

严文莲, 刘端阳, 孙燕, 等. 2014. 秸秆焚烧导致的江苏持续雾霾天气过程分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 237–247, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13209. Yan Wenlian, Liu Duanyang, Sun Yan, et al. 2014. Analysis of the sustained fog and haze event resulting from crop-burning residue in Jiangsu Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 237–247.

秸秆焚烧导致的江苏持续雾霾天气过程分析

严文莲¹ 刘端阳² 孙燕¹ 魏建苏¹ 濮梅娟¹

¹ 江苏省气象台, 南京 210008

² 无锡市气象局, 无锡 214101

摘 要 利用常规观测资料和 NCEP 再分析资料, 从污染情况、环流背景、地面气象要素特征、水汽、热力及动力条件等几个方面对江苏 2012 年 6 月中上旬持续雾霾天气进行了分析。结果表明: 江苏及周边省市秸秆焚烧造成大量的气溶胶粒子悬浮于空中, 是造成江苏出现持续不同程度的霾天气的主要原因, 同时也为雾滴形成提供了丰富的凝结核; 中高层冷空气强度未能完全破坏底层相对稳定的层结, 较小的风速和较大的湿度有利于雾霾的发展, 重度霾或雾风速多在 3 m/s 以下, 且相对湿度在 80% 以上。频繁的弱降水过程对雾的形成和霾的加重起到了重要的作用; 低层的逆温或近中性层结的维持, 为雾霾持续存在提供了有利的层结条件, 且浓雾形成主要有辐射贴地逆温和平流逆温两种形式; 垂直上升运动与雾霾的发展之间有着互相影响的紧密联系, 在具备一定的水汽条件时, 底层弱的上升运动有利于雾体的向上发展从而促进雾的加浓。后向轨迹模拟雾霾相对较严重的 6 月 10 日污染轨迹表明沿江和苏南地区污染物浓度上升除了本地悬浮颗粒物外, 安徽境内的污染物的输送也是一个重要因素, 而北部地区更多还是本地的污染源。

关键词 持续雾霾 秸秆焚烧 大气污染 气象条件 轨迹分析

文章编号 1006-9585 (2014) 02-0237-11

中图分类号 426.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13209

Analysis of the Sustained Fog and Haze Event Resulting from Crop-Burning Residue in Jiangsu Province

YAN Wenlian¹, LIU Duanyang², SUN Yan¹, WEI Jiansu¹, and PU Meijuan¹

¹ Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

² Wuxi Meteorological Office, Wuxi 214101

Abstract By using conventional observation data and NCEP reanalysis data, a sustained fog and haze event that occurred in Jiangsu Province in early and middle June was analyzed from several perspectives including pollution, circulation background, surface meteorological characteristics, and vapor, thermal, and dynamic conditions. The results showed that the residue of crop-burning, which caused a large aerosol burden, was the main reason for the sustained haze, whereas the heavy fog was formed mainly by radiation and advection inversions. The aerosol particles also provided condensation nuclei for fog formation. High-level cold air did not completely dissolve the underlying relatively stable stratification. Lower wind speed and higher relative humidity of less than 3 m/s and greater than 80%, respectively, were shown to be favorable for the development of the fog and haze. Frequent weak

投稿日期 2013-12-04 收到, 2014-01-21 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41340042, 江苏省科技支撑计划社会发展重大研究 BE2012771, 江苏省自然科学基金—青年基金 BK20130111, 江苏省气象局预报员专项 201212

作者简介 严文莲, 女, 1983 年出生, 硕士, 工程师, 从事中短期灾害性天气预报方法研究。E-mail: yike-112@163.com

precipitation processes also played an important role in the fog formation and aggravated the haze conditions. The maintenance of near-surface temperature inversion or nearly neutral stratification provided favorable stratification conditions for the persistence of the fog and haze. Moreover, a strong correlation was present between vertical upward movement and haze development. Underlying weak upward motion with specific moisture conditions was conducive to the upward development of the mist. By using backward trajectory simulation, the authors determined that in addition to local suspended particulate matter, the pollutant transport from Anhui Province was an important factor for the sustained fog and haze. In the northern regions, local pollution sources were the main factors.

Keywords Sustained fog/haze, Crop-burning residue, Air pollution, Synoptic condition, Trajectory analysis

1 引言

随着我国工业的高速发展和城市化进程,大气中气溶胶粒子浓度增加,低能见度日随之增加,我国的雾霾天气也逐渐增多,特别是我国中东部地区雾霾更加严重,大范围持续雾霾天气对交通运输、人体健康、供电、军事活动等均造成严重影响,也引起了社会和公众的极大关注。近年来,不少学者在雾霾的气候特征、天气学特点、成因等方面做了大量研究工作,并获得一系列有意义的研究成果。吴兑等(2010)对1951~2005年的中国大陆霾的时空特征进行了分析,并认为细粒子是珠江三角洲的主要气溶胶污染(吴兑等,2006);高健等(2012)分析北京2011年10月的连续灰霾过程指出频繁出现的鞍型场静稳天气及北京周边地区存在基数较大的细颗粒排放源所致;孙燕等(2010)、朱佳雷等(2011)先后对2008年10月重霾污染天气特征和机理分析,指出该污染事件与大范围的秋收秸秆集中燃烧造成大量污染物排放有密切关系;近年来国内外针对生物质燃烧(包括秸秆焚烧)的卫星遥感监测(胡梅等,2008;Badarinath et al., 2009)对其造成的污染物输送和空气质量的影响进行了观测和评估;许多学者也相继对秸秆焚烧造成的重霾天气所含污染物颗粒的特征和浓度进行了分析(朱彬等,2010;尹聪等,2011;高岑等,2012);吴彬贵等(2009)、张恒德等(2011)、贾星灿和郭学良(2012)分别对发生在华东和华北地区冬季持续雾过程热力和动力成因进行了诊断分析;杨军等(2012)通过观测试验揭示了持续雾霾过程的雾—湿霾—轻雾—霾之间的转换。

长江三角洲地区是我国近年来雾霾多发区(孙彧等,2013),每年5月底至6月中上旬这段时间,江苏省及周边地区进入夏收夏种的秸秆焚烧高峰期,这种生物质燃烧排放及其二次形成的气溶胶颗

粒物、污染气体对区域和局地空气质量、大气化学过程乃至气候变化将产生重要影响(Crutzen and Andreae, 1990;曹国良等,2007;Langmann et al., 2009)。2012年6月中上旬,江苏地区连续数日出现了大范围的雾霾天气,持续时间长、影响范围大,引起了广泛的关注。以往研究多针对雾霾频发的秋冬季节,而对于气温较高的夏季出现持续性雾霾天气的研究少见。本文将结合污染浓度,对这次持续雾霾天气从环流背景、气象要素、大气边界层特征和气流轨迹等方面进行分析,综合探讨此次持续雾霾天气成因,为江苏夏收时期的持续雾霾预报提供一定思路 and 参考。

