

复杂地形城市冬季边界层对气溶胶辐射效应的响应

郑 飞^{1, 2, 3} 张 镭^{1*} 朱 江²

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

3 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 作者着眼于城市气溶胶辐射效应与大气边界层的相互作用问题, 针对地形复杂的兰州市及周边地区, 开发应用了WRF(Weather Research and Forecasting, 天气研究和预报)模式, 使之与包含了大气气溶胶辐射效应和气溶胶粒子扩散的综合大气边界层数值模式嵌套起来。通过个例分析, 揭示了冬季气溶胶辐射效应对边界层结构的定量影响。主要特征为夜间气溶胶的长波辐射效应使地面附近的气温增高, 增温幅度为0.1~0.3 K/h, 使低空(25~300 m)大气层冷却, 降温幅度为0.08~0.15 K/h, 风速在150 m以下减小; 白天气溶胶的短波辐射效应使地面层内明显增温, 1 h内升温约0.5 K, 增温最大值在混合层顶500~600 m高度。受增温影响, 垂直风场和水平风场随之调整, 风速在450 m以下增大约0.1 m/s左右, 而在450 m以上风速减小0.1 m/s左右。

关键词 气溶胶辐射效应 WRF 模式 边界层 大气扩散

文章编号 1006-9895(2006)01-0171-09

中图分类号 P463

文献标识码 A

Responses of Urban Atmospheric Boundary Layer to Aerosol Radiative Effect over Complex Terrains in Winter

ZHENG Fei^{1, 2, 3}, ZHANG Lei¹, and ZHU Jiang²

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 International Center for Climate and Environment Science, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Abstract Focusing on the interaction between the atmospheric boundary layer (ABL) and the radiative effect of urban aerosol, the paper develops and applies the weather research and forecasting (WRF) model, and performs some corresponding numerical simulations and theoretical analyses of Lanzhou area of a complex terrain based on some previous research results. The whole model system integrates the WRF model and the comprehensive ABL model, in which the radiative effect and the diffusion of urban aerosol particles are considered. First of all, using the NNRP2 data in 1989, the meteorological data and air quality data of ABL measurement campaign during December 1989 in Lanzhou, the verification of the model system has been worked out separately for the WRF model and the ABL model, which shows that the two models can run steadily and the performance of the simulated meteorology and concentration fields is preferable. Secondly, by integrating the WRF model and the ABL model with the nesting scheme, the numerical simulation and case analysis of the structures of ABL and characters of air pollutant diffusion under the influence of the radiative effect of atmospheric aerosol are performed. With the comparison of observations

收稿日期 2004-10-27, 2004-12-17 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40275039 和国家重点基础研究发展规划项目 G1999043400

作者简介 郑飞, 男, 1979 年出生, 博士, 目前主要从事海洋资料同化研究。E-mail: zhengfei@mail.iap.ac.cn

* 通讯作者 zhanglei@lzu.edu.cn

and simulated results without the nesting scheme, the simulated results are substantially reasonable and show that the nesting scheme has improved the ABL model's simulated ability. Finally, by employing the established ABL model which is integrated with the WRF model and considering of the diffusion of the aerosol particles and the radiative effect of atmospheric aerosol, the quantitative influence of the aerosol radiative effect on boundary layer structure is discussed. The primary character is that the long wave radiative effect of aerosol leads to an increase of the atmosphere temperature about 0.1–0.3 K/h near the ground at night. The long wave radiative effect also makes the atmosphere temperature in the lower layer (25–300 m) descend about 0.08–0.15 K/h. The wind speed decreases below 150 m level and the convection is strengthened at the same time. These variations can weaken the stability of boundary layer at night, but this effect can make the wind field (including vertical velocity) and other meteorology fields change at the same time. During daytime, there is an obvious heat increase in the boundary layer due to the aerosol shortwave radiative effect with the increment of about 0.5 K/h. The maximum of the temperature increase occurs near the mixed layer top (500–600 m). Influenced by the temperature increase, the vertical wind field and horizontal wind field are adjusted correspondingly, and the wind speed increases by 0.1 m/s below 450 m level and decreases by 0.05–0.18 m/s above 450 m level. These variations clearly indicate that the differences of temperature increase at different levels induced by the aerosol shortwave radiative effect can weaken the stability of boundary layer to a certain extent, but a series of meteorology fields, including ascending velocity's increase and horizontal wind field's variations, are changed and adjusted by temperature increase.

