

姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 天津一次持续低能见度事件的影响因素分析[J]. 气象, 2012, 38(6): 688-694.

天津一次持续低能见度事件的影响因素分析^{*1}

姚 青^{1,2} 韩素芹¹ 蔡子颖¹

1 天津市气象科学研究所, 天津 300061

2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081

提 要: 2009年1月天津发生了一次持续低能见度事件, 从气象条件、污染演化过程和气流后向轨迹等方面分析该次事件是由以细粒子为主的灰霾天气所引起。分析表明, 细粒子质量浓度是影响大气能见度的主要因素; 细粒子在可吸入颗粒物中的富集, 是造成持续性污染和能见度连续下降的主要原因; 西南暖湿气流控制下的静稳天气有利于污染物聚集, 而以大风降温为标志的冷锋过境是细粒子清除的重要机制; 能见度的周期性变化主要依赖于细粒子的富集和污染物的快速清除, 并且这一过程受到周期性天气系统的影响。

关键词: 低能见度, 霾, 细粒子, 污染, 后向轨迹

Analysis of Related Factors for a Case of Low Horizontal Visibility in Tianjin

YAO Qing^{1,2} HAN Suqin¹ CAI Ziyang¹

1 Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300061

2 Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA, Beijing 100081

Abstract: A case of sustained low horizontal visibility occurred in Tianjin during January 2009. From the perspective of the meteorological factors, the evolution process of air pollution and air backward trajectory, this event was mainly caused by fine particles in haze weather conditions. The result indicated that fine particle mass concentration was the main influence factor of horizontal visibility. The increase of the ratio of PM_{2.5} to PM₁₀ resulted in the persistent air pollution and the continuous declined visibility, which was affected in the calm weather conditions under the control of southwest warm and moist air flow. Simulations of the backward trajectory model HYSPLIT have indicated that the aerosol pollutions come from southwestern region and surrounding areas, and cold waves are the important clearance mechanism of regional fine particle pollution in Tianjin. The cyclical change of visibility is caused by the enrichment of fine particle and the quick removal of air pollution, and is also affected by the periodic weather systems.

Key words: low visibility, haze, fine particle, pollution, backward trajectory

前 言

大气能见度是指视力正常的人在当时的天气条件下所能看到目标物的最大水平距离。能见度可以用来表征大气清洁程度。影响大气能见度的因素主

要包括降水、雾、大风、沙尘暴、扬沙等天气现象, 以及大气中广泛存在的污染性气体和气溶胶等。雾、霾等低能见度天气现象给人类生产、生活带来诸多不便和各种危害, 常常是造成交通堵塞和飞机起降事故的重要原因, 同时雾霾颗粒携带的有毒有害物质严重威胁人类健康。因此大气能见度, 尤其是低

* 公益性行业(环保)科研专项(201009001)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006011)和中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2009011)共同资助

2011年3月30日收稿; 2011年9月29日收修定稿

第一作者: 姚青, 主要从事大气环境与大气化学研究工作. Email: yao. qing@163. com

能见度天气现象受到了包括广大气象以及环境工作者在内的社会各阶层的广泛关注。

国内对城市大气能见度的研究主要集中在能见度长期趋势变化,大气污染物、相关气象条件对能见度的影响等方面,珠三角^[1-3]、安徽^[4]、香港^[5]、京津冀^[6-7]等地的长期能见度趋势表明,各大城市大气能见度近几十年呈逐步下降趋势,这与经济发展、空气污染有着密切关系。范引琪等^[6]的研究成果表明,1980—2003 年京津冀大部分地区能见度呈下降趋势,天津等 5 市下降最为明显,而且大气能见度趋势与能源消耗和机动车增长存在很好的相关性。空气污染物,尤其是气溶胶浓度对能见度影响巨大,丹东、深圳、北京等地的研究,都发现细粒子浓度增高是造成该地区能见度下降的主要原因^[8-12]。高湿、静小风和低边界层高度等气象条件不利于污染物扩散,从而极易引发低能见度事件^[13-14]。此外冷空气入侵一方面可能带来气溶胶粒子的远距离输送,另一方面也会造成本地气溶胶污染的快速清除,2010 年 3 月珠三角地区的一次典型灰霾过程显示了冷空气对邻近区域能见度巨大差异的影响^[15]。段玉森等^[16]参考美国凤凰城能见度指数,认为影响上海大气能见度的因子主要是污染、云量、相对湿度以及天气现象,并在此基础上建立了上海市大气能见度指数指标体系。

