

陈翔翔, 胡磊. 2018. 2017 年 11 月 7—8 日南昌市一次重度污染天气过程分析[J]. 气象与减灾研究, 41(1):69-76.

Chen Xiangxiang, Hu Lei. 2018. Analysis on a Heavy Air Pollution Process in Nanchang during Nov 7—8, 2017[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 41(1):69-76.

2017 年 11 月 7—8 日南昌市一次 重度污染天气过程分析

陈翔翔¹, 胡磊^{2,3}

1. 江西省气象台, 江西 南昌 330096
2. 江西省农业气象试验站, 江西 南昌 330200
3. 江西省气象局, 江西 南昌 330096

摘要: 利用地面常规观测资料、探空资料和大气污染物监测数据等资料, 对 2017 年 11 月 7—8 日南昌市一次重度污染天气过程的大气污染物特征、天气形势及气象要素特点等进行了分析, 并运用拉格朗日混合单粒子轨道模型(HYSPLIT)分析了大气污染物的后向轨迹。结果表明:1) 此次过程的首要污染物为 PM_{2.5}, 空气质量呈东部劣于西部, 市内劣于市郊的特点。AQI 有明显的日变化特征, 凌晨和上午 10 时各有一个 AQI 高峰, 傍晚有一个 AQI 低谷, 中午前后为 AQI 明显下降时段。2) 地面气压梯度小、风速小, 不利于污染物的扩散。对流层中层有低槽东移, 低层有弱切变线位于江西省北部, 低层弱辐合导致周边污染物向中心辐合堆积。地面能见度与相对湿度变化呈反相关, 在重度污染天气发生时多为雾和霾的混合物。南昌上空表现为“中层湿、低层干”的特点, 在较干的低层有等温层和弱的逆温层, 能抑制大气污染物的垂直扩散。3) 此次重度污染天气过程的大气污染物来源主要有三个, 即南昌市周边环境、本地污染源的排放和大气污染物的外来输入, 外来输入源主要为广东、广西及湖南上空的大气污染物。

关键词: 重度污染天气, 空气质量指数, 气象要素, HYSPLIT

中图分类号: X51

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2018)01-0069-08

doi: 10.12013/qxyjzjy2018-010

Analysis on a Heavy Air Pollution Process in Nanchang during Nov 7—8, 2017

Chen Xiangxiang¹, Hu Lei^{2,3}

1. Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330096, China
2. Jiangxi Agro-meteorological Experiment Station, 330200, China
3. Jiangxi Meteorological Service, Nanchang 330000, China

Abstract: Based on the observation meteorological data and atmospheric pollution observation data, the air pollutants, weather situation and meteorological parameters of a heavy air pollution process occurred in Nanchang during Nov 7—8, 2017 were discussed, and the air pollutant backward trajectory was analyzed by HYSPLIT. The results showed that the main pollutant during this process was PM_{2.5}. The air quality in the east was worse than that in the west, and the air quality in the city was worse than in the suburbs. AQI presented obvious diurnal variation characteristics. The AQI peak appeared in the small hours and at 10 a.m., and an AQI valley occurred at dusk. AQI decreased significantly around noon. The surface pressure gradient and wind

收稿日期: 2017-12-22; 修订日期: 2018-02-20.

基金项目: 江西省气象局 2014 年重点项目“南昌市灰霾天气与肺癌发病率关系及预报服务研究”; 江西省气象局 2015 年青年人才项目“基于欧洲中心细网格的江西大雾预报方法研究”。

作者简介: 陈翔翔, 硕士, 工程师, 主要从事中短期天气预报业务, E-mail: chenxiangxiang666@163.com.

speed were small, which was not propitious to pollutants diffusion. In the middle layer there was a low trough moving eastward, and a weak shear line located in northern Jiangxi with high humidity in the low layer. The weak convergence in low layer resulted in the accumulation of surrounding pollutants. The ground visibility and relative humidity presented a negative correlation, and a mixture of fog and haze can be found in the severe polluted weather. In this process, Nanchang was characterized by "wet in middle layer and dry in low layer". There was an isothermal layer and a weak inversion layer in low layer, which can inhibit the vertical diffusion of air pollutants. The main sources of air pollutants in this process included the environmental pollution around Nanchang, the emission of local pollution source and the external pollution source. The external pollution source was mainly from Hunan, Guangdong and Guangxi.

