大连市大气污染天气特征及污染成因模拟分析

傅 瑜[1],李红斌[1*],于蕙箐[2],王秀萍[2],赵繁盛[1],周德平[3],何 阳[1],濮文耀[1],张殿刚[1] (1.大连市人工影响天气办公室,辽宁 大连 116001；2.大连市气象台,辽宁 大连 116001；3.中国气象局沈阳大气环境研究所,辽宁 沈阳 110016)

摘要：利用大连市 2014~2015 年地面观测资料、高空地面形势场和 2015 年 12 月 NCEP/NCAR 再分析资料,结合 WRF-CMAQ 数值模式,对大连市污染天气特征和污染过程的成因进行分析研究.结果表明:2014~2015 年大连市共有大气污染日数 145d,占 20%,大气污染天气过程 35 个;发生大气污染时的高空形势场主要为槽后脊前的西北气流场,占 63%,槽前西南气流场次之,占 21%,槽区、脊区各占 6%;地面形势场主要表现为风速较小的均压场(68%)和等压线密集风速较大的非均压场(32%)两种气压场.2015 年 12 月出现的 5 次污染过程中,大气层结均为稳定层结,且近地面水平风速均值较小,对污染物垂直方向和水平方向上的扩散起到抑制作用,导致空气质量恶化;模拟结果发现大连市冬季污染过程中大气气溶胶的的主要成分是硝酸盐、铵盐和硫酸盐等细颗粒物,其中硝酸盐占比最大,且污染过程的增幅最为明显,说明机动车和燃煤排放已对大连市城市污染的形成产生重要影响.

关键词：大连；大气污染；气象场；WRF-CMAQ

中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2018)10-3639-08

Weather characteristics and simulation analysis on causes of air pollution in Dalian. FU Yu[1], LI Hong-bin[1*], YU Hui-qing[2], WANG Xiu-ping[2], ZHAO Fan-sheng[1], ZHOU De-ping[3], HE Yang[1], PU Wen-yao[1], ZHANG Dian-gang[1] (1.Dalian Weather Modification Office, Dalian 116001, China；2.Dalian Observatory, Dalian 116001, China; 3.Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016, China). *China Environmental Science*, 2018,38(10)：3639~3646

Abstract：Based on the observational data, upper air and ground surface synoptic field during 2014~2015, and NCEP/NCAR reanalysis data in December 2015, combined with WRF-CMAQ numerical model, the characteristics and the cause of the air pollution process in Dalian were analyzed. The results showed that there were 145 pollution days, accounting for 20%, and 35pollution processes in Dalian from 2014 to 2015. The upper air circulations during air pollutions were mainly northwest air flow field after the trough (accounting for 63%), and the southwest air flow field before the trough (accounting for 21%). The ground surface synoptic field were mainly in two types, which are uniform pressure field with weak wind (accounting for 68%) and intensive isobars with high-speed wind. The atmospheric stratification was stable, with weak average horizontal wind during 5air pollution processes in December 2015 in Dalian, which suppressed the dispersion of pollutant in the vertical and horizontal directions, leading to the deterioration of air quality. Results of the numerical model simulation showed that nitrate, ammonium and sulfate are the main components of aerosols during the pollution process. And the nitrate provided the first contribution and the most obvious increase during the pollution processes, which means the vehicle emission and coal-fired emission already had important impacts on the formation of urban pollution in Dalian.

Key words：Dalian city；air pollution；meteorological field；WRF-CMAQ

雾霾天气是一种大气复合污染过程,是空气污染和气象因素共同作用的结果.雾霾天气过程的本质是细粒子气溶胶的污染[1-3],大气中的细颗粒物($PM_{2.5}$)通过对太阳辐射的散射降低大气能见度,还能携带其他大气污染物和病菌进入人体肺部,危害人体健康.中国环境保护部 2012 年在新的环境空气质量标准(GB3095-2012)[4]中增设了 $PM_{2.5}$ 浓度限制,在“环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)”(HJ633-2012)[5]中给出了各级空气质量对应的 $PM_{2.5}$ 浓度 24h 平均的限制.随着城市化进程的加快和经济的快速发展,近几年大连市雾霾天气频发,细颗粒物已成为大连市大气污染的首要污染物.

多年来,许多国内外学者对大气污染过程中污染物成因、粒子谱分布等污染特征进行了多年观测和详细研究[6-8],发现城市污染是一个复杂过程,即造成大气污染的污染物成分复杂,来源广泛[9-12],污染物排放包括本地燃煤、工业及交通排放和外来输送.同时,受到各种气象条件包括天气形势场和各种气象要素变化(如风速、温度、湿度等)的影响,当大气

收稿日期：2017-11-09

基金项目：国家自然科学基金资助项目(41440036)

* 责任作者, 研究员, lhb7159@163.com

污染物排放稳定时,气象条件将成为决定大气污染发生的关键因素[13-14],污染过程初始阶段的持续晴天、高压均压场和污染过程中温度、相对湿度、降水等气象要素的变化对于颗粒物的浓度变化产生重要影响[15-16],降水过程则对污染物的清除起到重要作用[17-19].对于污染过程中的污染物成因分析,目前多使用不同尺度的空气质量数值模式[20-21],利用MM5-CMAQ 和 RAMS-CMAQ 等数值模式可分析污染过程中近地面污染物浓度分布、输送状况以及雾霾成因,研究表明引发雾霾的主要气溶胶物种为硝酸盐、硫酸盐和铵盐,工业源和交通源是北京地区的主要污染源[22-23].