天津作为环渤海地区的经济中心,将建设成为国际港口城市、北方经济中心和生态城市。随着环渤海区域经济快速发展和机动车保有量的迅速增长,天津地区大气污染复合型特征显著,突出体现在持续性的区域污染及低能见度天气频繁发生^[17-18]。

近年来的相关研究表明,能见度变化特征受到污染物排放特征及气象因素变化的共同影响,高污染物浓度,尤其是高 PM_{2.5} 质量浓度,以及高温、高湿和静小风天气容易造成能见度下降,并且在高湿条件下,能见度更易受到气溶胶浓度的影响,细粒子浓度和相对湿度可能是造成天津低能见度事件频发的主要原因^[19-20]。这与天津濒临渤海,相对湿度与一般北方城市相比较高的气候特征,以及重工业环绕在城市周边的工业布局有一定关系。

本文对 2009 年 1 月的一次典型低能见度事件的气象特征、气溶胶浓度分布、污染演化过程及后向轨迹进行分析,以此来寻找造成该次事件的大气物理与大气化学原因,为低能见度事件的预报预测提供科学依据。

1 资料与研究方法

大气能见度和空气污染资料来源于中国气象局天津大气边界层观测站(39°04'N、117°12'E,海拔 2.2 m,台站编号:54517),该站点位于天津市城区南部,其北距快速路约 100 m,东临友谊路—友谊南路,西面和南面主要为住宅区,交通源和生活源排放对其有一定影响。大气水平能见度采用美国 Belfort 公司生产的 M6000 型前向散射式能见度仪进行测量,PM₁₀和 PM_{2.5} 质量浓度采用美国安普公司生产的 TEOM 系列 RP 1400a 型环境颗粒物监测仪,SO₂ 和 NO₂ 采用美国热电公司生产的 TE43i 型脉冲荧光法 SO₂ 分析仪和 TE42i 型化学发光法 NO_x 分析仪进行测定,仪器参数见表 1。

表 1 观测仪器参数

Table 1 The basic parameters and specifications of monitoring instruments

观测项目	仪器型号	检测限	量程	精度	零点漂移/24 h	跨度漂移/24 h	流量/L·min ⁻¹
PM ₁₀	RP 1400a	0.06 μg·m ⁻³	1500 μg·m ⁻³	1.5 μg·m ⁻³	—	—	16.7
PM _{2.5}	RP 1400a	0.06 μg·m ⁻³	1000 μg·m ⁻³	1.5 μg·m ⁻³	—	—	16.7
SO ₂	TE 43i	0.5 ppb	500 ppb	1 ppb	1 ppb	±1%F·S	0.5
NO ₂	TE 42i	0.4 ppb	500 ppb	1 ppb	0.4 ppb	±1%F·S	0.5
能见度	Belfort M6000	6 m	20000 m	10%	—	—	—

1 ppb=10⁻⁹

常规气象资料来源于与天津大气边界层观测站位于同一位置的天津市城区国家气象观测站,所有数据均通过质量控制和数据订正。大气稳定度采用温差-风速法计算^[21],该方法基于温度梯度与风速相结合,能较好地既反映热力湍流又反映机械湍流的影响。晴空指数 K_s 指入射到水平面的太阳总辐

射(G)与天文辐射(G_0)之比,将天空状态按照平均晴空指数 K_s 分为四类:晴天($K_s \geq 0.6$)、多云($0.4 \leq K_s < 0.6$)、阴天($0.1 \leq K_s < 0.4$)和雨天($K_s < 0.1$),用以定量描述天气现象^[22]。观测期为 2009 年 1 月 14—23 日,为期 10 d,大气能见度、气象资料和污染物资料如无特别说明,均采用小时均值($N =$

240)。应用美国国家海洋和大气局(NOAA)等研发的,提供质点轨迹、扩散及沉降分析使用的综合模式系统 HYSPLIT^[23]分析天津气流后向轨迹,轨迹模式采用 NCEP 的 FNL 全球分析资料,并经过 ARL(NOAA-Air Resources Laboratory)的预处理模块转化成模式所需要的格式。