文中气象要素和物理量分析所用资料来自常规观测资料和NCEP的 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度)资料;污染物浓度数据来自江苏环境监测中心站;火点资料来源于中华人民共和国环境保护部网站([http://www.zhb.gov.cn/\[2012-07-01\]](http://www.zhb.gov.cn/[2012-07-01]))。用于轨迹计算的气象场资料为NOAA的全球同化系统(GDAS)数据,利用HYSPLIT4.8来分析大气输送情况。

2 雾霾概况

2012年6月中上旬全省各地均有不同程度的雾霾出现。从实况监测来看,仅上半月多站持续霾日10 d以上,部分站点雾日也达到7~8 d,雾多在沿江及以北地区。由图1可见,在江苏及周边地区多日均存在不同程度的秸秆焚烧现象,且火点多出现在苏北和安徽北部,对应的空气中颗粒物也将比苏南严重,这也使得沿江及以北地区相比苏南地区霾更严重。总体而言,这段时间夜里至早上以中度霾为主,部分时段出现了能见度低于2 km的大范围的重度霾天气,白天又转化为轻度和轻微霾为主。6日大范围降水之后,全省能见度整体有所恶化,其中7~8日和10日雾霾天气最强,部分站点

全天能见度均低于 2 km。另外, 3 日、6~8 日、10~12 日等夜里至早上这段时间还出现较明显的大雾天气(图 2), 呈现出霾—雾—霾的循环转化过程, 部分时段出现了能见度低至 200 m 以下的浓雾, 特别在 3 日的江淮之间东部地区和 10 日的沿江和苏南东部等地区还出现了 50 m 以下的强浓雾, 这在江苏 6 月是较为少见的。

3 污染物变化情况

据环保部门监测显示, 这段时间主要污染物均为可吸入颗粒物 PM₁₀, 13 个城市均超标 2~11 d 不等。图 3 给出了江苏部分城市 6 月的细颗粒物 (PM_{2.5}) 浓度和空气质量指数 (Air Quality Index,

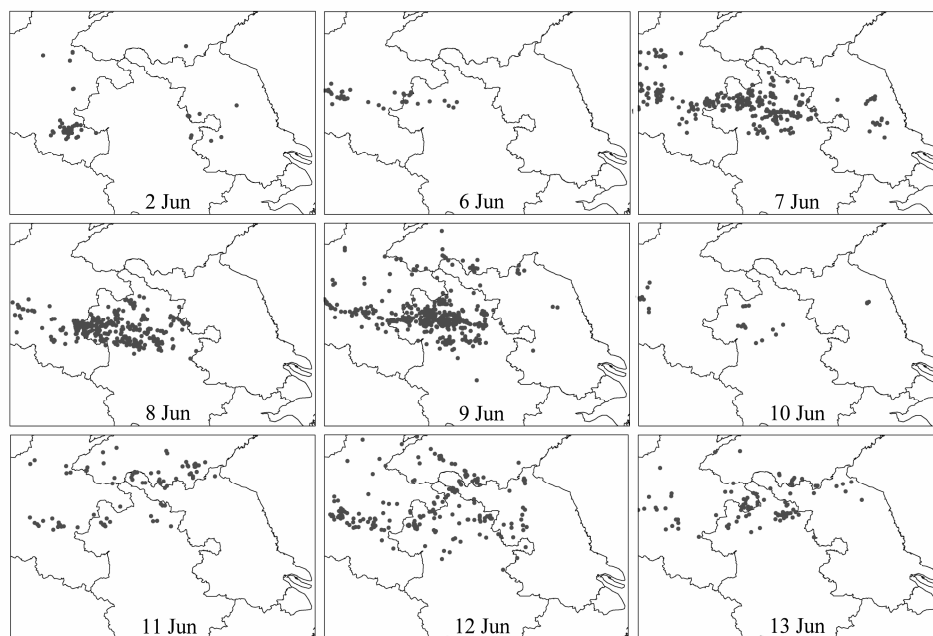


图 1 2012 年 6 月中上旬江苏及周边地区秸秆焚烧遥感监测

Fig. 1 Remote sensing monitoring of crop-burning residue in Jiangsu Province and the surrounding areas during the early and middle Jun in 2012

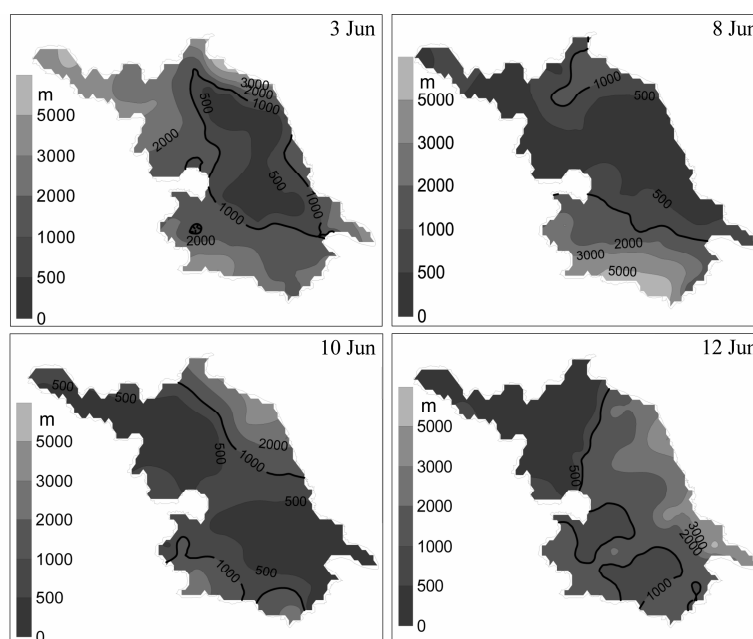


图 2 江苏 2012 年 6 月中上旬主要浓雾过程 05:00 (北京时间, 下文无特别说明处同) 能见度分布

Fig. 2 Visibility distribution at 0500 LST in the dense fog events during the early and middle Jun in 2012