Key words: heavy air pollution; AQI; meteorological factors; HYSPLIT

0 引言

大气气溶胶污染随着我国经济社会的发展以及经济规模的扩大、城市化的加快而日趋严重(孙亮, 2012)。影响空气质量的因素主要分为人为因素和自然因素。人为因素指污染物的排放造成的空气污染(罗宇翔等, 2012), 如砖瓦水泥等工业厂矿的大气污染物排放、汽车尾气的排放和秸秆、煤炭等的燃烧等; 自然因素主要指降水、雾、霾、沙尘暴、扬尘和大风等天气过程。当加重空气污染的人为因素和自然因素叠加时, 便产生较为严重的大气污染事件。污染天气不仅对人体的健康产生危害, 还会影响农作物的产量和品质(潘月鹏等, 2014), 其导致的低能见度可对交通运输造成严重影响。随着健康常识和环保意识的加强与普及, 人们对大气污染现象越发关注, 对污染天气预报预警的要求也随之提高。

多年来, 气象与环境保护方面的科研工作者主要从以下三个方面研究大气污染: 一是研究城市大气污染物的主要成分与来源, 如俞剑蔚等(2009)、孙燕等(2010)分析发现农民大规模焚烧秸秆引起的空气中高颗粒物浓度可造成大范围污染天气。杜晓惠等(2016)讨论了电力行业排放对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 的贡献。二是不断提升对污染天气的气象条件的研究与预报能力, 如尉鹏等(2015)对 2014 年 10 月中国东部持续重污染天气成因进行了分析。刘波(2009)分析了南昌市一次连续空气污染过程的气象条件, 指出地面有弱冷空气南下时不一定能改变污染状况, 极厚、极强的逆温层和极小风速是造成污染物高浓度的重要气象条件。三是找寻协调城市发展及污染排放的新平衡点与环保出路, 如傅敏宁等(2006)通过污染源分析、治理措施分析、清洁生产分析等技术找到了水泥粉尘控制的最好技术方案; 龚林儿和冯馨(2008)从环境污染修复角度指出, 将城市进行生态重建, 将森林引入城市, 形成由适宜本土生长的草地、灌木、树木构成的多层次、立体的生态

系统, 让自然回归城市; 李家才(2010)综合洛杉矶灰霾治理经验, 提出了修改环境空气质量标准并制定达标计划, 组建区域性空气污染控制机构, 扩展污染源和污染物的控制范围, 重视道路机动车尾气污染控制和运用排放权交易, 补贴手段等治理建议。

江西省南昌市位于鄱阳湖平原, 是长江中下游地区重要的省会城市之一, 随着城市的快速发展和气候条件的变化, 南昌市的大气污染问题日益凸显(汪如良等, 2014; 陈翔翔等, 2016)。2017 年 11 月 7—8 日, 南昌市出现了一次重度污染天气过程, 整个南昌城区的能见度较低且能持续闻到呛人而刺鼻的烟尘味, 市民的工作、生活均受到严重影响。文中, 利用地面常规气象观测资料、探空资料以及南昌市环境监测站空气污染物监测资料, 分析了此次污染天气过程主要大气污染物的时空分布、气象条件和大气污染物的来源, 以进一步了解长江中下游城市污染天气特点和成因, 为污染天气的监测与预报提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料来源

文中所用地面观测资料为南昌市国家级地面自动观测站逐小时气温、气压、湿度、能见度、风和降水量等。主要大气污染物监测数据为南昌市环境监测站提供的 9 个环境质量监测点(林科所、建工学校、省林业公司、省外办、象湖、石化、省站、京东镇政府和武术学校)逐小时 NO_2 、 SO_2 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 O_3 、 CO_2 浓度以及空气质量指数(AQI)。大气污染物后向轨迹数据为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)空气资源实验室分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的 GRDAS 数据。

1.2 研究方法

文中, 应用统计学和天气学分析方法对 2017 年 11 月 7—8 日南昌市重度污染天气过程的主要大气污染物时空分布、天气形势和主要气象要素进行分

析,并运用拉格朗日混合单粒子轨道模型(HYSPLIT)分析大气污染物的后向轨迹。

2 大气污染物特征

对大气污染物监测数据进行统计发现,2017年11月上旬,南昌市有2 d空气质量为良,5 d为轻度污染,2 d为中度污染,1 d重度污染,中度及以上污染天气出现在11月7—8日和10日,此过程首要污染物均为 $PM_{2.5}$ 。

图1给出了2017年11月6日18时—10日14时南昌市平均AQI逐小时变化。分析可知,6日18时南昌市空气质量等级为良(AQI为86),6日22时转为重度污染天气(AQI为223),在短短4 h内空气质量接连下降3个等级,并于7日10时转为严

重污染天气(AQI为301),这是南昌市2017年首次出现的严重污染天气。重度及以上污染从6日22时一直持续到7日13时,2个AQI峰值分别为270(7日01时)和301(7日10时),高峰过后空气质量稍有转好,AQI在17时出现一天中最低(为122)。8日的AQI变化与7日相似,均出现2个AQI高峰和傍晚的AQI低谷;而9—10日则有一个凌晨的AQI高峰和傍晚的AQI低谷。严重污染时,7—8日上午10时还出现了另一个AQI高峰。这表明,此次中度及以上污染天气时AQI有明显的日变化:凌晨(23时—次日02时)有一个AQI高峰;傍晚(17—18时)出现一个AQI低谷,此时空气质量为一天内最好;中午前后为AQI明显下降时段,也是空气质量改善时段。