2 结果与讨论

2.1 观测期间的气象特征

观测前期(2009年1月14—18日),除17日有轻雾发生外,天津城区天气以晴或多云为主(K_s 在0.46~0.64之间),地面受冷性大陆高压影响,风向多为偏北风,19—20日高空环流逐渐转平,影响天津地区的冷空气强度减弱,地面冷高压迅速东移入海,天津地区位于高压后部,风向为西南风,气温逐渐升高,21日高纬度冷涡迅速南掉,冷涡后部横槽处有冷空气堆积,地面有一较强的气旋发展,天津地区位于气旋底部,盛行西南风,22日横槽转竖,冷空气大举南下,受冷涡及高空槽影响,地面有强大冷高压东移南下,天津地区受东北大风影响,气温迅速下降,24 h 变温超过 10°C ,达到气象意义上的寒潮标准。

2.2 能见度的演变过程

观测期内能见度平均值为 10.80 km,日均值变化范围为 2.55~19.88 km,小时均值变化范围为 1.89~20.09 km(样本数:240个)。本次观测以能见度小时值低于 10 km 确定为低能见度,以连续 12 h 能见度低于 10 km 为持续低能见度事件(low visibility),观测期内 3 次主要的持续低能见度事件分别发生在 2009 年 1 月 15 日 21 时至 16 日 10 时、17 日 07 时至 18 日 7 时和 18 日 19 时至 22 日 01 时,分别持续约 14、25 和 79 h,分别记作 L_1 、 L_2 和 L_3 (图 1

长方形部分),相应的高能见度时段(能见度小时值大于 10 km)记作 H 时段,低能见度事件持续总时间超过观测期的 50%。根据中国气象局《地面气象观测规范》及相关气象行业标准,本文以相对湿度高于 95%,能见度低于 1 km 作为雾的判定标准^[24],相对湿度低于 80%,能见度低于 10 km 作为霾的判定标准^[25]。观测期间相对湿度平均值为 43%,相对湿度低于 80%,能见度低于 10 km 作为霾的判定标准^[25]。观测期间相对湿度平均值为 43% 23%,最大值为 85%,因此可以认为造成此次低能见度事件的主要原因在于持续的霾天气。

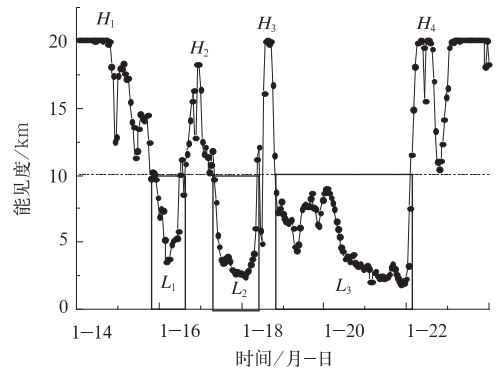


图 1 2009 年 1 月 14—22 日天津能见度的变化过程
Fig. 1 The visibility during the observation in Tianjin from 14 to 22 January, 2009

表 2 为观测期间及持续低能见度事件期间影响大气能见度水平的主要空气污染物和气象因素的平均统计特征,低能见度事件发生期间污染物 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著高于观测时段的平均水平,气象因素中气温、相对湿度较高,风速和气压则低于平均水平。能见度与各影响因子的线性相关系数说明,观测期间能见度与大气污染物和相对湿度、气压等气象因子相关性较好,表明能见度受多重因素影响,其中 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度、相对湿度和气压是最重要的影响因素,这与国内外多项研究结果相一致。低能见度期间,所有相关系数均有一

表 2 大气污染物和气象因素统计特征

Table 2 Descriptive statistics of air pollutants and meteorological factors

观测项目	Vis /km	SO_2 / $\times 10^{-9}$	NO_2 / $\times 10^{-9}$	PM_{10} / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{PM}_{2.5}$ / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	T / $^{\circ}\text{C}$	RH /%	V / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p /hPa	样本数 /个
观测期间	平均值	10.80	63.52	37.93	217.4	90.17	-1.6	43	1.9	1025
	R^2		0.43	0.36	0.54	0.74	0.28	0.49	0.25	0.56
低能见 度期间	平均值	5.01	91.10	48.97	299.05	149.93	0.7	56	1.1	1020
	R^2		0.20	0.26	0.51	0.58	-0.01	0.29	-0.01	0.19

定程度下降,表明单一因素对能见度的影响减弱,低能见度是多重因素相互作用的结果,低风速下能见度与风几乎没有相关性,这也正是霾天气的特征之一,大范围区域性污染依赖于低风速下的静稳天气,而 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度与能见度的相关系数维持在0.5以上,表明气溶胶质量浓度作为影响能见度水平的主要因素,其浓度变化直接影响了能见度变化。