大连市地处辽东半岛南端,三面环海,对其特殊地理位置下大气污染特征及成因的研究是十分必要的.但目前针对大连地区污染相关特征的研究较少[24-25],对影响大气污染过程的天气形势和污染过程中颗粒物组成等相关研究分析也缺少针对性.本文选取 2014~2015 年大连市地面气象要素监测和环保部门公布的大连市空气质量日均数据,以及影响大连市 35 个污染个例的高空环流形势场和地面形势场进行了系统地分析和研究,并选用 NCEP/ NCAR 再分析资料等分析研究大连市大气污染过程的气象要素特征,结合区域空气质量模式系统(WRF-CMAQ)对大连地区 2015 年 12 月份的气溶胶颗粒物浓度及其成分进行了数值模拟,进而对大连市大气污染的天气特征和污染成因进行了综合全面的分析,为应对和减轻大气污染提供科学依据.

1 资料和方法

1.1 资料来源

大连市空气质量污染指数 AQI 由中华人民共和国环境保护部数据中心(www.mep.gov.cn)给出,选取 2014 年 1 月 1 日~2015 年 12 月 31 日进行污染日分布情况分析;天气图(500hPa 高度场和地面气压场)和 T-lnP 图由国家气象局提供,利用气象信息综合分析处理系统(MICAPS)处理;气象要素分析选取 2015 年 12 月的 5 次污染天气过程进行分析,时间分别为 7~8 日、12~14 日、21~23 日、25~26 日、29~31 日,其中水平风选取大连站(站号 54662,经纬度为 38.9°N,121.6°E,海拔 91.5m)10m 水平风速日均值,温度和垂直风的垂直分布选取 NCEP/NCAR(美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心)再分析资料(时间分辨率为每天 02:00、08:00、14:00 和 20:00)进行分析,通过对大连站周围四个格点(2.5°×2.5°)数据进行插值,得到大连本站上空的近似温度和垂直风的垂直分布.

1.2 数值模式

WRF 模式是由美国环境预测中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)、美国国家大气海洋总署-预报系统实验室(FSL)等美国科研机构中心联合开发的新一代中尺度预报模式和同化系统,可用来进行 1~10km 内高分辨率气象要素的数值模拟.本文中 WRF 模式采用四层嵌套网格(见图 1),最外层(d01)为中国及周边部分地区,网格数为 88×75;第二层(d02)为京津冀及东北等地区,网格数为 85×71;第三层(d03)为辽宁大部地区,网格数为 82×82;第四层(d04)为大连及周边部分地区,网格数为 82×64,格距分别为 81,27,9,3km,垂直方向共 24 层,模式顶层为 10hPa.初始场采用美国国家环境预报中心的全球再分析资料(FNL),模拟时间为 2015 年 12 月 1~31 日,参数化方案选择如下:WSM 6 类冰雹微物理方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、MYJ Monin-Obukhov 近地面层方案、Noah 陆面过程方案、Eta Mellor-Yamada-Janjic TKE 边界层方案和 Betts-Miller-Janjic 积云参数化方案.

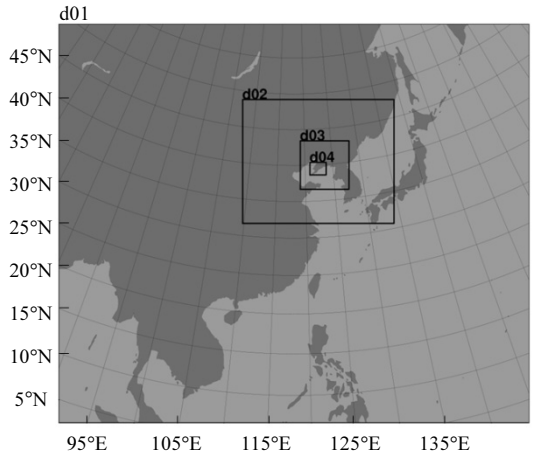

图 1 WRF 模式使用的四层嵌套网格区域设置

Fig.1 Grid area setting with four domains in WRF

CMAQ 模式是美国环保署(USEPA)开发的第三代区域空气质量模式,秉承一个大气的理念,代表

着当前大气化学、污染物迁移和沉降的最新研究成果,能够在 WRF 模式提供的气象背景场上模拟臭氧、气溶胶成分等多种污染物在大气中的扩散和迁移过程等.CMAQ 模式的网格设置与 WRF 模式一致,仅在水平边界上各少 3 个格点,其参数化方案采用 CB05 光化学机制,AERO4 气溶胶方案,Photolysis-inline 光解率方案,PPM 平流方案和 ACM2 扩散方案.CMAQ 模式包括 5 个部分:初值模块(ICON)、边界模块(BCON)、光解率模块(JPROC)、源排放处理模块(ECIP)和大气化学传输模块(CCTM). 其中,CCTM 模块是核心,用于大气化学过程、污染物输送和沉降过程的模拟;ECIP 模块使用 Zhang 等[26]提供的洲际化学运输实验东亚地区网格排放源清单作为背景源排放清单[27-28],包括电厂、工业源、交通源、居民生活等各种人为源及自然源排放,涵盖 BC、OC、NO_x、SO_2、CO、PM_{10}、$PM_{2.5}$、VOC 等多种污染物.

