

何建军,余晔,刘娜,等. 2013. 基于 WRF 模式的兰州秋冬季大气污染预报模型研究. 气象, 39(10): 1293-1303.

基于 WRF 模式的兰州秋冬季 大气污染预报模型研究^{*}

何建军^{1,2} 余晔¹ 刘娜^{1,2} 赵素平^{1,2} 陈晋北¹

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

2 中国科学院大学,北京 100049

提 要: 随着城市化进程的加快,城市大气环境问题成为人们关注的热点问题之一。诸多研究表明,特殊气象条件是造成城市大气污染事件的主要因子之一。本文利用 WRF 模式模拟得到的高时空分辨率气象场,结合污染物浓度监测数据,分析了风速、稳定能量、Froude 数、边界层高度、位温递减率、输送指数和梯度理查森数与兰州大气污染物浓度的关系,并根据 WRF 的模拟要素建立了污染物浓度与气象影响因子的回归方程。研究发现,兰州城区边界层高度和位温递减率与大气污染物浓度的相关系数高,NO₂ 与气象影响因子的相关性较 PM₁₀ 好。建立的回归方程对 NO₂ 的模拟效果好于对 PM₁₀ 的模拟效果,其对城区污染物浓度的模拟效果好于郊区。通过与不同地区空气质量数值模式模拟效果对比,结果表明:回归方程对污染物的模拟效果与数值模式模拟效果相当,甚至好于部分地区空气质量数值模式的模拟效果。因此,该研究方法为我国城市空气质量预报和大气污染研究提供了科学依据。

关键词: WRF, 大气污染, 数值模拟, 线性回归

中图分类号: P49

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.10.007

WRF-Based Forecast Model for Autumn and Winter Air Quality in Lanzhou

HE Jianjun^{1,2} YU Ye¹ LIU Na^{1,2} ZHAO Suping^{1,2} CHEN Jinbei¹

1 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 Sciences, Lanzhou 730000

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract: This paper investigates the relationship between air pollutant concentrations and seven meteorological parameters (wind speed, stable energy, Froude number, atmospheric boundary layer height, potential temperature lapse rate, transport index and gradient Richardson number) based on the near ground air pollutant concentrations and the high temporal and spatial resolution meteorological data from the Weather Research and Forecast (WRF) model and develops a regression model for predicting ground level daily mean PM₁₀ (particulate matter with aerodynamic diameter less than 10 μm) and NO₂ (nitrogen dioxide) concentrations for urban Lanzhou. The results show that in urban Lanzhou, pollutant concentrations correlate better with atmospheric boundary layer height and potential temperature lapse rate, and the correlations between NO₂ and meteorological parameters are better than that between PM₁₀ and meteorological parameters. The developed regression model performs better for NO₂ than for PM₁₀. The fitting degree of the developed regression model is higher in urban area than that in rural area, leading to the better

* 中国科学院百人计划项目(290827631)资助

2012 年 8 月 31 日收稿; 2013 年 3 月 5 日收修定稿

第一作者:何建军,主要研究方向为城市污染气象. Email:hejianjun520520@163.com

通信作者:余晔,主要从事数值模拟、大气边界层和大气环境研究. Email:yuy@lzb.ac.cn

performance in urban area. The overall performance of the regression model is as good as widely used comprehensive air quality models. The method provides a scientific basis for urban air quality forecasting and air pollution study.

Key words: WRF, air pollution, numerical simulation, liner regression

引 言

随着全球气候变化的加剧,以及城市化过程引发的诸多问题,城市大气环境问题已成为全球关注的热点问题之一。工业生产中矿物燃料燃烧、交通工具废气排放及冬季燃煤取暖等,使城市大气环境不断恶化,不仅危害到人们的正常生活,而且威胁着人们的身心健康。污染物排放量和大气对污染物的稀释扩散能力是影响城市大气环境质量的两个主要因子。在污染物排放量一定的情况下,污染浓度的日变化或月变化主要是由某些天气过程和天气系统影响城市边界层大气对污染物的稀释扩散能力造成的。大量研究发现城市大气污染与天气形势关系密切(Lam et al, 1998; Oanh et al, 2005; Bei et al, 2013; 孟燕军等, 2002),不利于大气扩散的天气形势甚至造成严重的城市大气污染事件,如著名的伦敦烟雾事件和洛杉矶光化学烟雾事件就是大量污染物排放和不利天气形势共同作用的结果。Chen 等(2008)通过分析天气形势对中国北方城市大气环境的影响,指出在高压及随后持续低压的天气形势下,空气污染指数(Air Pollution Index, API)会增加,冷锋前 API 达到极大值,冷锋过境时气压梯度增大,API 迅速减小,大气污染物浓度降低。气象条件对不同污染成因造成的大气环境问题的影响也不同。对于区域性污染,如沙尘污染,风速增加虽然可使城市大气通风能力增强,但由于污染物(沙尘)输入的增加,大气污染可能加重;对于局地污染,风速增加使大气通风能力增强,大气污染减轻(Pasch et al, 2011)。区域天气形势和局地气象条件对大气污染的影响程度也不同,在一些地区局地气象条件对大气环境可能有决定性影响(Xu et al, 2011)。Pearce 等(2011a; 2011b)分析了墨尔本大气环境与天气形势和局地气象条件之间的关系,发现局地气象条件对大气环境的影响更大。Lu 等(2012)模拟研究了气象条件对由南加州自然火灾所引起烟雾的输送和扩散的影响,发现复杂地形地区局地大气环流对大气污染物输送有很大的影响。李喜仓等

(2011)分析了城市发展对大气环境的影响,发现城市发展影响局地环流,大气扩散能力减弱。

兰州属大陆性干旱半干旱地区,年降水量 327.7 mm,其中 50%的降水集中在 7—10 月,年平均气温 9.3℃,年平均风速 0.8 m·s⁻¹,年平均静风频率达 62%,近地面盛行偏东风(Wang et al, 2009)。目前兰州市城区人口超过 300 万,大量工业生产排放、机动车尾气排放和燃煤取暖排放加上特殊的山谷地形影响,使兰州成为全国大气污染最严重的城市之一(张远航等, 1987),特别是冬季,污染十分严重,空气质量超标率达 50%以上(陈雷华等, 2010)。许多学者针对兰州市冬季大气污染成因做了大量有意义的工作。胡隐樵等(1999)定性分析了兰州大气污染的成因,指出冬季兰州山谷大气边界层长时间日夜维持的大气逆温和几乎静风的气象条件是造成兰州大气污染严重的客观原因,并提出了相应的治理对策;张强(2001)用 Froude 数分析了地形和逆温对兰州大气污染的影响,指出兰州山谷气流的 Froude 数远小于 1,在一般的天气条件下,地面污染物较难通过沿坡爬升方式输送出去;An 等(2007)认为大气环境容量小造成了兰州市严重的大气污染,污染物排放量减少 20%空气质量才能达到 II 级标准;姜大腾等(2001)、王世功等(2000)和尚可正等(2001)利用短期实验观测资料、多年常规地面和探空观测资料分析了低空风和大气温度层结状况以及天气形势与城市空气污染的关系,指出低空风速、逆温层厚度和强度、日最大混合层厚度及稳定能量是影响兰州市空气质量的重要因素。

