

王峰云, 王自发, 阎凤霞. 2010. 华东地区一次持续大雾过程及其与空气污染相互作用分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 685–694.
Wang Fengyun, Wang Zifa, Yan Fengxia. 2010. A study of a continuous heavy fog process in East China and the interaction between the fog and air pollution [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 685–694.

华东地区一次持续大雾过程及其 与空气污染相互作用分析

王峰云^{1,2,3} 王自发¹ 阎凤霞²

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 民航华东地区空中交通管理局气象中心, 上海 200335

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 2008年1月7~11日期间, 华东地区自北向南出现了一次持续大雾过程, 分别影响到山东、江苏、安徽、上海、浙江、福建等地, 并伴随有轻至中度空气污染, 对当地生活、生产、运输造成严重影响。利用地面探测和探空资料、NCEP/NCAR再分析资料及MM5数值模拟结果等资料, 分别从天气形势分析、水汽条件、动力因子、温度层结、空气质量变化等多方面入手, 对此次大雾过程的成雾条件及空气污染对持续大雾的贡献进行诊断分析。分析指出, 近地面层水汽通量散度、垂直速度以及500 hPa与1000 hPa散度差与能见度无显著相关, 近地面相对湿度(R_h)与能见度呈明显反相关, 近地面温度递减率(γ)与能见度呈明显正相关, 可以把 $R_h \geq 85\%$ 、 $\gamma < 0.2\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 作为大雾形成的必要条件。另外, 选取与空气污染指数(API)相同时间段(前一日04时至当日03时, 协调世界时)上海虹桥机场的航空能见度最低值与API对比发现, 航空能见度最低值与API呈强烈的反相关, 空气污染对大雾形成或维持具有显著的促进作用, 可以把“API上升达到150”作为上海虹桥机场出现大雾的一个重要的判断条件。

关键词 雾 能见度 空气污染指数 诊断分析

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0685-10 **中图分类号** P426.4 **文献标识码** A

A Study of a Continuous Heavy Fog Process in East China and the Interaction between the Fog and Air Pollution

WANG Fengyun^{1,2,3}, WANG Zifa¹, and YAN Fengxia²

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Meteorological Center of East China Air Traffic Management Bureau, Shanghai 200335*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract A continuous heavy fog process and air pollution occurred in East China during 7–11 January 2008. Based on the synoptic data, NCEP/NCAR reanalysis data set and MM5 model outputs, the surface circulation, water vapor condition, dynamic factor, temperature stratification, and air quality are analyzed in detail. It is concluded that the surface moisture flux divergence, vertical velocity, and the divergence difference between 1000 hPa and 500

收稿日期 2010-05-08 收到, 2010-07-03 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2005CB42220 和中国科学院大气物理研究所联合创新青年学者计划 IAP07313

作者简介 王峰云, 男, 1970年出生, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事航空气象预报及空气污染相关作用研究。
E-mail: wangfy@atmb.cn

hPa are not significantly correlative with the visibility, while the relative humidity near the surface is significantly negatively correlative, the temperature lapse rate (γ) near the surface is significantly positively correlative with the visibility, therefore, $RH \geq 85\%$ 、 $\gamma < 0.2\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ could be regarded as the necessary conditions of fog formation. In addition, the lowest visibility in Shanghai Hongqiao International Airport during the period of 0400 UTC on the previous day to intraday 0300 UTC is intensely negatively correlative with the Air Pollution Index (API) in the meantime. The API rising up to 150 could be an important criterion of fog formation in Shanghai Hongqiao International Airport.

Key words fog, visibility, Air Pollution Index, diagnostic analysis

1 引言

复杂天气是影响航空运行安全与效益的重要因素,而雾、霾等低能见度气象条件对起飞阶段的航空器运行安全的影响几乎列在各类复杂天气条件之首。赵庆云等(2003)、吴兑等(2006)研究表明,近年来,随着大气环境的变化,大气污染物浓度增加,也直接导致了能见度的下降。苏维瀚等(1986)、孟燕军等(2000)、王淑英等(2003)、王喜全等(2007)、隋珂珂等(2007)、王璟等(2008)研究了气象条件、大气能见度与大气污染相互关系,发现能见度的变化与空气污染程度的变化密切相关。因此,加强对航空能见度与相关气象条件和空气质量相互关系的研究,有助于提高航空能见度的预报水平,最大程度减少持续性、区域性低能见度事件对飞行的不利影响,对于确保飞行安全和提高民航运输业的经济社会效益,具有非常重要的现实意义。

本文利用地面探测和探空资料、NCEP/NCAR再分析资料、空气污染指数(API)、MM5数值模拟等资料和手段,分别从天气形势分析、水汽条件、动力因子、温度层结、空气质量等多方面入手,对2008年1月7~11日上海及周边地区大雾过程的成雾条件及大气污染对持续大雾的贡献进行分析,探究大气污染与低能见度的关系,为上海虹桥机场乃至华东地区的大雾预报提供参考。