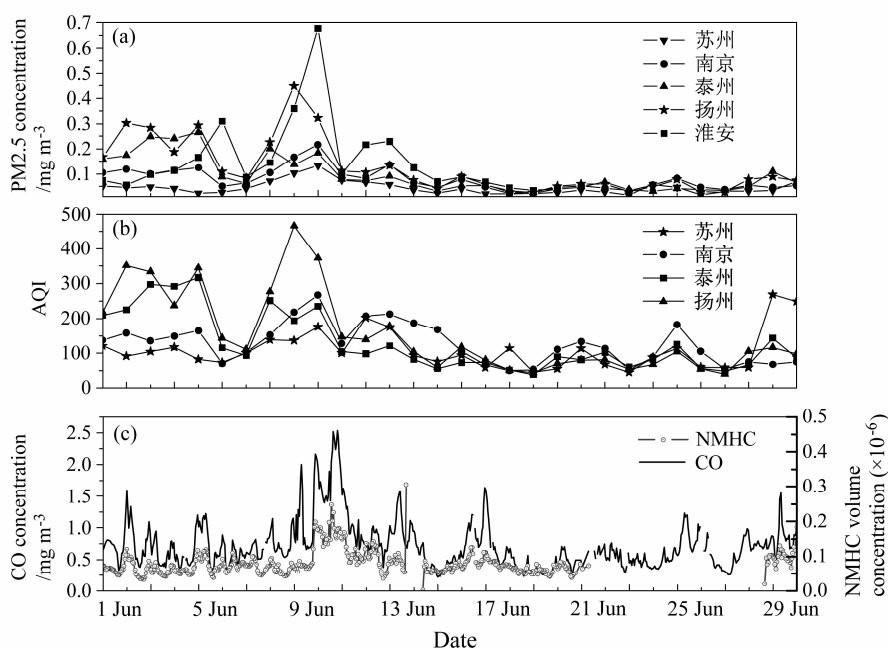


图3 2012年6月江苏部分城市 (a) 细颗粒物质量浓度和 (b) AQI 以及 (c) 南京 CO 和非甲烷碳氢化合物演变情况

Fig. 3 The evolutions of (a) the PM_{2.5} mass concentration and (b) Air Quality Index (AQI) in some cities of Jiangsu Province and (c) CO and non-methane hydrocarbon (NMHC) of Nanjing in Jun 2012

AQI) 的逐日演变情况, 可以看到高污染指数主要在上半月, 多日达到中度及以上污染, 且沿江以北地区污染普遍高于苏南地区, 这与秸秆焚烧多发生在苏北和安徽北部有关。仅上半月扬州有 9 d AQI 超过 200, 泰州也多达 7 d, 属重度污染级别, 而苏州仅 1 d; 日均细颗粒物质量浓度多数超过二级标准 (0.075 mg/m^3), 其中在雾霾最严重的 6 月 9~10 日, 淮安细颗粒物最高达 0.677 mg/m^3 , 扬州 0.472 mg/m^3 , 高浓度的细颗粒物的强烈“消光”作用也使得能见度大大削减, 造成雾霾加重; 而在降水相对明显的两次过程 6~7 日和 11 日, 对应的污染指数都有不同程度的下降, 也可以看出降水对污染物有一定的清除作用。但由于污染物的持续排放, 污染物浓度短暂的下降后又快速上升。另外图 3 还给出了南京地区非甲烷碳氢化合物 (non-methane hydrocarbon, NMHC) 和 CO 的浓度变化情况 (图 3c), 可以看到在南京霾最严重的 10 日前后相应的 NMHC 和 CO 浓度也急剧增加。直到 15 日之后, 秸秆焚烧现象有所缓解, 各市相应的 AQI 也明显下降, 多数时段维持在 150 以下的, 细颗粒物浓度也降至 0.075 mg/m^3 以下, 使得江苏持续多日的雾霾天气也趋于缓解。可见江苏及周边省市秸秆焚烧造成大量的气溶胶粒子悬浮于空中, 是造成江苏出现持续不同程度的霾天气的主要原因, 同时也为雾滴

形成提供了丰富的凝结核, 当空气中的湿度加大时, 饱和的水汽附在颗粒物上凝结, 极易造成霾转变成雾, 甚至出现强浓雾。

4 持续性雾霾天气背景

4.1 500 hPa 形势场

从 2012 年 6 月中上旬 500 hPa 平均形势场 (图 4a) 看, 在贝加尔湖以东、中国东北或蒙古一带维持一个冷涡, 江苏省处于冷涡底部的偏西气流中, 中纬度较常年平均也是一个负距平。具体来看冷涡位置有所摆动, 8 日以前在 50°N 以北, 江苏省处于冷涡底部偏西气流或冷涡后部西北风场里面, 期间多短波槽活动, 造成多日出现弱降水和对流天气, 8~10 日冷涡南掉, 11~15 日在东北地区维持, 9~12 日江苏多局部雷阵雨天气; 总体来说, 江苏省处于冷涡底部, 涡后不断有弱冷空气下来的, 导致上层层结并不是很稳定, 且弱降水过程也多。这种大的环流形势与秋冬季持续雾霾形势有所差异 (何立富等, 2006; 张恒德等, 2011)。

4.2 850 hPa 形势场

进一步从 850 hPa 平均形势场 (图 4b) 看, 对应着高层冷涡的位置也有一个低涡存在, 而在江苏省上空气压场较弱, 也说明低层涡后冷平流对江苏

省影响不明显, 利于低空相对稳定层结的建立。逐日分析 850 hPa 形势发现, 8~11 日江苏省处于西北或西南风场, 西边暖脊东伸, 有暖平流输送到江苏上空, 这有利于逆温的形成和低层稳定层结的建立; 而 3~7 日和 12~13 日分别处于偏东和偏北风场, 均有弱的冷平流作用, 这种形势下也出现了较明显的雾霾, 与秋冬季常见大雾日形势也有所不同。

4.3 地形形势场

分析 2012 年 6 月中上旬的地面形势场, 归纳

出雾霾形成时主要有以下几种天气形势: 1) 入海高压后部(图 5a); 如 3~6 日, 在高压后部的偏东风场的左后部, 一方面此处风场弱一点, 同时偏东风有利于海上的水汽输送到陆地。2) 均压场; 均压场区风速较小, 近地层层结稳定, 有利于水汽凝结。7~9 日是在华北延伸下来的大陆均压场(图 5b), 10~11 日处于类似鞍形场中的均压区里(图 5c); 3) 地面倒槽或低压右上方(图 5d); 如 13~14 日低压倒槽加强北抬, 降水区偏北, 江苏省处于

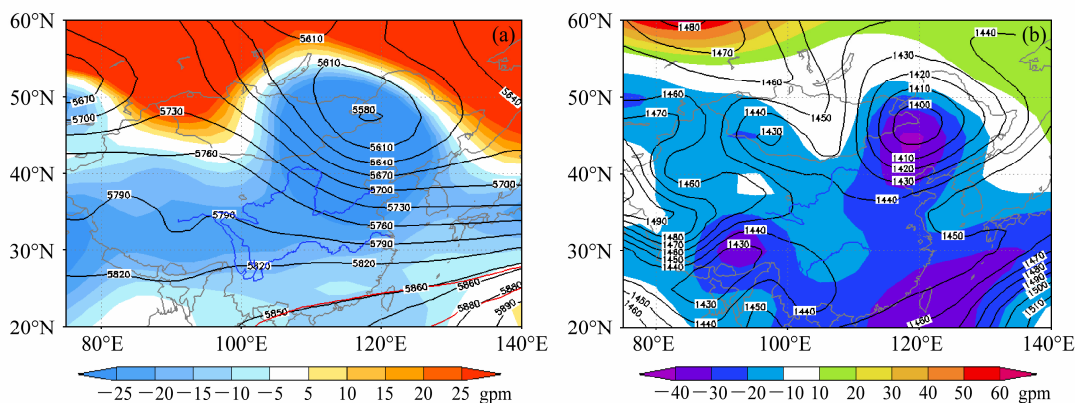


图 4 2012 年 6 月中上旬 (a) 500 hPa 和 (b) 850 hPa 平均高度场和距平 (阴影)

Fig. 4 Average geopotential height fields and their anomalies (shaded) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa in Jun 2012