Key words aerosol radiative effect, WRF model, boundary layer, atmospheric diffusion

1 引言

近几十年来,人类活动特别是工业排放污染物的急剧增长,已经在很大程度上改变了局地 and 全球范围的大气组成。日益严重的气溶胶污染不仅直接危害环境,而且通过其辐射效应影响局地和全球气候。气溶胶辐射强迫已经成为气候变化研究的前沿课题^[1]。大气气溶胶主要通过以下途径影响辐射平衡:(1)气溶胶的直接辐射效应:气溶胶的散射作用减少入射到地表的直接辐射,起冷却作用;气溶胶吸收太阳短波辐射,对其所在气层有加热作用;气溶胶不仅影响太阳短波辐射,也影响红外辐射的传输;(2)气溶胶的间接辐射效应:气溶胶可以充当云凝结核,从而改变云的微物理结构和光学特性,气溶胶浓度的增加可导致云滴浓度的增加,加强低层水云的反照率,起冷却作用;大量气溶胶粒子的存在还可能使云滴尺度减小,云生命期延长,云量增加,进而间接影响地-气系统的能量收支。有很多学者进行了相关研究,分析了气溶胶的辐射特性,以及辐射强迫和气候响应^[2~7],同时初步定量地探讨了气溶胶增加可能产生的气候变化^[8]等问题。

就气溶胶的局地辐射效应而言,大量观测分析表明,城市污染大气对太阳辐射的削弱十分严重。

与郊区相比,城市地面接收的太阳辐射可削弱百分之几至百分之几十。尽管气溶胶的散射将增加地面接收的天空漫射辐射,但只能部分补偿地面短波总辐射的亏损。气溶胶的存在还将增加大气长波逆辐射以维持局地能量平衡。同时,已有的研究^[8~18]表明,在太阳辐射作用下,气溶胶对边界层中温度、风速、混合层高度等气象参数的影响比较强烈;在气溶胶浓度很高时,通过长波辐射作用对夜间边界层也有影响。

2 对兰州地区冬季大气边界层的模拟

本文利用 WRF(天气研究与预报, Weather Research and Forecasting)模式和考虑大气气溶胶辐射效应的大气边界层模式和大气扩散模式^[17]嵌套起来,模拟了兰州地区冬季大气气溶胶辐射效应影响下的大气边界层结构特征。

2.1 模式系统介绍

2.1.1 WRF 模式

WRF MODEL 中尺度模式系统是 NCAR(美国国家大气科学研究中心, National Center for Atmospheric Research)中小尺度气象处等四部门联合开发的新一代高分辨率的中尺度模式。它与以前的中尺度模式相比,特点在于:(1)重点解决分辨率为 1~10 km、时效为 60 h 以内的有限区域天气预

报和模拟问题; (2) 采用 Runge-kutta 时间积分方案(二阶、三阶可选), 使模式对陡峭地形处理更加合理; (3) 模块化设计便于模式的修改和改进^[19, 20]。基于以上特点, 本文考虑在已有边界层和大气污染资料基础上, 将中尺度 WRF 模式与考虑大气辐射效应和粒子扩散在内的边界层数值模式系统结合起来, 研究城市大气边界层对气溶胶辐射效应的响应。本文采用 1.3 版本进行模拟分析。

2.1.2 气溶胶辐射效应

气溶胶辐射效应通过在 LOWTRAN 7(低分辨率传输, Low Resolution Transmittance)模式的框架上发展的适合于兰州城市的大气辐射传输模式计算。首先, 结合本地区已有研究结果, 对 Junge 谱与分段三参数谱相结合的谱模式进行修订, 使之更符合实际和便于应用。并利用本地区估算的复折射指数作为计算辐射参数的基础; 其次, 设计一种将实时气溶胶质量浓度转换为辐射参数的方案, 进而将其引入辐射传输模式。模拟中主要考虑了烟尘粒子辐射效应。大气扩散模式则根据本地区污染源高度特点, 将平流扩散模式和高斯扩散模式结合起来构成。由此, 可根据随时间演变的气溶胶质量浓度计算辐射通量和加热率(冷却率), 实现大气边界层模式、扩散模式和大气辐射传输模式的耦合^[17]。

2.1.3 WRF 模式与边界层模式的嵌套设计

为了使 WRF 模式和边界层模式能够较好的嵌套起来, 对边界层模式的侧边界条件做了修改, 对边界层模式采用双层侧边界条件, 外层侧边界条件用张弛边界条件, 内层侧边界则由 WRF 模式模拟结果每 1 小时提供一次内层侧边界场。

外层侧边界条件按照边界两侧通量连续的原则, 侧边界取为: 在入流边界上, 边界上变量值保持不变; 在出流边界上变量值等于最近内点上变量值, 即零梯度。当计算区域中有较强内波发生, 波速为 c 。为了避免波在侧壁的反射, 可以采用辐射边条件处理出流边界上的变量值。例如在 x 方向上取

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (u + c) \frac{\partial v}{\partial t} = 0. \quad (1)$$

内层侧边界条件设计将 WRF 模式模拟结果每 1 小时为边界层模式提供一次内层侧边界变量值, 对侧边界变量场进行调整。

2.1.4 模拟参数及背景

WRF 模式的模拟区域为(35.98°N~36.22°N, 103.51°E~104.02°E); 东西长 46 km, 南北宽 27 km, 包括兰州河谷盆地及周围山区; 模拟区域中心点为(36.10°N, 103.76°E); 东西向格点数为 46, 南北向格点数为 27; 模式的水平网格距 $D=1$ km; 模式的垂直分辨率 $k_y=33$ 层, 模式大气顶气压 $p_t=100$ hPa; 大尺度资料为由 NCEP/NCAR 提供的再分析资料(NNRP2)作为初始场, 模式初始时间为 1989 年 12 月 14 日 00 时(北京时间, 下同), 采用特定边界条件, 积分时间为 48 h, 每隔 1 小时输出一次模拟结果。