2 天气形势及大雾过程描述

2008年1月7~11日,华东地区出现了一次大范围持续大雾天气过程。这次大雾天气过程严

重扰乱了华东地区乃至全国范围的民航运输秩序,且持续大雾期间,当地大气环境质量恶化,对人民生活造成严重影响。

如图1所示,1月6~9日,北方冷空气主要在黄河以北活动,华东地区地面受均压场控制,气温日渐回升。9~11日,冷空气从东路扩散南下,依次影响华东地区的山东、江苏北部、安徽等地,同时,受西南倒槽发展和切变线东伸影响,江苏南部、上海、浙江、福建处于倒槽前部,近地面辐合,海上平流作用加强,有较强的暖湿气流输送。

在此天气形势下,6日,华东大部天气晴好;7~9日,山东、江苏、安徽、上海出现持续大雾,济南、青岛、合肥、南京、上海虹桥、上海浦东、杭州、宁波、温州等机场相继出现迷雾天气;9日下午,山东大雾消散,但苏、皖、沪、浙区域仍维持大雾天气,上海虹桥、上海浦东、合肥、南京、杭州、温州等机场大雾持续到11日(图2)。11日晚,随着北方冷空气大举南下,连日来影响华东地区的低能见度天气宣告结束。

3 大雾过程气象条件分析

稳定的大气层结、近地面充沛的水汽及其湍流混合作用以及适当的非绝热作用,对大雾形成和维持十分重要。本文将引入2 m高度相对湿度(R_h)、1000 hPa水汽通量散度、1000 hPa垂直速度、2 m至975 hPa温度递减率(γ)等物理量,对2008年1月7~11日华东地区持续大雾期间的水汽条件、动力因子以及非绝热因子进行分析。

3.1 水汽条件分析

利用2008年1月7~11日地面和探空资料、NCEP $1^{\circ}(\text{纬度}) \times 1^{\circ}(\text{经度})$ 再分析资料对1000~

