况的 MODIS 下垫面,所不同的是 A 方案没有考虑人为热排放,而试验 B 方案纳入了人为热排在模型中,通过对比 A、B 两试验,可清晰地分析出人为热排放的影响。

表 2 两组模拟试验的设计对比

Table 2 Model settings for the two experiments

试验	城市模型	下垫面	人为热
试验 A	UCM	MODIS	不引入
试验 B	UCM	MODIS	引入

2.4 检验方法

平均偏差 MB (Mean Bias, 记为 M_B) 是指模拟值与观测值的偏差之和除以样本数,它是代表一组样本中模拟值的总体偏差情况,不分正负。其公式为

$$M_B = \frac{1}{N} \sum_i^n (C_m - C_o), \quad (1)$$

其中, C_m 为同一物种模拟浓度值, C_o 为同时刻观测值, N 、 n 都为样本数。

正态平均偏差 NMB (normalized Mean Bias, 记为 N_{MB})

$$N_{MB} = \frac{\sum_i^n (C_m - C_o)}{\sum_i^n C_o} \times 100\%. \quad (2)$$

平均偏差是指模拟值与观测值的偏差之和除以观测值之和(不分正负),是将偏差结果使用观测值之和进行了正态化处理。

正态平均误差 NME (normalized Mean Error)

$$N_{ME} = \left| \frac{\sum_i^n (C_m - C_o)}{\sum_i^n C_o} \right| \times 100\%. \quad (3)$$

平均误差是指模拟值与观测值的偏差绝对值之和除以观测值之和(结果为正数),是将模式误差结果使用观测值之和进行了正态化处理。

3 结果与讨论

3.1 天气形势分析

在研究时段内,北京地区位于华北地区低压系统东南边缘,受系统性偏南风持续控制,低空 850 hPa 华北地区一直处于暖舌的影响,并出现弱暖平流。在此期间,北京地区并没有出现显著的降水及强风天气过程,天气系统一直都处于静稳状态,此天气形势是北京地区夏季形成“城市热岛”的重要天气系统(王喜全等, 2006)。

3.2 人为热排放的影响

3.2.1 对地面风场的影响

受篇幅所限,本文共挑选了 3 个代表性气象站点对其模拟效果进行评估,其中奥体及朝阳站位于城区,观象台位于郊区。由于对污染物扩散影响最为显著的气象要素为风,本文主要对风向以及风速进行了详细比对。试验 A、B 在各站点风速的统计分析结果如表 3 所示。比较两试验的检验结果可以看出,考虑了人为热的影响后,在城区站(奥体站和朝阳站)平均风速增大 $\sim 1 \text{ m/s}$,由于郊区受人为热的影响较小,因而在风速的变化上较城区都较弱,但根据观象台的站点可见,人为热仍可对其风速有约 0.2 m/s 的增加。试验 A、B 结果在奥体、朝阳及观象台站的观测模拟对比分别如图 2、3、4 所示。两组试验结果模拟风场基本能够还原实测结果,考虑人为热的试验 B 关于风速模拟的 NMB 基本维持在 10% 左右,而未考虑人为热的试验 A 的 NMB 可达到 40%~50%,可见考虑了人为热后关于风速的模拟效果有了一定的改善,但仍存在一定偏差的原因是:一方面由于北京地处太行山脚下,地形复杂,模式难以准确表征实际地形高度,从而影响模拟效果(何建军等, 2014);另一方面北京受渤海海陆风、燕山太行山地形山谷风环流,以及京津冀城市群热岛环流三者共同作用,也增加了对北京地区大气底层环流的模拟难度(刘振鑫等, 2012)。

3.2.2 对边界层高度的影响

数值模式中,边界层高度是决定污染物垂直扩散的关键因子,因此本小节特别分析研究了人为热排放对边界层高度的影响。从图 5 的对比结果可见,考虑人为热影响后边界层高度的模拟结果与激光雷达反演结果较为一致,呈现单峰型日变化特征:

