

谢学军, 李杰, 王自发. 2010. 兰州城区冬季大气污染物日变化的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 695–703. Xie Xuejun, Li Jie, Wang Zifa. 2010. Numerical simulation of diurnal variations of the air pollutants in winter of Lanzhou city [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 695–703.

兰州城区冬季大气污染物日变化的数值模拟

谢学军^{1,2} 李杰¹ 王自发¹

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

2 兰州市环境保护局环境信息中心, 兰州 730000

摘要 应用嵌套网格空气质量预报模式系统 (NAQPMS), 模拟研究了兰州市 2006 年 12 月大气污染的日变化特征及其影响因素。在复杂地形条件下, 兰州城区冬季大气污染日变化呈现白天高、夜晚低、峰值在中午的特点, NAQPMS 较为合理地再现了这一特征。分析表明, 在兰州冬季低风速的情况下, 逆温出现频次的日变化特征与污染的日变化特征保持一致, 说明逆温在冬季大气污染日变化中的作用显著。

关键词 嵌套网格空气质量预报模式系统 兰州 日变化 逆温层

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0695-09 **中图分类号** X31 **文献标识码** A

Numerical Simulation of Diurnal Variations of the Air Pollutants in Winter of Lanzhou City

XIE Xuejun^{1, 2}, LI Jie¹, and WANG Zifa¹

1 *Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Environmental Information Center of Lanzhou Municipal Environmental Protection Bureau, Lanzhou 730000*

Abstract A heavy pollution case in December 2006 in Lanzhou was simulated using the Nested Air Quality Prediction Model System (NAQPMS). The diurnal variations of the air pollutants and its mechanism were discussed. The results showed that NAQPMS can reproduce the temporal and spatial variations of the air pollution under complex terrain conditions. The concentrations of the pollutants presented a pattern with daytime maximum and night minimum, which can be explained by the daytime near-surface temperature inversion layer.

Key words the Nested Air Quality Prediction Model System, Lanzhou, diurnal variation, temperature inversion layer

1 引言

近几十年来, 随着我国经济的快速发展, 我国污染气体排放量显著增加, 区域性和复合型污

染日益增加, 了解大城市特别是主要工业城市的污染现状、特征、来源和对周边地区的影响是我国大气环境科学的重要议题, 同时对我国制定经济合理的污染减排政策具有重要意义。兰州是我国西部工业重镇, 石油化工、机械加工等产业使

收稿日期 2010-05-15 收到, 2010-07-28 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金青年基金 40805051 和国家重点基础研究发展计划项目 2005CB422205

作者简介 谢学军, 男, 1967 年出生, 学士, 高级工程师, 主要从事城市大气环境研究。E-mail: cunyan_x@hotmail.com

得其大气质量不容乐观,而特有的哑铃状的河谷盆地地形造成了污染物持续累积,加大了兰州大气污染治理难度。

针对兰州大气污染及其与排放源和地形的关系,许多学者利用观测以及各种数学方法进行广泛的研究。杨德保等(1994)认为冬季冷锋对兰州污染物有十分重要的影响。姜大膀等(2001)认为逆温层的存在是一些大气污染事件形成的根本原因,胡隐樵和张强(1999)则认为山峰加热效应是日间兰州市区强的脱地逆温层的重要形成机制,大气污染物的存在则进一步加强了日间逆温层。张强(2001, 2003)通过分析边界层气象观测和污染物监测资料,也证实大气中污染物和白天大气逆温存在的这种复杂反馈机制。王式功等(1997)也研究了低风速对大气污染的影响。

近年来,有学者针对兰州复杂地形,运用不同模式开展数值模拟研究,模拟污染的时空分布特征(姜金华和彭新东, 2002; 安兴琴等, 2005)。这些模式从最早的高斯扩散模式到物理过程比较简单的二维模式,目前发展到三维数值模式系统。本文针对兰州城区冬季大气污染,运用嵌套网格空气质量预报模式系统(NAQPMS),对污染的日变化特征进行模拟并分析其影响因素,同时对 NAQPMS 在兰州复杂山谷地形下的应用进行论证。

2 兰州市冬季大气污染日变化特征

空气污染指数(Air Pollution Index, API)显

示,尽管 2002~2007 年兰州大气质量在逐渐改善,11 月至次年 4 月的大气污染仍较严重,平均值在 120 以上(国家二级标准为 100)。2006 年 12 月 12~28 日兰州出现一次强污染过程,API 长期维持在 200 以上,最高达到 450 以上(18 日)^①。图 1 展示了 2006 年 12 月 12~28 日兰州市城区可吸入颗粒物(PM₁₀)和 SO₂ 观测浓度的日变化。如图所示,兰州 PM₁₀ 和 SO₂ 浓度白天高、夜晚低,污染物浓度中午达到最高(PM₁₀ 浓度达到 650 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),最低值出现在凌晨。这一特征与在天津等地观测到的白天低、晚上高的现象相反(韩素芹等, 2008),这也说明兰州大气污染的复杂性。

3 模式系统及参数设置

3.1 模式系统

本研究所选模式系统为中国科学院大气物理研究所研制的嵌套网格空气质量预报模式系统(NAQPMS)。该模式系统是一个自主研发的多尺度多物种模拟系统,它不但可以研究区域尺度的空气污染问题(如沙尘输送、酸雨、污染物的跨国输送等),还可以研究城市尺度的空气质量等问题的发生机理及其变化规律,以及不同尺度之间的相互影响过程。同时,模式系统的并行计算和理化过程的模块化则有效地保证了 NAQPMS 的在线实时模拟(王自发等, 2006),已在全国多个省市投入业务化运行。