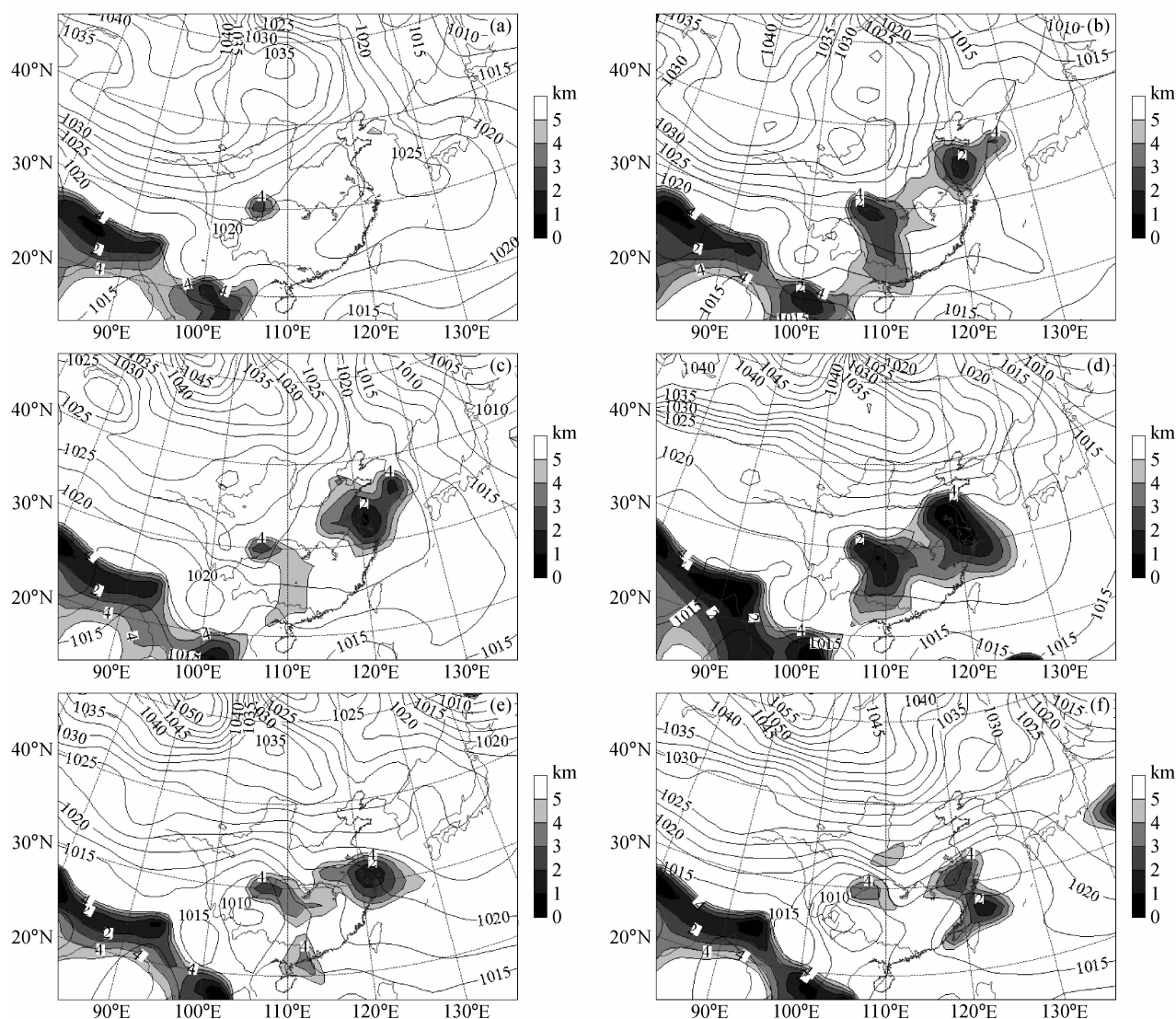


图1 2008年1月6~11日海平面气压(单位:hPa)及低能见度分布:(a)1月6日00时(协调世界时,下同);(b)1月7日00时;(c)1月8日00时;(d)1月9日00时;(e)1月10日00时;(f)1月11日00时

Fig.1 Distributions of the sea level pressure (units: hPa) and low visibility during 6-11 January 2008: (a) 0000 UTC 6 Jan; (b) 0000 UTC 7 Jan; (c) 0000 UTC 8 Jan; (d) 0000 UTC 9 Jan; (e) 0000 UTC 10 Jan; (f) 0000 UTC 11 Jan

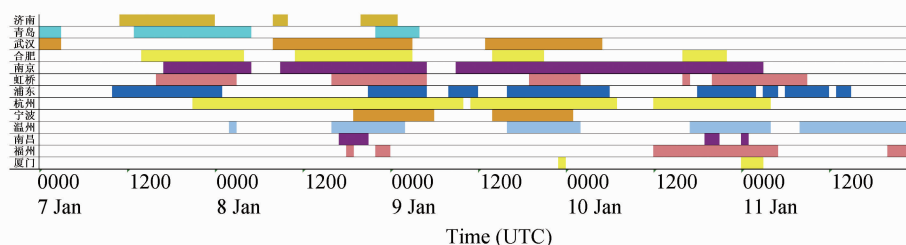


图2 2008年1月7~11日部分民航机场大雾持续时间

Fig.2 Fog duration at some airports during 7-11 Jan 2008

500 hPa 各层的水平流场(图略)、水汽通量散度进行分析发现,7~9日,华东地区1000~925

hPa水汽通量辐合中心主要在鲁、皖、苏、沪区域,与雾区有较好的对应关系;9~11日,水平

流场汇聚以及沿海水汽通量辐合的共同作用,也与苏、浙、沪地区的大雾发生时间基本同步,850、700、500 hPa 3层的水汽通量散度和流场则与地面能见度对应不佳。这说明近地面 1000~925 hPa 的水汽辐合在这次大雾过程中起到较直接的作用。

此外,7~9 日大雾区的水汽通量散度值明显低于 9~11 日大雾区的水汽通量散度值,水汽来源也有显著不同,前期水汽主要表现为从西南和北面较弱的水汽输送,后期则表现为海上较强烈的平流输送,这也决定了 7~9 日与 9~11 日间的持续大雾成雾机制不同。

尽管此次大雾过程体现出显著的区域性特点,但能见度变化具有很强的局地性特征,本文将就此次大雾过程上海的气象条件与能见度的变化关系开展研究。如图 2 所示,7~11 日期间,上海虹

桥机场共出现 4 次持续大雾,起雾时间分别为 7 日 16:30 至 8 日 01:30、8 日 16 时至 9 日 04 时、9 日 19:30 至 10 日 01 时和 10 日 20 时至 11 日 09 时。与此相对应,如图 3 和图 4 所示,每次起雾前 R_h 都升高至 80% 以上,比虹桥机场的起雾时间提前约 2~3 h,在雾消时段 R_h 又快速回落至 40%~70% 之间;1000 hPa 水汽通量散度的变化与大雾有一定的对应关系,除 8 日晚至 9 日上午水汽通量散度为正外,其余起雾时段均表现为水汽通量辐合。这说明趋于饱和的水汽是起雾的关键条件,同时, R_h 降低与雾消也有良好的对应关系,水汽通量散度则代表环境流场和周边水汽对上海本地水汽条件的贡献。