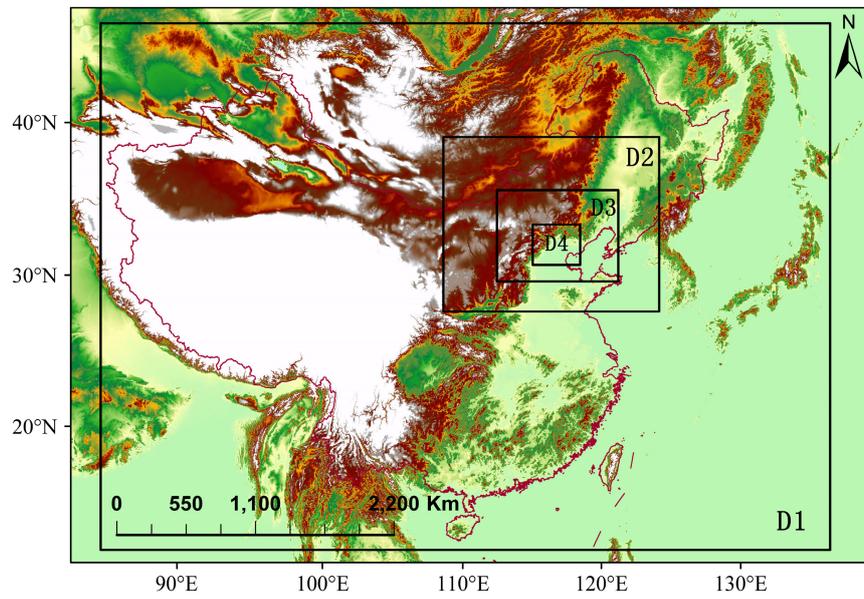


图1 模拟系统区域设置

Fig. 1 Model domains in the present study

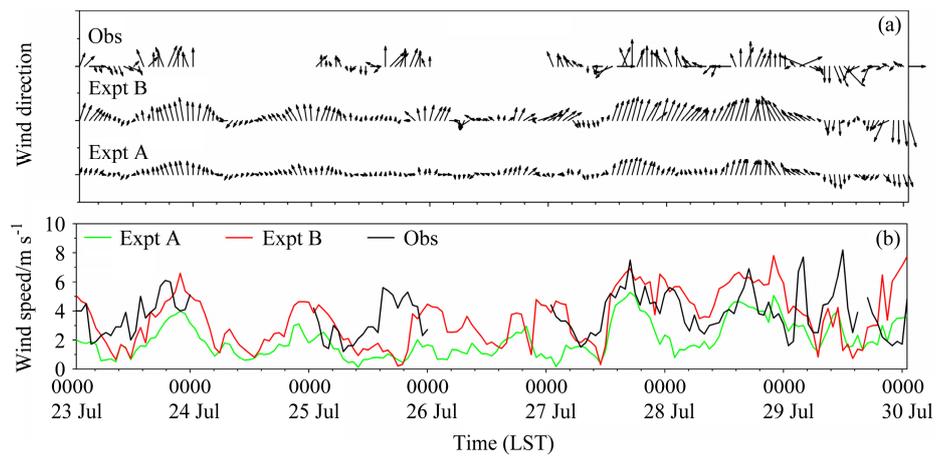


图2 2008年7月23~29日奥体站10 m (a) 风矢量、(b) 风速观测模拟对比

Fig. 2 Comparisons of model simulations and observations of 10-m (a) wind vector and (b) wind speeds at Aoti station during 23–29 Jul 2008