2.3 低能见度事件中的大气污染过程

如表2所述,低能见度事件发生期间 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度均高于观测期间的平均值,前者较后者分别高出43%、29%、38%和66%,这一比例大体上也与能见度和污染物浓度的相关系数次序相一致,表明细粒子($PM_{2.5}$)的散射作用是造成能见度下降的最重要原因之一。在利用能见度反算消光系数,以确定各种大气成分对能见度的贡献研究中,一般可忽略 NO_2 的吸收消光和干洁空气的散射消光,重点考虑气溶胶的散射及黑碳气溶胶(BC)的吸收消光作用。此前的研究表明, $PM_{2.5}$ 质量浓度对水平能见度的贡献大于 $PM_{2.5\sim 10}$ 质量浓度,并且高湿情况下,能见度与气溶胶质量浓度相关性更好^[19]。

PM_{10} 小时浓度最大值发生在1月22日19时,达到 $653.08 \mu g \cdot m^{-3}$,而此时 $PM_{2.5}$ 小时浓度仅为 $27.62 \mu g \cdot m^{-3}$,能见度为11.09 km,高于观测期间的平均值,表明高 PM_{10} 质量浓度并未能影响到能见度的大小,这是细粒子浓度影响能见度的一个极端例子,事实上 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度相差如此巨大一般多来自于寒潮所伴随的大风过程,如沙尘暴或地面扬尘等,主要由自然源的高空输送引起。22日地面气象观测结果显示,当日风速较大,12时以后风速一直维持在 $5 m \cdot s^{-1}$ 以上,最大风速发生在19时,达到 $8 m \cdot s^{-1}$, PM_{10} 小时浓度显然与这次寒潮过程所引起的大风有关。 $PM_{2.5}$ 小时浓度最大值发生在1月21日03时,达到 $342.29 \mu g \cdot m^{-3}$,同时 PM_{10} 小时浓度为 $543.15 \mu g \cdot m^{-3}$,能见度仅为2.10 km。

如图2所示,观测期间 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度经历了3次增长阶段(图中箭头表示),与3次低能见度事件在时间上基本吻合,相应 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 质量浓度的比值 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 也有规律地出现了3次增长,表明细粒子的富集是造成 PM_{10} 积累的重要原

因,同时也是形成大气能见度低值时段的重要原因。贺克斌等^[26]认为北京大气颗粒物污染过程的形成由以冷锋过境为明显标志的周期性天气系统所决定,天气系统的活动尺度决定了颗粒物污染的区域性,这一尺度大约4~10 d,并且颗粒物污染过程中随着颗粒物浓度的升高,细粒子呈现富集趋势,粗颗粒物的去除和超细颗粒物的生成(核化过程),以及二次颗粒物的生成是导致细粒子富集的主要原因。本次观测可以看作是一个典型的大气污染过程,期间伴随着细粒子的富集,气溶胶质量浓度的升高,以及因寒潮过程而引发的快速清除,3次低能见度事件间隙中的2次能见度升高与风速增大有关,较大的风速利于污染物扩散,但由于气温、相对湿度等相关气象条件变化不大,没有从根本上改变气溶胶积聚的趋势,因此高能见度仅能维持很短时间(图1中的 H_2 和 H_3 部分),细粒子的富集和能见度的持续下降仍是该次污染过程的主要表现形式,直到冷锋过境,冷锋之后的大风降温天气带来北方相对清洁、流动性较强的干冷空气,将天津大气边界层内的污染物在数小时内彻底清除,冷锋过后新一轮的西南或偏南气流逐渐控制天津,下一轮污染过程开始形成。

$PM_{2.5}/PM_{10}$ 用于表征细粒子的富集程度,与能见度变化呈现良好的负相关关系,观测期间其线性相关系数为 $-0.83(P < 0.0001)$ 。如图3所示,能见度高于10 km时, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 一般在0.4以下,随着能见度逐步降低, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 同步增大,最大值接近0.7,能见度则降至2 km左右,22日以后能见度快速升高至20 km以上时, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 快速下降,最低值可达0.01,这意味着空气中仅存在极少的细粒子,考虑到细粒子贡献了气溶胶中绝大部分的数浓度和表面积,并直接影响大气中可见光的透射,细粒子浓度降低导致的散射消光作用减弱是造成能见度变好的主要原因。分析 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的时间变化特征(图2),可以发现,多数情况下两者存在相一致的变化趋势,所不同之处在于 $PM_{2.5}$ 增长幅度大于 PM_{10} ,这也是 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 增大的原因,但在冷锋过境期间, $PM_{2.5}$ 快速下降,在1~2 h内由近 $200 \mu g \cdot m^{-3}$ 降至仪器检测限附近,而 PM_{10} 质量浓度下降速率明显慢于 $PM_{2.5}$,这与来自于西北方向的冷锋所携带的大量沙尘有关。