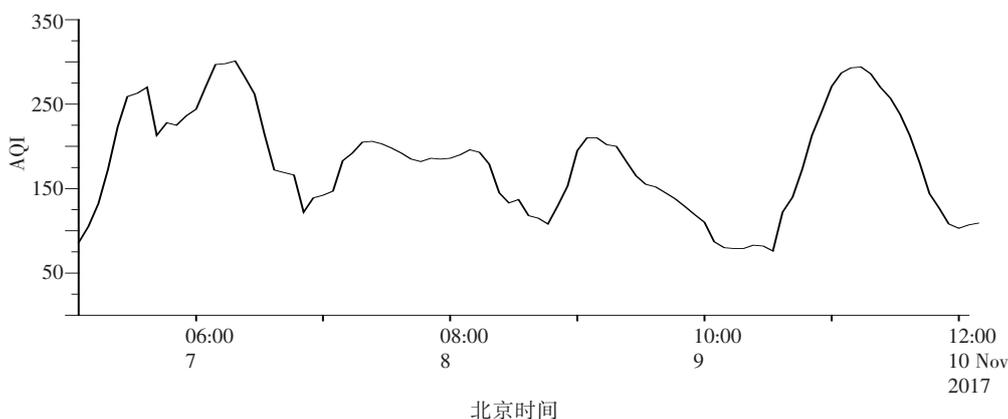


图1 2017年11月6日18时—10日14时南昌市平均AQI逐小时变化

Fig. 1 Hourly variation of average AQI of Nanchang from 18:00 BT of Nov 6 to 14:00 BT of Nov 10, 2017

图2给出了南昌市各环境质量监测点2017年11月6日20时—8日20时平均AQI。分析可知,大气污染过程自东向西蔓延,空气质量为东部劣于西部,市内劣于市郊。京东镇政府、省站、省外办、建工学校监测点基本位于东西走向的轴线上,7日依次达到重度、严重污染,4个站点平均AQI分别为319、263、180、160,为自东向西递减。南昌市西郊的武术学校空气质量最好,南郊的石化监测站空气质量略优于市中心的省站。京东镇政府监测点位于市区且为最东监测点,于6日21时率先达到重度污染等级(AQI为288),6日22时达到严重污染等级(AQI为396),并于7日00时开始连续12 h突破极限值500,单站严重污染天气共持续了17 h。

分析南昌市主要大气污染物逐小时浓度可知(图略), $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 逐小时浓度在本次过程中维

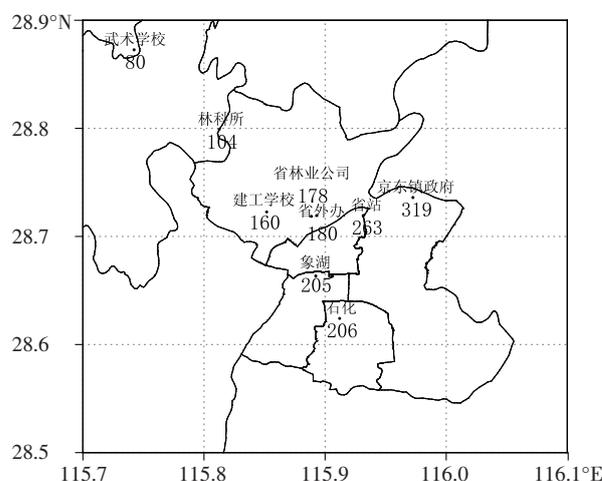


图2 南昌市各环境质量监测点2017年11月6日20时—8日20时平均AQI

Fig. 2 Distribution of environmental quality monitoring points and the average AQI in Nanchang from 20:00 BT of Nov 6, to 20:00 BT of Nov 8, 2017

持较高水平,一度达到了重度或严重污染类别。而 SO_2 、 NO_2 、 CO 、 O_3 的浓度均较低,这 4 类大气污染物的等级为优或良。本次重度污染天气的污染物主要为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ,主要来源多为燃料的燃烧,如汽车尾气、煤炭消耗以及焚烧秸秆(郑枚等,2014);而 SO_2 、 NO_2 浓度低意味着来自电力、石油加工与炼焦业、化工和非金属矿物制品业等污染源的污染较少(吴邦灿等,1997)。

3 天气形势分析

3.1 地面形势

图 3 给出了 2017 年 11 月 6 日 08 时、7 日 05 时、8 日 08 时地面气压场。分析可知,6 日 08 时,南昌市处于入海高压后部。7 日 05 时,入海高压已减弱并东移经过日本,地面冷高压中心位于蒙古国境内,此时南昌市处于相对均压带中,地面风速较弱,

不利于污染物的扩散。8 日 08 时,中心值超过 1030 hPa 的地面高压东移进入我国境内,但暂时没有明显的冷空气南下,南昌市处于高压底部,气压梯度并不大。由于地面没有冷空气及较大的风速,地面到低层的大气污染物基本维持在原地。直到 10 日下午,一股较强地面冷空气南下,南昌市的污染天气才得到明显改善,至 11 日南昌市空气质量转为良。

3.2 中低层形势

图 4 为 2017 年 11 月 7 日 08 时 500 hPa 位势高度和 700 hPa 风、温度露点差分布。分析可知,500 hPa 高度层江西省以北和以西有高空分裂槽东移,南昌位于槽前辐合区,低层弱辐合导致周边污染物向中心辐合堆积。低层切变线位于江西省北部,南昌市位于风场弱辐合区。南昌市及以南地区温度露点差均低于 2°C ,低层湿度较大,导致南昌市出现

