

石春娥, 邓学良, 杨元建, 等. 2014. 2013 年 1 月安徽持续性霾天气成因分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 227–236, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13112. Shi Chun'e, Deng Xueliang, Yang Yuanjian, et al. 2014. Analyses on the causes of the persistent haze in Anhui Province in January 2013 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 227–236.

2013 年 1 月安徽持续性霾天气成因分析

石春娥^{1,2} 邓学良¹ 杨元建¹ 吴必文¹ 孟燕军³

¹ 安徽省气象科学研究所, 合肥 230031

² 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

³ 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

摘 要 2013 年 1 月安徽霾天气具有范围广、持续时间长、能见度低等特点。利用合肥、安庆、阜阳 2009~2013 年 1 月地面常规资料、高分辨率探空资料, 结合轨迹分析和聚类分析, 讨论了 2013 年 1 月安徽霾天气频发的原因。结果表明: 低风速、高湿度不能解释 2013 年 1 月霾天气增多、增强的现象。大气层结稳定、接地逆温偏多、偏厚, 可部分解释这次霾天气增多现象。边界层中上部输送条件的变化也不能解释 2013 年 1 月霾天气增多现象, 但近地层输送条件的变化能较好地解释 2013 年 1 月霾天气增多现象, 如偏东北来向的轨迹组对应着最低的能见度, 且 2013 年 1 月各地最低能见度对应的轨迹组所占比例 (或与次低能见度的轨迹组所占比例之和) 在历年中最高。因此, 大气层结稳定、近地层偏东北来向气团较多是 2013 年 1 月安徽各地能见度偏低、霾天气偏多的主要原因。

关键词 霾 低能见度 逆温 输送轨迹

文章编号 1006-9585 (2014) 02-0227-10

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13112

Analyses on the Causes of the Persistent Haze in Anhui Province in January 2013

SHI Chun'e^{1,2}, DENG Xueliang¹, YANG Yuanjian¹, WU Biwen¹, and MENG Yanjun³

¹ Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031

² State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

Abstract During January 2013, Anhui Province experienced frequent and severe haze, which was characterized as widespread and long-lasting with very low visibility. The potential causes of this long-lasting haze are discussed by using the routine daily ground level observational data of three representative stations and high space-resolution sounding data recorded at two stations in January of the most recent five years, together with trajectory-cluster-statistics analysis. The statistics show that low wind speed and high humidity alone cannot explain the low visibility and abundant haze, which reached historical levels in January 2013. The more frequent and deeper ground inversion, and thus, higher stability of stratification occurring at that time can partly explain these situations. Although the back-trajectories of the air mass at the height of 1 km cannot explain the severe haze in Anhui Province, those at the height of 100 m can sufficiently explain these situations. At the height of 100 m, the northeasterly trajectories corresponded to the lowest average visibility at all three stations. In January 2013, the frequency of trajectories corresponding to the lowest visibility group, or together with the second-lowest group, was the highest among the same period of the most recent five years. Therefore, the main

收稿日期 2013-06-26 收到, 2013-12-13 收到修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206011-04, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题 LAPC-KF-2011-05

作者简介 石春娥, 女, 1970 年出生, 博士, 研究员, 主要从事区域大气物理化学研究。E-mail: chun.e.shi@gmail.com

reasons of the low visibility and high haze frequency in Anhui Province in January 2013 were more stable stratification and more controlling air masses from northeast.

Keywords Haze, Low visibility, Temperature inversion, Transport trajectory

1 引言

雾和霾都产生于静风稳定天气背景下,有时可以相互转换。近年来,不少地区就把雾、霾合并,统称为“雾霾天气”。雾对交通运输有直接危害,因此,中外科学家很早就对雾的消长机理和预报方法开展研究(Gultepe et al., 2007; Niu et al., 2010)。霾的出现有重要的空气质量指示意义,但由于霾天气的危害不及雾那么直接,中国对霾天气的研究起步较晚,系统的研究始于21世纪初(吴兑, 2012)。早期,主要集中于霾的定义、识别方法、气候特征等,近年来已经发展到霾的细粒子污染本质、粒子谱分布、可溶性离子组成、有机组分、碳成分、单颗粒物理化学特征、光学特性等多学科交叉内容(闵敏等, 2009; 吴兑, 2012; Li et al., 2012)。上述工作的开展,从形成霾的颗粒物粒径及组分等方面深入认识霾天气本质,同时也加深了人们对霾天气对人体健康危害的认识。

安徽省位于中国东部腹地,东连江苏、浙江,西接湖北、河南,南邻江西,北靠山东。属于内陆农业大省,南北跨6个纬度(约570 km),东西跨5个经度(约450 km)。除了西部大别山脉和南部的黄山山脉地势较高外,其余大部分为海拔15~400 m的丘陵和平原。气候上属于暖温带向亚热带的过渡型气候,以淮河为界,北边属于温带半湿润季风气候,南边属于亚热带湿润季风气候。主要的灾害性天气有暴雨、连阴雨等(于波等, 2013)。随着城市化、工业化进程加快,20世纪80年代开始安徽省城市能见度普遍下降,霾天气迅速增多(张浩等, 2008, 2010)。虽然城市霾天气频发,但由于霾天气的危害不及暴雨、雾等那么直接,目前还没列入安徽的主要灾害性天气,对安徽霾天气的相关研究也不多。

2012年冬天到2013年初,中国东部广大地区经历了多次严重的霾天气,伴随着严重的空气污染,尤其是2013年1月,引起了各级政府和相关部门的高度重视。2013年1月,中央气象台发布了“中央气象台霾预警发布暂行规范(试行)”,根据大气能见度、相对湿度和空气中细颗粒物(即

PM_{2.5})质量浓度将霾的预警分为3级,分别以黄色、橙色和红色表示。5月,中国气象局发布了“2013年环境气象业务工作方案”,以指导各级气象局开展相关业务。2013年1月,安徽也是霾天气高发区,尤其是合肥市,1月上旬有连续9 d出现霾天气、日最高能见度在5 km以下,月均能见度不到5 km,环保部门公布的数据显示合肥连续多日达到重度污染。本文利用2009~2013年1月安徽80个地面测站逐日02:00(北京时间,下同)、08:00、14:00和20:00的常规观测资料分析了2013年1月安徽霾天气的特点;利用合肥、安庆、阜阳3个代表性城市地面常规资料、高分辨率探空资料,结合轨迹分析和聚类分析,从局地气象条件、近地层输送条件等方面探讨了2013年1月安徽霾天气频发、能见度普遍偏低的可能成因和造成霾天气的大气污染物输送通道,为下一步开展霾天气预警服务奠定基础。

2 霾天气实况及特点

2013年1月,安徽省霾天气的范围广、持续时间长。全省80个地面观测站,有6个站的霾记录在15 d以上,分别是安庆(20 d)、阜阳(19 d)、淮南(18 d)、合肥(17 d)、蚌埠(16 d)和来安(15 d),除来安站外,都位于地级以上城市,除阜阳站外,附近都有1个县级测站霾日数超过10 d,如合肥郊县肥东、肥西分别有9 d和13 d。由图1可见,1月,合肥市有22 d日均能见度在5 km以下,只有7 d最大能见度不小于10 km,共有4次持续的雾、霾过程,分别为4~12日(霾)、14~15日(雾)、17~20日(霾)和23~30日(雾、霾),均对应低风速(日均风速在2 m/s以下)、高湿度(日均相对湿度在60%以上)的稳定气象条件,相对湿度与能见度之间存在显著的负相关(相关系数为-0.75),说明相对湿度对能见度的影响显著,风速与能见度之间有弱的正相关,但是不显著。