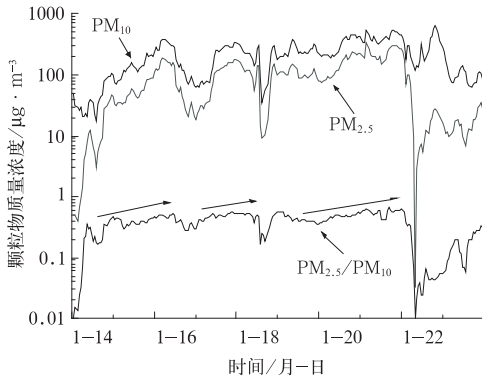


图2 观测期间内污染过程中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 变化

Fig. 2 Variations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration and their ratio ($PM_{2.5}/PM_{10}$) during the observation period

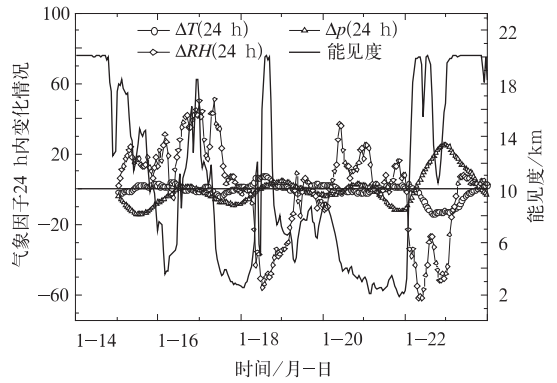


图4 观测期间内能见度与变温(单位: $^{\circ}C$)、变湿(单位: $\%$)和变压(单位: hPa)的关系

Fig. 4 Relation between temperature change (unit: $^{\circ}C$), relative humidity change (unit: $\%$) and pressure change (unit: hPa) and visibility

标志性天气事件,也可作为能见度预报预测的重要参数,这将在以后的研究中进一步分析和讨论。

2.4 后向轨迹分析

观测中后期(2009年1月19—23日)大气能见度经历了持续下降至突然反弹的快速发展过程,其小时值从9 km左右逐渐降至不足2 km,耗时约2 d,其后在数小时之内迅速升高至20 km,这种“缓慢降低—迅速反弹”的变化趋势一方面受细粒子等污染物的积累影响,另一方面也与观测后期发生的一次寒潮过程有关。考虑到细粒子浓度与能见度的高相关性,颗粒物的锯齿形污染过程可用来解释能见度的锯齿形过程^[24],但不同高度冷空气推进速度不一, $PM_{2.5}$ 浓度的垂直分布也不尽一致,分析 $PM_{2.5}$ 质量浓度垂直差异及来源对于研究大气能见度变化过程具有一定的科学意义。

以中国气象局天津大气边界层观测站(39.10°N,117.17°E)为参考点,选取观测仪器所在高度(3、40和220 m)作为高度层,计算2009年1月20—23日每日00:00(北京时,下同)的后向轨迹,追踪抵达天津的气团过去24 h的轨迹,用于分析影响不同高度气溶胶浓度的气团来源。

1月20日00时地面大气能见度为8.99 km,风速为 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度为36%,大气层结较稳定,各层 $PM_{2.5}$ 质量浓度处于 $61.24 \sim 108.76 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中220 m处最高,后向轨迹显示天津边界层各高度均受偏南低气流控制(如图5a),途经河北南部、山东等地的偏南气团,带来了一定程度的大气