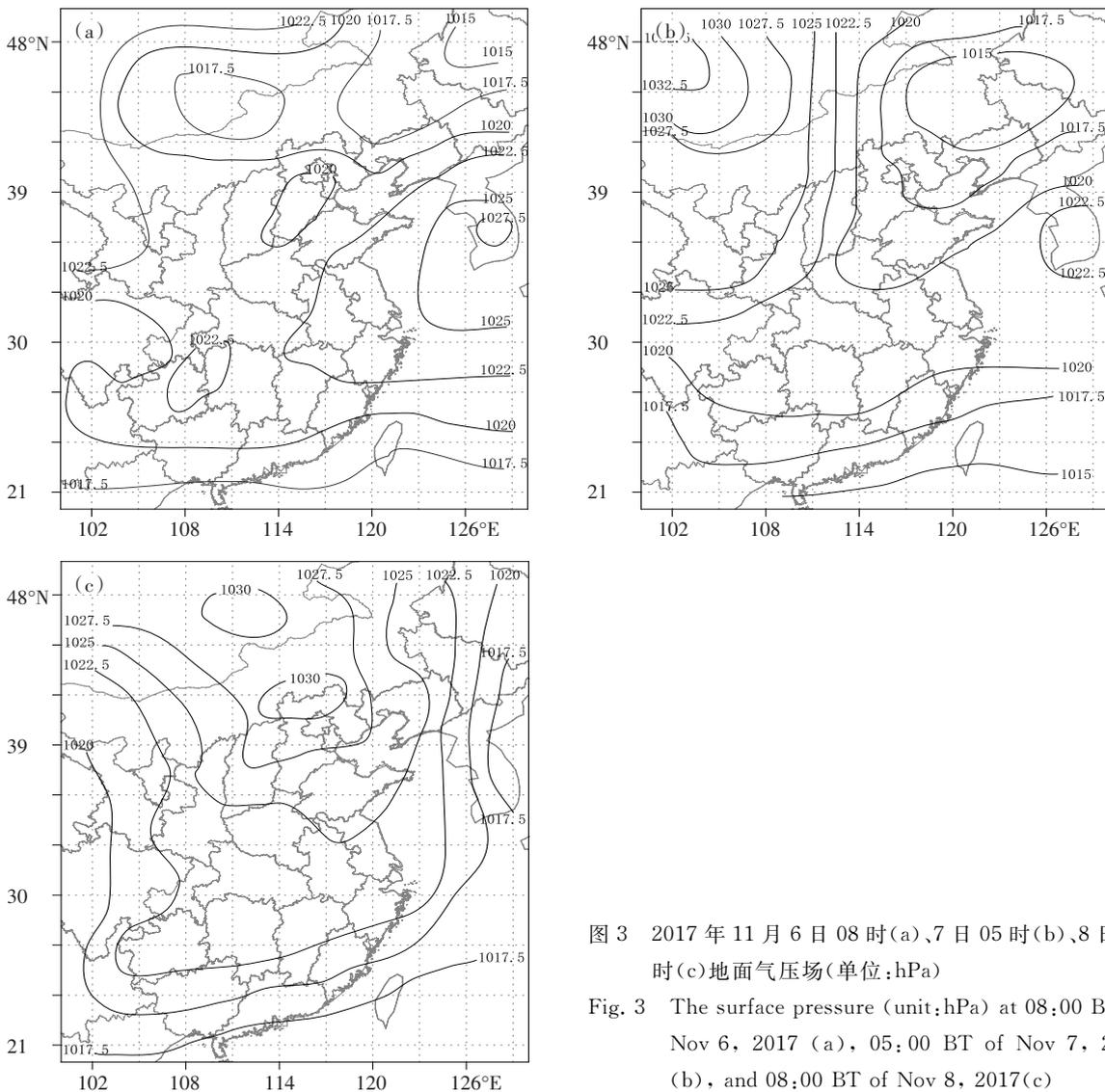


图 3 2017 年 11 月 6 日 08 时(a)、7 日 05 时(b)、8 日 08 时(c)地面气压场(单位:hPa)

Fig. 3 The surface pressure (unit:hPa) at 08:00 BT of Nov 6, 2017 (a), 05:00 BT of Nov 7, 2017 (b), and 08:00 BT of Nov 8, 2017(c)

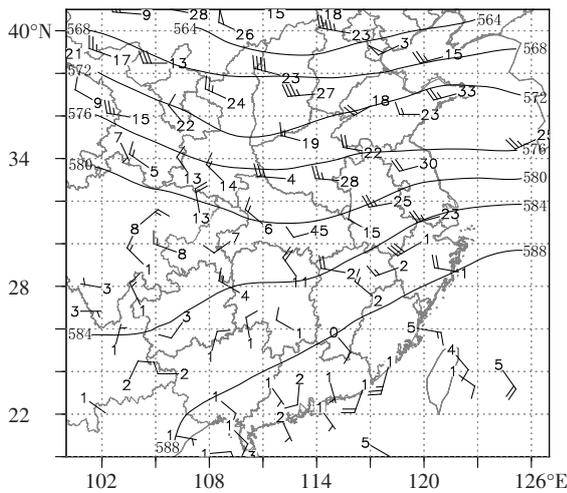


图4 2017年11月7日08时500 hPa位势高度场(等值线,单位:dagpm)和700 hPa风场(风向杆)、温度露点差(数值,单位:℃)