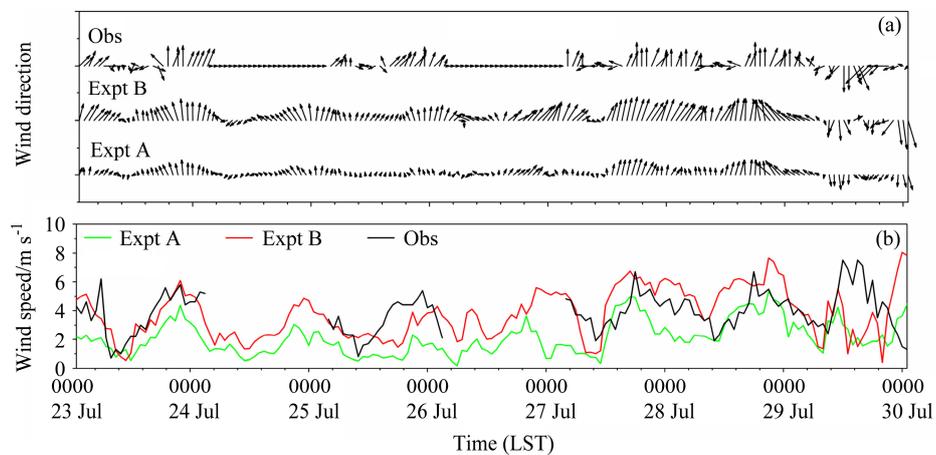


图3 同图2, 但为朝阳站

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for Chaoyang station

表 3 2008 年 7 月 23~29 日风速观测模拟结果统计分析

Table 3 Statistical parameters of wind speed during 23-29 Jul 2008

站点	观测平均值/ $m s^{-1}$	模拟平均值/ $m s^{-1}$		平均偏差/ $m s^{-1}$		RMSE/ $m s^{-1}$		正态平均偏差		正态平均误差	
		Exp A	Exp B	Exp A	Exp B	Exp A	Exp B	Exp A	Exp B	Exp A	Exp B
奥体	3.7	2.1	3.7	-1.2	0.3	2.2	2.2	34.5%	9.0%	50.0%	48.0%
朝阳	3.8	2.2	3.9	0.4	-1.3	2.2	2.2	34.7%	10.7%	49.2%	48.9%
观象台	2.6	2.6	2.8	0.2	0.4	1.8	1.7	7.7%	15.5%	53.3%	43.1%

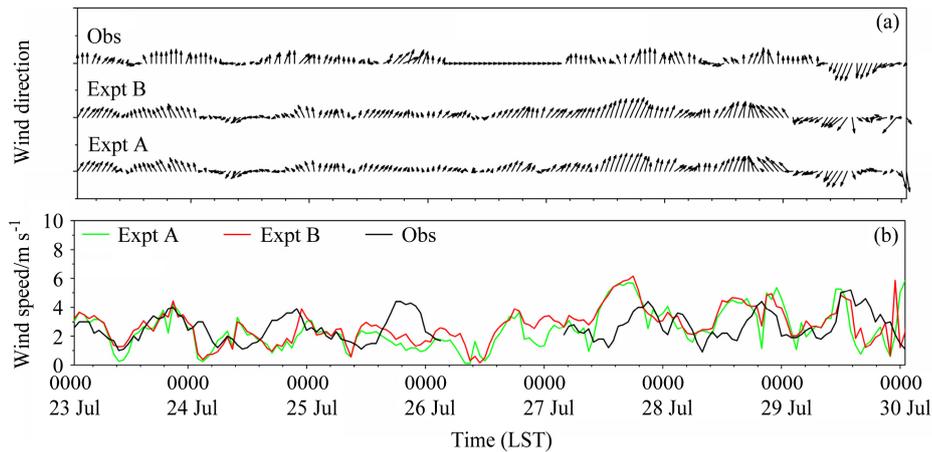


图 4 同图 2，但为观象台

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for Guanxiangtai station

07:00 至 08:00 出现谷值,随后边界层高度迅速抬升,并于 16:00 至 17:00 左右达到该日峰值。由于本小节关注的个例为夏季霾污染天,一般晴朗状况下边界层峰值出现时间多为 14:00 至 15:00 左右,可能由于气溶胶的存在影响了太阳辐射,延缓了日峰值的出现时刻。到 19:00,日落后短波辐射对地面的供热过程消失,地表开始因长波辐射冷却降温,导致大气边界层自下向上降温,并逐渐成为稳定大气边界层,稳定层结时湍流在运动中要反抗重力做功,消耗动能,从而对湍流交换起到抑制作用,这使得夜间稳定边界层的发展要比白天混合层的发展弱,厚度也小(涂静, 2011)。

中国科学院大气物理研究所铁塔分部观测站点地处典型城市区域,人为热影响显著,在数值模式中考虑了人为热的影响后,可较好地与实际情况吻合,改善边界层高度的模拟。具体体现在夜间边界层高度的显著升高,由于夜间太阳辐射为 0,人为热在边界层内部的加热作用较之白天而言更为凸显,人为热的排放增加了边界层内热动力运动,有助于边界层高度的抬升;而在白天人为热对边界层的影响则比较微弱,总体而言,考虑人为热影响后,可显著改善夜间边界层模拟偏低的状态,使现有模拟结果与激光雷达反演结果较为吻合。

3.2.3 对边界层结构的影响

城市热的排放导致城市区域大气运动的变化,以往研究已总结了城市区域空气环流的模型(如图 6 所示),由于城市热的排放,城市中气团增温上升至逆温层以下,然后向周边地区辐散,而近地面周围地区较冷空气向城市区域辐合,即在城市区域由于城市热排放所造成的效果为近地层为辐合,而在逆温层以下却是辐散的气流。本文将在此基础上通过数值模式对北京地区由于城市热产生的局地空气环流做进一步分析。