统计表明,霾主要发生在地级以上城市。2011~2013年1月,部分地级以上城市霾日数呈逐年上升趋势,如阜阳、安庆;部分地级市霾日数上升趋势不明显,2010年霾日数最多,如合肥、淮南、蚌埠等;其他地级市1月霾日数基本上低于5 d。

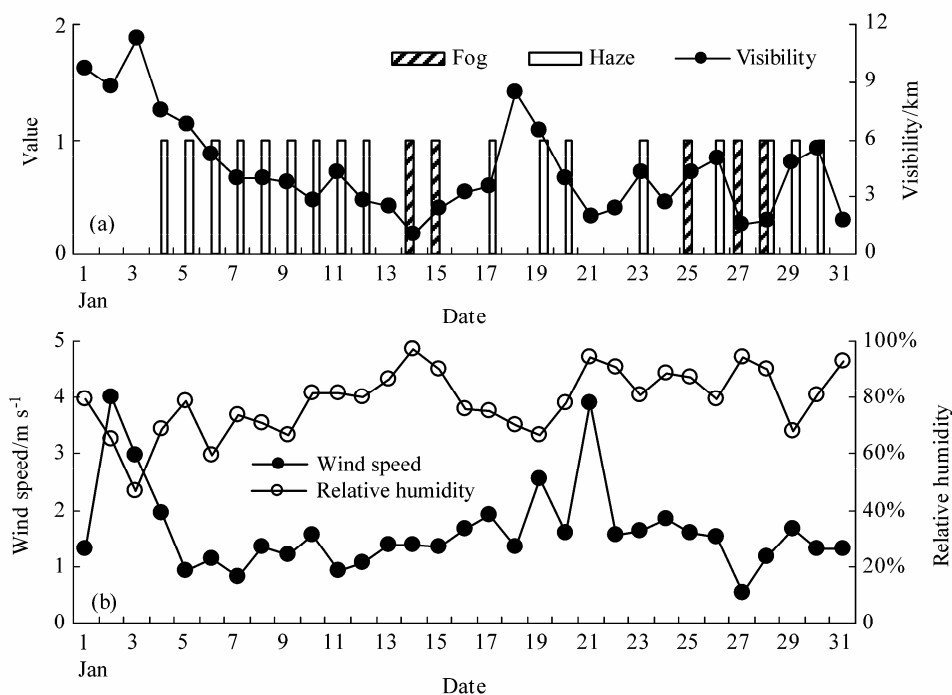


图 1 2013 年 1 月合肥逐日观测的雾霾 (a) 出现情况 (雾霾值为 1 表示是, 0 表示否) 和日均能见度、(b) 相对湿度和风速

Fig. 1 (a) Daily situations of fog and haze occurrence (value 1 denotes fog or haze, 0 denotes no fog or no haze) and daily average visibilities and (b) daily average relative humidity and wind speeds in Jan 2013

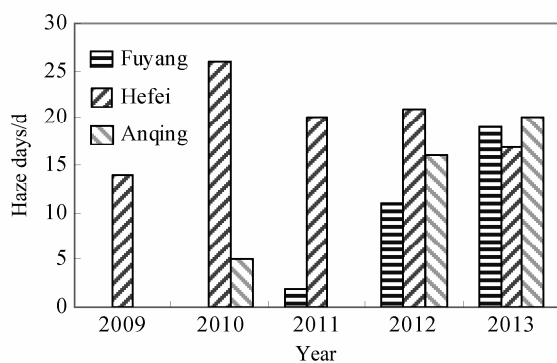


图 2 2009~2013 年 1 月阜阳、合肥、安庆霾日数

Fig. 2 Haze days in Fuyang, Hefei, and Anqing in Jan during 2009–2013

从 17 个地级市的情况看, 2013 年 1 月霾日总数最高, 为 119 站次, 其次是 2012 和 2010 年, 分别为 101 和 99 站次, 另外 2 a 低于 70 站次。综上所述, 2013 年霾天气范围最广, 且大范围霾天气持续时间长, 故影响大。

根据地理位置、2009~2013 年 1 月霾的发生情况, 以及安徽探空站的分布, 选取阜阳、合肥、安庆为代表性城市。由图 2 可见, 合肥是 2010 年最多 (26 d), 之后维持在 17 d 以上, 而阜阳和安庆在 2012~2013 年上升迅速, 尤其是安庆, 最近 2 a 都在 15 d 以上。

如上所述, 省会城市合肥 2013 年并非霾日数

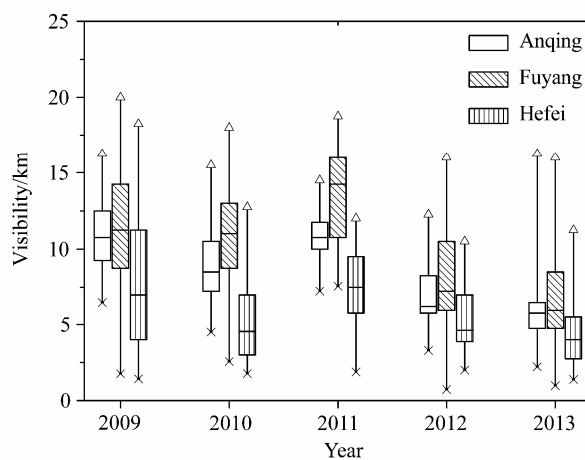


图 3 2009~2013 年 1 月合肥、阜阳和安庆能见度日均值统计对比 (Δ : 最大值; $\times$: 最小值; 长方形中的一: 中值; 长方形的上下边分别为第一、第三四分位值)

Fig. 3 Statistical comparisons of daily average visibilities in Hefei, Fuyang, and Anqing in Jan during 2009–2013 (Δ : maximum; $\times$: minimum; — within the rectangles: median; the upper and lower borders: the 25th and 75th)

最多的年份。但为什么 2013 年 1 月的霾天气给公众的影响最大呢? 为此, 计算了上述 3 个城市日均能见度 (02:00、08:00、14:00、20:00 平均) 的一些统计量 (图 3)。由图 3 可见, 3 个城市能见度的各项统计值都是 2013 年最低, 合肥、阜阳、安庆的

能见度中值分别为 4、6 和 5.75 km。合肥霾日数最多的 2010 年,日均能见度中值为 4.55 km,且第三个四分位值为 7 km,而 2013 年,这个值为 5.5 km。安庆和阜阳能见度的各项统计值在最近 2 年明显下降。这也就解释了为什么 2013 年合肥霾日数不是最多,但影响却最大。