2　结果与讨论

2.1　大连市污染日特征分析

利用 AQI 日均值统计和分析大连市 2014 年 1 月 1 日~2015 年 12 月 31 日的污染日分布情况,得到如下结果:大连市 2014 年 1 月 1 日~2015 年 12 月 31 日 24 个月的 730d 中,出现大气污染的日数有 145d,占平均年日数的 20%.其中,2014 年污染日数 77d,占全年日数的 21%,2015 年污染日数 68d,占全年日数的 19%;污染日数冬季最多,占 48.3%,其次是春季占 34%,秋季占 10%,夏季最少占 8%(表 1);且 11 月污染日数最多,达 29d,月均为 48%,其次是 1 月为 23d,月均为 37%,9 月最少,只有 1d(图 2).

表 1　大连市 2014~2015 年污染日季节分布

Table 1　Seasonal distribution of pollution days from 2014 to 2015in Dalian

季节	百分比(%)
春季(3,4,5 月)	34
夏季(6,7,8 月)	8
秋季(9,10,11 月)	10
冬季(12,1,2 月)	48

同时分析得到,出现重度污染的日数有 9d,严重污染日数 4d,共 13d,占污染日数的 9%,主要出现在冬季和秋季,其中 12 月份最多,达 6d 之多.

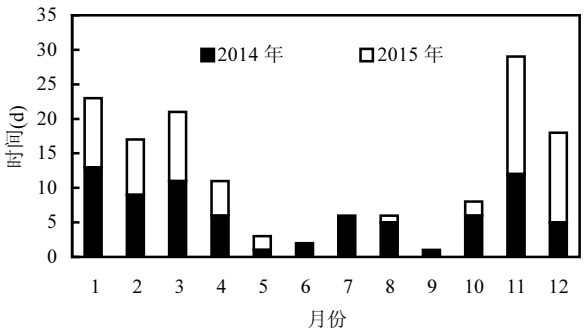

图 2　大连市 2014~2015 年污染日分布

Fig.2　Distribution of pollution days from 2014 to 2015 in Dalian

2.2　污染过程天气形势特征

对大连市 2014 年~2015 年出现的大气污染天气过程进行统计和分析发现,大连市近 2a 出现大气污染过程共 35 次,主要集中在 11 月~次年 4 月.其中 12 月~次年 2 月(冬季)最多,夏季(6~8 月)最少.

本文将 35 次污染过程作为 35 个大气污染天气个例,对大连市产生大气污染天气过程的高空 500hPa 环流形势场进行统计和分析发现:产生大气污染的高空环流形势为高空槽后脊前的西北气流场,占 63%;槽前脊后西南气流场,占 21%;槽区、脊区各占 6%,以及闭合低压环流场(2 次)占 4%.其中,大气污染产生的主要高空形势场为高空槽,而大气污染过程多出现在高空槽后的西北气流场,与出现污染时大气多为稳定层结相一致;同时发现,在 35 个大气污染个例中,有部分污染天气过程(21%)出现在高空槽前,当高空槽前的上升气流和西南暖湿气流带来降水天气过程时,会通过湿沉降对减轻污染起到一定影响[29].

同时,对 35 个大气污染天气个例的地面气压场进行统计和分析发现,大连市产生大气污染过程的地面形势场主要表现为两种特征,即风速较小的均压场特征和风速较大,等压线较密集的非均压场特征.其中,均压场占 68%,非均压场占 32%.由此表明,大连市产生大气污染过程有两种原因:一是由当地排放产生,即本地源(近地面风速较小);二是从大连上游地区传输过来的大气污染(近地面风速较大,且上游出现污染),即外来源.因此,大连市大气污染过程主要受本地源影响,另外一部分为本地源和外来源共同影响产生的.

2.3　污染过程大气层结与温度特征

2.3.1　大气层结特征　利用大连站气象探空资料对 2015 年 12 月份出现的 5 次污染过程的 T-lnp 图

进行分析,发现 5 次污染过程中大连市的大气层结均为稳定层结,层结的稳定在一定程度上抑制了大气湍流的垂直交换,不利于污染物的垂直扩散.而12~14日污染过程中更是出现了较为明显逆温现象,根据探空资料分析可以发现(图3),10日20:00~12日20:00大连市上空持续存在超过500m的逆温稳定层结,大气环境容量维持在较小的范围内,湍流扩散能量较弱,对近地面污染物的垂直稀释起到一定的抑制作用,使污染浓度逐日累积,在13日出现重度污染天气过程(13日AQI为225).