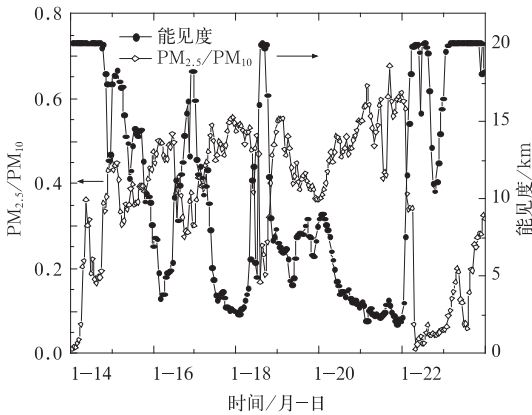


图3 观测期间内 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 与能见度的相关性

Fig. 3 Correlation between $PM_{2.5}/PM_{10}$ and visibility

影响能见度的主要因素还包括相对湿度、风等气象要素,考虑到冬季的气温、相对湿度、风等气象因子变化剧烈,采用气温、相对湿度及气压的24 h变化值来说明气象条件对能见度的影响。如图4所示,观测期的大部分时间内气温和气压变化不明显,多数时间24 h变温在 $5^{\circ}C$ 以内,24 h变压在10 hPa左右,相对湿度变化较为明显,相对湿度升高往往对应能见度的降低,从两者具有较高的相关系数($R^2 = 0.49$)可以看出这种高度负相关关系;伴随寒潮的冷锋过境期间,与能见度快速升高相对应的是气温下降、气压上升和相对湿度下降,24 h这3种气象因子变值最大分别可达到 $-14.5^{\circ}C$ 、25.4 hPa和 -62% ,剧烈的天气变化是寒潮来袭和清除污染物的

细粒子污染,从 220 m 处 PM_{2.5} 质量浓度最高可以看出西南输送特征明显。

1 月 21 日 00 时地面大气能见度仅为 3.27 km, 风速为 0.2 m · s⁻¹, 相对湿度为 61%, 静风高湿的天气利于 PM_{2.5} 质量浓度维持在较高水平(地面和 40 m 处浓度分别为 209.12 和 203.99 μg · m⁻³), 220 m 处仅为 28.69 μg · m⁻³, 细粒子浓度在垂直方向上的巨大差异可以用后向轨迹的高度分布来解释原因,220 m 处的气团主要来自于天津西北的内蒙古等地,在没有沙尘发生的天气,这部分气团较为清洁,主要途经 500~1500 m 高空的气团,较少受到沿线地区气溶胶污染,清洁的外来气团在高空快速取代本地污染气团,造成 220 m 处细粒子浓度迅速降低;而地面和 40 m 处的细粒子主要受来自于山西、河北等地的低空西南或偏西气流影响,气流移动过程中携带了大量沿线地区和天津本地的污染气

溶胶,且低风速利于气溶胶积聚,较低的边界层高度造成地面和 40 m 处 PM_{2.5} 质量浓度较高,这是造成当日霾天气主要发生在地面和低空的重要原因。

1 月 22 日 00 时地面风向以西南为主,风速较低(1.3 m · s⁻¹),静稳天气有利于污染物聚集,大气能见度低至 3.25 km,3、40 和 220 m 三层 PM_{2.5} 质量浓度范围为 176.71~235.72 μg · m⁻³,从当时的后向轨迹可以看出,地面和 40 m 处气流呈局地流动特征,24 h 轨迹主要集中在天津周边范围约 100 km 以内的区域,局地污染成为影响天津空气质量和大气能见度的主要因素,韩素芹等^[27]通过分析 220 m 处 PM_{2.5} 质量浓度的风图得出天津细粒子主要来源于本地污染;220 m 处气流虽来自较为清洁的 500 m 高空,但在下降过程中途经天津北部地区时也可能携带了部分污染气溶胶,造成边界层 PM_{2.5} 聚集,从而增大其质量浓度。