为了研究城市热排放对垂直上温度的影响,我们制作了北京市中心(39°54'27"N, 116°23'17"E)由于城市热排放温度改变的剖面图(如图 7 所示)。可以看到在边界层中下部,城市热排放带来的效果都是增温,夜间及凌晨增温最为明显,最大增温在 3°C 左右,这是因为在这一时段中,太阳辐射较弱,人为热排放影响相对更为明显,且边界层高度低,大气湍流交换范围较小,热量更不容易散失,但在午后边界层高度附近,城市热排放的结果却是降温,最大降温约为 2°C。主要可能有两方面原因引起:一方面是由于边界层顶气流的辐散(图 8)使得高层冷空气下沉,而午间边界层高度最高,该处气团温度更低,进而引起边界层顶的降温;另一方

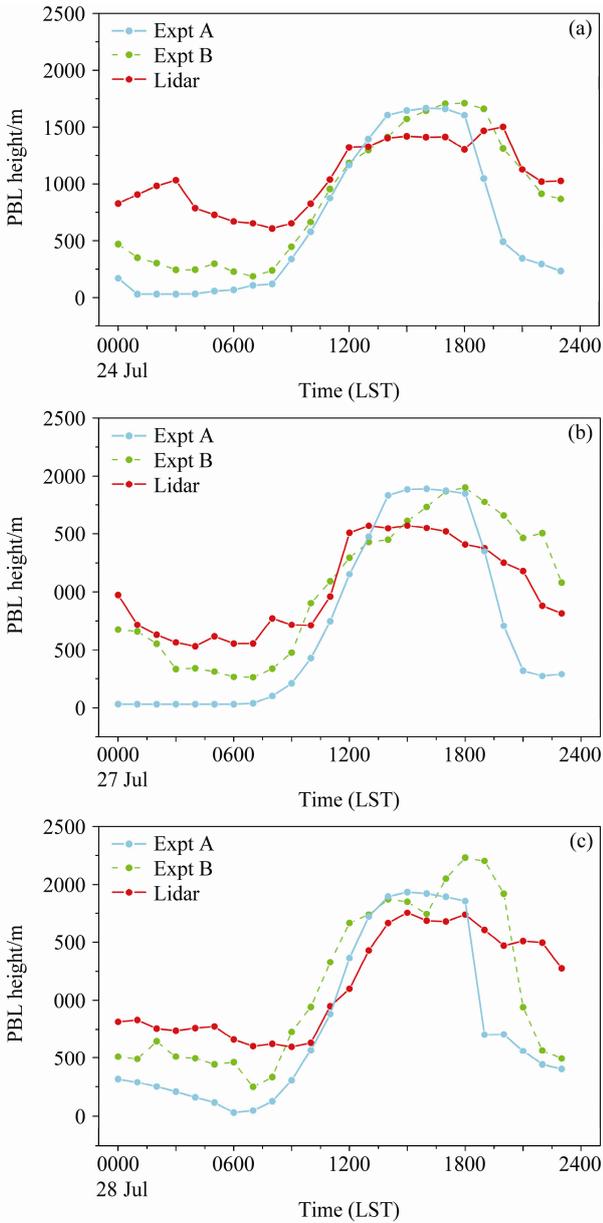


图5 WRF 中考虑了人为热影响后模拟 2008 年 7 月 (a) 24 日、(b) 27 日、(c) 28 日边界层高度与激光雷达反演结果的比较
Fig. 5 Comparisons of boundary layer height between lidar retrieval and model simulation with the consideration of anthropogenic heat on (a) 24 Jul, (b) 27 Jul, and (c) 28 Jul 2008

面，由于来自地面的暖气团在辐散上升过程中，周围气压变低，气团膨胀绝热降温。关于人为热引发的边界层顶降温过程，本研究结果与 Shahgedanova et al. (1997) 针对 Moscow 的垂直观测结果相吻合。

结合以上分析，我们改进了城市区域空气环流示意图 (图 9)，城市热排放导致地面温度的上升，从而造成近地层明显的辐散与上升气流，较暖的上升气流造成了低层大气的明显升温，这样的上升作

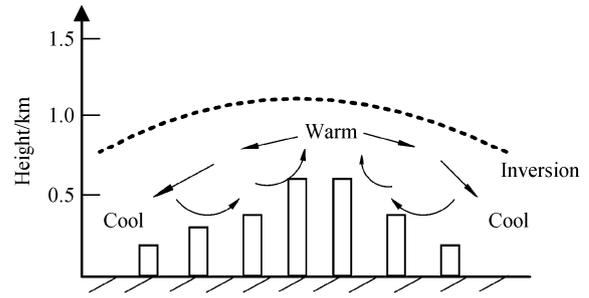


图6 原有城市区域空气环流示意图
Fig. 6 Diagram of original atmospheric circulation in urban area