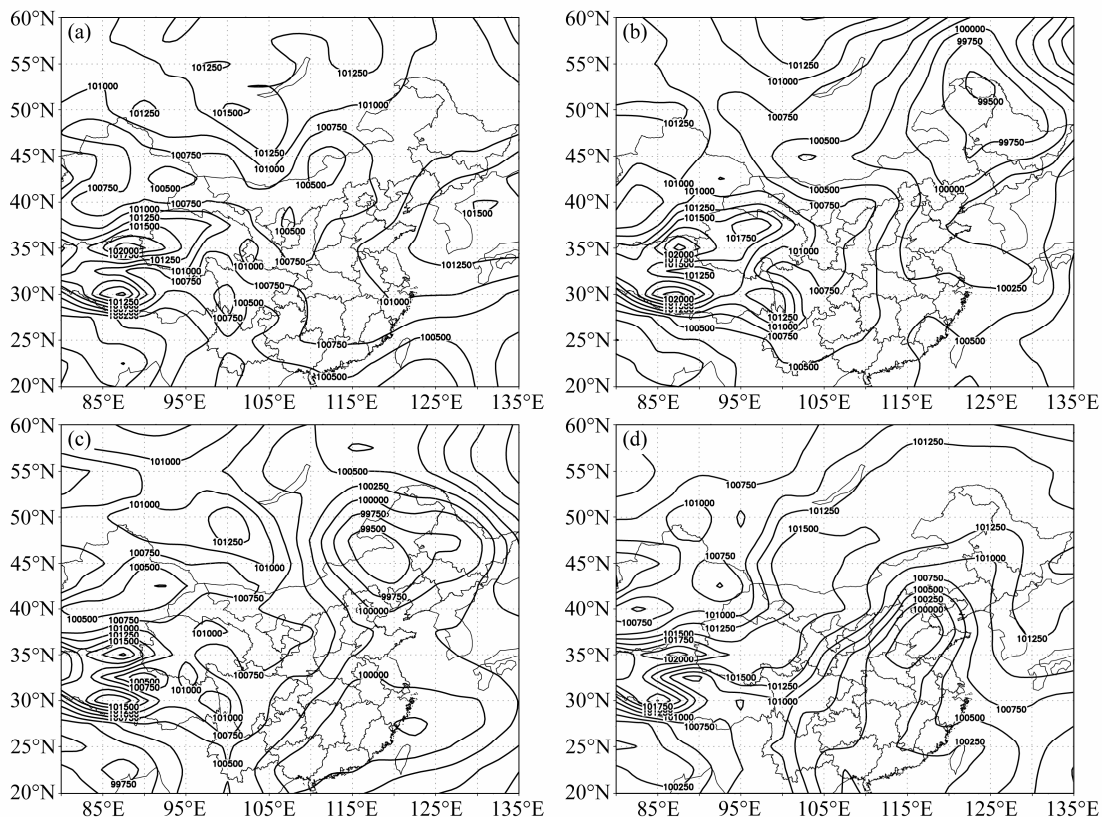


图 5 2012 年 6 月中上旬雾霾出现的 4 种主要地面天气形势: (a) 高压后部; (b)、(c) 均压场; (d) 低压或倒槽前部 (单位: 0.1 hPa)

Fig. 5 Four main ground weather situations of the fog and haze during the early and middle Jun in 2012: (a) The back of high pressure; (b, c) the uniform pressure field; (d) the front of low pressure or inverted trough (units: 0.1 hPa)

低压前部,偏南风加大,雾霾区范围强度也较前期小。可见,夏季持续雾霾的出现仍需要在微风环境下,风力增加,不利于较强雾霾的维持。

通过以上形势分析,6月中上旬出现的持续雾霾天气与秋冬季稳定的大气背景下出现雾霾的情况还是有所不同,高层有弱冷空气下来,且多短波槽活动,从而造成多次弱降水过程,地面形势也并不是很典型,甚至在风速较大时雾霾仍能存在,但强度上有所减弱。总体来看,中高层这种冷空气并不是很强,并不能完全破坏底层相对稳定的层结,同时地面静小风的存在仍是持续较强雾霾的有利条件。

5 持续雾霾的气象成因和维持机制

5.1 气象要素分析

图6给出了6月淮安站能见度与不同气象要素之间的变化关系,可以看到,6月中上旬淮安大部分时段能见度都在5 km以下。从湿度条件分析,期间露点变化不大,在夜间至早晨温度下降,温度露点差减小,相对湿度增大到90%左右,空气中的饱和度加大,近地面大气中水汽达到饱和而凝结,

致使大气能见度降低,有利于这段时间成雾;白天温度上升,湿度降至80%以下,雾转化为霾。在7~8日、10~11日近地面相对湿度增大且持续时间较长,对应着雾持续时间也较长。可见,空气湿度偏高,有利于气溶胶粒子吸湿增长,当相对湿度增加至饱和状态时,霾粒子吸湿成为雾滴,而相对湿度降低时,雾滴脱水后霾粒子又再悬浮在大气中,即霾雾相互转化。6月处在季节转换的时候,一般气温较高、湿度较大,风速也比较大,但从淮安站来看,6月上半月的风速基本较小,多在4 m/s以下,特别是发生大雾时风速仅1~3 m/s。相比,南京站(图略)底层的湿度条件要比淮安差,温度露点差达到饱和时段较少,对应的雾频次也较少,另外,其风速也要大一点,多在3~4 m/s,部分时段超过5 m/s,即南京站在湿度和风力条件上都不如淮安站有利于雾霾的发展,使得南京站雾霾严重程度要弱于淮安地区。同时,这段时间南北均出现了持续的偏东风或东南风,为雾霾的发展加强提供一定的水汽条件。

进一步分析不同等级雾霾(重度霾:能见度<2.0 km,中度霾:2.0 km≤能见度<3.0 km,轻度霾:3.0 km≤能见度<5.0 km,轻微霾:5.0 km≤能见度