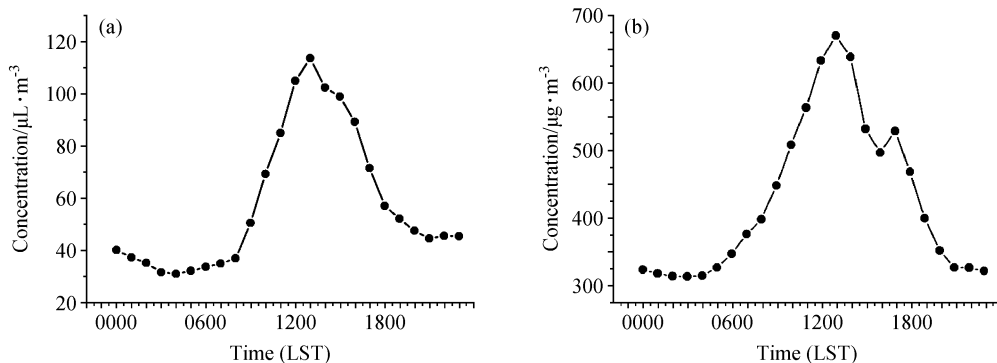


图 1 2006 年 12 月 12~28 日兰州 (a) SO₂ 和 (b) PM₁₀ 浓度小时平均值日变化

Fig. 1 Diurnal variations of the hourly averaged concentrations of (a) SO₂ and (b) PM₁₀ in Lanzhou during 12-28 Dec 2006

① 兰州市环境监测站

NAQPMS 主要由基础数据系统、中尺度天气预报系统、空气污染预报系统和预报结果分析系统组成。空气质量预报子系统为整个模式系统的核心,主要处理污染物的排放,平流输送,扩散,干、湿沉降和气相、液相及非均相反应等物理与化学过程。其空间结构为三维欧拉输送模式,垂直坐标采用地形追随坐标。水平结构为多重嵌套网格,采用单向、双向嵌套技术(王自发等, 2006)。目前,其气象化学模块已由碳键 IV (CBM-IV) 升级为 CBM-Z 机制。中尺度天气预报系统,采用第五代中尺度天气预报模式 (MM5) 进行气象场的模拟,为空气质量预报子系统提供逐时的气象场。基础数据系统是整个空气污染数值预报系统的基础,它包括下垫面资料、污染源资料、气象资料和实时监测污染物的监测资料 4 个部分,为模式系统提供预报的初始场和边界场以及对预报结果进行验证的观测数据。预报结果分析系统主要是对模式的输出结果进行转化,将模式的输出结果进行可视化并进行网络发布,使得用户更为直观清晰地了解污染物的变化情况。

3.2 参数设置

本研究设置了三重嵌套区域,第一区域主要为甘肃省中东部地区,包含青海、宁夏、陕西的部分地区,格点分辨率为 9 km,格点数 78×69 。第二区域主要为兰州市域范围,格点分辨率 3 km,格点数 72×63 。第三区域主要为兰州市城区及周边部分地区,格点分辨率 1 km,格点数 45×30 。垂直方向采用地形追随坐标,分为 10 层,从地面至海拔 10 km 不均匀分布,其中 2 km 以下为 5 层。以下使用的分析均基于第三区域的模拟结果。

MM5 气象初始场资料采用美国 NCAR 提供的 $1^\circ(\text{纬度}) \times 1^\circ(\text{经度})$ 再分析资料,污染源资料采用 2001 年 TRACE-P (TRANsport and Chemical Evolution over the Pacific) 期间的排放源资料 (Davis et al., 2003),分辨率为 $0.1^\circ(\text{纬度}) \times 0.1^\circ(\text{经度})$,同时应用兰州市及周边地区重点工业企业、大型火电厂、大型集中联片共热点、分散燃煤锅炉的排放源数据进行更新。

为更好地分析污染特征的气象影响因素,MM5 气象驱动场模拟时间定为 2006 年 12 月 12~28 日,污染物模拟时间为 2006 年 12 月 25~27

日,25 日前增加初始场的模拟。

4 结果与分析

4.1 模拟结果验证

本研究污染模拟时段为 2006 年 12 月 25 日 00 时至 27 日 23 时 (北京时间,下同),从模拟结果提取兰炼宾馆、生物制品研究所 (简称生物所) 数据与这两个点的观测值进行比对分析。

表 1 和表 2 显示,生物所 SO_2 观测与模拟值的一致性较好,倍数平均值为 0.93,而 PM_{10} 观测与模拟值的一致性较差,倍数平均值为 2.47,这主要是因为生物所观测点离公路较近,且人口密度较大,人为活动和气象因素引起的局地污染特别是二次扬尘较为显著。从图 2 可以发现,大部分模拟值在观测值的 0.5~2 倍区间内,说明模拟基本能够反映大气污染的主要特征。

表 1 SO_2 观测与模拟值的比较

Table 1 Comparisons between the observed and simulated SO_2 concentrations

监测点	样本数	监测平均值 $/\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$	模拟平均值 $/\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$	倍数平均值 (监测/模拟)
兰炼宾馆	72	88.14	71.72	1.59
生物所	72	42.07	62.30	0.93