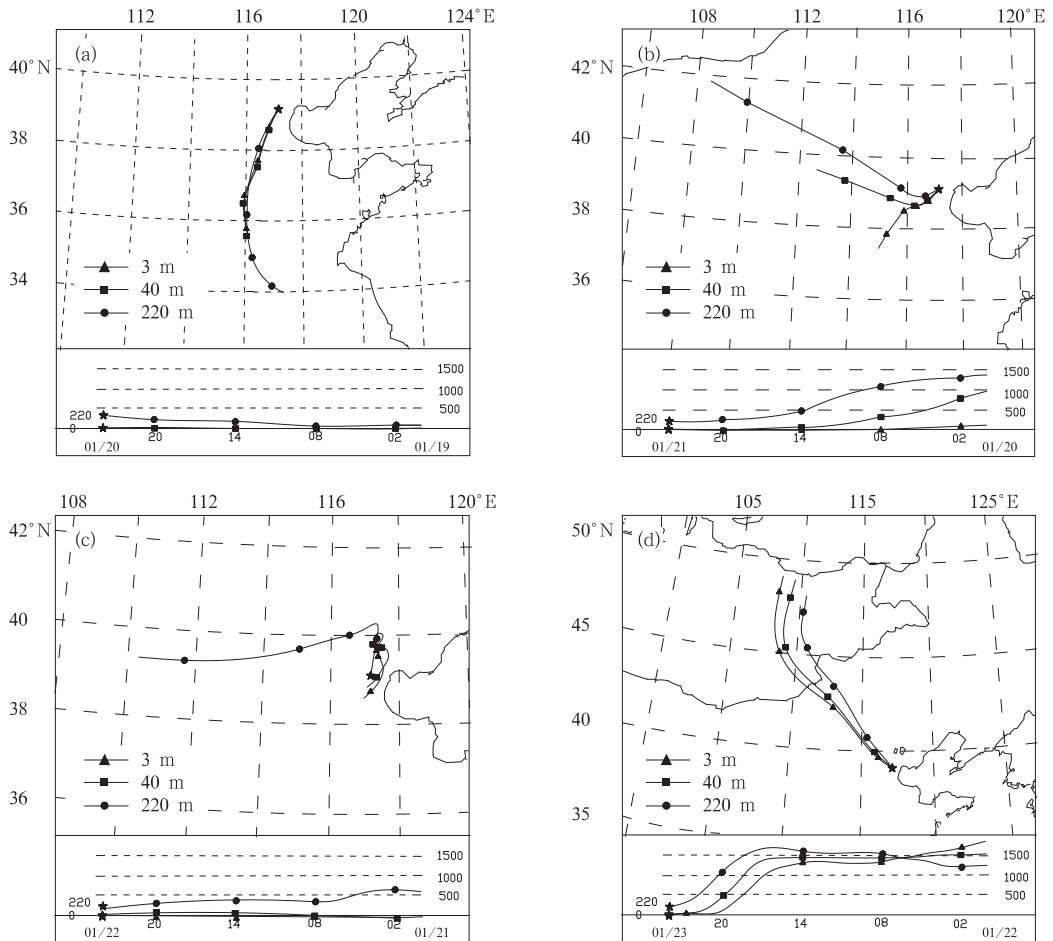


图 5 2009 年 1 月 20 日(a),21 日(b),22 日(c),23 日(d)00 时后向轨迹

Fig. 5 The back trajectories at Tianjin at

(a) 00 BT 20, (b) 00 BT 21, (c) 00 BT 22 and (d) 00 BT 23, January 2009

1月22日12时以后中国东北、华北等地发生寒潮(以24h变温低于 -10°C 作为判定标准),剧烈降温和大风成为本次天气过程的主要特征,最大24h变温值发生在16时达到 -14.5°C ,地面最大风速发生在19时,达到 $8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大24h变温值也达到 -62% (22日07时),大气能见度也从寒潮发生前的最低值 1.89 km (21日20时)迅速上升至 20 km 以上(22日07时),寒潮携带的来自于西伯利亚、蒙古国、东北等地的清洁气团一方面快速取代本地污染气团,另一方面来自于高空的冷气团快速移动,增大本地混合层高度,寒潮所带来的降温和除湿作用抑制了气溶胶,尤其是细粒子浓度增长所需的高温高湿环境,对边界层气溶胶污染有很好的清洗作用,近地层污染物浓度迅速下降,大气能见度快速升高,至23日00时3、40和220m三层 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度分别降低至 13.58 、 8.31 和 $13.52\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均远远低于此前的观测数值,大气能见度自22日午后一直维持在 10 km 以上,且大部分时间表现为“非常好”(19km以上),3条24h后向轨迹的运行方向和移动速度也基本一致,表明天津城市边界层各高度均受来自于 1500 m 高空西北气流控制,大气层结弱不稳定,边界层内的污染物得到比较彻底的清除。

3 结 论

(1) 造成2009年1月天津地区低能见度事件的主要原因在于持续增高的大气气溶胶浓度,尤其是细粒子浓度,直接决定了水平能见度的高低。

(2) 细粒子在可吸入颗粒物中的富集,是造成持续性污染和能见度连续下降的主要原因,西南暖湿气流控制下的静稳天气有利于污染物聚集,而以大风降温为标志的冷锋过境是细粒子清除的重要机制。