Fig. 4 The 500 hPa geopotential height field (contour, unit: dagpm), 700 hPa wind field (wind vane) and 700 hPa $T-T_d$ (number, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 08:00 BT of Nov 7, 2017

弱降水(6日20时—7日20时南昌市降水量为1 mm),这种高湿环境有利于污染物的吸湿增长。

4 主要气象要素特征

4.1 能见度与相对湿度

图5为2017年11月6—9日南昌市能见度与相对湿度变化。分析发现,能见度与相对湿度变化表现出很明显的反相关,7—8日能见度为1—6 km,相对湿度为60%—90%。在重度污染天气发生时

生时(6日22时—7日13时、7日23时—8日01时、8日22时—9日01时),能见度较低,在3 km以内,而相对湿度较高,为78%—96%,即雾和霾之间相互转换,多为雾和霾的混合物。这种相对湿度与能见度的反相变化是由于空气相对湿度维持较高水平有利于污染物的吸湿增长(段云霞等,2016)。

4.2 地面风场特征

对7—8日的南昌市地面风场监测发现,地面风速较低,普遍低于2 m/s,平均为1 m/s,尤其是出现重度/严重污染的时刻,平均风速为0.9 m/s(图略)。7日,南昌市地面主要为偏西南风,而8日地面转为偏东北风(图6),两天地面主导风向的改变主要受地面形势影响,即由入海高压后部转为另一东移高压底部。污染最为严重的7日地面主导风向与南昌市多年霾日的统计结果(东北风;陈翔翔等,2016)有出入,这也是本次过程较难预报预警的原因之一。

4.3 逆温条件

7日10时南昌市出现严重污染天气,分析7日08时南昌站探空图(图7)可知,南昌800—350 hPa高度为相对湿度大于80%的湿层,而800 hPa高度层以下空气则较干燥。在较干燥的低层有等温层和弱的逆温层,即1 017—921 hPa为温度为15℃的等温层,839—813 hPa有1℃的弱逆温。由于霾的厚度可达1—3 km(吴兑,2005),该等温层和逆温层均处于霾的厚度范围内。等温层和逆温层均能一定程度地减少边界层大气与其上层大气之间物质与能量的交换,从而抑制大气污染物的垂直扩散。

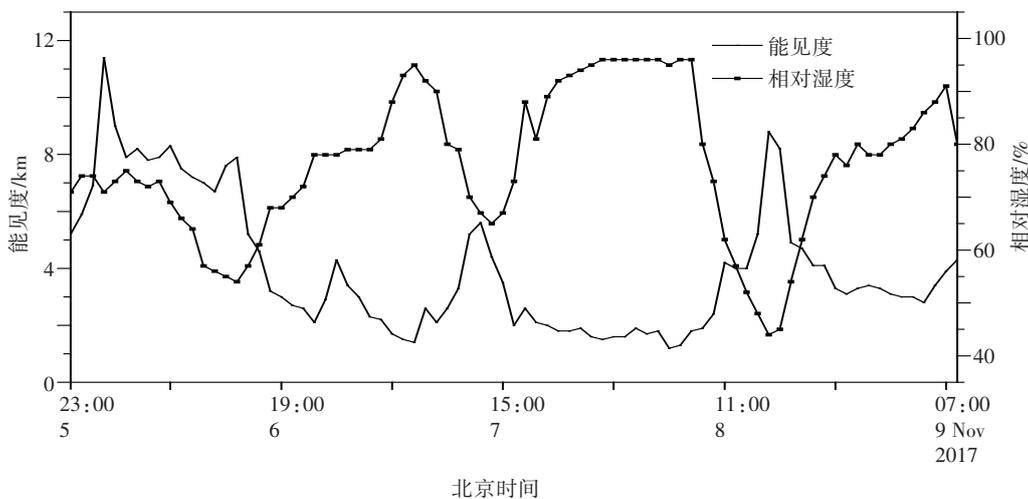


图5 2017年11月5日23时—9日08时南昌市能见度与相对湿度变化

Fig. 5 Variations of visibility and relative humidity in Nanchang during 23:00 BT 6 to 08:00 BT 9 Nov, 2017