3 局地气象条件分析

霾天气的出现与空气污染密切相关,即人为污染物排放是造成霾天气的内因,其次是气象条件,即外因,因为一个区域或城市大气污染物的浓度既与局地污染源的强度有关,又与当地的输送和扩散条件有关(Patricia and Timothy, 2003; 吴兑等, 2008)。王喜全等(2011)也指出,一个区域的灰霾污染会对另一个区域造成影响,且必须有一条输送通道。因此,在假定排放源分布变化不大的前提下,可以通过对气象条件的准确预报来对霾天气进行预警。

张浩等(2010)的研究表明,地面低风速、高湿度和偏东风容易导致合肥霾天气,近地面不同来向的气团对应霾的发生频率明显不同。因此,为探讨霾日数增多的原因,首先比较上述 3 个城市 2009~2013 年 1 月的局地气象条件,主要考虑与污染物扩散、输送和颗粒物吸湿增长有关的因子,即地面风速、风向、相对湿度。

3.1 地面相对湿度

由图 4 可见,2013 年 1 月,3 个城市 75%的日

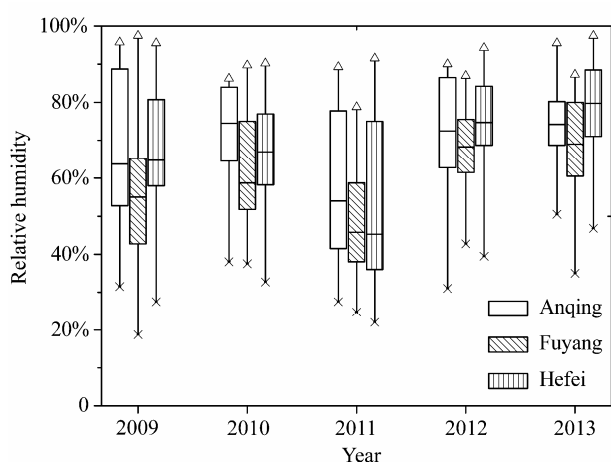


图 4 2009~2013 年 1 月合肥、阜阳和安庆相对湿度日均值统计对比 (△: 最大值; ×: 最小值; 长方形中: 中值; 长方形的上下边分别为第一、第三四分位值)

Fig. 4 Statistical comparisons of daily average humidity in Hefei, Fuyang, and Anqing in Jan during 2009–2013 (△: maximum; ×: minimum; — within the rectangles: median; the upper and lower borders: the 25th and 75th)

均相对湿度都超过 60%。已有的研究表明,当相对湿度达到 60%,即可使吸湿性颗粒物显著增大,对能见度产生显著影响(孙景群, 1985),因此,2013 年 1 月的高湿度确实加剧了能见度的恶化。但值得注意的是,虽然 2013 年 1 月各地相对湿度的各项统计值几乎都为近 5 年同期最高,但并没有显著高于 2010 年和 2012 年。而 2010 年 1 月,安庆和阜阳的霾日数并不多,能见度也明显高于 2013 年 1 月。可见,相对湿度并非决定性因子。

3.2 地面风速

低风速不利于污染物的扩散,即低风速容易导致大气污染。合肥 2013 年 1 月风速中值和均值在 2009~2013 年同期最低(如图 5 所示),安庆、阜阳 2013 年 1 月风速的中值和均值分别为近 5 年同期中最高和次高。因此,风速不是阜阳、安庆 2013 年的霾日数增多的原因。鉴于风速和相对湿度统计结果,2013 年 1 月,阜阳、安庆能见度下降(霾日数增多)不能归因于高湿度和低风速,导致低能见度的大气颗粒物可能与外来污染物的输入有关。

3.3 地面风向

2009~2013 年同期相比,2013 年 1 月合肥的偏东北风(N、NNE、NE)出现频率明显偏低(如图 6 所示),偏东风(ENE、E、ESE、SE)出现频率偏高;阜阳偏东北风出现频率偏低,但 NNW、ENE、SE、WSW 出现频率显著增大;安庆的 NE、ENE、E 出现频率明显比往年低,但 N、NNE、SE

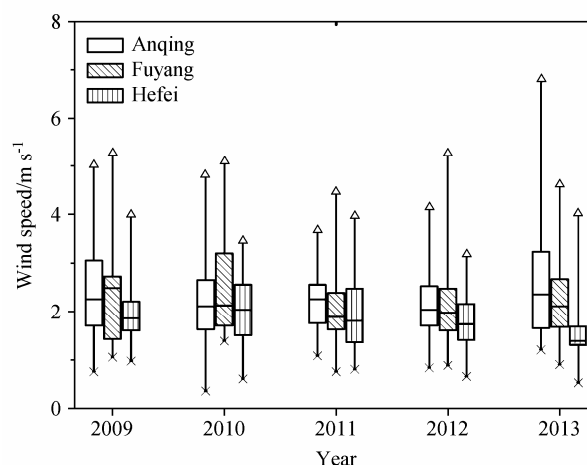


图 5 2009~2013 年 1 月合肥、阜阳和安庆地面风速日均值统计对比 (△: 最大值; ×: 最小值; 长方形中: 中值; 长方形的上下边分别为第一、第三四分位值)

Fig. 5 Statistical comparisons of daily average wind speed in Hefei, Fuyang, and Anqing in Jan during 2009–2013 (△: maximum; ×: minimum; — within the rectangles: median; the upper and lower borders: the 25th and 75th)

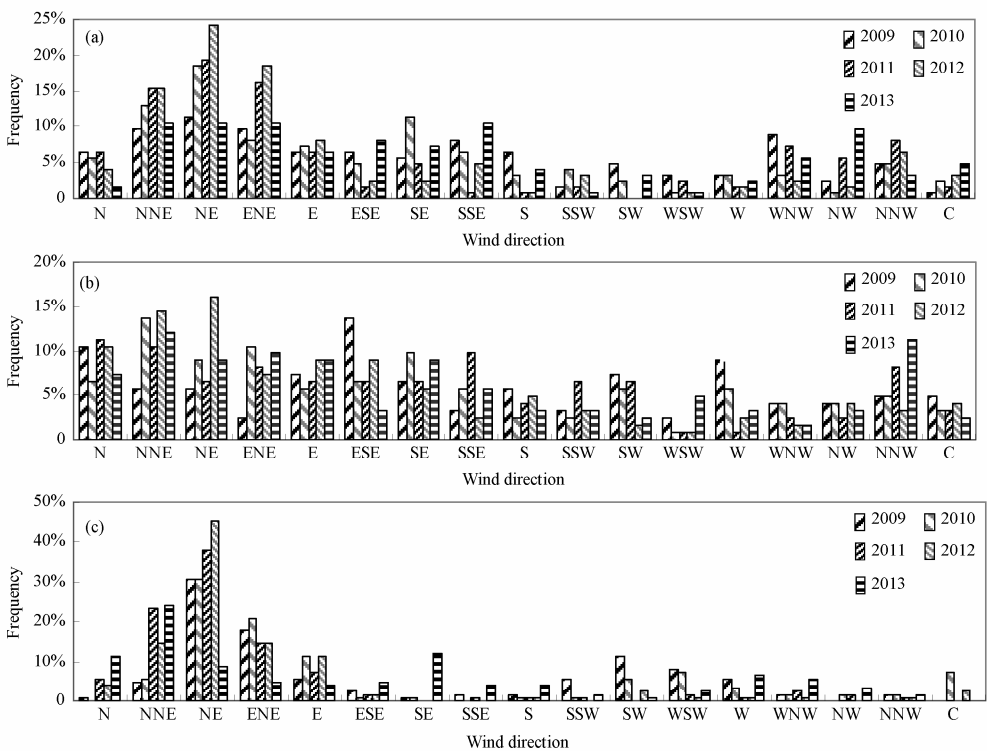


图 6 2009~2013 年 (a) 合肥、(b) 阜阳、(c) 安庆 1 月地面风向频率
Fig. 6 Frequencies of ground level wind directions in (a) Hefei, (b) Fuyang, and (c) Anqing in Jan during 2009–2013