随着人们对城市大气环境问题的日益重视,特别是 2012 年 6 月中华人民共和国环境保护部正式发布《重点区域大气污染防治“十二五”规划》,首次将民众最关心的细颗粒物(PM_{2.5})纳入指标体系,对今后大气污染防治工作和保护人民群众身体健康等都具有十分重要的意义。同时,也对大气污染预报工作提出了更高的要求。本文利用 WRF 模式模拟高时空分辨率的优势,通过模拟 2011 年 11 月 1 日至 2012 年 2 月 29 日兰州市区及其周边气象场,结合兰州市环境监测站的空气污染物浓度监测资料,

采用相关分析方法,分析兰州市冬季大气污染物浓度与气象因子的关系,明确主要影响因子以及影响因子与大气污染物浓度的关系,并建立预报模型,为开展城市空气质量预报提供参考。

1 资料和研究方法

1.1 资料及来源

本文所用资料包括 2011 年 11 月 1 日至 2012 年 2 月 29 日兰州市 4 个大气环境监测点[职工医院(SWH),生物制品研究所(LIBP),兰炼宾馆(LLH)和三角城(TC)]的 NO_2 和 PM_{10} 小时平均浓度自动监测数据;研究区 3 个自动气象站点[兰州(LZ)、皋兰(GL)和榆中(YZ)每日 8 次(02、05、08、11、14、17、19 和 21 时,LST)]地面常规观测资料和榆中(YZ)站 08 和 20 时的探空资料以及 WRF 模式模拟的研究区气象场。4 个大气环境监测站和 3 个自动气象站的位置示于图 1b,其中 LIBP、LLH 和 SWH 3 个监测点位于兰州城区,TC 监测点位于距离兰州城区 48 km 以外的榆中县城。城区监测点周边土地利用差异很大:SWH 周边是小工厂和耕地,LIBP 周边是居民区,LLH 周边是工业区。为了尽量减少除气象条件以外的其他因素对大气污染物浓度的影响,选择兰州气温低、降水少和污染源相对稳定的冬季,并且在分析气象参数与污染物浓度之间的相关性时剔除了有降水的时段。另外,为了去除污染源排放量日变化的影响,分析中使用污染物浓度的日均值。

1.2 研究方法

目前,空气质量预报模式大致分为 3 类。第一类是无化学反应的预报模式,它主要由扩散模式和统计模式组成;第二类是考虑气象场的影响又考虑污染物化学反应的化学预报模式;第三类是空气质量信息系统,它是将与空气质量有关的资料系统、预报模式、预报系统、决策系统和评估系统等有机的结合在一起。我国空气质量预报主要方法有数值模式、数理统计和综合经验 3 类方法(朱玉强,2004)。姚琳等(2012)对成都市空气质量预报中 WRF 的本地化参数选取进行了研究;顾莹(2010)尝试利用 WRF 模拟结果作为观测值代入动力-统计预报模式进行预报,分等级预报的结果较为理想。本文使用

WRF 模式模拟研究区气象场,通过分析兰州市冬季大气污染物浓度与气象因子的关系建立预报模型。

1.2.1 数值模拟方案

WRF 模式系统是美国国家大气科学研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)、国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)等多个部门联合开发的新一代高分辨率中尺度预报模式和资料同化系统,分为 ARW 和 NMM 两个动力核。WRF-ARW 是可压缩、欧拉、非静力平衡模式,控制方程组为通量形式,采用地形跟随静压垂直坐标系,水平网格采用 Arakawa-C 交错格式,模式顶层气压为常数。本研究采用 WRF-ARW V3.3 模式。

模拟试验微物理参数化选用 WRF Single-Moment 6-class(WSM6)方案(Hong et al,2006),积云参数化选用 K-F 方案(Kain,2004),辐射参数化选用长波辐射方案 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)(Mlawer et al,1997)和 Dudhia 短波辐射方案(Dudhia,1989),边界层参数化选用 YSU 方案(Hong et al,2006b),近地面参数化选用 Monin-Obukhov 相似理论方案,陆面过程参数化选用包含城市参数化的 Noah 陆面过程模式(Chen et al,1996)。

模式采用分段积分,将模拟时段(2011 年 10 月 30 日至 2012 年 2 月 29 日)分为 9 段分别进行模拟,每段前 24 h 作为模式起转时间,不作分析。模式垂直方向分为 35 层,模式层顶气压为 50 hPa。模式采用单向四重嵌套,网格距分别为 27、9、3 和 1 km,第四重模拟区域覆盖了兰州市区及南北两山大部地区(图 1a)。模式初始场和侧边界条件由 NCEP FNL 资料(时间间隔 6 h,空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$)提供。

1.2.2 影响因素的选取

影响边界层大气对污染物稀释扩散能力的因素主要有风、大气层结稳定度、混合层高度、逆温层厚度和强度等。风对大气污染物的稀释扩散和三维输送起着重要作用,是与空气污染密切相关的气象参数。在兰州特殊地形影响下,低层风一般比较小,这与低层大气层结过于稳定使上层动量下传受阻有关。因此,稳定的大气层结被认为是引起兰州空气重污染的因素之一(尚可政等,2001)。在以往的研究和应用中理查森数被用来描述低层大气的稳定度,逆温厚度和强度被用来描述近地面层的逆温状

况, Froude 数被用来衡量山谷地形下稳定大气边界层的气流越山能力(张强, 2001), 输送指数或通风指数被用来描述低层大气的扩散能力(Termonia et al, 2004), 大气边界层总体稳定度参数被用来衡量大气边界层湍流运动能力。

根据研究区的特点, 选取风速、稳定能量、Froude 数、边界层高度、位温递减率、输送指数和梯度理查森数来分析局地气象条件对兰州大气环境的影响。由于逆温强度和厚度无法描述没有逆温状态时大气的扩散能力, 故采用反映大气层结状态的位温递减率取代。有研究指出兰州低空气象参数中稳定能量与污染物浓度之间相关性最显著, 各月污染物浓度与稳定能量相关性最好的高度层位于 500~850 m(尚可政等, 2001), 因此计算了地面到 500 m 低空稳定能量。所选气象参数具体算法详见附录。