表 2 PM_{10} 观测与模拟值的比较

Table 2 The same as Table 1, but for PM_{10}

监测点	样本数	监测平均值 $/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	模拟平均值 $/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	倍数平均值 (监测/模拟)
兰炼宾馆	72	313.34	248.20	1.42
生物所	72	451.67	253.92	2.47

4.2 污染时空分布

4.2.1 水平分布特征

图 3 展示了 2006 年 12 月 25~27 日 12 时和 00 时兰州城区 SO_2 、 PM_{10} 和地面风场的平均分布。模拟期间,整个城区风速很小,处于近静风状态,污染主要集中在河谷盆地中,呈带状分布,东西各有一个污染高值区域, SO_2 、 PM_{10} 的污染分布趋势保持一致。从时间变化上看,12 时 SO_2 和 PM_{10} 的浓度和高值分布范围明显高于 00 时,呈现夜晚低、白天高,与观测到的特征吻合。

污染物的这种分布特征与兰州市的人口经济

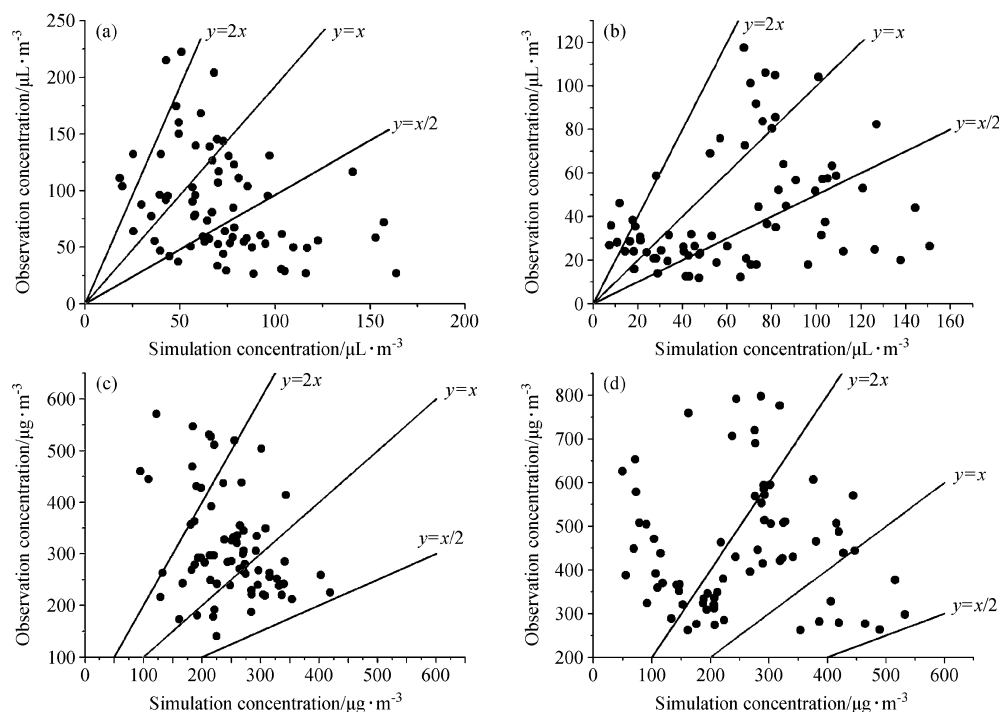


图2 (a、c) 兰炼宾馆、(b、d) 生物所 (a、b) SO₂、(c、d) PM₁₀ 模拟与观测值散点图

Fig. 2 Scatter plots of simulated and observed (a, b) SO₂ and (c, d) PM₁₀ at (a, c) Lanlian and (b, d) Shengwusuo stations