边界层模式系统的模拟区域东西长约 40 km, 南北宽约 20 km, 包括兰州河谷盆地及周围山区, 水平方向取均匀网格, $\Delta x=\Delta y=1$ km; 模拟垂直高度为 3000 m, 分成不等距的 18 层。初始资料采用 1989 年 12 月 1~15 日兰州大气边界层和大气扩散综合外场试验资料^[21], 主要使用了系留探空风、温、气压资料, 以及地面电接风资料。

模拟背景为冬季、晴天, 夜间(稳定层结)和白天(弱不稳定、不稳定层结), 并且没有明显的大尺度天气系统变化。模拟期间 1989 年 12 月 11~15 日兰州地区主要处于蒙古高压南部外围区, 属于兰州地区冬季地面多见的天气形势^[21]。为了突出气溶胶辐射效应作用, 需要选择晴天少云、没有明显天气过程的阶段。

因而在综合考虑模拟结果的代表性和气溶胶辐射效应影响之后, 本文选取 14、15 日两天的资料进行模拟试验。从 14 日 09 时开始计算, 共积分 39 h。同时, 为了使气溶胶辐射效应对边界层结构产生充分作用, 模拟结果的分析说明选取积分 16 h 以后, 即 15 日的情况为例。

2.2 对兰州地区冬季大气边界层的模拟

2.2.1 地面风场

在典型天气形势下, 兰州地区冬季地面流场多为辐合流场, 尤其是东、西部盆地, 由周围山地向盆地中辐合。这是由于气流进入盆地后, 受到山体阻挡, 风向改变形成动力辐合, 并且结合盆地四周山体的下坡风或山风造成的; 同时市区的热岛效应产生的热力辐合, 亦增强了地面流场的辐合作用, 这在夜间尤为明显。在高度 100 m 以下, 风速基本上不随高度变化。

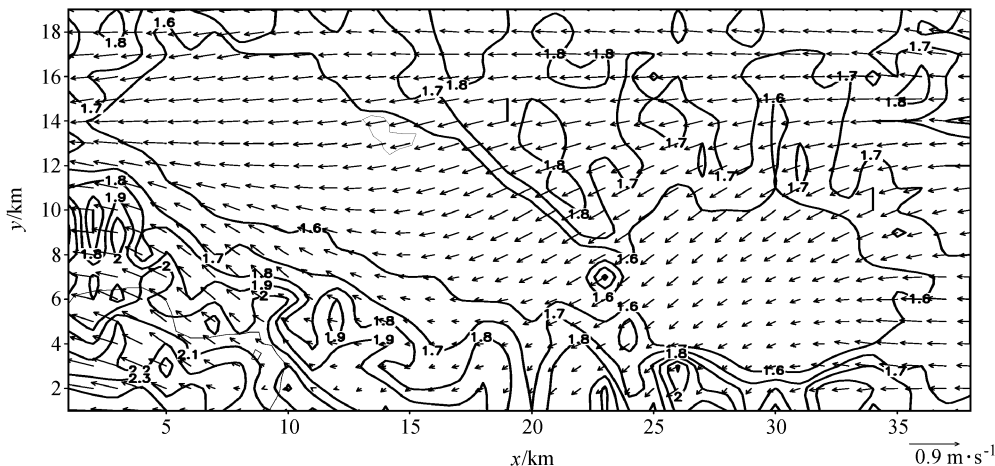


图1 白天(13时)地面(地表上1 m 风场)(单位: m/s)。等值线: 海拔高度, 单位: km

Fig. 1 Surface wind field (1 m above the surface) at 1300 LST (Local Time) (units: m/s). Contour line: sea level elevation, units: km

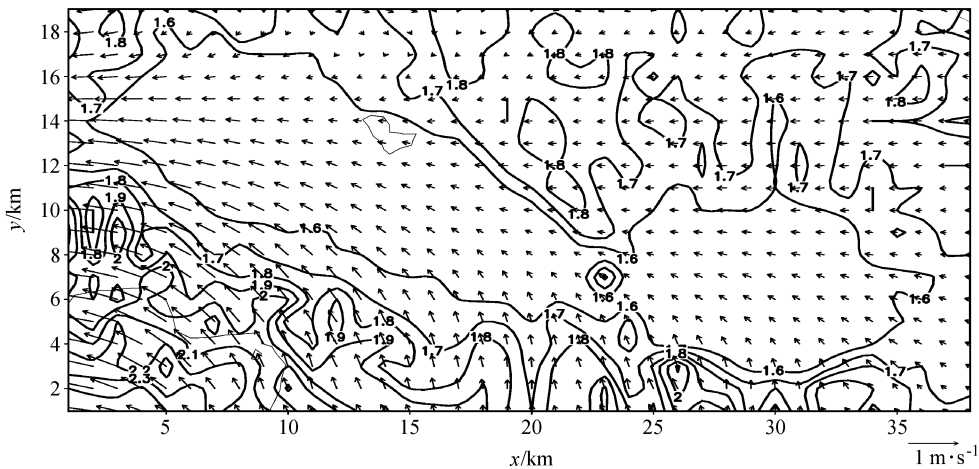


图2 夜间(01时)地面(地表上1 m 风场)(单位: m/s)。等值线: 海拔高度, 单位: km

Fig. 2 Surface wind field (1 m above the surface) at 0100 LST (units: m/s). Contour line: sea level elevation, units: km