用持续到边界层顶附近就明显减弱，上升气流转为向周围地区辐散，在这样辐散作用的引导下，更高层空气明显下沉。

3.2.4 对污染物垂直分布的影响

在充分考虑城市因素后，数值模式模拟边界层高度与真实结果较为接近，下面将讨论改进后的边界层高度对于污染物浓度模拟的影响。本节分别在城区及郊区各挑选了一个代表性站点 (北大站点地处城区，昌平站点地处郊区)，基于区域空气质量模式 NAQPMS，讨论人为热对 PM₁₀ 浓度的影响。从图 10 可见，试验 A、试验 B 基本都可模拟出 PM₁₀ 在上述两站点的变化规律，两组试验结果的趋势基本一致，较之试验 B 而言，未考虑人为热试验结果明显高估地面 PM₁₀ 浓度，并且这种现象在城区 (北大站) 要比郊区 (昌平站) 更为明显，一般情况下，PM₁₀ 地面浓度较高，考虑了人为热的影响之后，抬升了边界层高度、加大了近地面污染物的扩散空间，进而降低了地面 PM₁₀ 浓度；人为热对边界层的抬升作用在城区要比郊区明显，因而人为热对城区污染物的影响也要比郊区显著，在近地层 PM₁₀ 浓度的模拟中，考虑人为热试验的结果略胜一筹。

由于污染物的垂直分层连续观测非常有限，因此本文未能获取研究时段中 PM₁₀ 的有效观测数据，而各物种污染物的扩散遵循相似规律，因而本文评估了 O₃ 的垂直模拟效果。图 11 即为在大气物理研究所铁塔分部站点处近地面及 280 m 处 O₃ 的模拟观测比对，从图 11a 中可见，试验 A 结果中多处出现了 O₃ 浓度模拟结果为 0 的情况 (在图中已用黑框标出)，试验 B 结果并未出现零值，与观测较为接近，可见未考虑人为热会过分夸大 O₃ 夜间的滴定效应；图 11 b 为同站点 280 m 处的

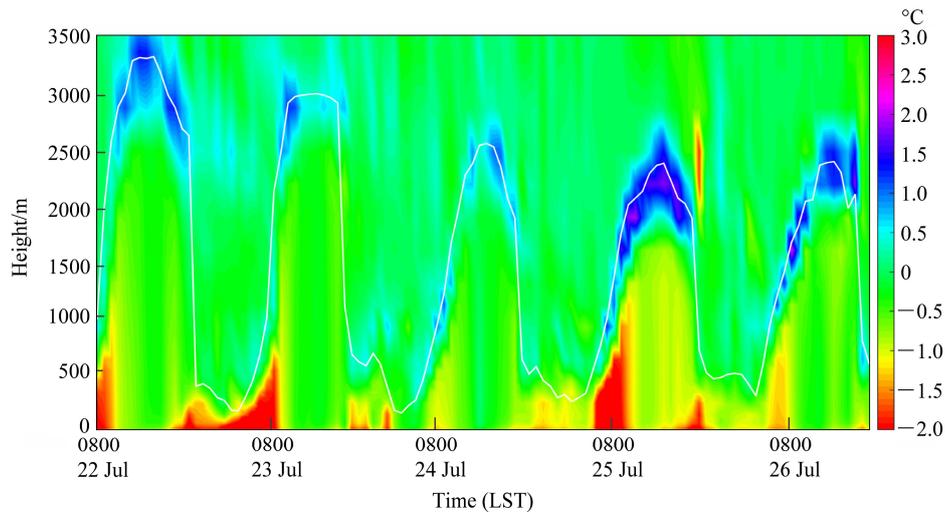


图 7 北京市中心 (39°54'27"N, 116°23'17"E) 因城市热排放引起的温度差异 (填色) 及边界层高度 (白线)
Fig. 7 Temperature difference with and without anthropogenic heat (shaded) and boundary layer height (white line)