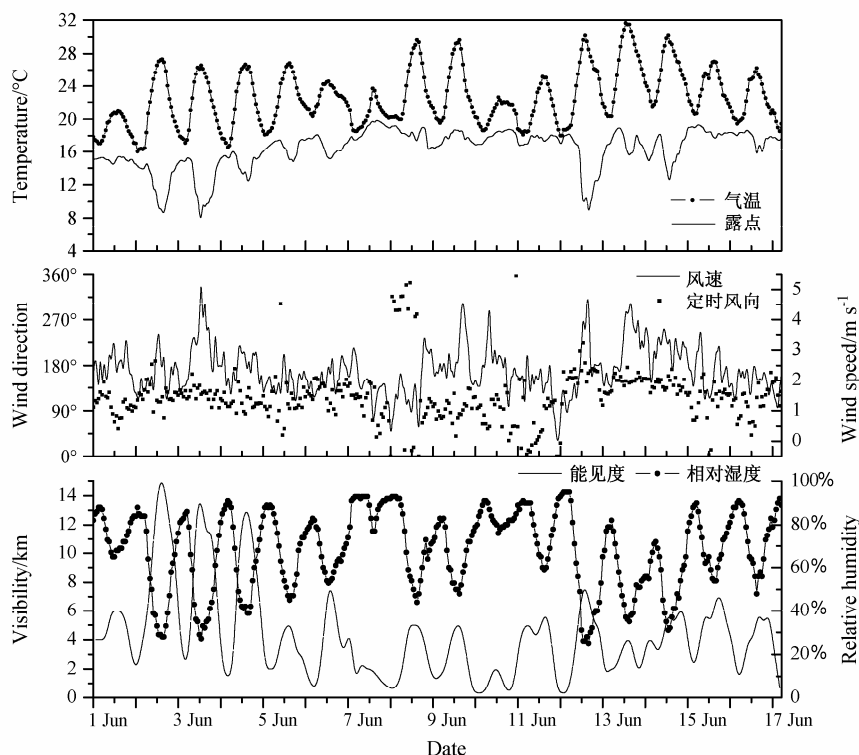


图6 江苏淮安地区2012年6月中上旬(a)气温和露点、(b)风速和风向、(c)能见度和相对湿度

Fig. 6 (a) Temperature and dew-point, (b) wind speed and wind direction, and (c) visibility and relative humidity at Huaian, Jiangsu Province, during the early and middle Jun in 2012

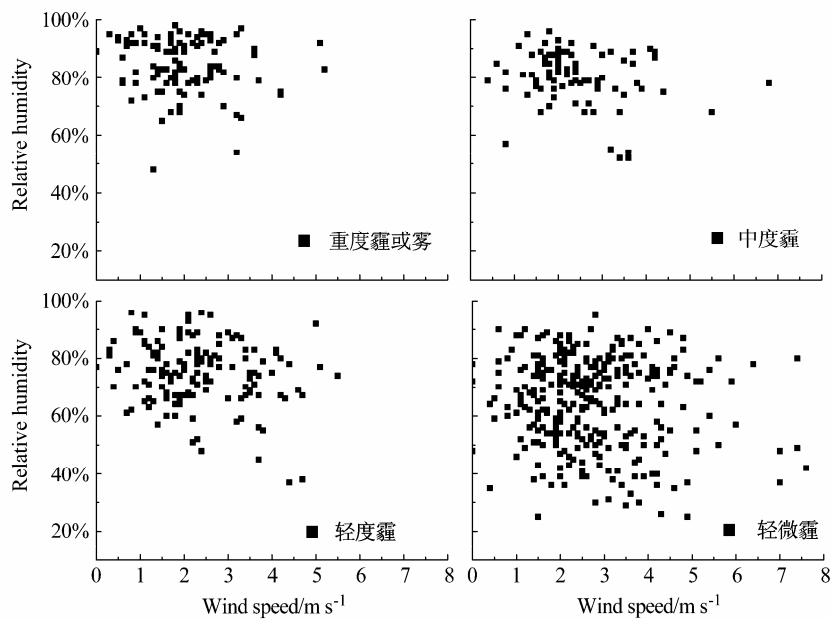


图 7 不同等级雾霾与相对湿度和风速的对应关系
Fig. 7 The corresponding relationships of fog-haze at different levels between relative humidity and wind speed

<10.0 km) 与相对湿度和风速的关系 (图 7) 可以看到, 重度霾或雾风速基本在 3 m/s 以下, 湿度在 80% 以上, 分别占总数 89% 和 83%, 而中度霾对应的比例降至 77% 和 55%, 轻微霾仅有 57% 和 17%, 即霾等级降低, 对应的风速和湿度条件也加宽。可见, 较小的风速和较大的湿度有利于雾的形成霾的加强, 当风速较大时雾霾也相应减弱。

5.2 水汽条件

前面已经分析, 6 月上半月这段时间江苏地面以偏东风为主, 特别是在 3~6 日和 12 日之后处于入海高压后部, 东到东南风为江苏输送一定的水汽, 持续海上的暖湿气流输送到陆地, 有利于近地面湿度的增加, 为雾霾发展维持提供一定的水汽条件。进一步分析发现, 在这次连续雾霾过程期间多次出现降水, 其频发的降水使得近地面潮湿, 为雾霾的发展和加强, 特别是浓雾的形成提供了很好的水汽条件。由表 1 可以看到, 降水多以小雨为主,

几次明显的区域性浓雾出现之前都有弱降水过程, 说明前期降雨为雾的形成提供充足的水汽, 夜间气温下降, 加上地面水汽蒸发, 容易使得近地层空气达到饱和而成雾; 在 6~7 日全省性降水过程中, 雾霾范围也扩大, 除了夜里至早上这段时间多在 3 km 以下外, 白天大部分地区能见度仍较差, 出现中轻度霾。可见, 当降水偏弱时, 对能见度的缓解并不明显, 同时容易导致秸秆的不完全燃烧, 反而加重污染, 如淮安 7 日 05:00 至 10:00 出现降水, 1 h 降水量多在 0.5 mm 以下, 累计 2.2 mm, 雨后能见度反而下降。孙燕等 (2010) 研究认为在未达到饱和情况下, 适当增加湿度有利于霾的形成, 且粒子吸湿凝结增大会使得能见度更加恶化, 烟霾更加严重。而当雨强增大时, 对污染物起到一定的清除作用, 如 10~12 日全省降水相比较为明显, 局部雨量较大, 对空气中的气溶胶粒子有一定的冲刷沉降作用, 使得在 11~12 日白天全省霾的强度有所减

表 1 江苏 2012 年 6 月中上旬降水过程和对应的雾霾情况

Table 1 The precipitation process and the corresponding fog-haze condition in Jiangsu Province during the early and middle Jun in 2012

降水时段和主要落区	降水强度	区域性浓雾	中度及以上霾情况
1~2 日前期沿淮淮河以南	小雨、微量为主	3 日江淮东部	沿江以北地区, 夜里至早上雾霾加强, 白天消散
6~7 日全省降水	小雨为主	8 日江淮淮北	
8 日午后江淮淮北局部雷阵雨, 9 日沿江沿淮局部雷阵雨	局部雨量大	10 日全省大范围	低能见度天气扩至全省且白天能见度也较差
10 日傍晚至 12 日, 10~11 日全省性降水, 12 日早上苏南渐止	小雨, 局部雨量大	12 日江淮淮北	10 日全天能见度差, 3 km 持续时间长; 11~12 日雾霾强度有所减弱