从白天(13时)的地面风场(图1)可以看出: 风向偏东; 东部盆地中央风速较小, 有向两边山体较弱的辐散, 周围山区风速较大, 尤其是东部盆地入口处; 西部盆地风速较东部略大, 有较弱辐合。这是由于山谷风环流和城市热岛环流白天相反作用, 白天较弱的城市热岛环流抑制了山谷风环流的结果。南部山地风向局部较乱, 主要是地势高低起伏所造成的。盆地内低层风速较小。

夜间(01时), 地面流场表现为更强的辐合趋势(图2)。东西盆地都存在明显的辐合, 东部较白天的强度更大; 西部盆地风速较白天变大, 辐合亦变强, 同时周围山地边缘下坡风较明显。夜间市区地面流场是以山谷风环流造成的辐合场为主, 而城

市热岛效应造成的热岛环流增强了山谷风环流的作用。

2.2.2 风速廓线

利用1989年12月在兰州大学生物园(位于兰州东部盆地内)的系留系统探空资料, 与模拟的风速廓线进行了比较分析。

从15日模拟与实测水平风速廓线结果比较(图3)可以看出, 各个时次模拟风速的变化趋势与实测较为一致, 但风速强切变的位置偏高, 且低层风速偏小。白天, 在400~700 m的高度层内风速随时次基本没有变化, 400 m向上, 风速呈递增趋势; 其他高度层虽然风速大小不同, 但变化趋势基本一致: 地面到100 m是随高度上升而增加, 然后递减

至 200 m, 向上又是随高度递增。总体上在低层和高层风速变化较大, 中部变化较小。夜间情况类似白天, 但是低层风速变化剧烈的高度明显变低, 这与夜间大气层结较稳定是一致的。整体上看, 夜间的平均风速比白天大, 但变化不如白天剧烈。

2.2.3 位温水平分布

夜间盆地内地面位温变化比较均匀, 大约 50 m 高度层以内变化很小。盆地内等位温线基本与地形线走势相同, 从盆地中心向边缘, 位温逐渐递减; 白天位温水平分布很不均匀, 东部盆地位温明显高于西部盆地, 且存在两个位温高值中心。

2.2.4 位温廓线

图 4 是模拟与实测位温廓线结果比较, 与前面水平风速廓线一致, 这里也是选取兰州大学生物园的测点进行分析。从图 4 可以看出, 01~11

时的模拟结果与实测较为一致, 而其他时次模拟值均略小于实测值, 尤其在低层较为明显, 但基本的变化趋势比较一致, 而且随着高度增加差异逐渐减小。

从上述分析可以看出, 考虑了气溶胶辐射效应的大气边界层模式对于选取个例的风场、位温场的模拟结果, 都能够反映出兰州气象场的主要结构特征。另外, 将本文结果与高丽等^[22]采用传统辐射参数化方案(未考虑气溶胶效应)的同一边界层模式进行的模拟研究相比较, 可以发现, 考虑气溶胶辐射效应和改进侧边界条件后, 模式模拟的兰州地区冬季风温场的结构更加细致、合理, 模式模拟能力有较大提高。

2.3 模式验证

这里利用风速和位温的模拟和观测之间对应点

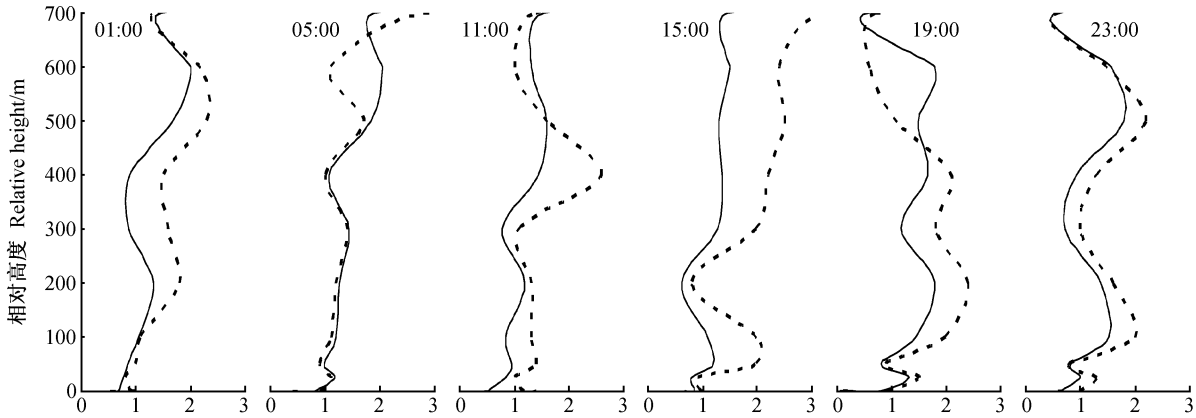


图 3 15 日模拟与实测水平风速廓线图(单位: m/s)。实线: 模拟值; 虚线: 实测值
Fig. 3 Simulated and observed velocity profiles on 15 Dec 1989 (units: m/s). Solid line: simulated data; dash line: observed data