明显增大。风向的改变可能是 2013 年 1 月霾日增多的主要原因，但地面风受地形及周边环境影响较大，代表性不强，下一节将计算 100 m 和 1000 m 高度的后向轨迹，结合聚类分析和统计分析，探讨不同高度输送条件对能见度的影响。

3.4 边界层内逆温

逆温层是冬季大气边界层结构中的一个重要特征，与大气污染物的扩散和稀释密切相关。为了解边界层逆温对能见度和霾的影响，用安庆和阜阳高分辨率 L 波段雷达探空资料统计了 2009~2013 年（阜阳 2010~2013 年）1 月接地逆温和 1500 m 以下的低空逆温出现情况，包括频率、平均厚度和平均强度。统计方法见唐家萍等（2012）（结果见表 1）。由表 1 可见，两地 2013 年 1 月 19:00 的逆温频率明显高于历史同期，07:00 的逆温频率明显高于 2010 年以外的其他年份；从逆温厚度看，19:00，阜阳和安庆分别是 2013 年和 2010 年最厚，但 07:00，阜阳、安庆分别是 2010 年和 2013 年最厚。总之，2013 年 1 月阜阳、安庆两地的接地逆温都偏多、偏厚。低空逆温包含悬浮逆温的情况，07:00，历年低空逆温频率都在 50%以上，阜阳、安庆 2013 年 1 月的低空逆温出现频率分别为 94%和 87%，为历年

表 1 2009~2013 年 1 月安庆、阜阳接地逆温出现情况
Table 1 Statistics of the near ground inversion in Anqing and Fuyang in Jan during 2009–2013

站点	年份	频率	07:00		19:00	
			平均强度/ 厚度/m	°C (100 m) ⁻¹	平均强度/ 厚度/m	°C (100 m) ⁻¹
阜阳	2010	0.35	448.09*	1.54	0.26	181.25
	2011	0.32	288.30	1.12	0.16	98.60
	2012	0.13	204.00	1.75*	0.13	93.75
	2013	0.39*	280.75	1.55	0.32*	239.60*
安庆	2009	0.13	306.50	1.45	0.16	181.80
	2010	0.26*	346.13	1.51	0.19	247.33*
	2011	0.13	216.25	1.65*	0.10	101.33
	2012	0.10	248.33	1.27	0.03	100.00
	2013	0.26*	637.63*	0.94	0.29*	160.33

*为历年最大值。

同期最高和第二高，强度为各年同期最强，分别为 1.43 °C (100 m)⁻¹ 和 1.14 °C (100 m)⁻¹，但不是最厚。19:00，阜阳、安庆 2013 年 1 月的低空逆温出现频率分别达到 81%和 77%，为历年同期最高。总之，从 07:00 与 19:00 的逆温统计结果看，2013 年 1 月安庆和阜阳的大气层结比往年同期更稳定，逆温出现次数更多、更深厚，不利于污染物的扩散。但综合来看，2010 年 1 月与 2013 年 1 月的接地逆温和

低空逆温的出现情况比较接近。因此,大气层结可部分解释 2013 年 1 月阜阳、安庆的能见度最低和霾日最多的现象,考虑到 2010 年 1 月阜阳、安庆霾日并不多,逆温现象仍不能完全解释 2013 年 1 月的霾日增多。

4 不同高度输送条件对能见度的影响

为弄清导致安徽低能见度时大气污染物的输送通道,首先,用 HYSPLIT4 轨迹模式(Draxler, 1997),计算了 2009~2013 年 1 月每 6 h 一次(即 08:00、14:00、20:00、02:00)合肥、阜阳和安庆近地层(100 m)和边界层中上部(1000 m) 72 h 后向轨迹,每个

起始点共得到 620 条轨迹,所用资料为美国 GDAS 格点资料;然后用聚类分析对每一起始点的 620 条轨迹进行客观分组,并对各组轨迹对应的能见度进行统计分析,最后,统计每年位于各组的轨迹数,以了解导致低能见度的大气污染物输送路径以及 2013 年 1 月与历史同期的差异。聚类分析的具体计算步骤和方法参见 Dorling et al. (1992)。

4.1 安徽及周边省份 SO₂、NO₂ 排放情况

由于 NO₂ 在大气中寿命较短,而且主要存在于对流层低层,其柱含量的空间分布主要由近地层的浓度决定,且基本上与 NO_x 源排放分布一致(Shi and Zhang, 2008),本文使用环境卫星(Sciamachy)监测的 2011 年对流层 NO₂ 分子柱含量分布表示安徽及周边省份 NO_x 源排放分布(图 7)。Sciamachy 卫星及其观测资料的介绍见 Shi et al. (2008),其有效资料到 2012 年 4 月。由图 7 可见,安徽省大部分地区对流层 NO₂ 柱含量为 $(1\sim2)\times10^{16}$ mol cm⁻²,合肥到沿江东部和沿淮部分地方在 $(2\sim3)\times10^{16}$ mol cm⁻²,山东、河南、河北是一个范围很大的 NO₂ 高值区,大部分地区年均值超过 4×10^{16} mol cm⁻²,江苏、上海、浙江北部都在 2×10^{16} mol cm⁻² 以上。相对而言,南边和西边 NO₂ 柱含量较低。

图 8 给出了 2003~2011 年安徽及周边各省 SO₂ 年排放量,资料来自中国国家统计局网站,同时还给出了图 7 中矩形方框内平均 NO₂ 柱含量的年变化。可以看到多年来,安徽及其西边和南边的省份 SO₂ 排放量远低于东边和北边。安徽北边的矩形方框内的年均 NO₂ 柱含量呈逐年上升趋势。SO₂ 和 NO₂ 都是二次气溶胶的前体物,同时,SO₂ 或 NO₂ 的排放源也可能是颗粒物的排放源,也就是说,SO₂ 和 NO₂ 浓度高的地方气溶胶浓度也会相对较高。因