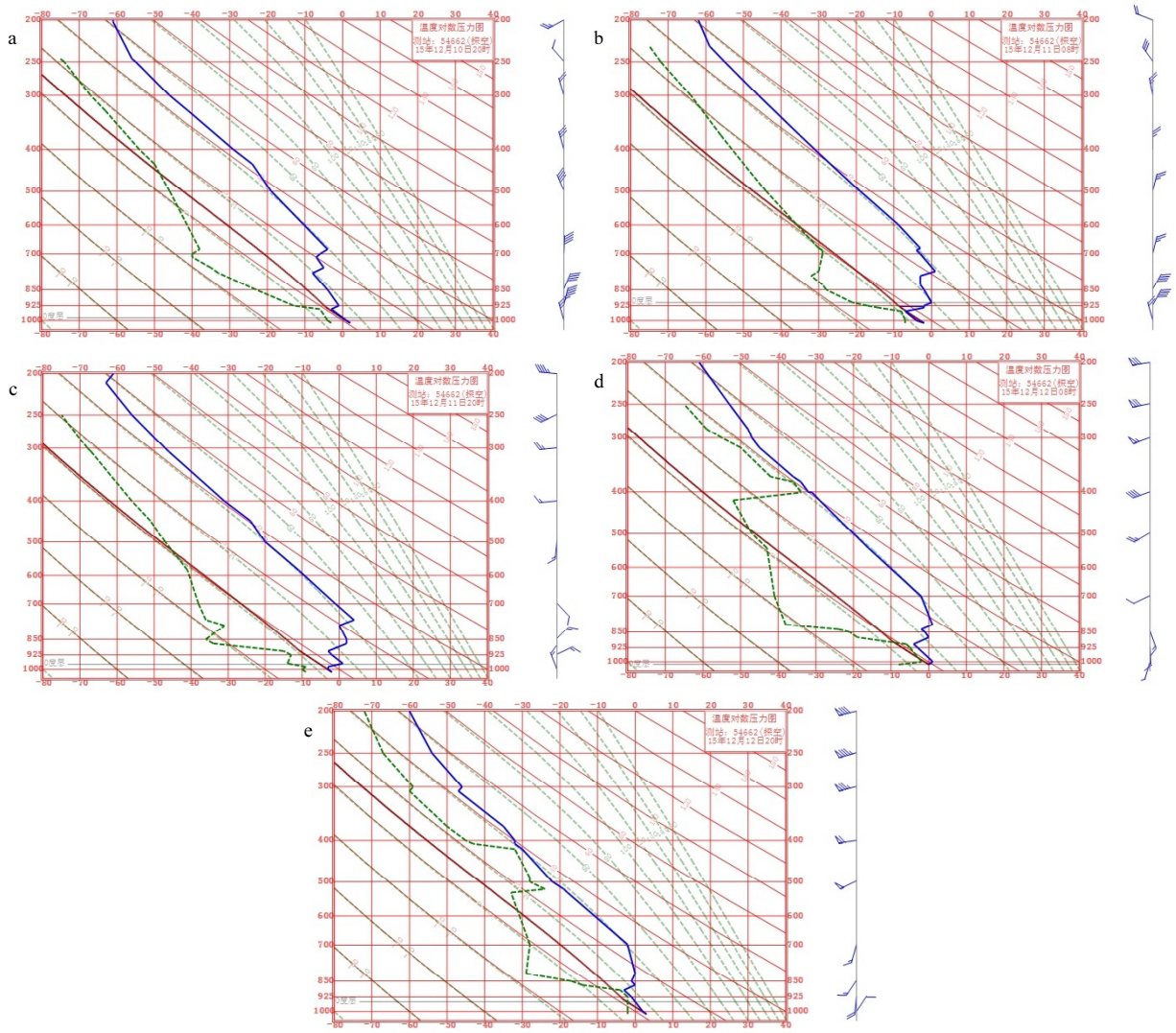

图 3 12 月 10 日 20:00~12 日 20:00 大连站 T-lnP

Fig.3 T-lnp diagram from 20p.m. in December 10 to 20p.m. in December 12 in Dalian

(a)10 日 20:00 (b)11 日 08:00 (c)11 日 20:00 (d)12 日 08:00 (e)12 日 20:00

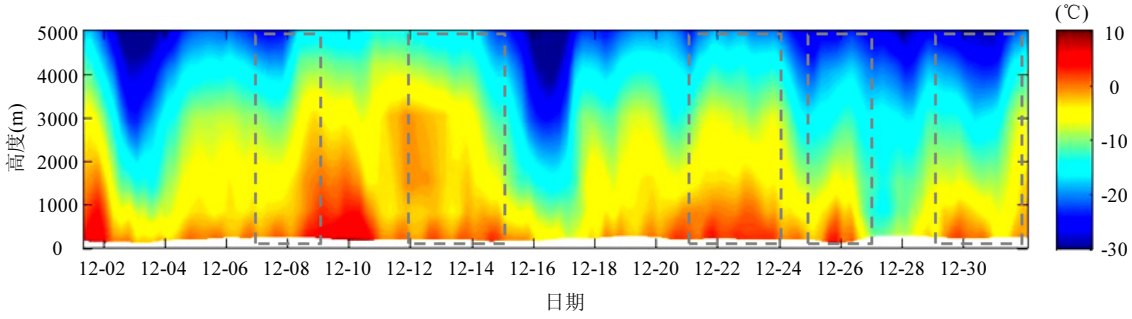

图 4 2015 年 12 月份不同高度温度值随时间的变化情况

Fig.4 Temperature at different altitude with time in December 2015

2.3.2　温度特征　选用 NCEP/NCAR 再分析资料中的温度资料,对大连地区上空不同高度层温度的时空分布及变化进行了分析,得到2015 年 12 月大连本站上空的近似温度垂直分布(图 4).图中灰色虚框标出的是 12 月份出现污染天气的日期,可以看到在污染天气下,近地面气温较高,统计大连站 12 月份的 2m 温度日均值,发现污染天气下日均温度的平均值较无污染天气高出 1℃左右.另外,从温度垂直分布图上同样可以看到 12 日前后出现了较明显的逆温现象,持续时间达3d之久,最大逆温层厚度超过1km,与温度层结的分析一致.