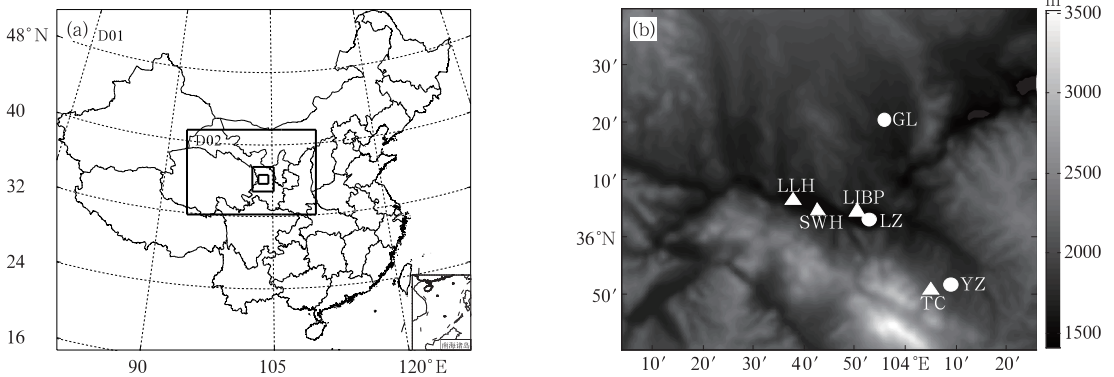


图 1 模式模拟区域(a)和研究区内观测站点分布(b)

[生物制品所(LIBP)、兰炼宾馆(LLH)、职工医院(SWH)和三角城(TC)为大气环境自动监测站, 兰州(LZ)、皋兰(GL)和榆中(YZ)为自动气象站]

Fig. 1 Four nested domains of WRF (a), three meteorological stations (dots) and four air quality stations (triangles) in the innermost domain (elevations shaded gray) (b)

2 模拟结果检验及回归方程效果分析

2.1 气象场模拟结果检验

本节用命中率(HR)、平均偏差(MB)、均方根误差($RMSE$)和标准差(SD)来评估 WRF 模式在研究区域的模拟能力。 HR 考虑了观测的不确定性, 其结果可以反映模式的总体模拟性能, 其值与所选控制值大小有关。气温、相对湿度和风速的控制值分别取 2°C 、 10% 和 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Papalexiou et al, 2006; Miao et al, 2009)。

1.2.3 相关分析

本文用相关系数描述变量间的相关程度。常用的相关系数有 Pearson 积矩相关系数、Spearman 秩相关系数和 Kendall 秩相关系数。用 Kolmogorov-Smirnov 法, 取显著性水平为 0.05, 检验变量是否服从正态分布, 结果表明日平均污染物浓度、风速、Froude 数和输送指数服从对数正态分布, 位温递减率、稳定能量和边界层高度服从正态分布, 梯度理查森数是非正态分布。因此, 用 Pearson 积矩相关系数描述风速对数、Froude 数对数、输送指数对数、位温递减率、稳定能量和边界层高度与污染物浓度对数的相关性; 用 Spearman 秩相关系数描述梯度理查森数与污染物浓度对数的相关性。下文将 Pearson 积矩相关系数和 Spearman 秩相关系数均简称为相关系数。

表 1 给出了第四重模式区域模拟结果与 3 个自动气象站和 1 个探空站观测值对比统计结果。WRF 模式模拟的气温比观测值偏高, 模拟的近地面气温标准差较观测标准差小。WRF 模式对上层气温的模拟效果好于近地面气温, 近地面相对湿度和风速模拟效果较上层好。WRF 模式在不同研究区的模拟能力不同, Miao 等(2009)利用 WRF 模式模拟研究了北京地区城市热岛和边界层结构的变化, 得到 WRF 模拟的 2 m 气温、2 m 比湿和 10 m 风速的 HR 分别是 70% 、 60% 和 62% , MB 分别是 0.2°C 、 $-1.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $RMSE$ 分别是 1.94°C 、 $2.19\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。尽管兰州

地区地形复杂,统计评估结果与其他地区基本相当, WRF 模式能很好地模拟兰州地区气象场。

表 1 气温、相对湿度和风速模拟与观测值比较统计量

Table 1 Performance statistics of simulated temperature, relative humidity and wind speed

统计量	温度/°C	相对湿度/%	风速/m·s ⁻¹
HR ^a /%	61	49	45
MB ^a	0.62	-3.37	0.12
RMSE ^a	2.58	15.83	1.53
SD _C ^a	5.93	18.98	1.6
SD _O ^a	6.86	17.06	0.65
HR ^b /%	80	35	31
MB ^b	0.14	5.51	-0.09
RMSE ^b	1.72	23.46	3.14
SD _C ^b	15.1	21.74	11.78
SD _O ^b	15.04	27.28	12.01

注: a: 与地面观测资料对比结果, b: 与探空资料对比结果, C: 模拟值, O: 观测值。

a: the results compared with surface observation data, b: the results compared with sounding data, C: simulated, O: observed

2.2 日平均污染物浓度与气象影响因素的相关性分析

图 2 是日平均 NO₂ 浓度对数与风速对数、位温递减率、梯度理查森数、输送指数对数的相关系数。图中垂直虚线是相关系数通过 $\alpha=0.05$ 显著水平 t 检验时临界值。日平均 NO₂ 浓度对数与风速对数呈负相关(图 2a), 4 个环境监测站(SWH、LIBP、LLH 和 TC, 下同)最大相关系数分别是 -0.47、-0.49、-0.45 和 -0.39, LIBP 在 200 m 高度相关系数最大, 其余站点则在近地面 50 m 处相关系数最大。城区环境监测站在 450 m 以下相关系数均超过临界值, 相关系数通过 t 检验; 郊区环境监测站在 350 m 以下相关系数超过临界值。平均 NO₂ 浓度对数与位温递减率呈正相关(图 2b), 4 个环境监测站最大相关系数分别是 0.59、0.72、0.74 和