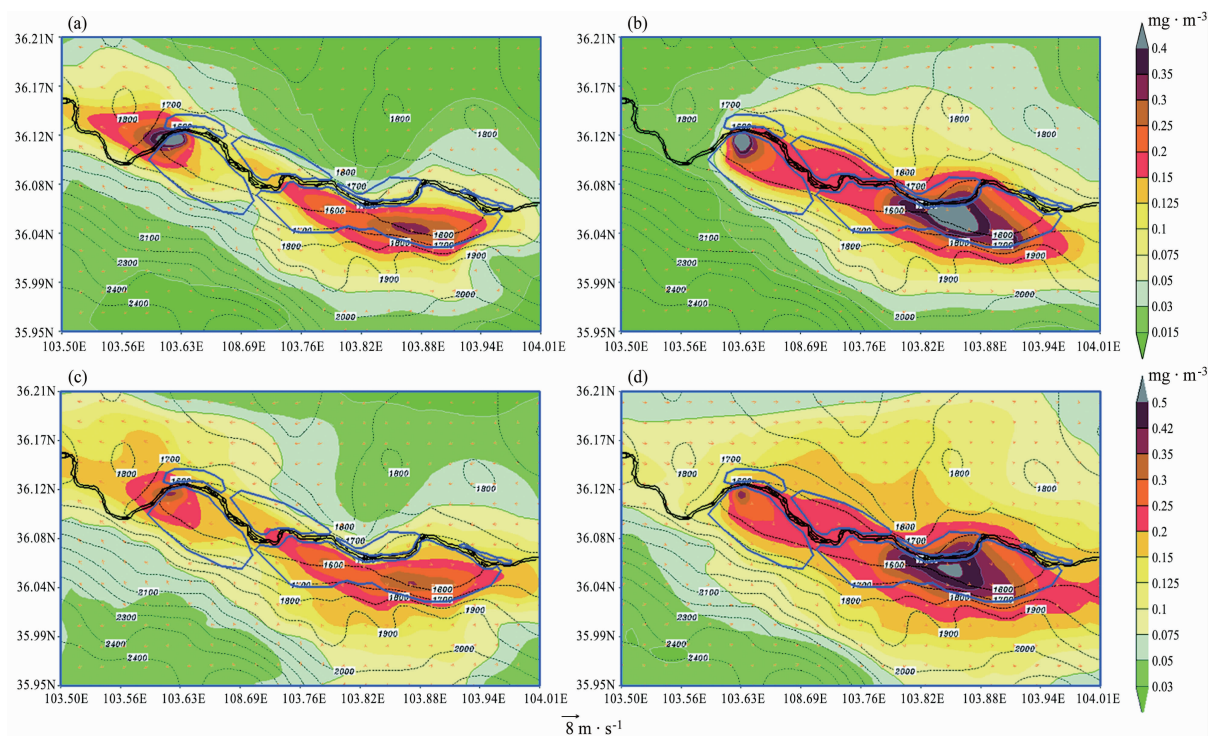


图3 2006年12月25~27日 (a、c) 00时和 (b、d) 12时兰州城区地面 (a、b) SO₂和 (c、d) PM₁₀以及风场。虚线是等高线 (单位: m), 蓝色线条区域为兰州市城区, 黑线为黄河

Fig. 3 Spatial distributions of the averaged surface (a, b) SO₂ and (c, d) PM₁₀ at (a, c) 0000 LST and (b, d) 1200 LST and wind vectors during 25~27 Dec 2006 in Lanzhou city. Dashed lines denote contour terrain lines (m), blue line denote Lanzhou city boundary, and black line denotes the Yellow River

产业分布状况密切相关。城市东部是城关区，人口密度也最大，冬季燃煤采暖锅炉排放大量的污染物，形成了河谷盆地东部高值区；城市西部是西固区，是兰州市的主要工业区，集中了大型石油化工、冶炼、能源、机械加工等产业，人口密度较城关区小，大气污染主要是工业生产和冬季

采暖共同作用，形成了河谷盆地西部高值区。

4.2.2 垂直分布特征

为了更好地显示污染物的时空分布特征，沿兰州城区东西向和南北向取 3 个剖面（如图 4 所示），分别展示 2006 年 12 月 25~27 日 00 时和 12 时的 SO_2 和 PM_{10} 污染垂直分布状况（如图 5~7



图 4 沿兰州城区的垂直剖面分布图，红线表示剖面方向

Fig. 4 The selected cross sections along Lanzhou city, red lines denote three cross sections

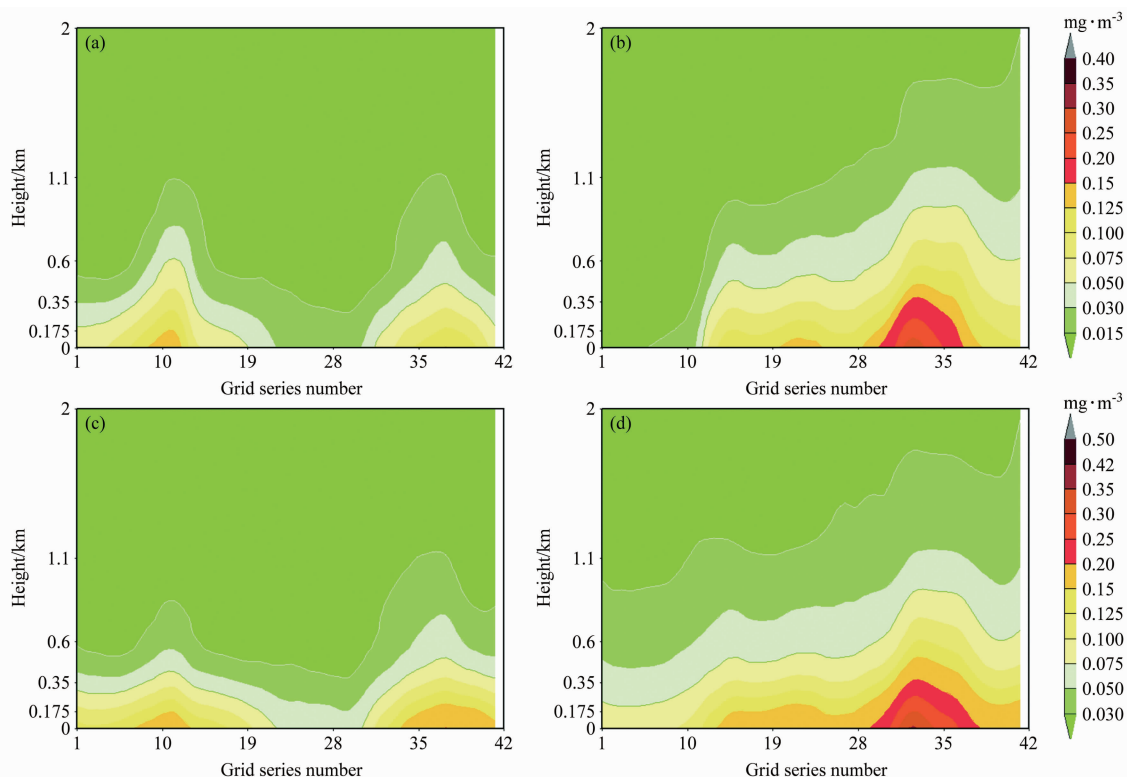


图 5 2006 年 12 月 25~27 日 (a、c) 00 时和 (b、d) 12 时 (a、b) SO_2 和 (c、d) PM_{10} 沿剖面 A 的垂直分布