2.4　污染过程风场特征

2.4.1　垂直风速特征　根据 NCEP/NCAR 再分析资料对大连市 2015 年 12 月份不同高度层垂直风速随时间变化情况进行分析(图 5).从图 5 可以看出,在 5 次大气污染过程中,除 7~8 日污染过程的垂直风速为微弱下沉气流外,其余 4 次大气污染过程(即 12~14 日、21~23 日、25~26 日和 29~31 日)的垂直风速主要表现为均匀稳定(时有微弱上升气流).其中,大气污染日 30 日出现了弱降水过程,在垂直方向上大气出现了一段时间和一定强度的上升运动,对大气中近地面细颗粒物向高空的输送起到了重要作用.由此可见大气污染过程中大气层结较为稳定,但垂直方向上也会出现微弱的上升运动.

2.4.2　水平风速特征　对 2015 年 12 月份的 5 次污染过程的水平风速进行统计和分析(表 2),结果表明,绝大多数大气污染过程的水平风速均较小,4 次污染过程(7~8 日、12~14 日、21~23 日和 29~31 日)的近地面水平风等级均为 1~2 级,前 3 次污染过程的水平风均值更是不超过 2.0m/s,大气的稀释扩散能力较差,使近地面污染物累积增加.另外,25~26 日污染过程中近地面风速较大,结合风向和全国 AQI 日均分布图分析发现,本次污染过程主要受外来源影响,26 日近地面风速增加对污染物的扩散起到促进作用.

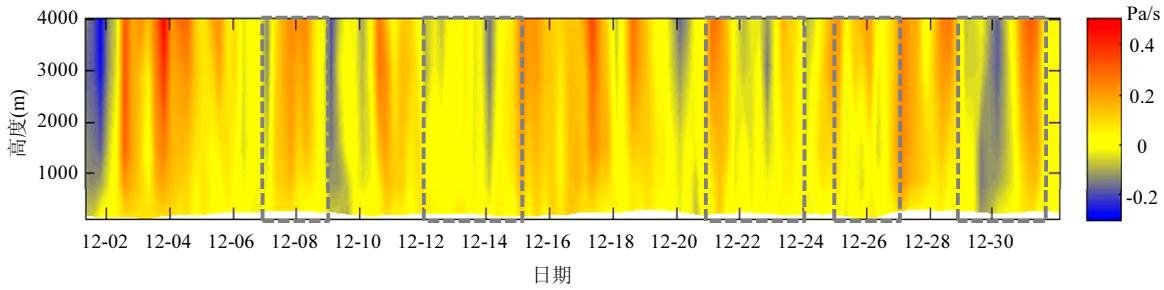

图 5　2015 年 12 月份不同高度垂直风速随时间的变化情况

Fig.5　Vertical wind speed at different altitude with time in December 2015

表 2　12 月 13d 污染天气下水平风速

Table 2　Daily wind of 13 pollution days in December

日期	风速(m/s)	日期	风速(m/s)
7	2	23	1.7
8	1.9	25	2.7
12	1.5	26	5
13	1.6	29	1.6
14	2.4	30	2.2
21	1.6	31	2.7
22	1.5		

2.5　模拟结果分析

2.5.1　模拟结果评估　对大连市2015年12月5~31日进行气象要素和颗粒物的数值模拟,并通过选取大连市近地面温度、气压、相对湿度、风速和颗粒物浓度对 WRF-CMAQ 耦合模式模拟出的结果进行评估,得到图 6((a)~(d)),即大连市 2015 年 12 月 5~31 日气象要素、颗粒物的模拟和观测日均时间序列.从图 6 可以看出,模拟温度、气压与观测资料对应较好,模拟结果基本上可以较好地再现观测值大小和变化趋势,两种气象要素的模拟相关系数接近0.9(表 3);模拟相对湿度和风速则略高于实际观测值,认为是 WRF 模式中城市冠层设置较为粗糙导致的,但二者的总体变化趋势与实际观测基本相符,能够通过显著性水平 α<0.001 的 t-检验.总体来看,气象要素模拟结果较为准确,变化趋势也与观测值较为接近,可以为 CMAQ 模式提供背景气象场.

图 6(e)、(f)中通过 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的时间序列对 CMAQ 模式模拟结果进行了评估.其中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的观测数据取自中国环境保护部公布的大连市实测值.从图 6(e)、6(f)可以看出,$PM_{2.5}$、PM_{10} 模拟结果的

变化趋势与观测资料有较好的一致性,尤其是 12 月 14 日和 22 日的高值,二者的相关系数统计结果也较为理想,相关系数接近 0.8,通过显著性水平 α<0.001 的 t-检验.由此可见,CMAQ 模式能够较好模拟大连市 2015 年 12 月份出现的污染天气过程,该模拟结果可以用来进行本月大气污染过程的定量分析.