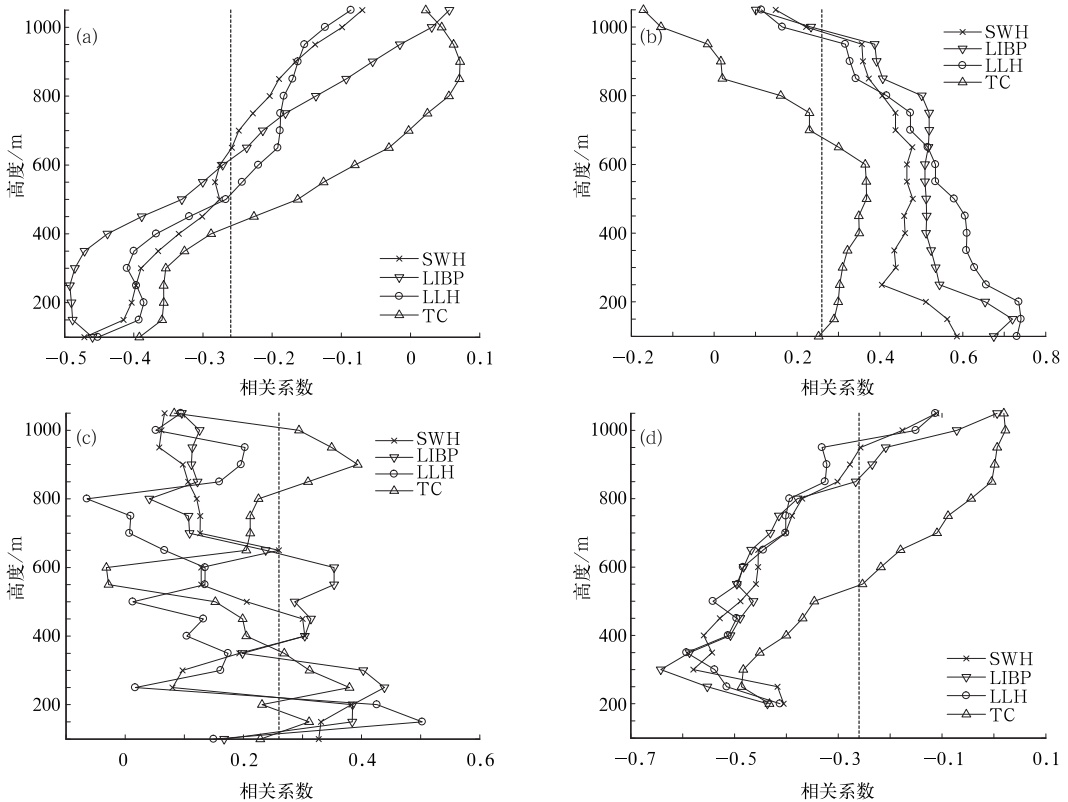


图 2 日平均 NO₂ 浓度对数和风速对数(a)、位温递减率(b)、梯度理查森数(c)及输送指数对数(d)的相关系数随高度的变化

(图中垂直虚线是相关系数通过 $\alpha=0.05$ 显著水平 t 检验时的相关系数临界值)

Fig. 2 Correlation coefficients between logarithm of daily-averaged NO₂ concentration and (a) logarithm of horizontal wind speed, (b) potential temperature lapse rate, (c) gradient Richardson number, and (d) logarithm of transport index

(The vertical dashed line indicates the critical correlation coefficient having passed t -test with $\alpha=0.05$)

表 2 日平均污染物浓度对数和稳定能量、Froude 数对数及边界层高度的相关系数

Table 2 Correlations between logarithm of daily average pollutant concentrations and stable energy, logarithm of Froude number and boundary height at four air quality stations

	SWH	LIBP	LLH	TC
稳定能量 ^a	0.50	0.56	0.65	0.37
Froude 数 ^a	-0.39	-0.53	-0.51	-0.42
边界层高度 ^a	-0.61	-0.67	-0.78	-0.46
稳定能量 ^b	0.58	0.59	0.61	0.44
Froude 数 ^b	-0.34	-0.46	-0.74	-0.42
边界层高度 ^b	-0.62	-0.70	-0.72	-0.46

注: a: NO₂, b: PM₁₀

0.37, 城区 150 m 以下相关系数稳定, 700 m 以上相关性随高度增加迅速减小。城区环境监测站 900 m 以下相关系数均超过临界值, 郊区环境监测站 600 m 以下相关系数超过临界值。日平均 NO₂ 浓度对数与梯度理查森数呈正相关(图 2c), 4 个环境监测站最大相关系数分别是 0.38、0.44、0.50 和 0.39, 但由于模式模拟的水平风场切变在垂直方向差异较大, 垂直方向相关性波动明显。日平均 NO₂ 浓度对数与输送指数呈负相关(图 2d), 4 个环境监测站最大相关系数分别是一 0.58、-0.64、-0.59 和 -0.49, 500 m 以上相关性随高度增加迅速减小。城区环境监测站在 800 m 以下相关系数均超过临界值, 郊区环境监测站在 450 m 以下相关系数超过临界值。日平均 PM₁₀ 浓度和风速、位温递减率、梯度理查森数、输送指数的相关性与 NO₂ 相似(图略)。4 个环境监测站日平均 PM₁₀ 浓度与风速最大相关系数分别是一 0.36、-0.44、-0.36 和 -0.25, 与位温递减率最大相关系数分别是 0.60、0.72、0.66 和 0.45, 与梯度理查森数最大相关系数分别是 0.56、0.39、0.53 和 0.30, 与输送指数最大相关系数分别是一 0.58、-0.56、-0.57 和 -0.47。表 2 是日平均污染物浓度对数和稳定能量、Froude 数对数及边界层高度的相关系数。稳定能量与污染物浓度呈正相关, 城区相关系数超过 0.5, 最大相关系数是 0.65。Froude 数与污染物浓度呈负相关, 相关性较差, 最大相关系数是一 0.53。边界层高度与污染物浓度呈负相关, 兰州城区相关系数超过 -0.6, 最大相关系数是一 0.78。受地形差异和污染源排放特征差异的影响, 郊区气象条件与污染物浓度相关性低于城区。

平均而言, NO₂ 浓度与气象参数相关性较 PM₁₀ 好, 气态污染物受局地气象条件影响较颗粒物

明显, 这与 Pearce 等(2011b)研究结果一致。不同气象参数与污染物浓度的相关性差异明显, 与污染物主要扩散和输送方式有关。兰州为典型的山谷城市, 周边山体阻碍了城区大气与周边大气的交换(张强, 2001), 城区位温递减率和边界层高度与污染物浓度相关性较其他参数好, 污染物浓度主要受大气垂直扩散能力影响。

综合分析表明, 50 m 风速、100 m 位温递减率和 250 m 输送指数与污染物浓度相关性较其他高度层显著。图 3 是日平均 NO₂ 浓度对数与 50 m 风速对数、100 m 位温递减率、250 m 输送指数对数、稳定能量、Froude 数对数和边界层高度的相关系数随日平均污染物浓度计算的滞后时间的变化。从图中可以看出, 气象条件对大气污染物浓度的影响有一定滞后性, 24 h 内相关系数随滞后时间基本呈现先增加后减小的变化趋势, 但不同环境监测站、不同气象参数间相关系数极值出现的滞后时间不同。城区日平均污染物浓度计算比风速和 Froude 数滞后 12 h 左右时, 其相关系数达到极值, 如图 3 所示, 除风速和 Froude 数, 城区站点(SWH、LIB 和 LLH)相关系数极值(极大值或极小值)滞后时间小于 12 h, 郊区则大于 12 h。气象条件对 12 h 后大气污染物浓度的影响逐渐减弱。颗粒物来源复杂, 气象参数与 PM₁₀ 浓度相关系数达到极值时的滞后时间比气象参数与 NO₂ 浓度相关系数达到极值时的滞后时间长(图略)。受地形、排放源差异的影响, 城区各环境监测站气象条件对大气污染物浓度影响的滞后性也不同, 除风速和 Froude 数, SWH 站点气象参数与污染物浓度的相关系数达到极值的滞后时间是 3~8 h, LIBP 站点相关系数达到极值的滞后时间是 7~11 h, LLH 站点相关系数达到极值的滞后时间是 4~8 h。郊区气象参数与污染物浓度达到极值的滞后时间是 12~17 h, 较长的滞后时间可能与兰州城区污染物向郊区输送有关。进一步分析发现, 风速对大气污染物浓度影响的滞后性比温度层结明显。