Fig. 5 Vertical profile of (a, b) SO_2 and (c, d) PM_{10} at (a, c) 0000 LST and (b, d) 1200 LST during 25–27 Dec 2006 along cross section A

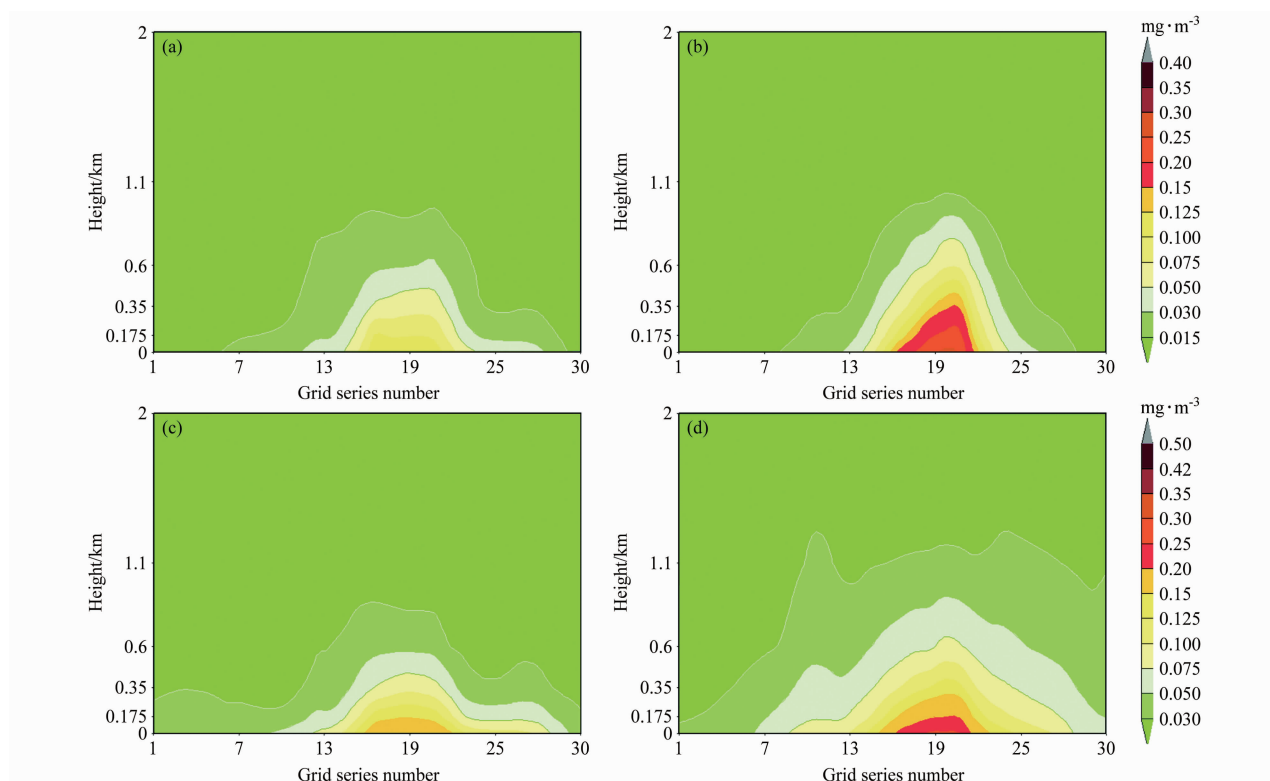


图 6 同图 5, 但为剖面 B

Fig. 6 Same as Fig. 5, but along cross section B

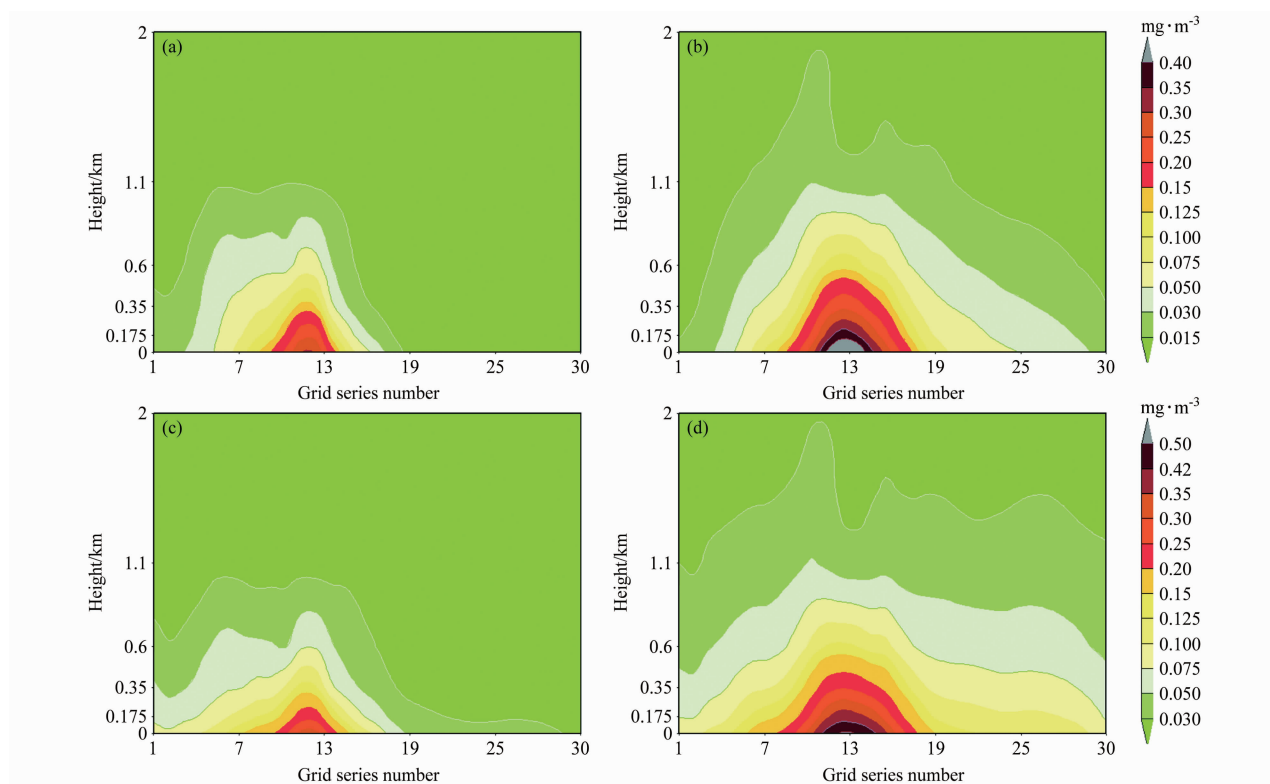


图 7 同图 5, 但为剖面 C

Fig. 7 Same as Fig. 5, but along cross section C

所示)。从图中可以看出, 污染高值主要在近地面, 东西向两个峰。明显地, PM₁₀ 可以比 SO₂ 扩散至更高的高度。以 0.05 mg · m⁻³ 浓度值为例, 对于 SO₂ 来讲, 高于此浓度主要分布在 800 m 以下, 大部分在 600 m 以下, PM₁₀ 则相对要更高, 在 1 km 以下。

4.3 影响因子

兰州城区冬季大气污染日变化呈现白天高、夜晚低, 峰值出现在中午的特点, 这与兰州市特殊的地理气象条件有关。有研究表明, 兰州市山谷内的大气污染物浓度变化主要取决于山谷内大气逆温和水平风速 (张强, 2003)。