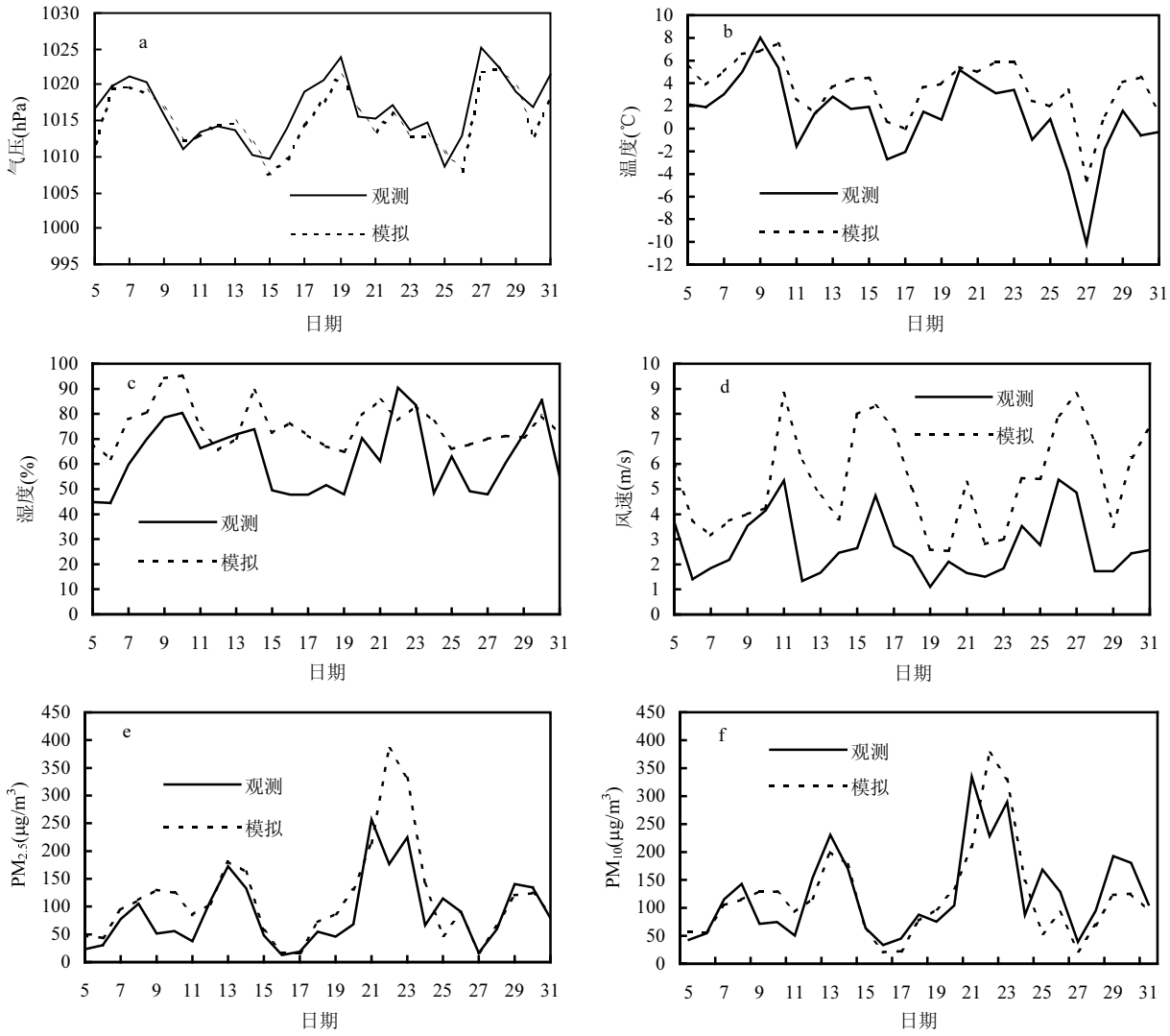

图 6 日均气象要素和颗粒物质量浓度的观测与模拟结果比较

Fig.6 Observed and modeled daily meteorological elements and particle mass concentration

表 3 气象要素和颗粒物的观测与模拟统计结果

Table 3 Statistics of observed and modeled meteorological elements and particle mass concentration

统计量	气温(℃)	气压(hPa)	湿度(%)	风速(m/s)	$PM_{2.5}$(μg/m^3)	PM_{10}(μg/m^3)
观测平均	1.18	1016.56	62.66	2.76	89.08	124.74
模拟平均	3.51	1015.14	75.11	5.31	114.31	119.88
相关系数	0.89	0.88	0.60	0.66	0.79	0.77

2.5.2 大气污染成因模拟分析 据张小曳等[30]研究表明,硝酸盐气溶胶主要来源于机动车和燃煤等化石燃料燃烧,铵盐主要来自于农业化肥和工业排放,硫酸盐主要来自电厂和工业用煤.此外,有机碳(OC)和元素碳(EC)主要来源于化石燃料和生物质的不完全燃烧,其他成分则包括自然排放的粗粒子和土壤、建筑扬尘等.利用 WRF-CMAQ 数值模式对大连市 2015 年 12 月出现的 5 次污染过程中大气气溶胶组分及质量浓度百分比的日均值进行分析(表 4),发现大连市出现污染天气的大气气溶胶主要成分是细粒子,且硝

酸盐、铵盐和硫酸盐是大气污染时气溶胶粒子的主要成分.硝酸盐占比最大,占比均值超过 45%;铵盐和硫酸盐其次,占比均值分别为 18.05%和 13.02%;此外,OC 和 EC 的质量浓度占比均值总和超过 10%,分别为 7.29%和 3.87%;海盐成分占比略低,均值为 0.87%;其他成分的质量浓度占比均值为 11.33%.