2.3 回归方程建立

在污染特征及地形地貌基本不变、污染物排放相对稳定的情况下, 利用气象条件对大气污染物浓度的影响有一定滞后性的特征, 通过建立多元回归方程可以预测气象因素变化对大气污染物浓度的影响。

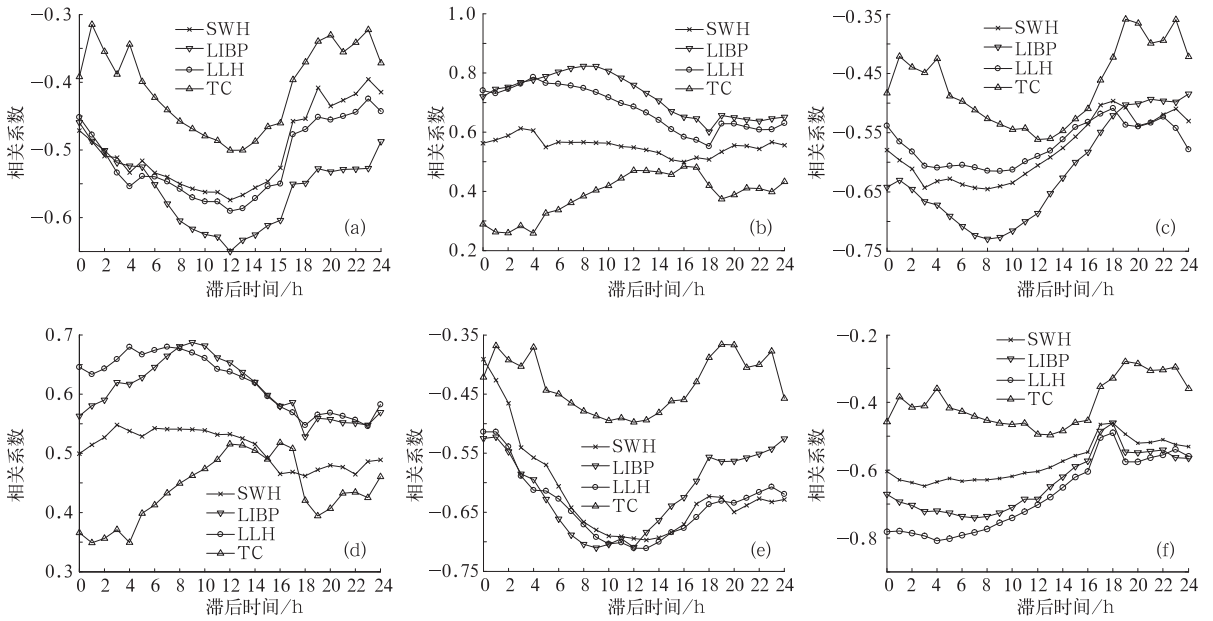


图 3 日平均 NO₂ 浓度对数与 50 m 风速对数(a)、100 m 位温递减率(b)、250 m 输送指数对数(c)、稳定能量(d)、Froude 数对数(e)和边界层高度(f)的相关系数随日平均 NO₂ 浓度计算的滞后时间的变化

Fig. 3 Correlation between meteorological parameters and logarithm of daily average NO₂ concentrations calculated with different lag times relative to (a) logarithm of 50-m horizontal wind speed, (b) 100-m potential temperature lapse rate, (c) logarithm of 250-m transport index, (d) stable energy, (e) logarithm of Froude number, and (f) boundary layer height

受地形和城市热岛影响,兰州城区出现大气层结不稳定概率高于郊区,当大气层结不稳定时,无法计算输送指数和 Froude 数。因此,在进行逐步回归分析时,城区选取 50 m 风速对数、100 m 位温递减率、稳定能量和边界层高度,郊区选用 50 m 风速对数、100 m 位温递减率、250 m 输送指数对数、稳定能量、Froude 数对数和边界层高度作为自变量,用污染物浓度对数作因变量,用 2011 年 11 月 1 日至 2012 年 1 月 20 日资料进行线性回归拟合。不同气象参数对大气污染物浓度影响的滞后性不同,分别选取 4、8、4 和 12 h 滞后时间计算 SWH、LIBP、LLH 和 TC 4 个环境监测站日平均 NO₂ 浓度,再分别选取 7、9、4 和 17 h 滞后时间计算这 4 个环境监测站的日平均 PM₁₀ 浓度,来建立预报模型。通过线性拟合,得到 NO₂ 回归方程式(1)~式(4)和 PM₁₀ 回归方程式(5)~式(8)。回归方程均通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平 F 检验,具有统计显著性。

$$\ln(\bar{C})_{\text{SWH}} = -0.371\ln(\bar{u}) + 102.783 \frac{\partial\theta}{\partial z} - 3.001 \quad (1)$$

$$\ln(\bar{C})_{\text{LIBP}} = -0.202\ln(\bar{u}) + 151.787 \frac{\partial\theta}{\partial z} - 3.631 \quad (2)$$

$$\ln(\bar{C})_{\text{LLH}} = 80.703 \frac{\partial\theta}{\partial z} - 0.00187 \bar{Bh} - 2.99 \quad (3)$$

$$\ln(\bar{C})_{\text{TC}} = -0.412\ln(\bar{l}) - 1.533 \quad (4)$$

$$\ln(\bar{C})_{\text{SWH}} = -0.608\ln(\bar{u}) + 177.493 \frac{\partial\theta}{\partial z} - 2.13 \quad (5)$$

$$\ln(\bar{C})_{\text{LIBP}} = 206.144 \frac{\partial\theta}{\partial z} - 0.0019 \bar{Bh} - 2.443 \quad (6)$$

$$\ln(\bar{C})_{\text{LLH}} = 89.039 \frac{\partial\theta}{\partial z} - 0.00309 \bar{Bh} - 1.34 \quad (7)$$

$$\ln(\bar{C})_{\text{TC}} = 0.000111 \bar{E}_{500} - 3.422 \quad (8)$$

式中, \bar{C} 是污染物日平均浓度(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), $\frac{\partial\theta}{\partial z}$ 是 100 m 高度日平均位温递减率(单位: $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$), \bar{u} 是 50 m 高度日平均风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), \bar{l} 是 250 m 高度日平均输送指数(单位:m), \bar{E}_{500} 是地面到 500 m 高度日平均稳定能量(单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$), \bar{Bh} 是日平均边界层高度(单位:m)。