考虑到污染物的累积与消散有一个时间过程, 故气象分析提前 2 h。从图 8 可以看出, 整个区域地面风很小, 这对污染物的扩散造成了很大的不利影响。

从图 9 中可以看出, 风速的变化与污染物的变化呈现出了一致的趋势, 其中兰炼宾馆模拟平均风速为 1.2 m · s⁻¹, 最小、最大值分别为 0.4 m · s⁻¹、2.4 m · s⁻¹, 生物所模拟平均风速为 1.0 m · s⁻¹, 最小、最大值分别为 0.4 m · s⁻¹、1.8 m · s⁻¹。这说明, 兰州城区在较低的风速条件下, 风速变化对站点污染物浓度的变化影响不大。

从图 10 可见, 兰炼宾馆、生物所观测点出现逆温的时段分别为 19 时至次日 13 时、21 时至次日 12 时, 没有逆温的时间分别为 5 h 和 8 h, 为下午至傍晚时间。两站逆温出现次数最多的时间都为 6~11 时。由于逆温对污染物扩散的影响, 使得污染浓度从凌晨开始持续增长, 至中午达到极致, 而在下午逆温消失后回落。这说明, 逆温对污染的影响是显著的。

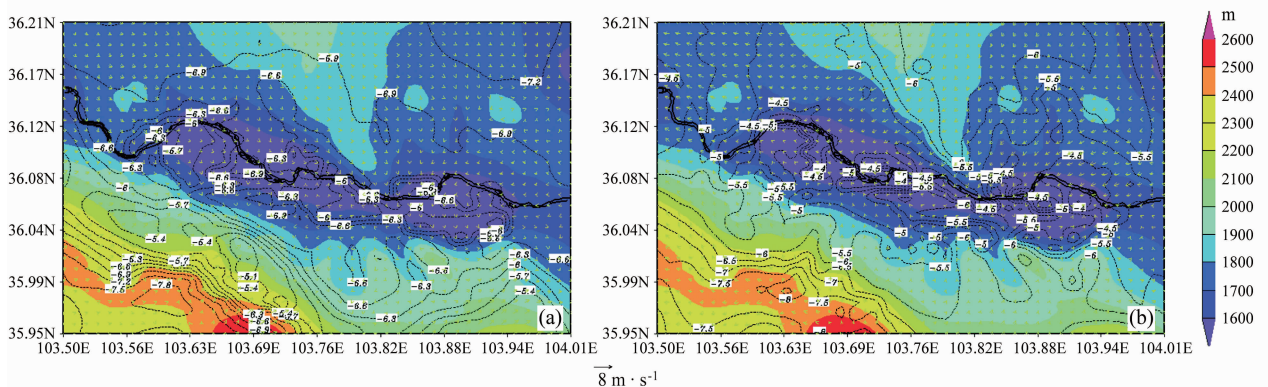


图 8 兰州城区 2006 年 12 月 12~28 日地形 (阴影) 及 (a) 10 时和 (b) 22 时地面风场与温度 (虚线, 单位: °C)