通过统计和对比分析大连市 5 次污染天气过程与无污染天气中大气气溶胶不同组分及质量浓度的百分比均值(图 7),可以看出污染天气下的硝酸盐和硫酸盐气溶胶质量浓度百分比较无污染天气高出 7.75%和 1.82%,而铵盐、OC 2 种细粒子则略有降低,但总量不超过 2%.由此可以看出污染天气下细颗粒物浓度增幅显著,且硝酸盐贡献最大,说明汽车尾气排放和燃煤排放已成为大连市不可忽视的大气污染源,控制机动车尾气排放和燃煤排放对减缓大气污染的效果更为显著.

另外,在无污染天气下,海盐气溶胶的质量浓度百分比明显大于污染天气,增幅超过 3 倍,分析其原因可能与大连市三面环海的地形有关,即在水平输送条件较好的无污染天气条件下,大连市上空海盐气溶胶粒子质量浓度反而有所升高.

表 4　污染天气下大气气溶胶不同成分的质量浓度百分比(%)

Table 4　Mass concentration percentage of aerosol composition on pollution days (%)

日期	硝酸盐	铵盐	硫酸盐	OC	EC	海盐	其他
12−07	44.11	17.10	11.47	6.33	3.02	0.61	17.36
12−8	53.61	19.74	11.17	5.89	2.56	0.66	6.39
12−12	36.16	15.60	13.63	7.40	4.33	0.45	22.43
12−13	41.02	16.68	12.83	7.22	3.70	0.18	18.37
12−14	44.14	17.71	13.47	6.67	3.27	0.46	14.28
12−21	51.27	19.96	13.96	6.37	3.41	0.52	4.50
12−22	52.08	19.77	12.60	7.97	4.67	0.25	2.66
12−23	50.97	19.76	14.06	7.35	3.80	0.16	3.91
12−25	38.96	16.08	12.72	8.38	4.17	2.41	17.29
12−26	44.47	17.39	11.96	8.68	4.95	2.52	10.04
12−29	51.82	18.91	10.35	7.28	4.24	0.67	6.74
12−30	41.13	19.07	19.23	7.22	4.00	1.13	8.24
12−31	42.77	16.83	11.78	8.06	4.23	1.26	15.07
平均值	45.58	18.05	13.02	7.29	3.87	0.87	11.33

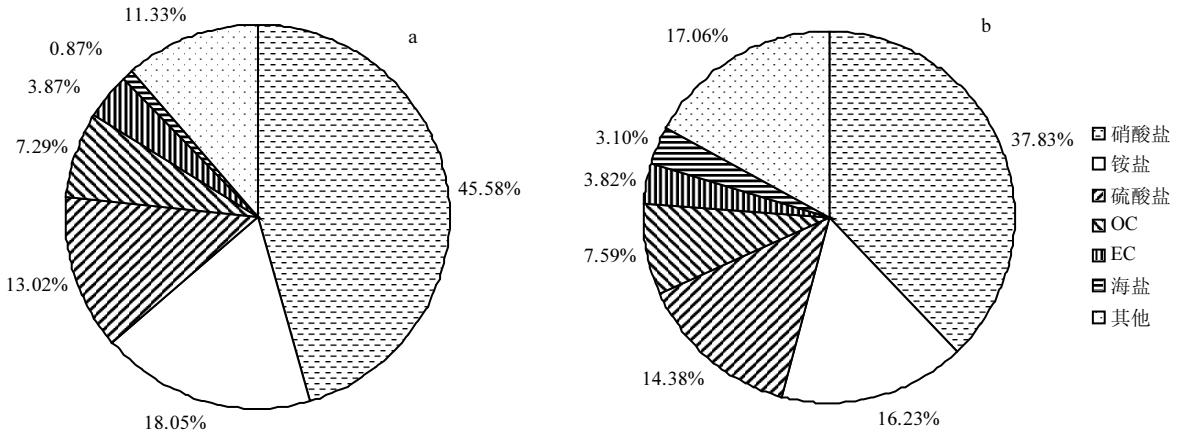

图 7　大连市不同气溶胶组分在污染天气下和无污染天气下的质量浓度百分比

Fig.7　Mass concentration percentage of aerosol composition on pollution days (a) and non−pollution days (b)

(a)污染天气 (b)无污染天气

3　结论

3.1　统计环保部给出的大连市 2014~2015 年 10 个国控点位的日均 AQI 数据,得到 145 个污染日数,占 20%,且冬季最多,占 48%,夏季最少,占 8%,重度污染主要出现在冬季和秋季,以 12 月份为最多.

3.2　统计大连市 2014~2015 年的 35 个污染个例,发现大连市产生大气污染的高空形势场主要为槽后脊前的西北气流场(占 63%)和槽前脊后的西南气流场(占 21%),槽区、脊区各占 6%;地面主要表现为风速较小的均压场(68%)和等压线较密集、风速较大(32%)的气压场,表明大连市大气污染过程主要受本地源影响.

3.3　分析 2015 年 12 月出现的 5 次大气污染过程的探空资料、再分析资料和观测资料,发现污染过程中大气层结稳定,垂直风速均匀稳定,水平风速均值较小,对污染物垂直方向和水平方向的扩散起到抑制作用.

3.4 数值模拟结果得出大连大气污染过程中大气气溶胶的主要成分是硝酸盐、铵盐和硫酸盐等细颗粒物,且硝酸盐占比最大;与无污染天气相比,污染过程中大气细颗粒物浓度增幅显著,硝酸盐贡献最大,说明汽车尾气排放和燃煤排放已成为大连市不可忽视的大气污染源.