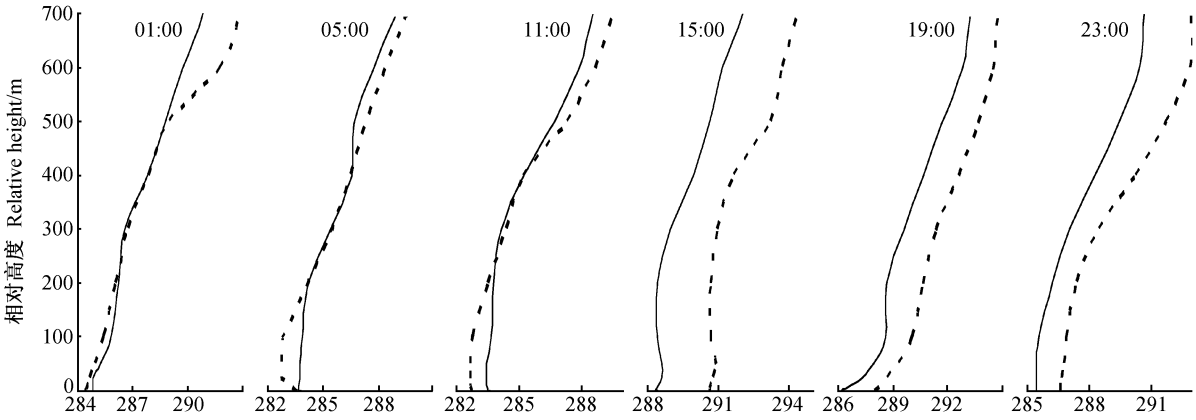


图 4 15 日模拟与实测位温廓线图(单位: K)。实线: 模拟值; 虚线: 实测值
Fig. 4 Simulated and observed potential temperature profiles on 15 Dec 1989 (units: K). Solid line: simulated data; dash line: observed data

值的统计特征, 检验模式的模拟误差。根据 Fox^[23] 的建议, 下列这些量可做统计比较之用。

设观测值为 A_{obs} , 模拟值为 A , 计算其误差值 A_d

$$A_d = A_{\text{obs}} - A, \tag{2}$$

A_d 的时间平均值或空间平均值 M_d

$$M_d = \sum \frac{A_d}{N}, \tag{3}$$

及相应 A_d 的绝对值的平均值 $|M_d|$,

$$|M_d| = \sum \frac{|A_d|}{N}. \tag{4}$$

利用 A_{obs} 和 A 还可计算其比例误差 e ,

$$e = \frac{2(A - A_{\text{obs}})}{A + A_{\text{obs}}}, \tag{5}$$

以及 e 的时间或空间平均值 e_m ,

$$e_m = \sum \frac{e}{N}. \tag{6}$$

通过计算误差 A_d 、 M_d 和 $|M_d|$, 比例误差 e 及 e_m 来定量反映模拟值与观测值之间的差异大小, 从而反映模式的性能。表 1 列出了运用上述验证方法得到的 15 日模式预报误差分析情况统计, 即不同

表 1 模拟误差分析
Table 1 Simulation error analysis

高度 Height/m	V_d	$ M_V $	ev	T_d	$ M_T $	e_T
1	0.054	0.054	0.667	0.063	0.063	-0.002
25	0.229	0.229	0.569	-0.255	0.255	-0.002
50	0.161	0.161	0.605	-0.150	0.150	-0.002
100	0.222	0.222	0.575	-0.165	0.165	-0.002
200	0.365	0.365	0.925	-0.263	0.263	-0.003
300	0.243	0.243	1.035	-0.155	0.155	-0.004
400	0.517	0.517	1.403	-0.369	0.369	-0.005
500	0.622	0.622	1.734	-0.365	0.365	-0.006
600	0.261	0.261	1.833	-0.122	0.122	-0.006
700	-0.016	0.016	1.908	0.066	0.066	-0.007
800	0.439	0.439	1.980	-0.244	0.244	-0.007
900	0.540	0.540	1.761	-0.280	0.280	-0.006
1000	0.534	0.534	1.597	-0.277	0.277	-0.005
平均 Mean	0.321	0.323	1.276	-0.194	0.213	-0.007

注: V_d 为水平风速的平均误差, $|M_V|$ 是水平风速绝对值的平均误差, ev 是水平风速的比例误差; T_d 为位温的平均误差, $|M_T|$ 是位温绝对值的平均误差, e_T 是位温的比例误差