Fig. 8 The terrain height (shadings), averaged surface wind vectors and temperature (dashed lines, units: °C) at (a) 1000 LST and (b) 2200 LST during 12–28 Dec 2006 in Lanzhou city

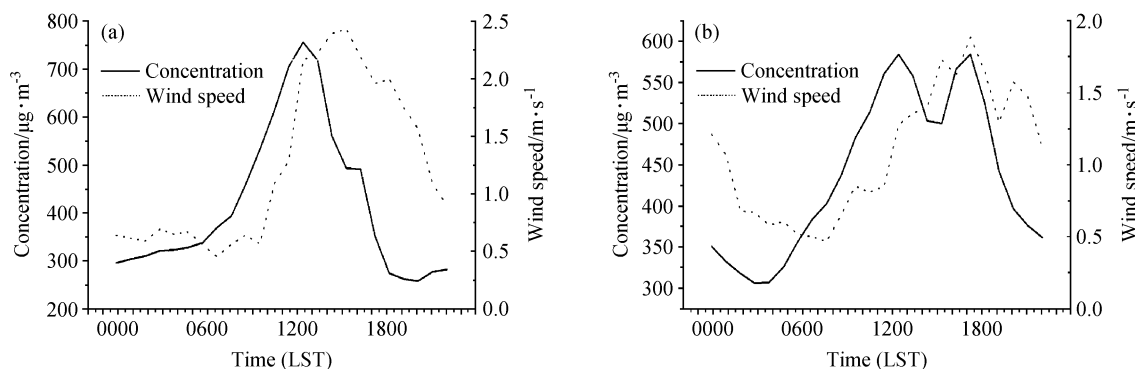


图 9 2006 年 12 月 12~28 日 (a) 兰炼宾馆和 (b) 生物所模拟地面风速与观测 PM₁₀ 浓度的日变化

Fig. 9 Mean diurnal variations of the simulated surface wind speeds and observed PM₁₀ concentrations at (a) Lanlian and (b) Shengwusuo stations during 12–28 Dec 2006

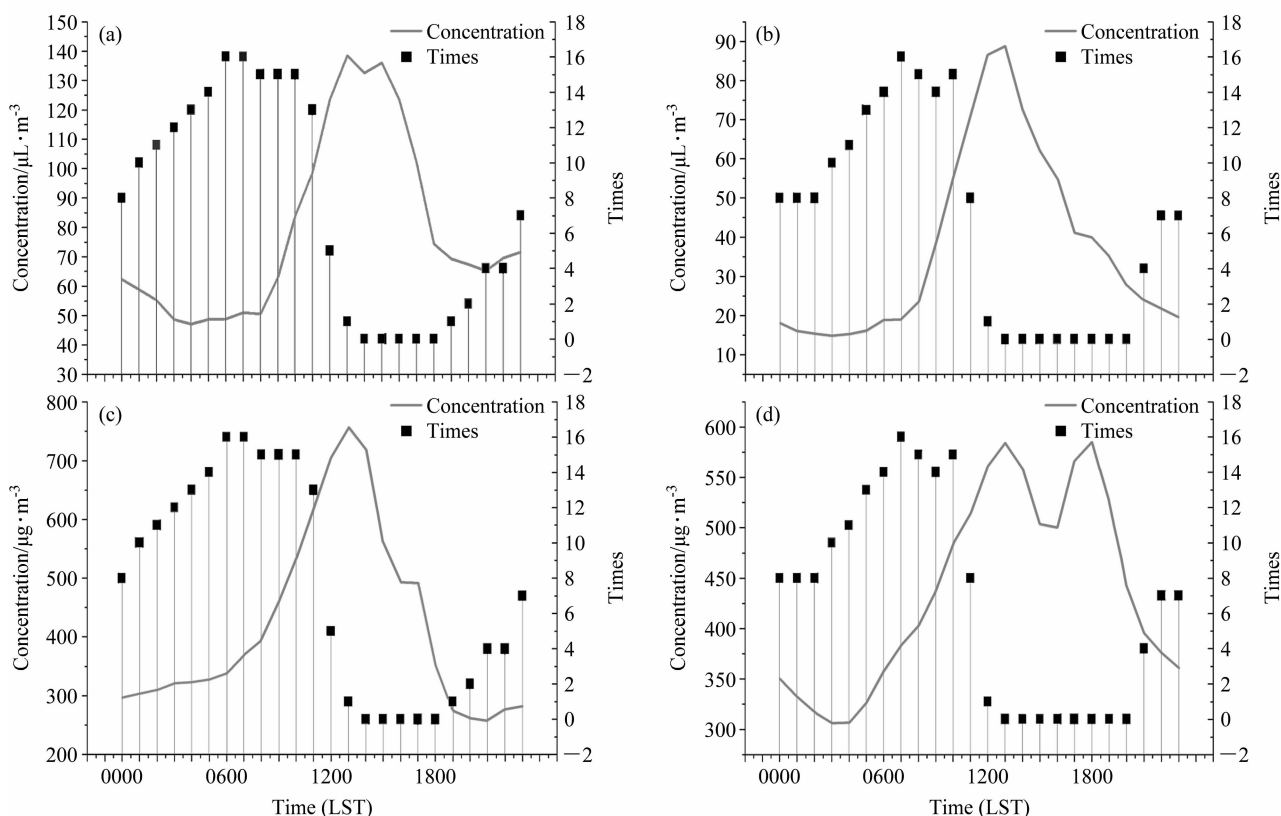


图 10 2006 年 12 月 12~28 日 (a、c) 兰炼宾馆和 (b、d) 生物所模拟逆温发生次数、观测 (a、b) SO_2 和 (c、d) PM_{10} 浓度的日变化