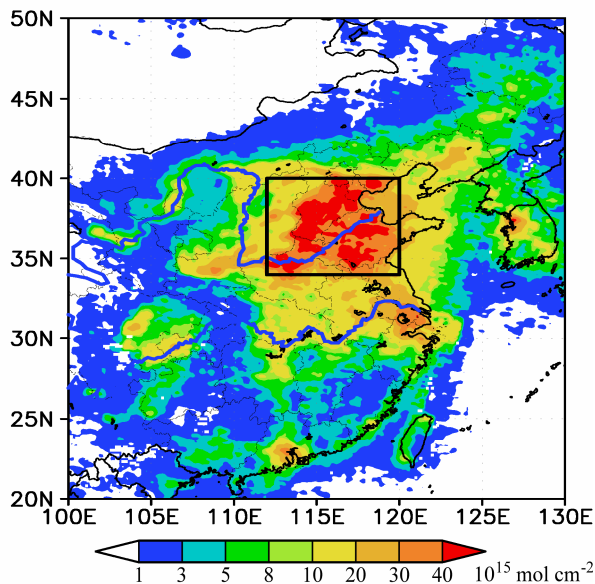


图 7 2011 年环境卫星监测中国东部地区对流层 NO₂ 分子柱含量分布
Fig. 7 NO₂ column concentration distributions in eastern China in 2011 from satellite

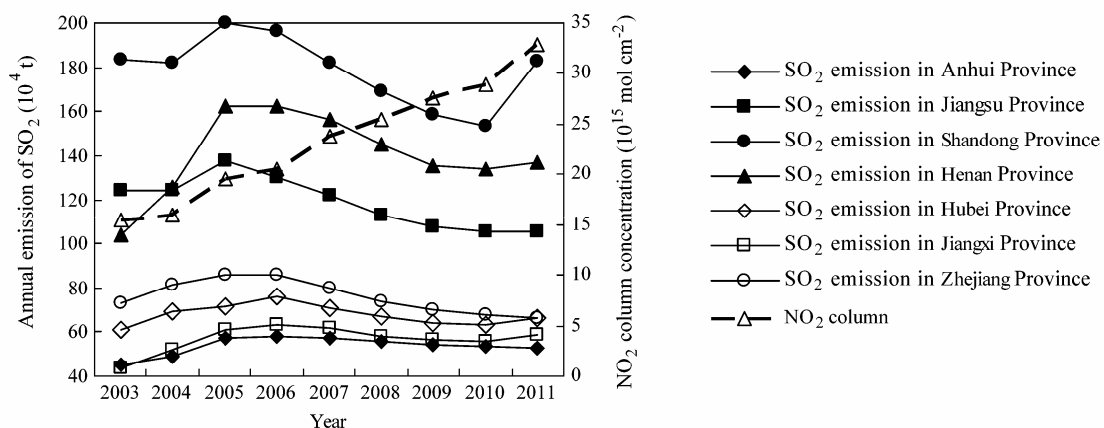


图 8 2003~2011 年安徽及周边省份 SO₂ 排放量和图 7 中矩形方框内 NO₂ 柱含量的年均值

Fig. 8 Yearly SO₂ emissions in Anhui Province and its surrounding provinces and averaged NO₂ column concentration in the square in Fig. 7

此, 从 SO_2 和 NO_2 排放或者浓度分布情况, 可以推测, 近地层西北风、北风、东北风都存在把高浓度气溶胶向安徽输送的可能, 容易导致安徽各地出现高浓度气溶胶污染, 从而在合适的条件下产生低能见度事件, 即霾天气。考虑到安徽的季风气候, 从输送的角度看, 安徽处于非常不利的地理位置。

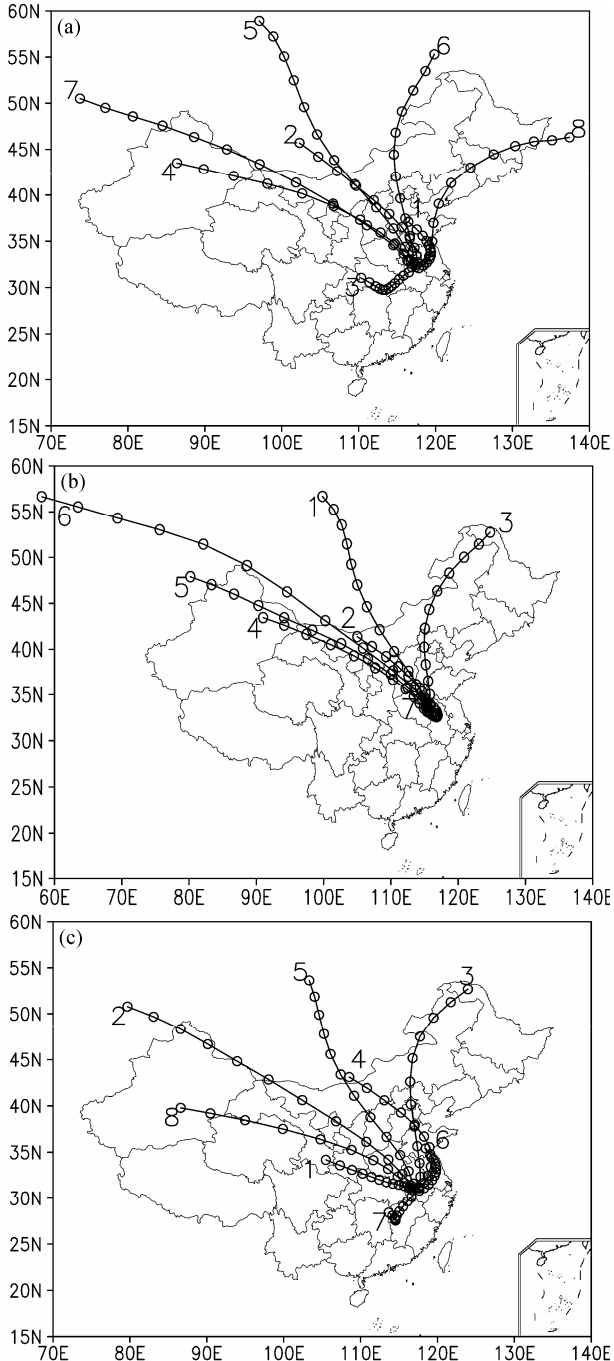


图 9 2009~2013 年 1 月 (a) 合肥、(b) 阜阳和 (c) 安庆 1 km 高度各簇平均后向轨迹分布 (每根平均轨迹上的小圆圈表示 6 h 时间间隔)
Fig. 9 Cluster-mean back trajectories at 1 km in (a) Hefei, (b) Fuyang, and (c) Anqing in Jan during 2009–2013 (circles in the trajectories denote the 6-h time intervals)

4.2 1 km 高度不同输送条件对能见度的影响

总体上, 3 个地方 1 km 高度 1 月的气团均以西北来向为主, 但仍可以根据方向和轨迹长度的差异分成不同的组。应用聚类分析, 合肥、阜阳、安庆分别得到 8、7、8 组后向轨迹。各组平均轨迹的水平分布见图 9, 每组轨迹起始时刻对应的能见度统计结果见表 2。从图 9 可以看出, 每一城市都有 1~2 组平均轨迹明显比其他各组短, 如合肥的 1、3 组, 阜阳的第 7 组, 安庆的 6、7 组。除了合肥的第 3 组和安庆的第 7 组来自西南方向, 其他各组都来自西北方向或偏北方向。如果细看每一组的轨迹组成可以发现, 平均轨迹较长的组内轨迹往往方向一致, 轨迹来向单调, 平均轨迹较短的一组往往是由围绕本地打转的轨迹组成, 也有平均轨迹较短的是由来向一致、方向变化不大的轨迹组成。这类轨迹往往对应着属性不变、移动缓慢的气团。在合肥, 这样的气团往往对应着较高的 PM_{10} 浓度 (石春娥等, 2008) 和霾天气发生率 (张浩等, 2010)。