弱。可见,这段时间频繁的弱降水对雾的形成和霾的加重起到了重要的作用,而雨强略大时,对污染物有一定的清除作用,使得雾霾有所减弱。

5.3 热力条件

大气层结特征是雾霾天气形成和维持的重要条件之一,逆温层持续的时间、强度和逆温层厚度与污染物扩散有直接关系。为分析本次持续雾霾期间的层结情况,绘制了6月中上旬逐日08:00和20:00温度层结时序图(图8),可以看到,在雾霾期间夜间至早晨这段时间整个层结都较稳定,逆温主要集中在900 hPa以下。3~6日,徐州站在980 hPa以下已经出现逆温,射阳和南京站分别在920 hPa和950 hPa附近有弱逆温或近等温层结存在,即在这个区域上下的温差不大甚至近似相同。6日后各站低层温度递减率逐渐减小,层结趋于更加稳定,特别是在9~15日这段时间3站在900 hPa以下均存在较明显的逆温结构,且多个时次存在不同程度的贴地层逆温,对应的这段时间雾霾强度也要较前期强。在几次明显浓雾期间,近地层都存在明显的逆温,且雾霾的严重程度与层结的稳定度相一致。北部地区夜间至早晨这段时间雾较频发,对应的徐州和射阳的逆温层结较南京明显,南京地区雾较少,即便在逆温条件较好的10日前后,仍是以重度霾为主,这与水汽不足有关。可见即便有逆温存在,水汽不足,也只能成霾。由此可见,无论是逆温层还是均温层都使得大气上下的湍流热量和动量交换减弱,不利于上升运动的发展,从而有利于将近地层污染物粒子和水汽不断积聚,促使雾霾天气的发生和维持。但总体而言,雾所需要的近地层逆温要稍强于霾。

进一步对几次浓雾过程中逆温成因进行分析,发现主要有辐射和平流两种作用。在3~6日夜间逆温形成多以辐射作用为主,产生的逆温往往集中在贴地层,对应的浓雾范围也较小。如2日夜间,盐城附近天空云系较少,有利于辐射降温,射阳站有贴地层几十米内出现逆温,贴地逆温的存在有利于底层水汽和污染物的聚集而使得空气达到饱和成雾,这也是在同样的大气环流背景下,仅盐城附近出现了浓雾的重要原因之一。这种辐射雾对应的雾层不厚,一旦贴地逆温破坏,雾很快减弱消散。另一种,是中层暖平流作用为主,如在9日夜间开始至14日前后,在850~925 hPa不断有暖舌东伸至江苏上空,使得江苏3个探空站在10~15日这段时间逆温明显,整个层结比

较稳定。如10日早上出现雾期间,天空云系较多,辐射作用较弱,但在江苏上空有明显暖平流,促进了平流逆温的形成和低层稳定层结的建立,使得雾维持较长时间不消,10日在08:00之后仍维持较大范围的雾,且饱和层达到800 hPa左右,说明这种平流作用产生的雾层较厚,持续时间也较长。可见,辐射贴地逆温和平流逆温的存在为2012年6月中上旬出现浓雾提供了稳定层结条件。

5.4 动力条件

垂直运动也是影响温度层结发展变化的重要因子之一。从图9可以看出,整个6月中上旬垂直速度是上升下沉频繁交替的过程,其上升速度和下沉速度大部分时段较小,这也有利于稳定层结的维持和污染颗粒的聚集;有雾发生时的低层以弱的上升运动为主,如淮安站4日、6日、8日、9~12日等,一般在-0.1 hPa/s左右。之上则是下沉气流,这种微弱的上升运动与雾形成初期的水汽凝结现象有密切的关系,而这种微弱的上升运动又进一步促进近地层的水汽和污染物的输送,使得雾能往上发展。弱上升运动大多在925 hPa以下,与这段时间逆温层顶和雾顶高度不是很高也是一致的,另外11日上升运动高度达到850 hPa,对应的这次过程是一次平流雾,雾顶也相对较高。当从低层到高层均转为一致的上升运动,往往对应着能见度有所上升,雾消散转为霾,由于上升运动强度弱,在环境污染物的影响下,霾维持,当上升运动强至出现降水时,由于降水弱,污染物吸湿增长,加上雨滴的作用,能见度仍得不到好转,出现重度霾。当整层转为下沉运动时,其导致的整层下沉增温易使得底层形成相对稳定层结而阻止水汽的向上扩散从而有利于霾的维持。白天随着太阳辐射加热有利于近地面的温度升高从而产生由热力作用所致的弱上升运动,破坏底层的温度层结,雾消散;另一方面,大量环境颗粒物的存在削弱了太阳辐射从而抑制了地面热力作用所致的上升运动,使得温度层结不至于完全破坏,同时垂直向上扩散不会太强,利于霾的维持。由此可见,垂直上升运动与雾霾的发展之间有着互相影响的紧密联系。垂直上升运动减弱会抑制低层水汽或颗粒物的垂直向上扩散输送,从而促进雾霾天气的发展和维持;同样地,雾霾天气的发展和维持也会抑制垂直上升运动的发展。另外,在具备一定的水汽条件时,底层弱的上升运动有利于雾体的向上发展从而促进雾的加浓。

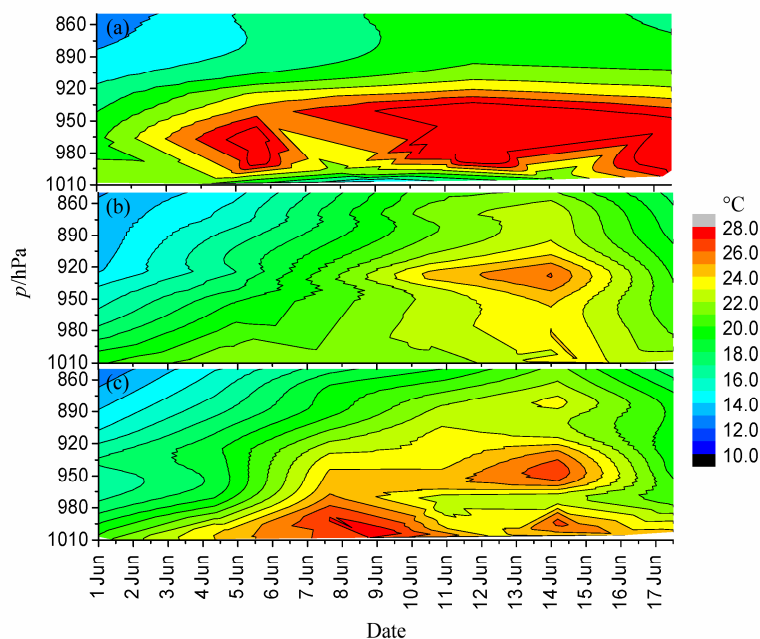


图 8 2012 年 6 月中上旬江苏 (a) 徐州、(b) 射阳、(c) 南京探空温度层结

Fig. 8 The temperature stratification at (a) Xuzhou, (b) Sheyang, and (c) Nanjing sounding stations in Jiangsu Province during the early and middle Jun in 2012