参考文献:

[1] 吴 兑.近十年来中国灰霾天气研究综述 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(2):257-269.

[2] 宋 宇,唐孝炎,方 晨,等.北京市能见度下降与颗粒物污染的关系 [J]. 环境科学学报, 2003,23(4):468-471.

[3] Wu D, Tie X X, Deng X J. Chemical characterizations of soluble aerosols in Southern China [J]. Chemosphere, 2006,64(5):749-757.

[4] GB3095-2012 环境空气质量标准 [S].

[5] HJ633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S].

[6] Weiss R E, Waggoner A P, Charlson R J, et al. Sulfate aerosol; Its geographical extent in the Midwestern and southern United States [J]. Science, 1977,195(4282):979-981.

[7] Husar R B, Wilson W E. Haze and sulfur emission trends in the eastern United States [J]. Environmental Science and Technology, 1993,27(1):12-16.

[8] 杨卫芬,银 燕,魏玉香,等.霾天气下南京 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征及来源分析 [J]. 中国环境科学, 2010,30(1):12-17.

[9] Ferman M A, Wolff G T, Kelly N A. The nature and source of haze in the Shenandoah Valley/Blue Ridge Mountains area [J]. Air Pollut Control Assoc, 1991,31(10):1074-1082.

[10] 徐 敬,丁国安,颜 鹏,等.北京地区 $PM_{2.5}$ 的成分特征及来源分析 [J]. 应用气象学报, 2007,18(5):645-654.

[11] 付桂琴,张迎新,谷永利,等.河北省霾日变化及成因 [J]. 气象与环境学报, 2014,30(1):51-56.

[12] 王成祥,刘加珍.聊城市空气质量现状及污染原因分析 [J]. 气象与环境学报, 2016,32(1):108-112.

[13] Ziomas I C, Melas D, Zerefos C S, et al. Forecasting peak pollutant levels from meteorological variables [J]. Atmospheric Environment, 1995,29(24):3703-3711.

[14] 谢付莹,王自发,王喜全.2008 年奥运会期间北京地区 PM_{10} 污染天气形势和气象条件特征研究 [J]. 气候与环境研究, 2010,15(5):584-594.

[15] 任阵海,苏福庆,高庆先,等.边界层内大气排放物形成重污染背景解析 [J]. 大气科学, 2005,29(1):57-63.

[16] Tai A P K, Loretta J M, Daniel J J, et al. Correlations between fine particulate matter($PM_{2.5}$)and meteorological variables in the United States:Implications for the sensitivity of $PM_{2.5}$ to climate change [J]. Atmospheric Environment, 2010,44(32):3976-3984.

[17] 胡 敏,刘 尚,吴志军,等.北京夏季高温高湿和降水过程对大气颗粒物谱分布的影响 [J]. 环境科学, 2006,27(11):2293-2298.

[18] 韩 燕,徐 虹,毕晓辉,等.降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响 [J]. 中国环境科学, 2013,33(2):193-200.

[19] 李 芳,张承中.西安市大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 与降水关系的探讨 [J]. 中国环境监测, 2013,29(6):22-28.

[20] Ding A, Wang T, Zhao M, et al. Simulation of sea-land breezes and a discussion of their implications on the transport of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China [J]. Atmospheric Environment, 2004,38(39):6737-6750.

[21] Chen X L, Feng Y R, Li J N, et al. Numerical simulations on the effect of set-land breezes on atmospheric haze over the Pearl River Delta region [J]. Environment Model Assessment, 2009,14(3):351-363.

[22] 李 莉,陈长虹,黄 成,等.长江三角洲地区大气 O_3 和 PM_{10} 的区域污染特征模拟 [J]. 环境科学, 2008,29(1):238-246.

[23] 韩 霄,张美根.2013 年 1 月华北平原重霾成因模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 2014,19(2):127-139.

[24] 李 丹.2006~2010 年大连市区空气质量变化原因分析 [J]. 辽宁师范大学学报, 2011,34(4):524-527.

[25] 阎守政,纪德钰,李 丹,等.大连市区空气中颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)污染原因分析 [J]. 中国环境管理干部学院学报, 2015,25(4):53-56.

[26] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006for the NASA INTEX-B mission [J] Atmospheric Chemistry and Physics, 2009,9(14):5131-5153.

[27] 李 锋,朱 彬,安俊岭,等.2013 年 12 月初长江三角洲及周边地区重雾霾污染的数值模拟 [J]. 中国环境科学, 2015,35(7):1965-1974.

[28] 常 明,刘晓环,刘明旭,等.非采暖期和采暖期青岛市及中国东部臭氧和细颗粒物模拟研究 [J]. 中国海洋大学学报:自然科学版, 2016, 46(2):14-25.

[29] 李红斌,傅 瑜,张靖萱,等.一次大气污染过程的降水天气特征及相关分析 [J]. 气象, 2018,44(5):655-664.

[30] 张小曳.中国不同区域大气气溶胶化学成分浓度、组成与来源特征 [J]. 气象学报, 2014,72(6):1108-1117.

作者简介: 傅 瑜(1990-),女,助理工程师,硕士,主要从事人工影响天气、大气物理与环境研究.发表论文 1 篇.