表 2 2009~2013 年 1 月合肥、阜阳和安庆 1 km 高度不同后向轨迹对应的能见度统计值

Table 2 Statistics of visibilities corresponding to different back-trajectory groups at 1 km in Hefei, Fuyang and Anqing in Jan during 2009–2013

站点		簇 1	簇 2	簇 3	簇 4	簇 5	簇 6	簇 7	簇 8
合肥	第一四分位值	2.00	4.00	3.00	3.00	6.00	10.00	5.00	8.00
	最小值	0.00	0.10	0.00	0.10	0.30	6.00	3.00	5.00
	中值	4.00	6.00	4.00	5.00	8.00	10.00	7.00	10.00
	第三四分位值	6.00	10.00	6.00	10.00	10.00	12.00	8.00	12.00
	平均值	4.35*	6.51	4.36**	5.98	9.50	11.09	7.47	8.86
阜阳	第一四分位值	10.00	5.00	12.00	7.00	8.00	10.00	4.00	
	最小值	2.00	0.10	6.00	1.00	1.00	2.00	0.10	
	中值	15.00	10.00	15.00	10.00	10.00	10.00	8.00	
	第三四分位值	20.00	12.00	15.00	12.00	15.00	15.00	10.00	
	平均值	13.98	9.02**	14.91	10.37	11.29	10.93	7.73*	
安庆	第一四分位值	6.00	6.00	11.00	6.00	11.00	5.00	5.00	6.00
	最小值	0.10	0.30	8.00	3.00	0.20	0.70	0.10	0.10
	中值	9.00	10.00	12.00	10.00	12.00	7.00	7.00	9.00
	第三四分位值	11.00	11.00	13.00	11.00	13.00	10.00	10.00	11.00
	平均值	8.35	9.27	12.22	8.89	11.87	7.23**	7.21*	8.64

*和**分别表示平均值中的最低值和次低值。

综合分析图 9 和表 2 发现, 短轨迹对应着最低的能见度中值和平均值 (表 2), 显然, 移动缓慢的气团有利于大气污染物的累积, 导致能见度下降。另外, 合肥的 1、3 组和安庆的 6、7 组, 轨迹长度差别不大, 对应的能见度中值和平均值也很接近, 说明能见度跟轨迹来向关系不大。各市都是来

自北方的轨迹（合肥的 6、8 组，阜阳的 1、3 组，安庆的 3、5 组）对应的能见度中值和平均值各组中偏高，其他各组大方向都来自西北，长度差别较大，能见度中值和平均值差别不大，所以，并非轨迹长度越长，对应的能见度越高。如果假定能见度的高低与空气中细颗粒物浓度成反比关系，合肥的统计结果明显不同于 PM10 浓度与 1 km 高度输送轨迹的关系（石春娥等，2008）。

表 3 给出了 3 个城市每年后向轨迹在各组中的分布情况。合肥霾日较多的 2010 年、2012 年、2013 年属于 1、3 组的轨迹都超过了 50%，尤其是 2012 年和 2013 年，而属于 6、8 组的轨迹较少。这解释了为什么合肥这几年 1 月能见度偏低。安庆 2010 年、2012 年、2013 年 6、7 组轨迹出现频率较高，但并非能见度最低（霾日数最多）的 2013 年最高。阜阳是第 7 组轨迹最短，对应的平均能见度最低，但 2013 年这一组出现的频率在各年中偏低，即使考虑次短的轨迹组（第 2 组），也远不及 2012 年出现频率高。因此，1 km 高度的输送条件不能解释为什么 2013 年 1 月安庆、阜阳的霾日数偏多、能见度偏低这个事实。

表 3 2009~2013 年 1 月合肥、阜阳、安庆 1 km 高度不同来向轨迹出现的百分比

Table 3 Percentages of back-trajectories in each group at 1 km in Hefei, Fuyang, and Anqing in Jan during 2009–2013

站点	年份	簇 1	簇 2	簇 3	簇 4	簇 5	簇 6	簇 7	簇 8
合肥	2009	21.77	14.52	22.58	13.71	9.68	12.10	5.65	0.00
	2010	12.10	12.10	38.71	23.39	6.45	1.61	5.65	0.00
	2011	33.06	20.97	4.03	7.26	12.10	14.52	2.42	5.65
	2012	55.65	20.16	9.68	8.06	4.03	1.61	0.81	0.00
	2013	32.26	16.13	31.45	9.68	4.03	5.65	0.81	0.00
阜阳	2009	16.13	12.90	12.90	13.71	9.68	6.45	28.23	
	2010	4.03	13.71	1.61	17.74	24.19	5.65	33.06	
	2011	11.29	16.94	17.74	12.90	7.26	0.00	33.87	
	2012	7.26	25.81	0.00	8.06	3.23	0.00	55.65	
	2013	3.23	28.23	4.84	19.35	14.52	0.00	29.84	
安庆	2009	16.94	10.48	7.26	6.45	16.94	13.71	23.39	4.84
	2010	18.55	6.45	0.00	10.48	4.84	7.26	41.94	10.48
	2011	11.29	8.06	13.71	17.74	13.71	18.55	6.45	10.48
	2012	9.68	8.06	0.00	16.94	4.84	33.87	16.94	9.68
	2013	20.16	8.06	0.81	7.26	5.65	16.94	24.19	16.94

4.3 100 m 高度不同输送条件对能见度的影响

100 m 高度的气团来向主要为西北到偏北方向，与 1 km 高度略有不同。合肥、阜阳和安庆的后向轨迹各分为 5、8、5 组，平均轨迹的水平分布见图 10。由图 10 可见，各市都有 2 组轨迹比较短，如合肥

的 1、3 组，阜阳的 4、6 组，安庆的 1、2 组；同时，都有 1~2 组轨迹途经江苏伸向山东、华北，如合肥的第 3 组、阜阳的第 4 组、安庆的第 1、3 组。跟伸向西北方向的轨迹组相比，这些轨迹都偏短。表 4 给出了各组轨迹起始时间对应能见度的统计结果。

综合分析图 10 与表 4 可知，3 个城市都是来向偏东、经过江苏北部（苏北）和山东半岛的轨迹组对应着最低的能见度（平均值和中值，下同），如合肥的第 3 组，阜阳的第 4 组，安庆的第 1 组，