3.2 动力条件分析

为探究大雾发展维持的动力机制,本节针对虹桥机场的近地面散度、垂直速度及高低空散度

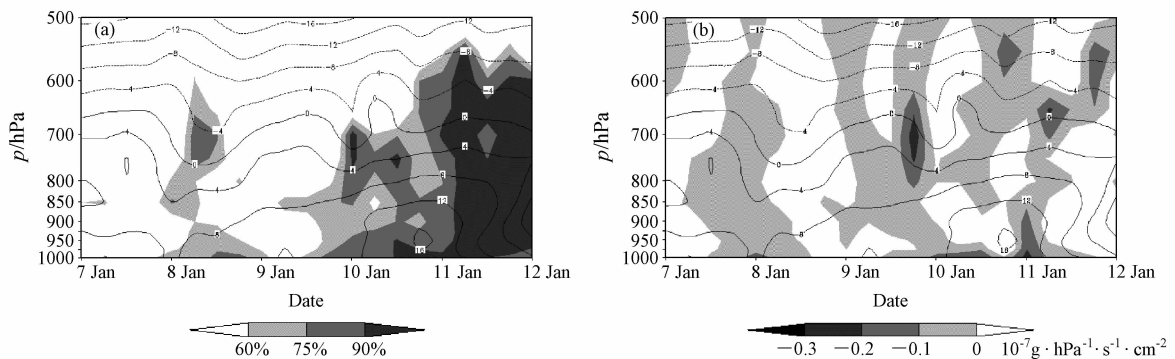


图 3 2008 年 1 月 7~11 日上海 (a) 温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和相对湿度、(b) 温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和水汽通量散度时间—高度剖面

Fig. 3 Time-height cross sections of (a) temperature ($^{\circ}\text{C}$) and relative humidity, and (b) temperature ($^{\circ}\text{C}$) and moisture flux divergence in Shanghai during 7-11 Jan 2008

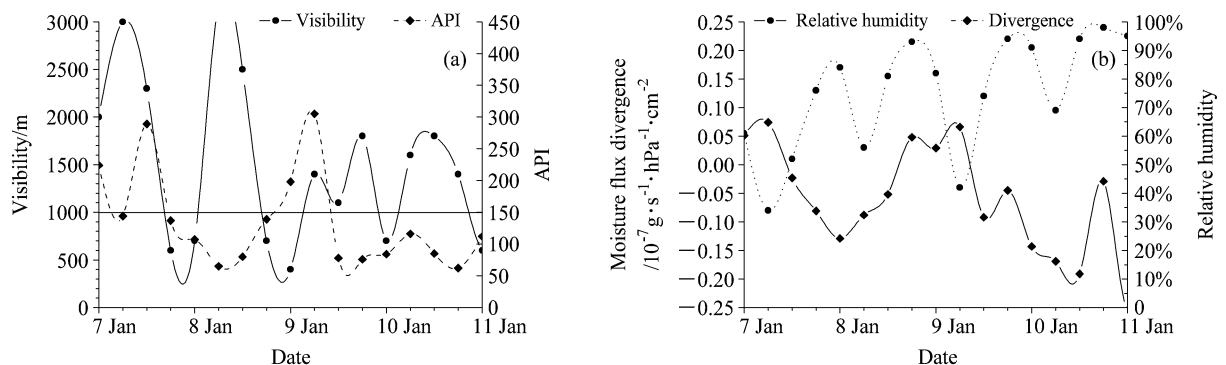


图 4 2008 年 1 月 7~11 日上海 (a) API 和能见度、(b) 相对湿度和水汽通量散度

Fig. 4 (a) API (Air Pollution Index) and visibility, and (b) relative humidity and moisture flux divergence in Shanghai during 7-11 Jan 2008

差等气象物理量进行分析。

如图 5 所示, 4 个大雾时段 1000~925 hPa 平均散度均为负值, 说明大雾期间近地面均存在辐合作用, 有利于水汽的汇聚; 7~11 日期间, 除 8 日晚至 9 日上午外, 500 hPa 散度始终大于 1000 hPa, 散度差为正, 有利于在 1000~500 hPa 整层内保持总体上升运动, 这与图 6 的垂直速度图相吻合。初步分析认为, 近地面的辐合作用是 2008 年 1 月 7~11 日 (8 日晚至 9 日上午除外) 虹桥机场大雾生成的重要动力机制。近地面辐合和弱上升气流的存在有利于周边的水汽和气溶胶的汇聚, 而 925 hPa 以上的下沉运动与 925 hPa 以下的上升运动有助于边界层逆温的形成和维持, 既有利于水汽和气溶胶在近地面层的湍流混合, 又阻止水汽和气溶胶向高层输送, 为雾的形成和维持创造