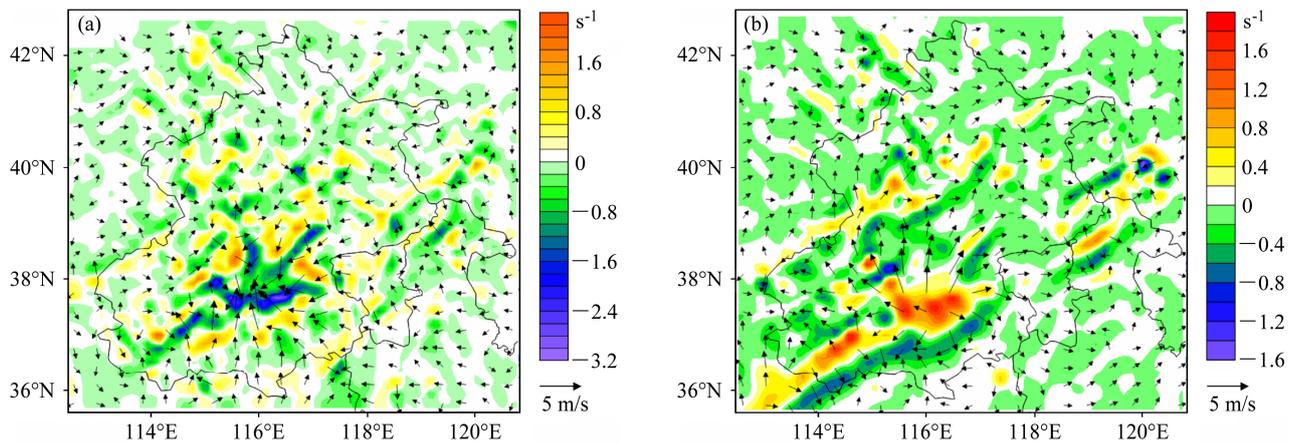


图 8 2008 年 7 月 22 日 14:00 人为热排放引起的 (a) 地面、(b) 边界层顶风场及风散度的差异
Fig. 8 Difference in wind and wind divergence at (a) the surface and (b) the top of the boundary layer height at 1400 LST on 22 Jul 2008

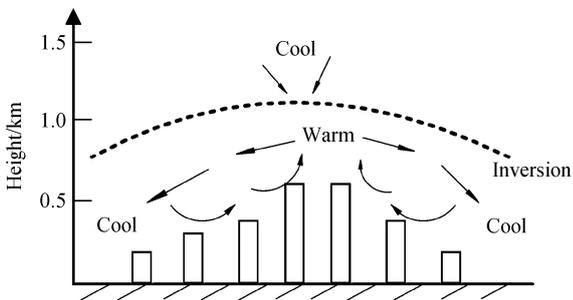


图 9 改进后的城市区域空气环流示意图
Fig. 9 Diagram of the improved atmospheric circulation in urban area

对比情况, 试验 A 在 280 m 处仍出现 O₃ 浓度滴定到 0 的情况, 而试验 B 在 280 m 则仍旧表现出较好的模拟效果。

4 结果与讨论

较之其它地形平坦的广大平原城市而言, 北京地区三面环山的复杂地形就已增加了数值模式精细化模拟的难度, 而超千万的人口所带来的巨大人为热排放与现有复杂地形的叠加效应更是为精细模拟提出了进一步的挑战。为提高北京地区数值模式精细化模拟效果, 将人为热排放纳入到已耦合 UCM 城市模块的 WRF 中, 并探讨了人为热排放的重要意义, 主要结论如下:

(1) 人为热的纳入可有效改善风场模拟效果, 同时对控制空气质量模式中污染物垂直扩散关键因子的边界层高度也有显著改善, 这将对后续研究

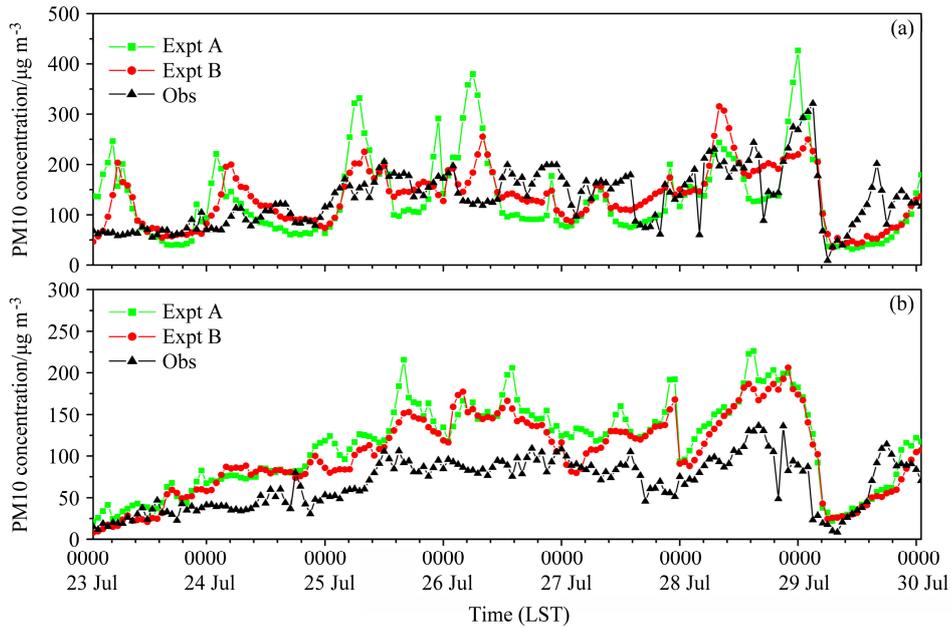


图 10 2008 年 7 月 23~29 日 (a) 北大站及 (b) 昌平站 PM10 模拟观测对比

Fig. 10 Comparison of model simulated and observed PM 10 concentrations at the (a) Beida station and (b) Changping station during 23-29 Jul 2008