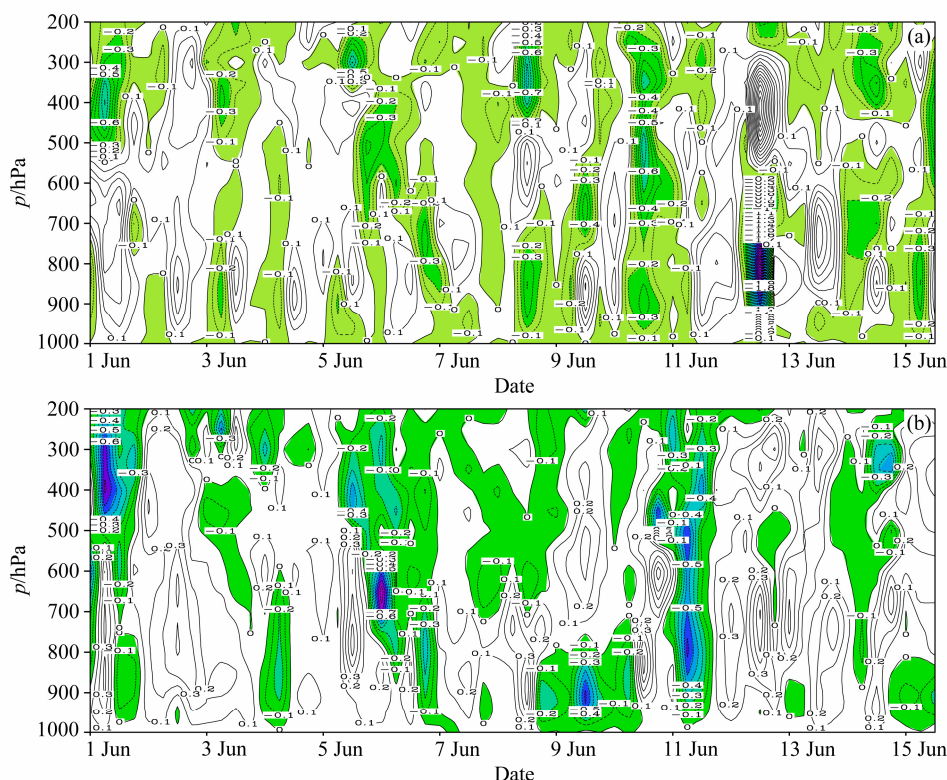


图 9 2012 年 6 月 1~15 日 (a) 淮安和 (b) 南京垂直速度时间-高度剖面 (阴影区为负值, 单位: hPa/s)

Fig. 9 The time-height profiles of vertical velocity in (a) Huaian and (b) Nanjing during 1-15 Jun 2012 (shadow area is negative values, units: hPa/s)

6 污染物来源分析

不利的空气污染气象条件是造成这次区域性严重空气污染事件的主要原因。应用轨迹模式

HYSPLIT4.8 对这次持续雾霾过程中雾霾相对较严重时段 (6 月 10 日) 的 3 个城市出现的污染分别进行 72 h 后向轨迹模拟。后向轨迹模式主要输入参数: 时间选 10 日 08:00, 轨迹的终点分别设为宿迁、南通、无锡, 设了 100 m、500 m、1000 m 和 2000 m

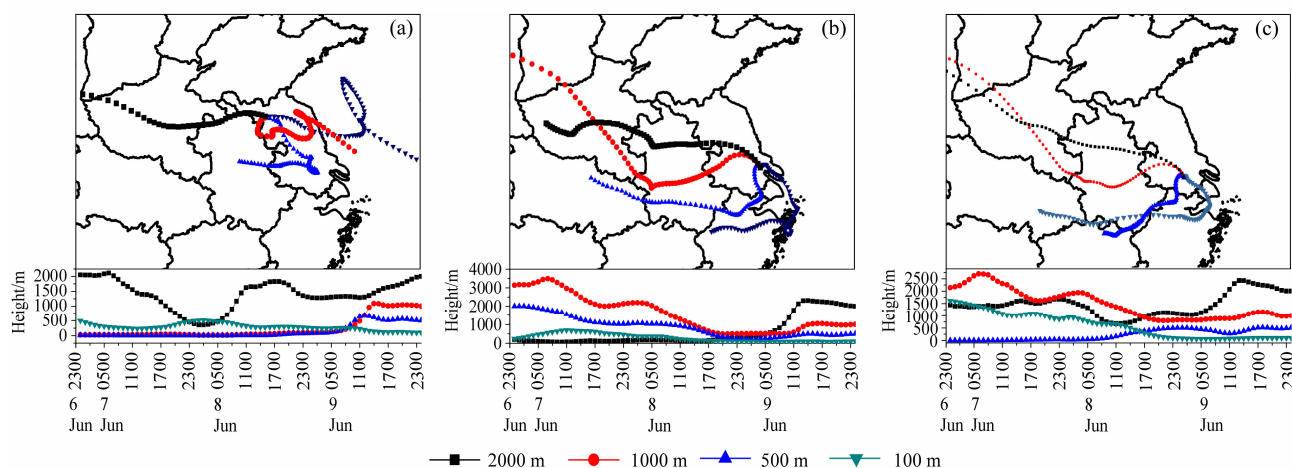


图 10 2012 年 6 月 10 日 08:00 到达 (a) 宿迁、(b) 南通和 (c) 无锡的 72 h 后向轨迹模拟 (协调世界时)

Fig. 10 The 72-h backward trajectory simulations of (a) Suqian, (b) Nantong, and (c) Wuxi at 0800 UTC 10 Jun 2012

4 个终点高度来代表中低层气团的走向, 其模拟结果见图 10: 南通和无锡各层气团主要来自西边界, 1 km 和 2 km 气团均由安徽中北部往南输送并折向沿江、苏南一带, 并在输送过程中向下传输, 形成显著的下沉逆温, 500 m 高度气团来自安徽中南部, 而底层 100 m 高度气团, 自安徽南部过来, 60 h 前到达杭州湾并沿海岸线转折至沿江、苏南一带, 由于前期 8~9 日安徽火点较多, 产生大量的颗粒物悬浮于空中, 污染物浓度相应的也比较高。这种来自秸秆焚烧多发地的气团势必会使得沿江和苏南一带污染物浓度快速上升。而北部, 宿迁站 2 km 也是来自西边安徽境内, 并在输送过程中伴随着高层的下沉气流而往下输送, 但 100 m 和 1000 m 气团主要还是来自海上, 有利于底层水汽输送。由于江苏淮北 9 日就存在大量火点, 所以说本地秸秆焚烧产生的污染物贡献较大。

可见沿江和苏南地区污染物浓度上升除了本地悬浮颗粒物外, 来自安徽境内的这种污染物的输送也是一个重要的因素, 而北部地区更多还是本地的污染源。

7 结论

通过对 2012 年 6 月中上旬发生在江苏的持续雾霾过程分析, 获得以下几点结论:

(1) 2012 年 6 月中上旬江苏及周边省市秸秆焚烧造成大量的气溶胶粒子悬浮于空中, 是造成江苏持续出现不同程度霾天气的主要原因, 同时也为雾滴形成提供了丰富的凝结核。随着秸秆焚烧现象减少, 污染物浓度也总体下降, 持续雾霾才得以缓解。

(2) 本次持续雾霾过程中高层冷空气强度未能完全破坏底层相对稳定的层结, 期间地面形势主要有入海高压后部、均压场及地面倒槽或低压右上方; 较小的风速和较大的湿度有利于雾的形成霾的加强, 重度雾或霾风速多在 3 m/s 以下且相对湿度在 80% 以上。