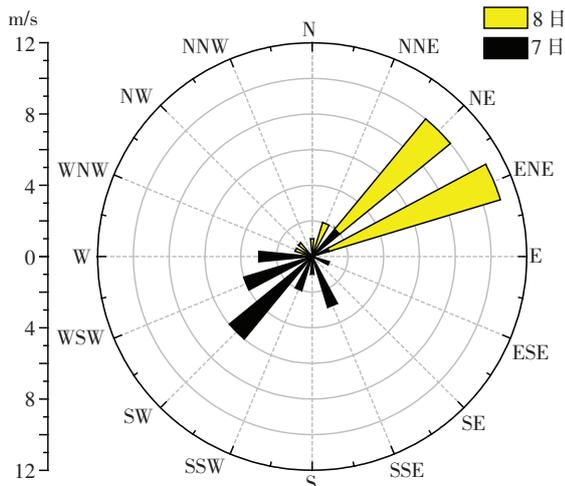


图6 2017年11月7—8日南昌市地面小时风向次数玫瑰图
Fig. 6 Rose map of hourly surface wind direction in Nanchang during Nov 7-8, 2017

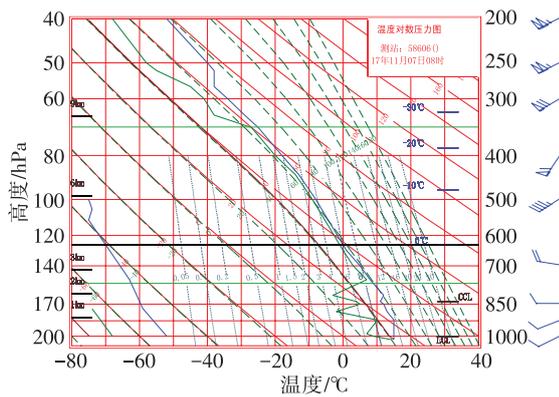


图7 2017年11月7日08时南昌站市探空图
Fig. 7 t -log p diagram at Nanchang station at 08:00 BT of Nov 7, 2017

5 污染物来源分析与治理建议

此次重度污染天气过程是受中低层弱切变影响下产生,江西省北部阴天并伴随弱降水,弱降水并未有效解除重度空气污染状况,据江西省环境质量信息发布平台显示,2017年11月7日07时,江西省11个设区市中仅南昌市和吉安市为重度污染天气,其他市等级为轻度污染或良。可见,稳定的气象环境因素是诱因,而环境污染确是内在表现。

江西省气象科学研究所卫星遥感监测结果显示,2017年10月30日—11月5日全省共监测到农用热点31个,其中南昌市最多,为11个,这表明农民秋收后有明显的烧荒现象。此外,针对本次重度污染天气过程,南昌市环境检查支队对南昌县、进贤

县、青山湖区、高新区4个农作物相对较多的区域进行了督导,发现焚烧秸秆比较严重的地方有高新区、昌东、南昌县等地区。南昌本地污染源的排放问题也面临着严峻的现实,尤其是空气污染最为严重的南昌东部地区,分布着相对较多的工厂,如南昌钢铁厂、氨厂等,而南昌昌东工业园区和南昌高新技术产业开发区的化工建材、生物医药和包装等均是支柱产业,本地污染源的排放也亟待规范与管理。在南昌重度污染时,可通过有关部门及时制止周边秸秆与垃圾的焚烧,以及对本地污染性工厂进行减排、停产等管理方式避免污染天气的进一步恶化。

外来大气污染物的输入与堆积也能导致一个地区空气质量变差。2017年11月第1候,南昌市主要位于高压底部,低层与地面以偏北风为主导,对2017年11月5日00时(UTC)大气污染物向后回推4d的轨迹模拟可知(图8a),来自蒙古国、内蒙古甚至俄罗斯的大气污染物南下途经黄河下游地区、长江下游地区到达江西省北部,但11月第1候南昌市空气质量为轻度污染或良,即前期北方输入并堆积在南昌市的大气污染物有限。而11月第2候,南昌市地面形势为高压后部转为另一高压底部,南昌市天气污染较为严重时,低层和地面为弱南风控制,对2017年11月7日00时(UTC)大气污染物向后回推4d的轨迹模拟可知(图8b),此次南昌市重度污染天气时段的外来输入性大气污染物主要受西南气流的影响,低层大气污染物主要于3d前从华南北上到达江西省北部,其中500m高度的大气污染物主要来自广东,1000m高度的大气污染物主要来自海南、南海附近的低层大气,这些污染物经过广西、湖南到达江西境内。1500m高度的大气污染物则自11月4日进入我国云南境内后,向东北方向穿越湖南进入江西省北部。11月5日前后广东、广西、湖南确实出现了大范围霾天气,可见此次南昌重度污染天气的外来输入主要为广东、广西及湖南上空的大气污染物。

综上所述,此次南昌市重度污染天气污染物来源主要有南昌市周边环境,本地污染源的排放,大气污染物的外来输入。此次重度污染天气过程具有明显局地性,一方面由于南昌市地面风速弱,低层弱辐合导致周边污染物向中心辐合堆积,低层湿度高有利于污染物的吸湿增长以及近地层等温层和逆温层的出现与维持,导致南昌市污染比江西省其他地区严重;另一方面由于南昌市东部工业厂矿污染排放和焚烧秸秆现象严重,且南昌市西部为梅岭山