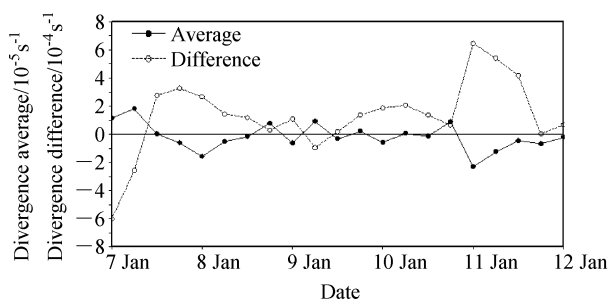


图 5 2008 年 1 月 7~11 日上海 1000~925 hPa 平均散度和 500 hPa 与 1000 hPa 散度差

Fig. 5 Averaged divergence from 1000 hPa to 925 hPa and divergence difference between 500 hPa and 1000 hPa in Shanghai during 7-11 Jan 2008

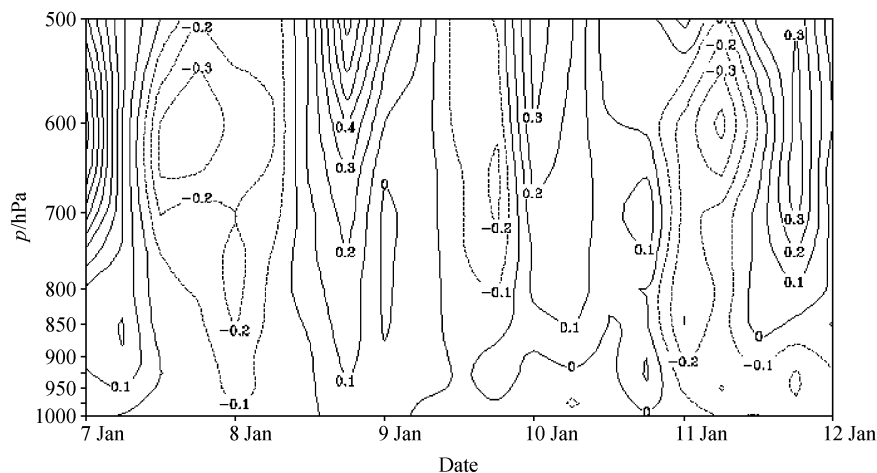


图 6 2008 年 1 月 7~11 日上海垂直速度 (单位: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) 时间—高度剖面

Fig. 6 Time-height cross section of the vertical velocity (units: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) in Shanghai during 7-11 Jan 2008

了条件。

3.3 温度层结分析

由图 7 可见, 2008 年 1 月 7~11 日虹桥机场上空始终存在接地逆温, 有时还出现双逆温层。4 个大雾时段地面至 975 hPa 温度递减率 (γ) 分别达到 $-0.08 \sim -0.91 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$, 有强烈逆温, 且在每次大雾形成 4~6 h 前即已形成显著逆温 [$\gamma \leq 0.0 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$]; 在大雾消散时接地逆温消失, γ 分别达到 $0.95 \sim 1.30 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。11 日 06 时, 地面至 975 hPa γ 为 $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$, 近地面逆温完全破坏, 取而代之的是 900~750 hPa 间强烈的锋面逆温, 大雾消散。

由此可见, 近地面层形成逆温能够有效阻止水汽和气溶胶向高层输送, 并与辐合作用相配合, 有利于低层水汽、气溶胶的累积增加, 促使浓雾形成或浓度增强。接地逆温层的出现与大雾形成和维持具有显著的对应关系, 且达到 $\gamma \leq 0.0 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 的时间比大雾形成早 4~6 h。事实上, 将虹桥机场能见度与上述各气象因子做相关分析可以发现, 能见度与 γ 的相关系数最高, 达 0.6 以上, 因此, 可以把形成接地逆温层以及 $\gamma \leq 0.0 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 作为大雾形成的重要预报因子。

3.4 数值模拟的液态水含量分析

一般认为 (樊琦等, 2004), 雾中液态水含量的范围为 $0.05 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本文取 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为雾区临界值, 并运用 MM5 做 72 h 数值模拟, 分别从 2008 年 1 月 6 日 00 时和 8 日 00 时起报。