表 3 是 4 个环境监测站线性回归方程拟合度,城区(LIBP、LLH 和 SWH)回归方程拟合度高于郊区(TC),LIBP 站拟合度最高(0.713)。尚可政等(1999;2002)利用兰州城区环境监测站大气污染物浓度日均值和能见度、总云量、气压、气温、相对湿度

和风速等气象观测资料建立线性回归模型, 冬季 NO_x 回归方程拟合度在 0.45~0.80 之间, 但回归方程预报精度高度依赖能见度和总云量, 给实际大气污染物浓度预测带来不便。赵仲莲等(2006)基于地面气象要素和天气形势建立了兰州城区大气污染预报模型, 冬季 NO_2 回归方程拟合度在 0.33~0.47 之间, PM_{10} 回归方程拟合度在 0.35~0.44 之间。本文所选气象参数较全面, 与污染物浓度相关性较高, 回归方程拟合度高。

表 3 各站点线性回归方程拟合度
Table 3 Fitting degree of linear regression equations of four stations

污染物	SWH	LIBP	LLH	TC
NO_2	0.463	0.713	0.70	0.315
PM_{10}	0.580	0.705	0.597	0.479

2.4 回归方程对污染物浓度的预报检验

图 4 和图 5 是用回归方程预报得到的 2012 年 1 月 21 日至 2 月 29 日 NO_2 和 PM_{10} 的日平均浓度及其与观测结果的对比。其中, NO_2 日平均浓度模

拟值与观测值的相关系数和回归方程复相关系数相当, 而 PM_{10} 日平均浓度模拟值与观测值的相关系数比回归方程复相关系数低(可能与春节前后大量燃放烟花导致 PM_{10} 浓度增加有关), 除 TC 站点外, 其余站点由回归方程模拟的日均 PM_{10} 浓度均低于观测值(表 4)。城区回归方程拟合度好于郊区回归方程拟合度(表 3), 使回归方程对城区污染物浓度的预报效果好于郊区。TC 站点模拟 PM_{10} 浓度与观测值相比偏差较大, 可能是由于预测时段内 PM_{10} 浓度很低(基本与城区 PM_{10} 浓度最低值相当, 代表该区域大气背景浓度), 局地气象条件对其浓度逐日变化的影响很小, 进一步分析也证实预测时段 TC 站点 PM_{10} 日均浓度与局地气象条件相关性很低。由于资料限制, 本文用于建立回归方程的资料时间序列较短, 利用更长时间的资料作回归分析, 结果应有所改善。

为进一步分析回归方程对污染物浓度的预报能力, 下面用平均值(M)、相关系数(R)、均方根误差($RMSE$)、标准差(SD)、归一化平均偏差(NMB)和归一化平均误差(NME)进行预报检验。表 4 中由

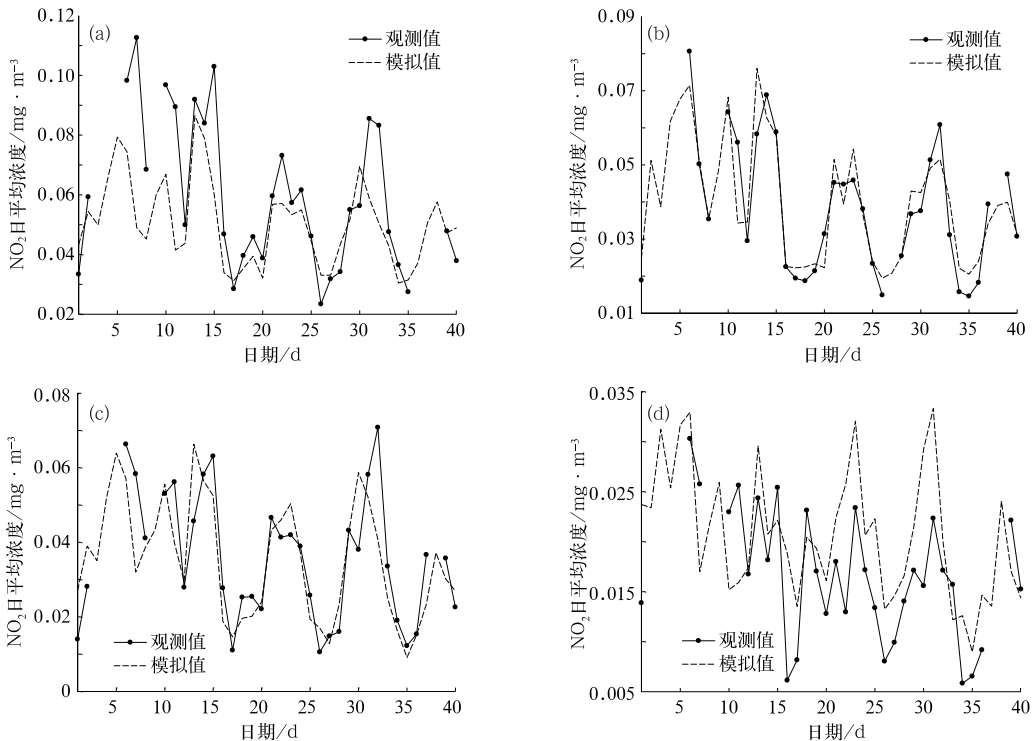


图 4 由回归方程得到的 4 个环境监测站 NO_2 日均浓度与观测值的对比
(a)SWH, (b)LIBP, (c)LLH, (d)TC

Fig. 4 Comparison of observed and modeled daily average NO_2 concentration
(a) SWH, (b) LIBP, (c) LLH, and (d) TC