(3) 能见度的周期性变化主要依赖于细粒子的富集和污染物的快速清除,并且这一过程受到周期性天气系统的影响。

参考文献

- [1] 张剑鸣,陶俊,张仁健,等. 2008年1月广州大气污染特征能见度观测研究[J]. 环境科学研究,2008,21(6):161-165.
- [2] 吴兑,邓雪娇,毕学岩,等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J]. 热带气象学报,2007,23(1):1-6.
- [3] 黄健,吴兑,黄敏辉,等. 1954—2004年珠江三角洲大气能见度变化趋势[J]. 应用气象学报,2008,19(1):61-70.
- [4] 张浩,石春娥,谢伟,等. 安徽省1955—2005年城市大气能见度变化趋势[J]. 气象科学,2008,28(5):515-520.
- [5] 林盛群,林莽,万军明,等. 香港大气能见度与污染物长期变化的特征和相互关系[J]. 中国环境科学,2009,29(4):351-356.
- [6] 范引琪,李春强. 1980—2003年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究[J]. 高原气象,2008,27(6):1392-1400.
- [7] 范引琪,李二杰,范增禄. 河北省1960—2002年城市大气能见度的变化趋势[J]. 大气科学,2005,29(4):526-535.
- [8] 刘宁微,马雁军,王扬锋,等. 丹东市大气颗粒物质量浓度变化特征及其与能见度的关系[J]. 环境科学研究,2010,23(5):642-646.
- [9] 林云,孙向明,张小丽,等. 深圳市大气能见度与细粒子浓度统计模型[J]. 应用气象学报,2009,20(2):252-256.
- [10] 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.
- [11] 宋宇,唐孝炎,张远航,等. 北京市大气能见度规律及下降原因[J]. 环境科学研究,2003,16(2):10-12.
- [12] 王京丽,刘旭林. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量关系初探[J]. 气象学报,2006,64(2):221-227.
- [13] 赵习方,徐晓峰,王淑英,等. 北京地区低能见度区域分布初探[J]. 气象,2002,28(11):55-57.
- [14] 陈静,吴兑,刘啟汉. 广州地区低能见度事件变化特征分析[J]. 热带气象学报,2010,26(2):156-164.
- [15] 吴兑,吴晟,李海燕,等. 穗港晴沙两重天——2010年3月17—23日珠三角典型灰霾过程分析[J]. 环境科学学报,2011,31(4):695-703.
- [16] 段玉森,束炯,张弛,等. 上海市大气能见度指数指标体系的研究[J]. 中国环境科学,2005,25(4):460-466.
- [17] 郝天依,王式功,尚可政,等. 环渤海地区低能见度气候特征及影响因子分析[J]. 气象,2012,待发表.
- [18] 周贺玲,李丽萍,乐章燕,等. 河北省雾的气候特征及趋势研究[J]. 气象,2011,37(4):462-467.
- [19] 姚青,张长春,樊文雁,等. 天津冬季大气能见度与空气污染的相互关系研究[J]. 气象科技,2010,38(6):704-708.
- [20] 张凯,柴发合,陈义珍,等. 天津武清能见度特征分析[J]. 气候与环境研究,2008,13(6):800-806.
- [21] 刘强,何清,杨兴华,等. 塔克拉玛干沙漠腹地冬季大气稳定度垂直分布特征分析[J]. 干旱气象,2009,27(4):308-313.
- [22] 胡波,王跃思,刘广仁. 北京城市紫外辐射变化特征及经验估算方程[J]. 高原气象,2007,26(3):511-518.
- [23] Air Resources Laboratory. HYSPLIT Trajectory Model [EB/OL]. <http://ready.arl.naa.gov/hysplit-bin/trajtype.pl?runtype=archive>.
- [24] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003:24-25.
- [25] 中国气象局. 霾的观测和预报等级. QX/T 113-2010 中华人民共和国气象行业标准[S]. 北京:气象出版社,2010.
- [26] 贺克斌,贾英韬,马永亮,等. 北京大气颗粒物污染的区域性本质[J]. 环境科学学报,2009,29(3):482-487.
- [27] 韩素芹,李培彦,李向津,等. 天津市近地层 $\text{PM}_{2.5}$ 的垂直分布特征[J]. 生态环境,2008,17(3):975-979.