Note: V_d is mean error of the horizontal wind velocity; $|M_V|$ is mean error of the horizontal wind velocity's absolute value; ev is ratio error of the horizontal wind velocity; T_d is mean error of the potential temperature; $|M_T|$ is mean error of the potential temperature's absolute value; e_T is ratio error of the potential temperature

高度上风速、位温误差和比例误差。

从列出的 15 日平均风速、位温误差看, 从地面到 1000 m, 不同高度上风速平均误差为 0.32 m/s, $|M_V| = 0.323$; 位温平均误差为 -0.19 K, $|M_T| = 0.213$ 。表明考虑了气溶胶辐射效应、嵌套了 WRF 的边界层模式用于模拟兰州地区冬季的风、温场是合理的。

3 气溶胶辐射效应对边界层的影响

利用前面建立的与 WRF 模式嵌套的考虑了气溶胶浓度分布、气溶胶的长波和短波辐射效应的边界层模式, 通过两种模拟方案来考察气溶胶辐射效应对边界层结构的影响。方案一, 在一定的初始场基础上, 考虑气溶胶辐射效应加热(冷却)率, 积分 1 h; 方案二, 采用和方案一相同的初始场和边界条件, 而不计气溶胶加热(冷却)率, 积分 1 h。这样就得到相应的风、温等气象要素场, 按方案一得到的气象场与方案二得到的差别, 应该是由气溶胶辐射效应引起的。

3.1 城市气溶胶辐射效应对夜间边界层的影响

夜间, 气溶胶通过改变长波辐射过程而对其所在高度的大气层产生冷却或加热。在贴近地面层其作用为加热, 在其他高度层其作用为冷却。这种作用在模式方程组的支配下, 逐渐影响到温度场、风场、能量场, 因而边界层结构发生一系列变化。图 5 给出了有气溶胶作用和无气溶胶作用模拟结果中兰州大学生物园测点的夜间(01 时)温度、风速廓线的变化, 图中反映了在 01 时加热率(在地面层为 0.09 K/h, 而在其他高度层随高度减小, 平均约为 -0.12 K/h)作用 1 h 以后, 地面到 25 m 高度温度增加 0.1~0.3 K, 25~300 m 层内温度降低约 0.08~0.15 K, 400 m 以上基本不变。风速在 25~150 m 层内有所减小, 减小约 0.05 m/s。

由于夜间的气溶胶长波辐射效应, 使地面附近大气层出现弱增温, 又使低空(25~300 m)气溶胶所在气层冷却, 而在盆地上空 600 m 高度以上, 气溶胶浓度很低, 因而其冷却效应很小。气溶胶长波辐射效应导致的这些在不同高度层的弱增温和冷却, 有一定的减弱夜间边界层稳定性的作用, 但这种作用不是静态的, 温度场的改变引起风场(包括垂直速度)等气象要素场发生变化和调整。

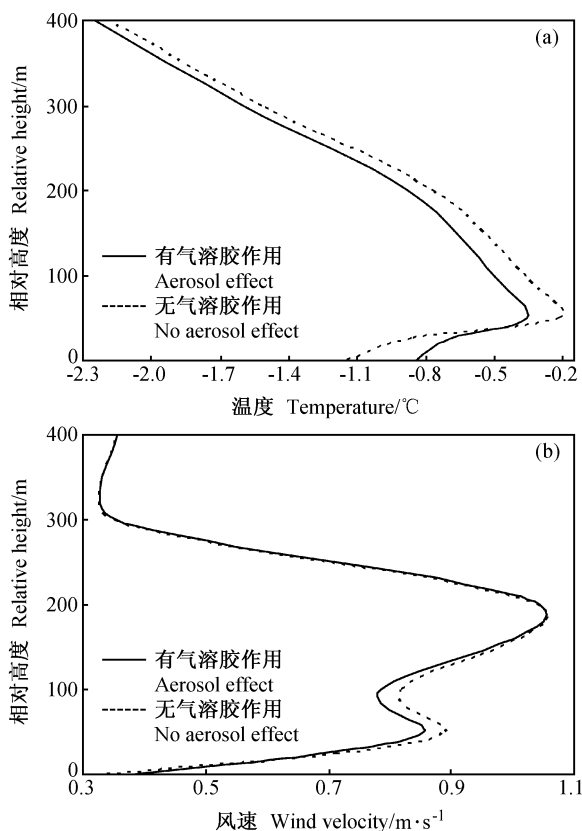


图5 兰州大学生物园测点 01 时温度(a)、风速廓线(b)的变化。实线: 有气溶胶作用; 虚线: 无气溶胶作用

Fig. 5 Variations of (a) temperature and (b) velocity at Lanzhou University at 0100 LST (Solid line: aerosol effect; dash line: no aerosol effect)