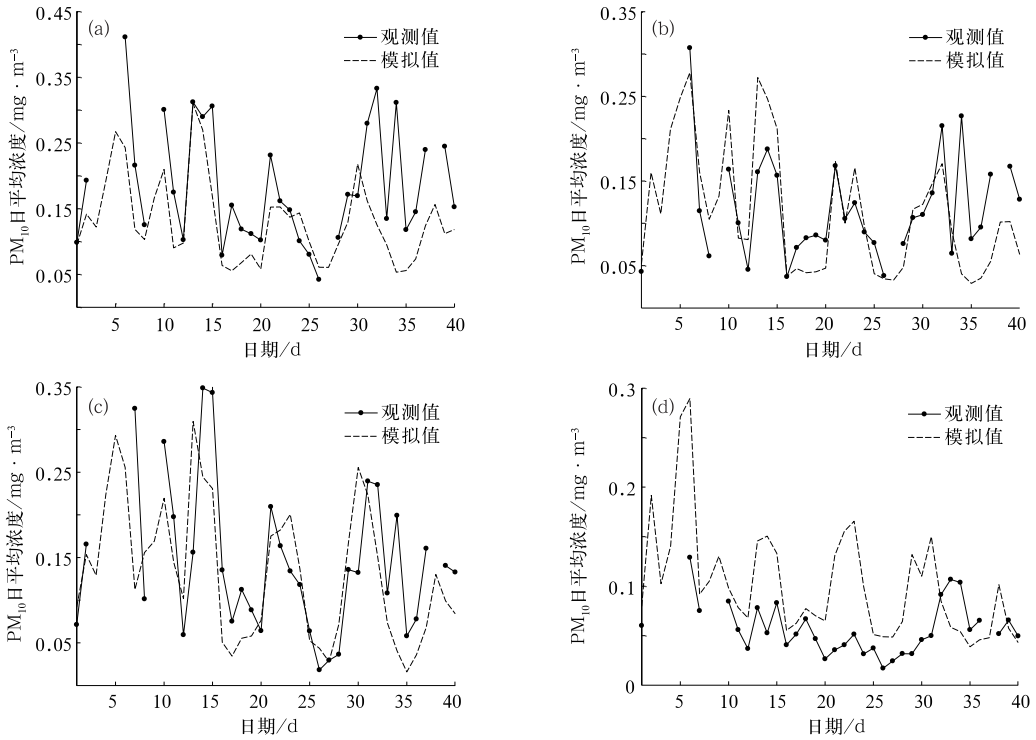


图 5 由回归方程得到的 4 个环境监测站 PM₁₀ 日均浓度与观测值的对比

(a)SWH, (b)LIBP, (c)LLH, (d)TC

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for PM₁₀

表 4 由回归方程得到的污染物日均值与观测值的对比结果统计

Table 4 Performance statistics of modeled NO₂ and PM₁₀ concentrations by regression equations

污染物	监测站	M _O	M _C	R	RMSE	SD _O	SD _C	NME	NMB
NO ₂	SWH	59.1	49.2	0.71	20.1	24.9	14.4	23.1	-16.8
	LIBP	38	38.7	0.91	7.1	17.6	16.2	14.3	1.8
	LLH	35.6	33.7	0.8	10.7	17.3	15.6	22.2	-5.2
	TC	16.7	19.8	0.55	6.7	6.5	6.3	34.4	18.7
PM ₁₀	SWH	184.3	126	0.65	89.2	89.8	64.9	35.8	-31.6
	LIBP	117.1	108.1	0.68	55.8	60.4	74.7	35.8	-7.7
	LLH	144.8	121.9	0.62	75.2	87.7	77.4	40.3	-15.8
	TC	56.8	94.1	0.35	60.9	25.8	51.6	82.3	65.6

注: M 为平均值(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), R 为相关系数, RMSE 为均方根误差(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), SD 为标准差(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), NME 为归一化平均误差(单位: %), NMB 为归一化平均偏差(单位: %), C 为模拟值, O 为观测值。

回归方程得到的 NO₂ 日均值与观测的日均值之差小于 $10 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 但 PM₁₀ 日均值与观测的日均值相差较大(SWH 和 TC 两站误差分别达到 58.3 和 $37.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)。回归方程预报的日均 NO₂ 浓度和 PM₁₀ 浓度与观测值的相关系数在城区分别超过 0.7 和 0.6, 但对污染物浓度极值的模拟偏弱。整体而言, NO₂ 回归方程的模拟效果好于 PM₁₀, 回归方程对城区污染物浓度的模拟效果好于郊区。

目前, 空气质量数值模式是模拟大气污染物浓度的主流方法, 可较准确地模拟大气污染物的时空

分布, 但其模拟精度依赖于排放清单的精度, 不同地区不同模式模拟性能差异较大。Sartelet 等(2007)用 Polyphemus 系统模拟欧洲颗粒物和气态污染物浓度变化时得到的 NO₂ 均方根误差为 $10 \sim 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 相关系数为 0.3~0.4; PM₁₀ 均方根误差低于 $20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 相关系数为 0.4~0.6。Im 等(2010)用 WRF/CMAQ 模拟研究了伊斯坦布尔冬季 PM₁₀ 日平均浓度的变化, 其观测和模拟平均值分别是 107.1 和 $96.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 标准差分别是 15.1 和 $19.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 均方根误差是 $24.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

Roustan 等(2011)用化学输送模式(CTM)模拟了巴黎 NO₂ 小时浓度和 PM₁₀ 日平均浓度,得到 NO₂ 和 PM₁₀ 观测平均值分别是 32.1 和 18.7 μg·m⁻³,模拟平均值分别是 24.4 和 22.7 μg·m⁻³,相关系数分别是 0.54 和 0.5,均方根误差分别是 18.9 和 9.8 μg·m⁻³,归一化平均误差分别是 45.9% 和 40%,归一化平均偏差分别为 -27.9% 和 22%。

本文利用 WRF 模式模拟的气象场,结合污染物浓度监测资料,分析研究建立的污染物浓度与气象影响因子的回归方程,其对污染物浓度的模拟效果与常用的空气质量数值模式模拟效果相当,回归方程对兰州城区污染物浓度的预测值与观测值相关系数、归一化平均误差和归一化平均偏差甚至好于数值模式模拟的效果。与空气质量数值模式相比,该方法不需要污染源排放数据,并且可用 WRF 模式预报的气象场预测污染物浓度水平,为城市空气质量预报、大气污染防治和研究提供了科学依据。

3 结 论

本文利用 WRF 数值模式模拟的兰州市及其周边气象场,结合污染物浓度监测数据,分析了气象影响因素与污染物浓度之间的相关性,并建立了污染物浓度与气象影响因子的回归方程,得到以下结论:

(1) NO₂ 与气象影响因子的相关性较 PM₁₀ 好。兰州城区污染物浓度与位温递减率和边界层高度相关性高。由于周边山体的阻挡作用,污染物浓度主要受垂直扩散的影响。

(2) 气象条件对大气污染物浓度的影响有一定的滞后性,24 h 内相关系数随滞后时间基本呈现先增加后减小的变化趋势,风速对大气污染物浓度影响的滞后性比温度层结明显。

(3) 线性回归方程对 NO₂ 浓度的模拟效果好于对 PM₁₀ 的模拟效果,对城区污染物浓度的模拟效果好于对郊区污染物浓度的模拟效果。

(4) 线性回归方程对污染物浓度的模拟效果与常用的空气质量模式的模拟效果相当,回归方程对兰州城区污染物浓度的模拟效果甚至好于部分地区空气质量数值模式的模拟效果。

本研究结果为山谷城市大气污染物浓度预测提供了一种新方法,该方法比用空气质量数值模式计算快,模拟效果较好,可用于城市大气污染预报。

附 录:

式(1)~式(5)分别给出了位温递减率、输送指数、梯度理查森数、Froude 数和稳定能量的计算方法。

$$\gamma = \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (1)$$

$$l = u_z \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}} \quad (2)$$

$$R_i = \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (3)$$

$$Fr = \bar{u} \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}} \quad (4)$$

$$E_w = \frac{c_p}{g} \int_{p_h}^{p_0} (T_G - G) dp \quad (5)$$

式中,γ 是位温递减率(单位:K·m⁻¹),正值越大表示层结越稳定;θ 是位温(单位:K);z 是高度(单位:m);l 是输送指数(单位:m);u_z 是高度 z 处水平风速(单位:m·s⁻¹);g 是重力加速度(单位:m·s⁻²);u 和 v 是水平风速(单位:m·s⁻¹); \bar{u} 是 0~500 m 平均水平风速(单位:m·s⁻¹);h 是山谷深度(单位:m),取 500 m;E_w 是稳定能量(单位:J·m⁻²);c_p 是定压热容(单位:J·K⁻¹·kg⁻¹);T 是温度(单位:K);p 是气压(单位:Pa)。

参考文献

- 陈雷华,余晔,陈晋北,等.2010.2001—2007 年兰州市主要大气污染物污染特征分析.高原气象,29(6):1627-1633.
- 顾莹.2010.上海城市化对臭氧污染影响的数值模拟.上海:华东师范大学.
- 胡隐樵,张强.1999.兰州市大气污染的物理机制与防治对策.中国环境科学,19(2):119-122.
- 姜大膀,王式功,郎咸梅,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.兰州大学学报,37(4):133-139.
- 李喜仓,白美兰,马玉峰,等.2011.呼和浩特市城区发展对大气环境的影响分析.气象,31(12):1572-1577.
- 孟燕军,程丛兰.2002.影响北京大气污染浓度变化的地面天气形势分析.气象,28(4):42-47.
- 尚可政,王世功,杨德保.1999.兰州冬季空气污染与地面气象要素的关系.甘肃科学学报,10(1):1-5.
- 尚可政,达存莹,富有智,等.2001.兰州城区稳定能量及其与空气污染的关系.高原气象,20(1):76-81.
- 尚可政,王世功,杨德保,等.2002.兰州城区空气污染预报的动力统计模型.兰州大学学报,38(8):114-119.
- 王式功,姜大膀,杨德保,等.2000.兰州市区最大混合层厚度变化特征分析.高原气象,19(3):363-370.
- 姚琳,叶芝祥,陆成伟,等.2012.成都市空气质量预报中 WRF 的本地化参数选取.成都信息工程学院学报,27(5):485-489.
- 张强.2001.地形和逆温层对兰州市污染物输送的影响.中国环境科学,21(3):230-234.
- 张远航,唐孝炎,毕木天,等.1987.兰州西固地区气溶胶污染源的鉴

- 别. 环境科学学报, 7(3): 269-278.
- 赵仲莲, 戚登臣, 杨德保, 等. 2006. 兰州市三种主要空气污染物 (SO_2 , NO_2 , PM_{10}) 的统计预报方法. 甘肃科技, 22(12): 102-103.
- 朱玉强. 2004. 几种空气质量预报方法的预报效果对比分析. 气象, 30(10): 30-33.
- An X Q, Zhou H C, Chen L J. 2007. Atmospheric environmental capacity of SO in winter over Lanzhou in China: A case study. Adv Atmos Sci, 24(4): 688-699.
- Bei N F, Li G H, Zavala M, et al. 2013. Meteorological overview and plume transport pattern during Cal-Mex 2010. Atmos Environ, 70: 477-489.
- Chen Z H, Cheng S Y, Li J B, et al. 2008. Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China. Atmos Environ, 42(24): 6078-6087.
- Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. 1996. Modeling of land surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. J Geophys Res, 101(3): 7251-7268.
- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. J Atmos Sci, 46(20): 3077-3107.
- Hong S Y, Lim J O J. 2006a. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme. Korean Meteor Soc, 42(2): 129-151.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006b. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Mon Wea Rev, 134(9): 2318-2341.
- Im U, Markakis K, Unal A, et al. 2010. Study of winter PM episode in Istanbul using the high resolution WRF/CMAQ modeling system. Atmos Environ, 44(26): 3085-3094.
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. J Appl Meteor, 43(1): 170-181.
- Lam K C, Cheng S. 1998. A synoptic climatological approach to forecast concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong. Environ Pollut, 101(2): 183-191.
- Lu W, Zhong S, Charney J J, et al. 2012. WRF simulation over complex terrain during a southern California wildfire event. J Geophys Res, 117(D5), doi:10.1029/2011JD017004.
- Miao S G, Chen F, Lemone M A, et al. 2009. An observational and modeling study of characteristics of urban heat island and boundary structures in Beijing. J Appl Meteorol Clim, 48(3): 484-501.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for longwave. J Geophys Res, 102(D14): 16663-16682.
- Oanh N T K, Chutimon P, Ekbordin W, et al. 2005. Meteorological pattern classification and application for forecasting air pollution episode potential in a mountain-valley area. Atmos Environ, 39(7): 1211-1225.
- Papalexiou S, Moussiopoulos N. 2006. Wind flow and photochemical air pollution in Thessaloniki, Greece. Part II: Statistical evaluation of European Zooming Model's simulation results. Environ Model Softw, 21(12): 1752-1758.
- Pasch A N, MacDonald C P, Cilliam R C, et al. 2011. Meteorological characteristics associated with $\text{PM}_{2.5}$ air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009-2010 Cleveland multiple air pollutants study. Atmos Environ, 45(39): 7026-7035.
- Pearce J L, Beringer J, Nicholls, et al. 2011a. Investigating the influence of synoptic-scale meteorology on air quality using self-organizing maps and generalized additive modeling. Atmos Environ, 45(1): 128-136.
- Pearce J L, Beringer J, Nicholls, et al. 2011b. Quantifying the influence of local meteorology on air quality using generalized additive models. Atmos Environ, 45(6): 1328-1336.
- Roustan Y, Pausader M, Seigneur C. 2011. Estimating the effect of on-road vehicle emission controls on future air quality in Paris, France. Atmos Environ, 45(37): 6828-6836.
- Sartelet K N, Debry E, Fahey K, et al. 2007. Simulation of aerosols and gas-phase species over Europe with the Polyphemus system; Part I Model-to-data comparison for 2001. Atmos Environ, 41(29): 6116-6131.
- Termonia P, Quinet A. 2004. A new transport index for predicting episodes of extreme air pollution. J Appl Meteorol, 43(4): 631-640.
- Wang S G, Feng X Y, Zeng X J, et al. 2009. A study on variations of concentrations of particulate matter with different sizes in Lanzhou, China. Atmos Environ, 43(17): 2823-2828.
- Xu W Y, Zhao C S, Ran L, et al. 2011. Characteristics of pollutants and their correlation to meteorological conditions at a suburban site in the North China Plain. Atmos Chem Phys, 11(3): 4353-4369.