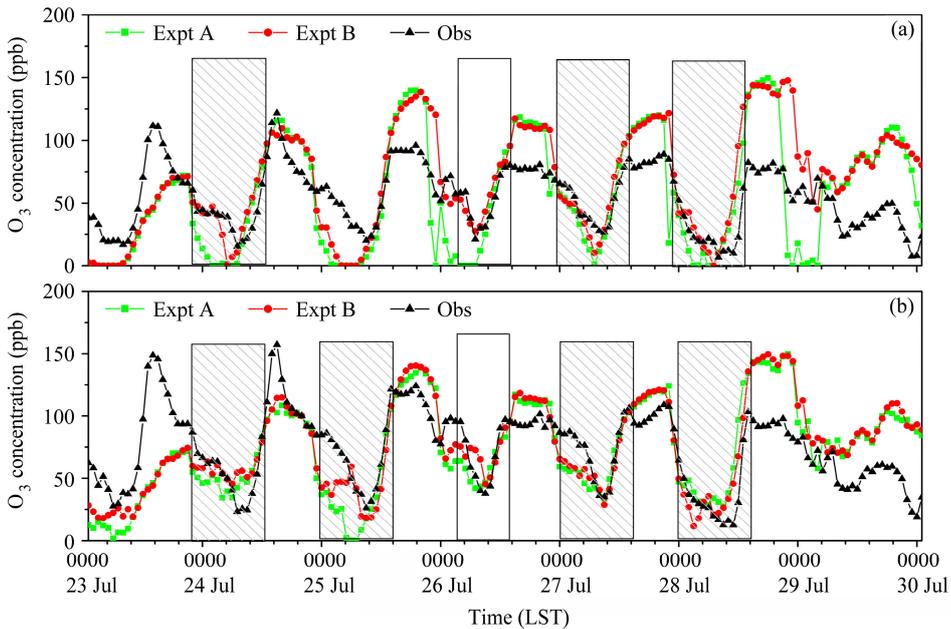


图 11 2008 年 7 月 23~29 日中国科学院大气物理研究所 (IAP, CAS) 铁塔分部站 (a) 近地面、(b) 280 m O₃ 模拟观测对比 (1 ppb=10⁻⁹)

Fig. 11 Comparisons of model simulated and observed O₃ concentrations at (a) the surface and (b) 280-m height above the ground level at the IAP station during 23-29 Jul 2008 (1 ppb=10⁻⁹)

具有重要的指导意义。

(2) 人为热排放对边界层内温度的影响与边界层高度密切相关。在边界层中下部,城市热排放带来的效果都是增温,夜间增温最为明显,最大增温 3 °C 左右。但是在边界层高度附近,城市热排放的结果却是降温,降温效果在每日边界层高度最高时

刻最为明显,最大降温为 2 °C 左右。

(3) 采用考虑了人为热排放的 WRF 气象模式输入,区域空气质量模式 (NAQPMS) 可显著地改善污染物垂直分布特征的模拟。

本研究受观测资料所限,仅针对个例进行了研究,在后续工作中,将针对四季,探讨人为热排放

对不同污染物垂直结构的影响。

参考文献 (References)

- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129 (4): 569–585, doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2.
- 董芬, 王喜全, 王自发, 等. 2013. 北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象 [J]. *气候与环境研究*, 18 (1): 63–70. Dong Fen, Wang Xiquan, Wang Zifa, et al. 2013. A study of the north–south differences of the air quality in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (1): 63–70, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11035.
- Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D22): 8851, doi: 10.1029/2002JD003296.
- 何建军, 余晔, 刘娜, 等. 2014. 复杂地形区陆面资料对 WRF 模式模拟性能的影响 [J]. *大气科学*, 38 (3): 484–498. He Jianjun, Yu Ye, Liu Na, et al. 2014. Impact of land surface information on WRF's performance in complex terrain area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (3): 484–498, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13186.
- 何晓凤, 蒋维楣, 陈燕, 等. 2007. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究 [J]. *地球物理学报*, 50 (1): 74–82. He Xiaofeng, Jiang Weimei, Chen Yan, et al. 2007. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 50 (1): 74–82.
- 霍飞, 陈海山. 2010. 人为热源对城市热岛效应影响的数值模拟试验 [J]. *气象与减灾研究*, 33 (3): 49–55. Huo Fei, Chen Haishan. 2010. Numerical simulation of the effect of anthropogenic heat on UHI [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese)*, 33 (3): 49–55, doi: 10.3969/j.issn.1007-9033.2010.03.008.
- 蒋维楣, 陈燕. 2007. 人为热对城市边界层结构影响研究 [J]. *大气科学*, 31 (1): 37–47. Jiang Weimei, Chen Yan. 2007. The impact of anthropogenic heat on urban boundary layer structure [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 37–47, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.04.
- Kusaka H, Kimura F. 2004. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (12): 1899–1910, doi: 10.1175/JAM2169.1.
- 李兴荣, 胡非, 舒文军. 2006. 近 15 年北京夏季城市热岛特征及其演变 [J]. *气象*, 32 (8): 42–46. Li Xingrong, Hu Fei, Shu Wenjun. 2006. Characteristics and variations of urban heat island effect in Beijing for last 15 years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 32 (8): 42–46, doi: 10.3969/j.issn.1000-0526.2006.08.007.
- 刘振鑫, 刘树华, 胡非, 等. 2012. MM5 和 WRF 对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究 [J]. *中国科学: 地球科学*, 42 (2): 301–312. Liu Zhenxin, Liu Shuhua, Hu Fei, et al. 2012. A comparison study of the simulation accuracy between WRF and MM5 in simulating local atmospheric circulations over Greater Beijing [J]. *Science China Earth Sciences*, 55 (3): 418–427, doi: 10.1007/s11430-011-4310-2.
- Miao S G, Chen F, Lemone M A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary layer structures in Beijing [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48 (3): 484–501, doi: 10.1175/2008JAMC1909.1.
- Shahgedanova M, Burt T P, Davies T D. 1997. Some aspects of the three-dimensional heat island in Moscow [J]. *International Journal of Climatology*, 17 (13): 1451–1465, doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13<1451::AID-JOC201>3.0.CO;2-Z.
- 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 2004. 城市人为热对北京热环境的影响 [J]. *气候与环境研究*, 9 (3): 409–421. Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. 2004. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (3): 409–421, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2004.03.001.
- 涂静. 2011. 黄东海大气边界层高度时空变化特征 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文. Tu Jing. 2011. Temporal and spatial variation of atmospheric boundary layer height (ABLH) over the Yellow-East China Sea [D]. M. S. thesis (in Chinese), Ocean University of China.
- 王喜全, 王自发, 郭虎. 2006. 北京“城市热岛”效应现状及特征 [J]. *气候与环境研究*, 11(5): 627–636. Wang Xiquan, Wang Zifa, Guo Hu. 2006. The study of the urban heat island in Beijing City [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (5): 627–636, doi: 10.3969/j.issn.1006-9585.2006.05.007.
- 王喜全, 王自发, 齐彦斌, 等. 2008. 城市化进程对北京地区冬季降水分布的影响 [J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 38 (11): 1438–1443. Wang Xiquan, Wang Zifa, Qi Yanbin, et al. 2008. Effect of urbanization on the winter precipitation distribution in Beijing area [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52 (2): 250–256, doi: 10.1007/s11430-009-0019-x.
- 王郁, 胡非. 2006. 近 10 年来北京夏季城市热岛的变化及环境效应的分析研究 [J]. *地球物理学报*, 49 (1): 61–68. Wang Yu, Hu Fei. 2006. Variations of the urban heat island in summer of the recent 10 years over Beijing and its environment effect [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 49 (1): 61–68, doi: 10.3321/j.issn:0001-5733.2006.01.009.
- 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 2006. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用 [J]. *大气科学*, 30 (5): 778–790. Wang Zifa, Xie Fuying, Wang Xiquan, et al. 2006. Development and application of Nested Air Quality Prediction Modeling System [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 778–790, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.07.
- 郑飞, 张镭, 朱江, 等. 2007. 复杂地形城市冬季边界层气溶胶扩散和分布模拟 [J]. *高原气象*, 26 (3): 532–540. Zheng Fei, Zhang Lei, Zhu Jiang, et al. 2007. Simulations of aerosol diffusion and distribution in urban atmospheric boundary layer over complex terrains in winter [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (3): 532–540, doi: 10.3321/j.issn:1000-0534.2007.03.014.