Fig. 10 Mean diurnal variations of the simulated times of the temperature inversion, observed (a, b) SO_2 and (c, d) PM_{10} concentrations at (a, c) Lanlian and (b, d) Shengwusuo stations during 12 - 28 Dec 2006

5 结论

兰州冬季大气污染日变化呈现出白天高、夜晚低, 污染物浓度中午达到最高, 而低值出现在凌晨的特征。

NAQPMS 较为合理地反映了兰州城区及周边复杂地形条件下的污染变化情况。模拟出的污染分布与兰州市的产业布局、人口经济分布相一致, 模拟结果与观测结果比较吻合, 反映出了污染的时空变化情况。

山谷地区冬季大气污染主要影响因素为大气逆温与水平风速, 由于兰州地区冬季平均风速低、静风频率高, 使得逆温成为影响该地区污染的主导因素。逆温出现频次的日变化特征与污染的日变化特征一致, 说明逆温在冬季大气污染日变化中的作用显著。

参考文献 (References)

- 安兴琴, 左宏超, 吕世华, 等. 2005. Models-3 空气质量模式对兰州市污染物输送的模拟 [J]. 高原气象, 24 (5): 748 - 756.
- An Xingqin, Zuo Hongchao, Lü Shihua, et al. 2005. Simulation on air pollution of Lanzhou utilizing Models-3 air quality model system [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 748 - 756.
- Davis D D, Chen G, Grawford J H, et al. 2003. An assessment of western North Pacific ozone photochemistry based on spring observations from NASA's PEM-West B (1994) and TRACE-P (2001) field studies [J]. J. Geophys. Res., 108, D21, 8829, doi: 10.1029/2002JD003 - 232.
- 韩素芹, 冯银厂, 边海, 等. 2008. 天津大气污染物日变化特征的 WRF-Chem 数值模拟 [J]. 中国环境科学, 28 (9): 828 - 832.
- Han Suqin, Feng Yinchang, Bian Hai, et al. 2008. Numerical simulation of diurnal variation of major pollutants with WRF-Chem model in Tianjin [J]. China Environmental Science (in Chinese), 28 (9): 828 - 832.

- 胡隐樵, 张强. 1999. 兰州山谷大气污染的物理机制与防治对策 [J]. 中国环境科学, 19 (2): 119 - 122. Hu Yinqiao, Zhang Qiang. 1999. Atmosphere pollution mechanism along with prevention and cure countermeasure of Lanzhou hallow basin [J]. China Environmental Science (in Chinese), 19 (2): 119 - 122.
- 姜大膀, 王式功, 朗咸梅, 等. 2001. 兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 37 (4): 133 - 138. Jiang Dabang, Wang Shigong, Lang Xianmei, et al. 2001. The characteristics of stratification of lower-layer atmospheric temperature and their relations with air pollution in Lanzhou proper [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 37 (4): 133 - 138.
- 姜金华, 彭新东. 2002. 复杂地形城市冬季大气污染的数值模拟研究 [J]. 高原气象, 21 (1): 1 - 7. Jiang Jinhua, Peng Xindong. 2002. Numerical study on air pollution concentration over Lanzhou winter under complex terrain [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (1): 1 - 7.
- 王式功, 杨德保, 尚可政, 等. 1997. 兰州城区冬半年低空风时空变化特征及其与空气污染的关系 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 33 (3): 97 - 105. Wang Shigong, Yang Debao, Shang Kezheng, et al. 1997. Time-space changing character of low-level wind in Lanzhou city and its correlation with air pollution [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 33 (3): 97 - 105.
- 王自发, 黄美元, 何东阳, 等. 1997. 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 I. 三维欧拉污染物输送实用模式 [J]. 大气科学, 21 (3): 367 - 378. WANG Zifa, Huang Meiyuan, He Dongyang, et al. 1997. Studies on transport of acid substance in China and East Asia. Part I: 3-D eulerian transport model for pollutants [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (3): 367 - 378.
- 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.
- 杨德保, 王式功, 黄志国. 1994. 兰州市区大气污染与气象条件的关系 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 30 (1): 132 - 136. Yang Debao, Wang Shigong, Huang Zhiguo. 1994. The relations between the meteorological conditions and the air pollution over the city of Lanzhou [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 30 (1): 132 - 136.
- 张强. 2001. 地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响 [J]. 中国环境科学, 21 (3): 230 - 234. Zhang Qiang. 2001. The influence of terrain and inversion layer on pollutant transfer over Lanzhou city [J]. China Environmental Science (in Chinese), 21 (3): 230 - 234.
- 张强. 2003. 兰州大气污染物浓度与局地气候环境因子的关系 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 39 (1): 99 - 106. Zhang Qiang. 2003. A study of the interaction between concentration of pollutants and the climatic and environmental factors of Lanzhou [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 39 (1): 99 - 106.