(3) 偏东风的水汽输送以及前期降水, 为大范围的雾霾天气提供了水汽条件; 其中频繁的弱降水过程对雾的形成和霾的加重起到了重要的作用, 雨强略大时, 对污染物有一定的清除作用。

(4) 低层的逆温或近中性层结的维持, 为 6 月中上旬雾霾持续存在提供了有利的层结条件, 且雾的发生所需逆温要求要稍强于霾; 晴空少云产生的辐射贴地逆温和中层暖平流输送形成的平流逆温为这段时间的浓雾形成提供了稳定层结条件。在高污染的背景下, 空气中含水量较少时, 即便有逆温存在, 也不利于雾的继续维持或增强, 只能形成霾。

(5) 垂直上升运动与雾霾的发展之间有着互相影响的紧密联系。垂直上升运动减弱会抑制低层水汽或颗粒物的垂直向上扩散输送, 从而促进雾霾天气的发展和维持; 同样地, 雾霾天气的发展和维持也会抑制垂直上升运动的发展。另外, 在具备一定的水汽条件时, 底层弱的上升运动有利于雾体的向上发展从而促进雾的加浓。

(6) 对雾霾相对较严重的 6 月 10 日后向轨迹模拟表明沿江和苏南地区污染物浓度上升除了本地悬浮颗粒物外, 来自安徽境内的这种污染物的输送也是一个重要的因素, 而北部地区更多还是本地的污染源。

参考文献 (References)

- Badarinath K V S, Kharol S K, Sharma A R, et al. 2009. Analysis of aerosol and carbon monoxide characteristics over Arabian Sea during crop residue burning period in the Indo-Gangetic Plains using multi-satellite remote sensing datasets [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71 (12): 1267–1276.
- 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 2007. 中国区域农田秸秆露天焚烧排放量的估算 [J]. *科学通报*, 52 (15): 1826–1831. Cao Guoliang, Zhang Xiaoye, Wang Yaqiang, et al. 2007. The estimation on the emissions from farmland crop residue burning in China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 52 (15): 1826–1831.
- Crutzen P J, Andreae M O. 1990. Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles [J]. *Science*, 250 (4988): 1669–1678.
- 高岑, 王体健, 吴建军, 等. 2012. 2009 年秋季南京地区一次持续性灰霾天气过程研究 [J]. *气象科学*, 32 (3): 246–252. Gao Cen, Wang Tijian, Wu Jianjun, et al. 2012. Study on a continuous haze weather event during autumn of 2009 in Nanjing [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 32 (3): 246–252.
- 高健, 张岳翀, 王淑兰, 等. 2012. 北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探 [J]. *环境科学研究*, 25 (11): 1201–1207. Gao Jian, Zhang Yuechong, Wang Shulan, et al. 2012. Study on the characteristics and formation of a multi-day haze in October 2011 in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 25 (11): 1201–1207.
- 何立富, 陈涛, 毛卫星. 2006. 华北平原一次持续性大雾过程的成因分析 [J]. *热带气象学报*, 22 (4): 340–350. He Lifu, Chen Tao, Mao Weixing. 2006. The formation of a sustained heavy fog event in North China Plain [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 22 (4): 340–350.
- 胡梅, 齐述华, 舒晓波, 等. 2008. 华北平原秸秆焚烧火点的 MODIS 影像识别监测 [J]. *地球信息科学*, 10 (6): 802–807. Hu Mei, Qi Shuhua, Shu Xiaobo, et al. 2008. Monitoring fire from crop residues burning with MODIS data in North China Plain [J]. *Geo-Information Science (in Chinese)*, 10 (6): 802–807.
- 贾星灿, 郭学良. 2012. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究 [J]. *大气科学*, 36 (5): 995–1008. Jia Xingcan, Guo Xueliang. 2012. Impacts of anthropogenic atmospheric pollutant on formation and development of a winter heavy fog event [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (5): 995–1008.
- Langmann B, Duncan B, Textor C, et al. 2009. Vegetation fire emissions and their impact on air pollution and climate [J]. *Atmos. Environ.*, 43 (1): 107–116.
- 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 Yan, Zhang Bei, Yan Wenlian, et al. 2010. Analysis of a heavy haze event in Nanjing and its surrounding areas [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (3): 794–800.
- 孙彧, 马振峰, 牛涛, 等. 2013. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征 [J]. *气候与环境研究*, 18 (3): 397–406. Sun Yu, Ma Zhenfeng, Niu Tao, et al. 2013. Characteristics of climate change with respect to fog days and haze days in China in the past 40 years [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 18 (3): 397–406.
- 吴彬贵, 张宏升, 汪靖, 等. 2009. 一次持续性浓雾天气过程的水汽输送及逆温特征分析 [J]. *高原气象*, 28 (2): 258–267. Wu Bingui, Zhang Hongsheng, Wang Jing, et al. 2009. Characteristics of the inversion and the water vapor transport during a duration fog event [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (2): 258–267.
- 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题的研究 [J]. *气象学报*, 64 (4): 510–517. Wu Dui, Bi Xueyan, Deng Xuejiao, et al. 2006. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pear River delta [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (4): 510–517.
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2010. 1951~2005 年中国大陆霾的时空变化 [J]. *气象学报*, 68 (5): 680–688. Wu Dui, Wu Xiaojing, Li Fei, et al. 2010. Temporal and spatial variation of haze during 1951–2005 in Chinese mainland [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (5): 680–688.
- 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 2012. 南京冬季雾霾过程中气溶胶离子的微物理特征 [J]. *环境科学*, 31 (7): 1425–1431. Yang Jun, Niu Zhongqing, Shi Chun'e, et al. 2012. Microphysics of atmospheric aerosols during winter haze/fog events in Nanjing [J]. *Environmental Science (in Chinese)*, 31 (7): 1425–1431.
- 尹聪, 朱彬, 曹云昌, 等. 2011. 秸秆焚烧影响南京空气质量的成因探讨 [J]. *中国环境科学*, 31 (2): 207–213. Yin Cong, Zhu Bin, Cao Yunchang, et al. 2011. The origin of crop residue burning impact on air quality of Nanjing [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 31 (2): 207–213.
- 张恒德, 饶晓琴, 乔林. 2011. 一次华东地区大范围持续雾过程的诊断分析 [J]. *高原气象*, 30 (5): 1255–1260. Zhang Hendeng, Rao Xiaolin, Qiao Lin. 2011. Diagnostic and analysis of consecutive fog process on large-scale in east China region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (5): 1255–1260.
- 朱彬, 苏继锋, 韩志伟, 等. 2010. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析 [J]. *中国环境科学*, 30 (5): 585–592. Zhu Bin, Su Jifeng, Chao Zhiwei, et al. 2010. Analysis of a serious air pollution event resulting from crop residue burning over Nanjing and surrounding regions [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 30 (5): 585–592.
- 朱佳雷, 王体健, 邢莉, 等. 2011. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析 [J]. *中国环境科学*, 31 (12): 1943–1950. Zhu Jialei, Wang Tijian, Xing Li, et al. 2011. Analysis on the characteristics and mechanism of a heavy haze episode in Jiangsu Province [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 31 (12): 1943–1950.