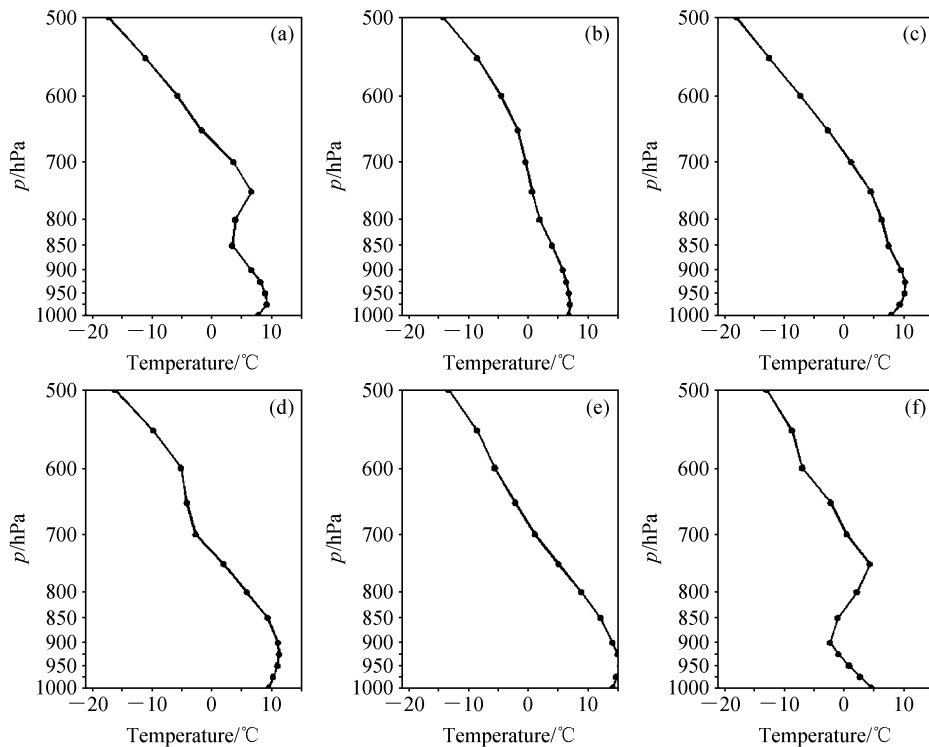


图7 2008年1月7~12日上海温度垂直廓线: (a) 1月7日00时; (b) 1月8日00时; (c) 1月9日00时; (d) 1月10日00时; (e) 1月11日00时; (f) 1月12日00时

Fig. 7 Temperature profiles in Shanghai during 7–12 Jan 2008; (a) 0000 UTC 7 Jan; (b) 0000 UTC 8 Jan; (c) 0000 UTC 9 Jan; (d) 0000 UTC 10 Jan; (e) 0000 UTC 11 Jan; (f) 0000 UTC 12 Jan

从图8可以看出, 8~11日早晨华东地区的雾区水平分布与实况非常接近, 说明模式较成功地模拟了华东地区这次持续大雾过程。

进一步研究图9发现, 6日00时至9日00时的模拟过程成功地揭示了上海虹桥机场7日夜至8日晨的大雾过程, 模拟液态水含量在2008年1月7日16时至8日01时出现爆发性增长, 最大值达到 $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 但8日夜至9日晨的模拟液态水含量仅为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 这与NCEP再分析数据表现的相对湿度偏低及水汽散度通量为正的现象相吻合。基于以上分析可以认为, 8日夜至9日晨上海水汽含量偏低、低层辐散下沉, 不具备成雾的气象条件, 需要从空气质量变化等方面分析光学视程障碍的原因。

8日00时至11日00时的模拟过程成功地揭示了上海虹桥机场8日夜至9日晨、10日夜至11日晨的大雾过程, 模拟液态水含量分别在8日15时至9日02时和10日20时至11日00时出现爆发性增长, 最大值分别达到 0.4 和 $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以

上, 模拟的生消时间与实况基本一致, 但9日夜至10日晨模拟液态水含量不足 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对比结果说明, 中尺度数值模式能较成功模拟区域性大雾过程, 但定点预报能力尚有不足。

4 空气污染对航空能见度的影响

本次持续大雾过程初期, 华东地区主要受地面变性高压控制, 气压梯度小, 后期转受低压倒槽影响, 气温大幅回升, 地面风速低。7~9日, 上海地区近地面平均风速为 $1 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 9日晚至11日晨转东南风, 平均风速为 $3 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于风速小, 空气中大气污染物的稀释、扩散条件差。7~11日, 上海市API分别为121、149、123、119、92, 处于轻微到轻度污染等级, 主要污染物为PM₁₀ (图10)。