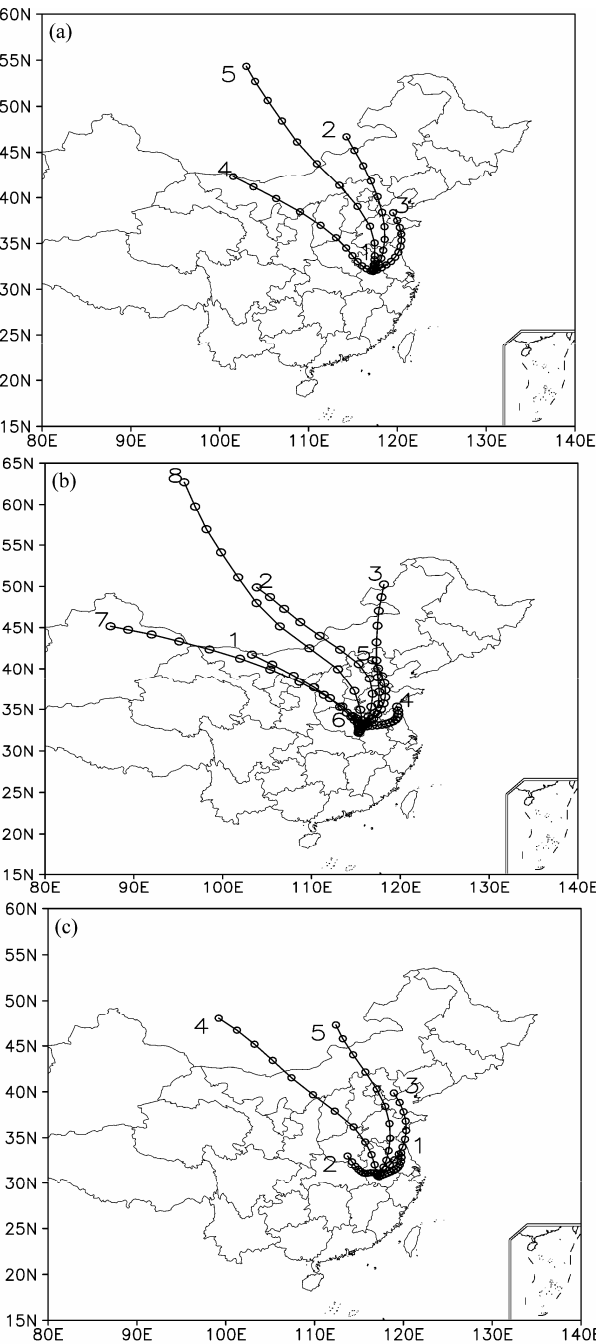


图 10 同图 9，但为 100 m

Fig. 10 Same as Fig. 9, but at 100 m

这些轨迹并不是最短的轨迹组；除了合肥较短的两组轨迹对应着比较接近的能见度外，阜阳和安庆的次低平均能见度都是来自偏东北方向经过山东到华北的、各组中第三短的轨迹组。结合图 7 和图 8，这个结果显得很合理，因为安徽东边的江苏和北边的山东不仅是 SO₂ 的排放大省（图 8），也是 NO₂ 高值区（图 7）。这个结果也体现了不同规模城市的差异。对照 4.2 节 1 km 高度的结果，根据能见度与细粒子浓度的反比关系，可以认为，冬季细粒子的输送主要发生在近地层，而不是边界层的中上部。从 100 m 高度不同来向输送轨迹对应的能见度统计结果看，1 月安徽这几个城市大气污染物的输送通道接近。根据北半球的风压关系，偏东来向的轨迹（合肥第 3 组，安庆第 1、3 组，阜阳第 4、5 组）对应的天气形势为安徽位于高压底部或均压区内（图略），近地层为偏东到东北风，大气污染物从华北经山东、江苏输送到安徽。

合肥市在能源消耗、汽车保有量方面都位居全省之首，局地污染比较严重。在能见度上表现为，第 1 组轨迹对应的能见度平均值也比较低，中值与第 3 组的一样低，因此，可以认为合肥的局地污染物排放可以造成与东北来向的输送同等严重的低能见度，而阜阳和安庆的低能见度则主要是外来污染物的输送造成的。

表 5 给出了每年 1 月后向轨迹在图 10 各组中的分布。综合图 10、表 4 和表 5，可以理解为什么 2013 年 1 月安徽各地霾日较多、能见度偏低。2013 年 1 月合肥有 81% 的后向轨迹属于第 1、3 组，与 2012 年 1 月持平，明显高于 2010 年 1 月。2013 年 1 月第 1 组轨迹所占百分比（47%），历年同期最高，也是各组中最高。如果第一组对应的大气污染以本地源为主，则 2013 年 1 月对合肥的低能见度贡献最大的是本地污染物排放，其次是由华北、长江三角洲输送的污染物的贡献。阜阳，2013 年 1 月第 4 组轨迹出现频率各组中最高（45%），但低于 2012 年 1 月（52%），如果考虑对应能见度最低的 3 组（第 4、5、6 组）之和，2013 年 1 月这 3 组所占比例达到 82%，历年同期最高，另外，与逆温情况比较接近的 2010 年 1 月相比，2013 年 1 月第 4 组轨迹出现的比例显著高于 2010 年。这较好地解释为什么 2012、2013 年 1 月阜阳的霾日数显著增多、能见度显著下降。安庆，2013 年 1 月属于第 1 组的轨迹数占总轨迹数的 58%，显著超过历史同期。考

虑到来自东北方向的 1 组轨迹对应着最低的能见度，这很好地解释了为什么 2013 年 1 月，安庆的霾日数显著增多、能见度下降。

上述结果说明，近地层偏东和偏北气流较多是 2013 年 1 月安徽各地能见度偏低、霾天气偏多的主要原因，也说明大气污染物的输送主要发生在近地层。

表 4 2009~2013 年 1 月合肥、阜阳、安庆 100 m 高度不同后向轨迹对应能见度统计值

Table 4 Statistics of visibilities corresponding to different back-trajectory groups at 100 m in Hefei, Fuyang, and Anqing in Jan during 2009–2013

		km							
站点		簇 1	簇 2	簇 3	簇 4	簇 5	簇 6	簇 7	簇 8
合肥	第一四分位值	3.00	6.00	2.00	6.00	10.00			
	最小值	0.10	1.20	0.00	0.80	5.00			
	中值	4.00	10.00	4.00	7.00	10.00			
	第三四分位值	6.00	10.00	6.00	10.00	15.00			
	平均值	5.00**	8.59	4.64*	7.50	12.19			
阜阳	第一四分位值	10.00	12.00	12.00	3.00	6.00	6.00	10.00	15.00
	最小值	2.00	5.00	2.00	0.10	0.90	0.10	2.00	12.00
	中值	12.00	12.00	15.00	7.00	10.00	10.00	12.00	15.00
	第三四分位值	15.00	15.00	20.00	10.00	12.00	12.00	15.00	20.00
	平均值	12.00	14.03	14.11	7.14*	9.21**	9.49	13.04	17.27
安庆	第一四分位值	5.00	7.00	6.00	10.00	10.00			
	最小值	0.10	0.20	3.00	0.20	4.00			
	中值	7.00	10.00	8.00	12.00	12.00			
	第三四分位值	10.00	12.00	11.00	15.00	13.00			
	平均值	7.15*	9.11	8.58**	11.82	11.11			

*和**分别表示平均值中的最低值和次低值。

表 5 2009~2013 年 1 月合肥、阜阳、安庆 100 m 高度不同来向轨迹出现的百分比

Table 5 Percentages of back-trajectories in each group at 100 m in Hefei, Fuyang, and Anqing in Jan during 2009–2013