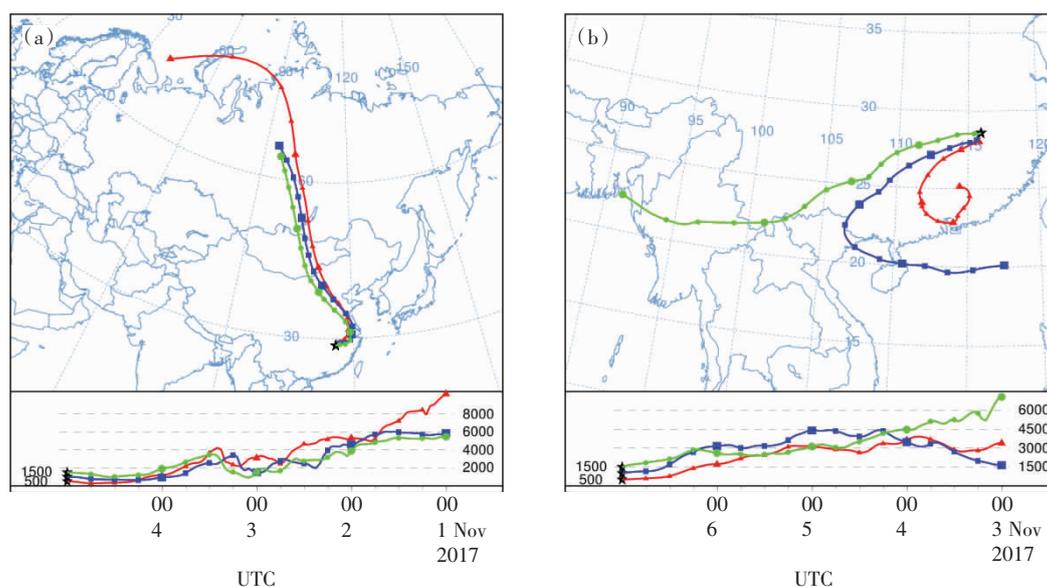


图8 2017年11月5日00时UTC(a)和2017年11月7日00时UTC(b)南昌市500、1000、1500 m高度大气污染物后向轨迹模拟

Fig. 8 Backward trajectories of air pollutants in Nanchang at the height of 500 m, 1000 m and 1500 m at 00:00 UTC of Nov 5, 2017 (a) and 00:00 UTC of Nov 7, 2017 (b)

区,植被对空气有一定的净化能力,导致南昌市东部污染明显重于西部。

6 小结

利用地面常规观测资料、探空资料和大气污染物监测数据等资料,对2017年11月7—8日南昌市一次重度污染天气过程的大气污染物特征、天气形势及气象要素特点进行了分析,并用拉格朗日混合单粒子轨道模型(HYSPLIT)分析了此次过程大气污染物的后向轨迹,结果表明:

1) 此次污染天气过程的首要污染物为 $PM_{2.5}$,重度及以上污染天气持续了16 h。空气质量呈东部劣于西部,市内劣于市郊的特点。本次污染天气过程AQI有明显的日变化特征,凌晨和上午各有一个AQI高峰,傍晚有一个AQI低谷,中午前后为AQI明显下降时段,而9—10日则只有一个凌晨附近的AQI高峰和傍晚的AQI低谷。

2) 此次过程的地面形势是,6日南昌处于入海高压后部,7日处于两个高压之间相对均压带内,8日南昌市转处于另一东移高压底部,其间气压梯度小,地面风速小,较小的风速不利于污染物的扩散。中层有低槽东移,南昌市位于槽前辐合区,低层弱切变线位于江西省北部且湿度较大,低层弱辐合能导致周边污染物向中心辐合堆积。

3) 此次污染天气过程,南昌市地面风速较低,

风向由7日的偏西南风转为8日的偏东北风,两天地面主导风向的改变主要受地面形势转变影响。南昌市上空表现为“中层湿、低层干”的特点,在较干的低层有等温层和弱的逆温层,等温层和逆温层均能一定程度地减少边界层大气与其上层大气之间的物质与能量的交换,从而抑制大气污染物的垂直扩散。

4) 此次污染天气污染物来源主要有三点,一是南昌市周边环境,二是本地污染源的排放,三是大气污染物的外来输入。卫星遥感监测的农用热点表明农民秋收后有明显的烧荒现象;空气污染最为严重的南昌市东部地区,分布着相对较多的工厂;对大气污染物向后回推的轨迹进行模拟后显示,本次污染天气过程的外来输入来源主要为广东、广西及湖南上空的大气污染物。

参考文献(References)

- 陈翔翔,胡磊,彭王敏子,等. 2016. 1960—2014年南昌市霾天气气象要素及主要大气污染物变化特征[J]. 气象与环境学报,32(5):114-121. Chen X X, Hu L, Peng W M Z, et al. 2016. Characteristics of meteorological parameters and main atmospheric pollutants of haze events in Nanchang from 1960 to 2014[J]. J Meteorol Environ, 32(5):114-121. (in Chinese)
- 段云霞,李得勤,田莉,等. 2016. 沈阳市一次持续性重污染天气过程特征分析[J]. 干旱气象,34(5):803-810. Duan Y X, Li D Q, Tian L, et al. 2016. Characteristic analysis of a continuous and serious pollution weather process in Shenyang[J]. Arid Meteor, 34(5):803-810. (in Chinese)