图11合成了中华人民共和国环境保护部公布的全国重点城市空气质量日报数据和同日00时NCEP再分析10 m风数据。由图11可见, 2008

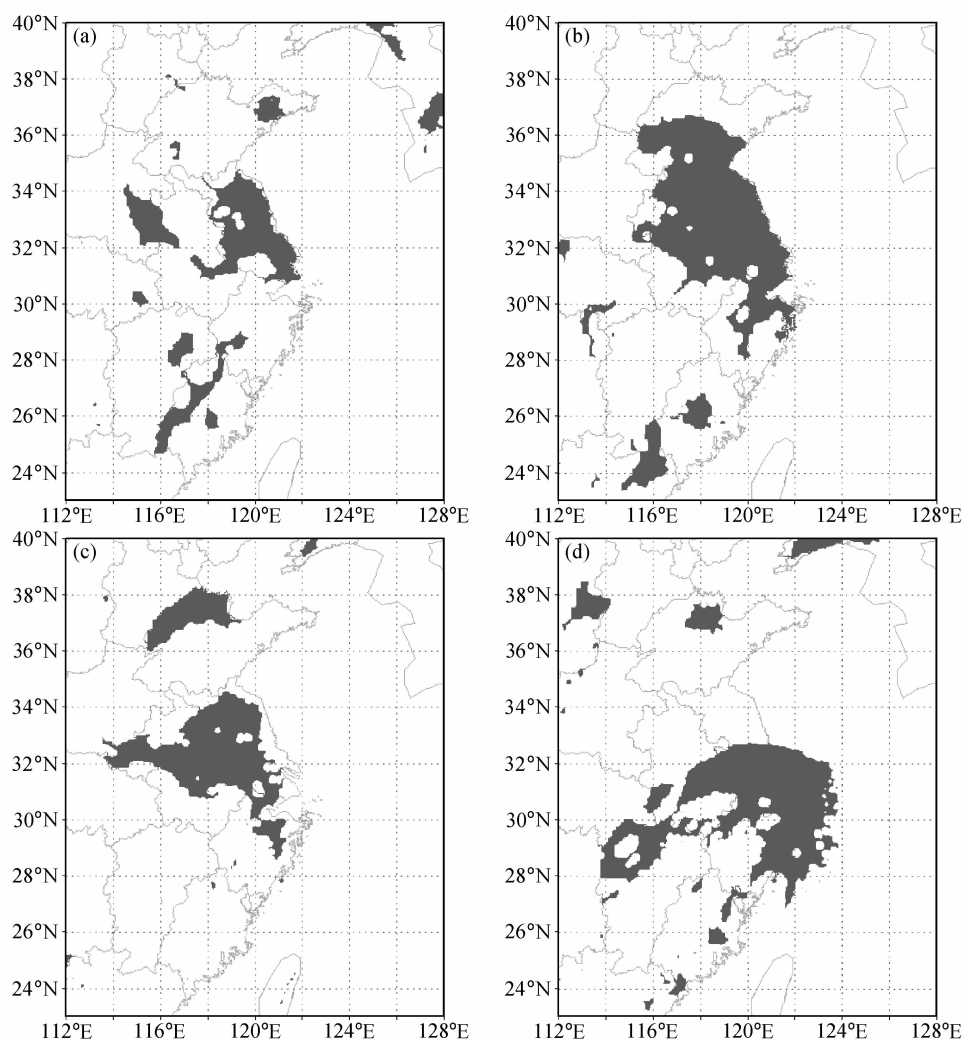


图 8 MM5 模拟的 2008 年 1 月 8~11 日 00 时的雾区：(a) 1 月 8 日 00 时；(b) 1 月 9 日 00 时；(c) 1 月 10 日 00 时；(d) 1 月 11 日 00 时
Fig. 8 Fog areas simulated by MM5 model at 0000 UTC during 8–11 Jan 2008: (a) 0000 UTC 8 Jan; (b) 0000 UTC 9 Jan; (c) 0000 UTC 10 Jan; (d) 0000 UTC 11 Jan

年 1 月 6 日，在我国新疆、河套地区、内蒙古东部都有轻度以上空气污染。7 日开始，山东境内、长江中下游地区陆续出现轻至中度污染，受气流输送的影响，8~10 日，长江口区污染加剧。与此相对应，长江口区 8~11 日连日出现大雾，上海虹桥机场累计大雾时间超过 40 h。

为分析污染输送对上海的影响，以上海为起始点，利用 NOAA HYSPLIT 模型和 GDAS 数据作 300、600 和 1000 m 高度 48 h 后向轨迹（图 12）发现，9 日影响上海的空气来源可以从 600 m 高度追溯到 48 h 前的武汉，而武汉本地的 API 值已从 6 日的 132 升至 7 日的 181。与图 11 对比可以认为，7 日在长江中下游地区出现的轻至中度

空气污染通过平流输送，导致上海在 9 日早晨空气质量显著恶化，PM₁₀ 浓度陡升（图 4），能见度下降。这也解释了 9 日早晨上海相对湿度偏低、水汽通量散度为正、近地面辐散下沉的气象条件下依然出现持续迷雾天气的原因。

将 2008 年 1 月 7~11 日上海环境监测数据和机场能见度进行对比（图 4）发现，上海 PM₁₀ 浓度或 API 值和虹桥机场能见度呈显著反相关关系，当 API 达到或超过 150，则虹桥机场能见度降低至 1000 m 以下，可以把“API 上升达到 150”作为上海虹桥机场出现大雾的一个重要预报因子。