3.2 城市气溶胶辐射效应对午后边界层的影响

日出后, 气溶胶总加热率为正, 并随时间增大, 中午加热率达到最大, 对大气加热可持续到日落时分。图 6 是从方案一(有气溶胶作用)和方案二(无气溶胶作用)模拟结果中取出的兰州大学生物园测点 13 时的温度和风速廓线比较, 从图中可以看到, 温度从地面至 600 m 高度层内增加约 0.5 K, 增温最大值在 500~600 m 高度层内, 600 m 以上增温 0.1~0.2 K。同时, 风速在 450 m 以下增大 0.05~0.15 m/s 左右, 而在 450 m 以上风速减小 0.05~0.18 m/s。

白天在气溶胶短波辐射效应的作用下, 边界层内明显增温, 温度在 1 h 内升高约 0.5 K, 增温最大值在混合层顶 500~600 m 高度附近, 600 m 以上由于气溶胶浓度减小, 加热率减小, 所以增温明显减弱, 增温由大于 0.5 K/h 变为 0.2 K/h。气溶

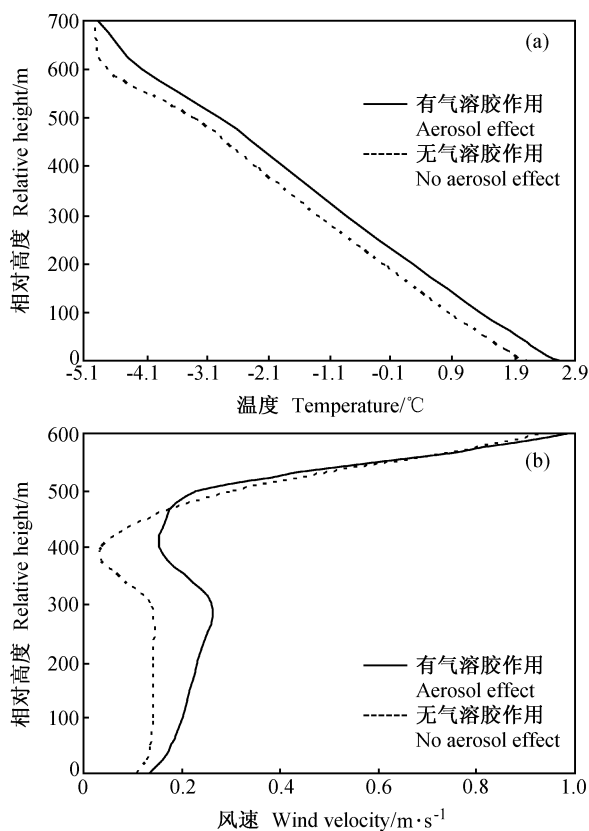


图6 同图 5, 但为 13 时

Fig. 6 Same as Fig. 5, but at 1300 LST

胶短波辐射效应导致的这些在不同高度层的增温差异, 对边界层不稳定性有一定程度的减弱, 但受增温影响, 引起上升运动增强、水平风场变化等一系列气象场的变化和调整。

4 结论

将 WRF 模式与考虑了大气气溶胶粒子扩散、气溶胶短波和长波辐射效应的边界层模式嵌套。通过一个模拟例子定量地揭示了城市气溶胶辐射强迫的气象场响应。

(1) 模拟较好地再现了兰州地区冬季典型风场, 即主导风向偏东, 地面流场多为辐合。通过模拟风速廓线与实测水平风速廓线的比较可知, 模拟风速的变化趋势与实测较为一致, 但风速强切变的位置偏高, 夜间平均风速比白天大, 但变化不如白天剧烈。

与实测位温廓线相比, 模拟廓线较好地反映了位温垂直变化特点, 但在不同时段模拟情况存在差异。

(2) 夜间, 气溶胶的长波辐射效应使地面附近的气温增高, 1 h 内增温幅度为 0.1~0.3 K/h, 使低空(25~300 m)大气层冷却, 降温幅度为 0.08~0.15 K/h; 风速在 150 m 以下减小 0.05 m/s。这些变化, 有一定的减弱夜间边界层稳定性的作用, 但这种作用同时引起风场(包括垂直速度)等气象要素场发生变化。

白天, 气溶胶的短波辐射效应使地面层内明显增温, 位温在 1 h 内升高约 0.5 K, 增温最大值在混合层顶 500~600 m 高度。受增温影响, 垂直风场和水平风场随之调整, 风速在 450 m 以下增大 0.05~0.15 m/s, 而在 450 m 以上风速减小 0.05~0.18 m/s。表明气溶胶短波辐射效应导致的不同高度层的增温差异, 一方面对边界层不稳定性有一定程度的减弱, 但受增温影响, 引起上升运动增强、水平风场变化等气象场一系列的变化和调整。

致谢 感谢导师张镭教授对本文工作的长期指导和关怀, 感谢国家气象中心预报室邓莲堂博士的帮助和指导。

参考文献 (References)