- 杜晓惠,徐峻,刘厚丰,等. 2016. 重污染天气下电力行业排放对京津冀地区 PM_{2.5} 的贡献[J]. 环境科学研究, 29(4):475-482. Du X H, Xu J, Liu H F, et al. 2016. Contribution of power plant emissions to PM_{2.5} over Beijing-Tianjin-Hebei area during heavy pollution periods[J]. Res Environ Sci, 29(4):475-482. (in Chinese)
- 傅敏宁,孔新红,徐卫民. 2006. 江西亚东水泥有限公司大气污染控制与清洁生产评价[J]. 气象与减灾研究, 29(4):53-58. Fu M N, Kong X H, Xu W M. 2006. Atmospheric pollution control and clean production as assessment of Jiangxi Yadong Cement CO. LTD.[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 29(4):53-58. (in Chinese)
- 龚林儿,冯馨. 2008. 论中国城市生态健康与环境污染修复[J]. 气象与减灾研究, 31(4):24-27. Gong L E, Feng X. 2008. The urban ecological health and the remediation of environmental pollution in China[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 31(4):24-27. (in Chinese)
- 李家才. 2010. 洛杉矶经验与珠三角地区灰霾治理[J]. 环境保护, (18):61-63. Li J C. 2010. Haze control experience in Los Angeles and the Pearl River Delta area[J]. Environ Prot, (18):61-63. (in Chinese)
- 刘波. 2009. 南昌市一次连续空气污染过程的气象条件分析[J]. 气象与减灾研究, 32(2):68-72. Liu B. 2009. Meteorological conditions of a continuous air pollution process in Nanchang[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 32(2):68-72. (in Chinese)
- 罗宇翔,陈娟,郑小波,等. 2012. 近 10 年中国大陆 MODIS 遥感气溶胶光学厚度特征[J]. 生态环境学报, 21(5):876-883. Luo Y X, Chen J, Zhen X B, et al. 2012. Climatology of aerosol optical depth over China from recent 10 years of MODIS remote sensing data[J]. Ecol Environ, 21(5):876-883. (in Chinese)
- 潘月鹏,贾琳,田世丽,等. 2014. 大气霾污染对农业生产的可能影响[J]. 农业环境科学学报, 33(11):2279-2280. Pan Y P, Jia L, Tian S L, et al. 2014. Potential effects of haze pollution on agriculture in China[J]. J Agro-Environ S, 33(11):2279-2280. (in Chinese)
- 孙亮. 2012. 灰霾天气成因危害及控制管理[J]. 环境科学与管理, 37(10):71-75. Sun L. 2012. Hazard and treatment of haze weather[J]. Environ Sci Managen, 37(10):71-75. (in Chinese)
- 孙燕,张备,严文莲,等. 2010. 南京及周边地区一次严重烟霾天气的分析[J]. 高原气象, 29(3):794-800. Sun Y, Zhang B, Yan W L, et al. 2010. Analysis of a heavy haze event in Nanjing and its surrounding areas[J]. Plateau Meteor, 29(3):794-800. (in Chinese)
- 汪如良,吴凡,刘志萍,等. 2014. 南昌市近 60 年城市气象灾害变化特征分析[J]. 气象与减灾研究, 37(2):44-49. Wang R L, Wu F, Liu Z P, et al. 2014. Variation characteristics of urban meteorological disasters over the past 60 years in Nanchang[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 37(2):44-49. (in Chinese)
- 尉鹏,任阵海,王文杰,等. 2015. 2014 年 10 月中国东部持续重污染天气成因分析[J]. 环境科学研究, 28(5):676-683. Wei P, Ren Z H, Wang W J, et al. 2015. Analysis of meteorological conditions and formation mechanisms of lasting heavy air pollution in eastern China in October 2014[J]. Res Environ Sci, 28(5):676-683. (in Chinese)
- 吴邦灿,孙志强,贾建和,等. 1997. 大气污染物来源的分析研究[J]. 环境保护, (8):29-31. Wu B C, Sun Z Q, Jia J H, et al. 1997. Oasis turf and forage technology development center[J]. Environ Prot, (8):29-31. (in Chinese)
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J]. 气象, 31(4):3-7. Wu D. 2005. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather[J]. Meteor Mon, 31(4):3-7. (in Chinese)
- 俞剑蔚,孙燕,张备,等. 2009. 江苏沿江一次重霾天气成因分析[J]. 气象科学, 29(5):664-669. Yu J W, Sun Y, Zhang B, et al. 2009. Analysis of one heavy haze case happened in the region around Yangtze River in Jiangsu province[J]. Scientice Meteor Sinica, 29(5):664-669. (in Chinese)
- 郑枚,张延君,闫才青,等. 2014. 中国 PM_{2.5} 来源解析方法综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 50(6):1141-1154. Zhen M, Zhang Y J, Yan C Q, et al. 2014. Review of PM_{2.5} source apportionment methods in China[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 50(6):1141-1154. (in Chinese)