站点	年份	簇 1	簇 2	簇 3	簇 4	簇 5	簇 6	簇 7	簇 8
合肥	2009	42.74	16.94	28.23	5.65	6.45			
	2010	41.13	16.94	27.42	9.68	4.84			
	2011	27.42	23.39	34.68	10.48	4.03			
	2012	19.35	12.90	62.10	5.65	0.00			
	2013	46.77	7.26	34.68	5.65	5.65			
阜阳	2009	10.48	10.48	4.03	22.58	12.10	22.58	12.90	4.84
	2010	4.84	14.52	4.84	26.61	20.16	25.00	1.61	2.42
	2011	10.48	11.29	13.71	24.19	18.55	13.71	4.03	4.03
	2012	8.87	6.45	3.23	51.61	13.71	12.10	4.03	0.00
	2013	7.26	5.65	4.03	45.16	16.13	20.97	0.00	0.81
安庆	2009	35.48	29.03	14.52	11.29	9.68			
	2010	45.97	20.16	22.58	1.61	9.68			
	2011	23.39	12.90	37.10	9.68	16.94			
	2012	37.90	9.68	39.52	3.23	9.68			
	2013	58.06	20.16	12.90	4.03	4.84			

5 结论

(1) 2013 年 1 月, 安徽省霾天气具有范围广、持续时间长、能见度偏低的特点。南北各地都具有低风速、高湿度的特点, 但低风速、高湿度并非 2013 年 1 月霾日增多的决定性因子。

(2) 与历史同期相比, 2013 年 1 月安庆和阜阳的接地逆温偏多、偏厚, 可部分解释 2013 年 1 月霾日增多的现象。

(3) 1 km 高度, 控制气团以西北来向为主, 能见度与后向轨迹的长短关系密切, 最短的轨迹组对应着最低的能见度。但是, 与历史同期相比, 2013 年 1 月阜阳、安庆短轨迹出现比例并非最高。

(4) 100 m 高度, 控制气团以偏北到偏东北来向为主, 能见度与后向轨迹来向关系密切, 偏东北来向的气团对应着最低的能见度。而且, 2013 年 1 月最低能见度对应的轨迹出现频率(或与次低能见度对应的轨迹出现频率之和)明显高于历史同期, 解释了为什么 2013 年 1 月各地霾日增多, 能见度偏低。

(5) 从输送的角度看, 安徽处于非常不利的地理位置, 北边、东边各省 SO_2 排放量和 NO_2 柱含量都显著超过安徽。大气层结稳定、近地层偏东北来向气团较多是 2013 年 1 月安徽各地能见度偏低、霾天气偏多的主要原因。

参考文献 (References)

- Dorling S R, Davies T D, Pierce C E. 1992. Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry—Method and applications [J]. *Atmos. Environ.*, 26 (14): 2575–2581.
- Draxler R R, Hess G D. 1998. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion, and deposition [J]. *Aust. Meteor. Mag.*, 47: 295–308.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. *Pure. Appl. Geophys.*, 164: 1420–1436.
- Li W, Shi Z, Zhang D, et al. 2012. Haze particles over a coal-burning region in the China Loess Plateau in winter: Three flight missions in December 2010 [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D12), D12306, doi:10.1029/2012JD017720.
- 闵敏, 王普才, 宗雪梅, 等. 2009. 灰霾过程中的气溶胶特性观测研究 [J]. *气候与环境研究*, 14 (2): 153–160. Min Min, Wang Pucai, Zong Xuemei, et al. 2009. Observation and study on aerosol properties in hazy days [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14 (2): 153–160.
- Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. 2010. Fog research in China: An overview [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (3): 639–661.
- Patricia K Q, Timothy S B. 2003. North American, Asian, and Indian haze: Similar regional impacts on climate? [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (11): 1555–1599.
- Shi C, Zhang B. 2008. Tropospheric NO_2 columns over northeastern North America: Comparison of CMAQ model simulations with GOME satellite measurements [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25 (1): 59–71.
- Shi C, Fernando H J S, Wang Z, et al. 2008. Tropospheric NO_2 columns over east central China: Comparisons between SCIAMACHY measurements and nested CMAQ simulations [J]. *Atmos. Environ.*, 42 (30): 7165–7173.
- 石春娥, 姚叶青, 张平, 等. 2008. 合肥市 PM_{10} 输送轨迹分类研究 [J]. *高原气象*, 27 (6): 1383–1391. Shi Chun'e, Yao Yeqing, Zhang Ping, et al. 2008. Transport trajectories classifying of PM_{10} in Hefei [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (6): 1383–1391.
- 孙景群. 1985. 能见度与相对湿度的关系 [J]. *气象学报*, 43 (2): 230–234. Sun Jinqun. 1985. Relationship between visibility and relative humidity [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 43 (2): 230–234.
- 唐家萍, 谭桂容, 谭畅. 2012. 基于 L 波段雷达探测资料的重庆市区低空逆温特征分析 [J]. *气象科技*, 40 (5): 789–792. Tang Jiaping, Tan Guirong, Tan Chang. 2012. Characteristic analysis of temperature inversion in lower-level atmosphere over Chongqing based on L-band radar data [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 40 (5): 789–792.
- 王喜全, 杨婷, 王自发. 2011. 灰霾污染的跨控制区影响——一次京津冀与东北地区灰霾污染个例分析 [J]. *气候与环境研究*, 16 (6): 690–696. Wang Xiquan, Yang Ting, Wang Zifa. 2011. Impact of dust-haze episode from one air pollution control region to the other —One case study [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (6): 690–696.
- 吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述 [J]. *环境科学学报*, 32 (2): 257–269. Wu Dui. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 32 (2): 257–269.
- 吴兑, 廖国莲, 邓雪娇, 等. 2008. 珠江三角洲天气的近地层输送条件研究 [J]. *应用气象学报*, 19 (1): 1–9. Wu Dui, Liao Guoliang, Deng Xuejiao, et al. 2008. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 19 (1): 1–9.
- 于波, 鲍文中, 王东勇. 2013. 安徽天气预报业务基础与实务 [M]. 北京: 气象出版社, 308. Yu Bo, Bao Wenzhong, Wang Dongyong. 2013. *Technological Handbook for Anhui Weather Forecast (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 308.
- 张浩, 石春娥, 谢伟, 等. 2008. 安徽省 1955~2005 年城市大气能见度变化趋势 [J]. *气象科学*, 28 (5): 515–520. Zhang Hao, Shi Chun'e, Xie Wei, et al. 2008. Visibility trends in cities of Anhui Province during 1955–2005 [J]. *Scientia Meteorologic Sinica (in Chinese)*, 28 (5): 515–520.
- 张浩, 石春娥, 邱明燕, 等. 2010. 合肥市霾天气变化特征及其影响因子 [J]. *环境科学学报*, 30 (4): 714–721. Zhang Hao, Shi Chun'e, Qiu Mingyan, et al. 2010. Long-term variation of haze phenomena in Hefei and its impact factors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 30 (4): 714–721.