- [1] Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle. *Science*, 2001, **294**: 2119~2124
- [2] National Research Council. Panel on aerosol radiative forcing and climate change, board on atmospheric sciences and climate, commission on geosciences, environment, and resources. *Aerosol Radiative Forcing and Climate Change*. National Academy Press, Washington D. C., 1996
- [3] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102** (D6): 6831~6864
- [4] 付培健, 王世红, 陈长和. 探讨气候变化的新热点: 大气气溶胶的气候效应. *地球科学进展*, 1998, **13**(4): 387~393
Fu Peijian, Wang Shihong, Chen Changhe. The hot discussion about climate change: the climate effects of aerosols. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1998, **13**(4): 387~393
- [5] 钱云, 符淙斌, 王淑瑜. 沙尘气溶胶与气候变化. *地球科学进展*, 1999, **14**(4): 391~394
Qian Yun, Fu Congbin, Wang Shuyu. Mineral dust and climate change. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1999, **14**(4): 391~394
- [6] 罗云峰, 李维亮, 周秀骥. 20 世纪 80 年代中国地区大气气溶胶光学厚度的平均状况分析. *气象学报*, 2001, **59**(1): 77~87
Luo Yunfeng, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Analysis of the 1980's atmospheric aerosol optical depth over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59**(1): 77~87
- [7] Jacobson M Z. Global direct radiative forcing due to multi-component anthropogenic and natural aerosols. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**: 1551~1568
- [8] Bergstorm R W, Viskanta R. Modeling of the effects of gaseous and particulate pollutants in the urban atmosphere. Part I: Thermal structure. *Journal of Applied Meteorology*, 1973, **12**(6): 901~912
- [9] Atwater M A. Thermal change induced by urbanization and pollutants. *Journal of Applied Meteorology*, 1975, **14**: 1061~1071
- [10] 杨硕文, 周明煜, 李兴生. 夜间稳定大气边界层的数值模拟. *中国科学(B辑)*, 1986, **16**(9): 999~1008
Yang Shuowen, Zhou Mingyu, Li Xingsheng. Numerical modeling of the nocturnal stable boundary layer. *Science in China (Series B)* (in Chinese), 1986, **16**(9): 999~1008
- [11] Yoshida A. Two-dimensional numerical simulation of thermal structure of urban polluted atmosphere (effects of aerosol characteristics). *Atmospheric Environment*, 1991, **25B**(1): 17~23
- [12] Cautenet G, Legrand M, Cautenet S, et al. Thermal impact of Saharan Dust over land, Part I: simulation. *J. Appl. Meteor.*, 1992, **31**: 166~180
- [13] 李乐泉, 周明煜, 李兴生. 夜间城市大气边界层和气溶胶的相互作用. *应用气象学报*, 1992, **3**(1): 32~41
Li Lequan, Zhou Mingyu, Li Xingsheng. The interaction between nocturnal urban atmospheric boundary layer and aerosols. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1992, **3**(1): 32~41
- [14] 陈长和, 王海啸, 黄建国, 等. 城市气溶胶辐射效应及对混合层发展的影响. *科学通报*, 1993, **38**(15): 1399~1402
Chen Changhe, Wang Haixiao, Huang Jianguo, et al. Urban aerosol radiation effects and its influences on evolution of the mixed layer. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1993, **38**(15): 1399~1402
- [15] 王海啸, 陈长和, 黄建国. 烟雾层的长波辐射效应以及对边界层温度层结的影响. *大气科学*, 1994, **18**(1): 22~29
Wang Haixiao, Chen Changhe, Huang Jianguo. The long-wave radiative effect of smog layer and its influences on the boundary layer temperature stratification. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18**(1): 22~29
- [16] 田文寿, 陈长和, 黄建国, 等. 兰州冬季气溶胶的短波加热效应以及对混合层发展的影响. *应用气象学报*, 1997, **8**(3): 1399~1402
Tian Wenshou, Chen Changhe, Huang Jianguo, et al. The solar heating effect of the winter aerosol in Lanzhou and its influence on evolution of the mixed layer. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1997, **8**(3): 1399~1402
- [17] 张镭. 城市大气气溶胶与边界层相互作用研究. 兰州大学博士学位论文, 2001

- Zhang Lei. A study of interaction of urban atmospheric aerosol and boundary layer. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 2001
- [18] Menon S, Handen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, **297**: 2250~2253
- [19] Wicker L J, Skamarock W C. Time-splitting methods for elastic models using forward time schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 2002, **130**: 2088~2097
- [20] Introduction to the WRF Modeling System. http://www.mmm.ucar.edu/wrf/tutorial/2003/WRF_Tutorial/Introduction/
- [21] 陈长和, 黄建国, 程麟生, 等. 复杂地形大气边界层和大气扩散研究. 北京: 气象出版社, 1993, 159~165
- Chen Changhe, Huang Jianguo, Cheng Linsheng, et al. *Study on Atmospheric Boundary Layer and Diffusion over Complex Terrains* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 159~165
- [22] 高丽, 张镭. 兰州东部地区冬季风场和温度场模拟. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, **38**(3): 120~126
- Gao Li, Zhang Lei. The simulations of winter wind and temperature fields of eastern Lanzhou Area. *Journal of Lanzhou University* (Natural Sciences) (in Chinese), 2002, **38**(3): 120~126
- [23] Fox D G. Judging air quality model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1981, **62**(5): 599~609