在我国，造成空气污染的首要污染物多为 PM₁₀。API 的高低直接反映了气溶胶尤其是

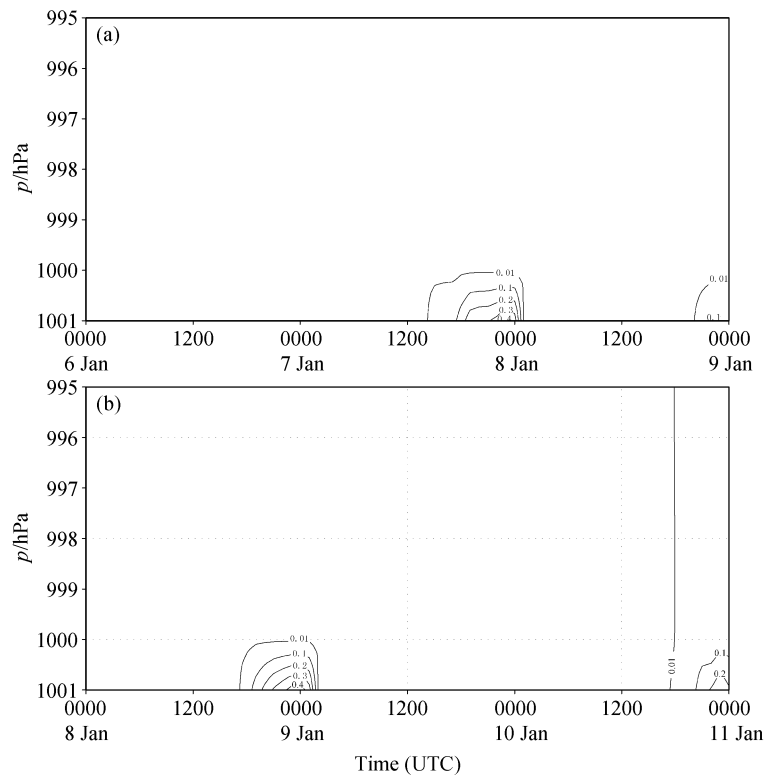


图9 MM5模拟的上海虹桥机场近地面雾中液态水含量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的时间-高度剖面:(a) 2008年1月6日00时至9日00时;(b) 2008年1月8日00时至11日00时

Fig. 9 Time-height cross section of the near surface liquid water contents (units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) in Shanghai Hongqiao Airport simulated by MM5 model: (a) from 0000 UTC 6 Jan to 0000 UTC 9 Jan 2008; (b) from 0000 UTC 8 Jan to 0000 UTC 11 Jan 2008

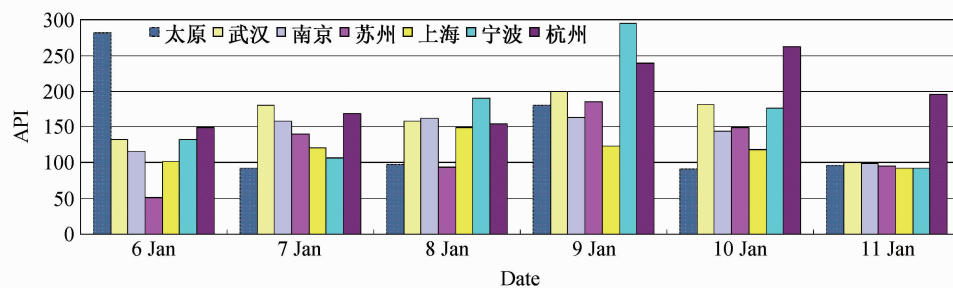


图10 2008年1月6~11日太原、武汉、南京、苏州、上海、宁波、杭州 API 指数

Fig. 10 API in Taiyuan, Wuhan, Nanjing, Suzhou, Shanghai, Ningbo, and Hangzhou during 6-11 Jan 2008

PM₁₀对光学视程的障碍程度,即API越大,PM₁₀浓度越高,光线在大气中受到的散射作用越强烈,越容易造成大气能见度降低。因此,空气污染对大雾形成或维持具有显著的促进作用。

5 结论

综上所述,2008年1月7~11日华东地区持

续大雾过程中,API、近地面逆温、近地面水汽汇聚等气象条件对上海持续大雾的形成具有显著的相关性,相比较而言,近地面辐合作用、低层垂直运动、1000~500 hPa散度差等动力因子对大雾形成的贡献较小。

(1)在不考虑空气污染的情况下,高湿度、近地面逆温是虹桥机场大雾的重要气象条件。其中,2 m高度相对湿度(R_h)与能见度呈明显反

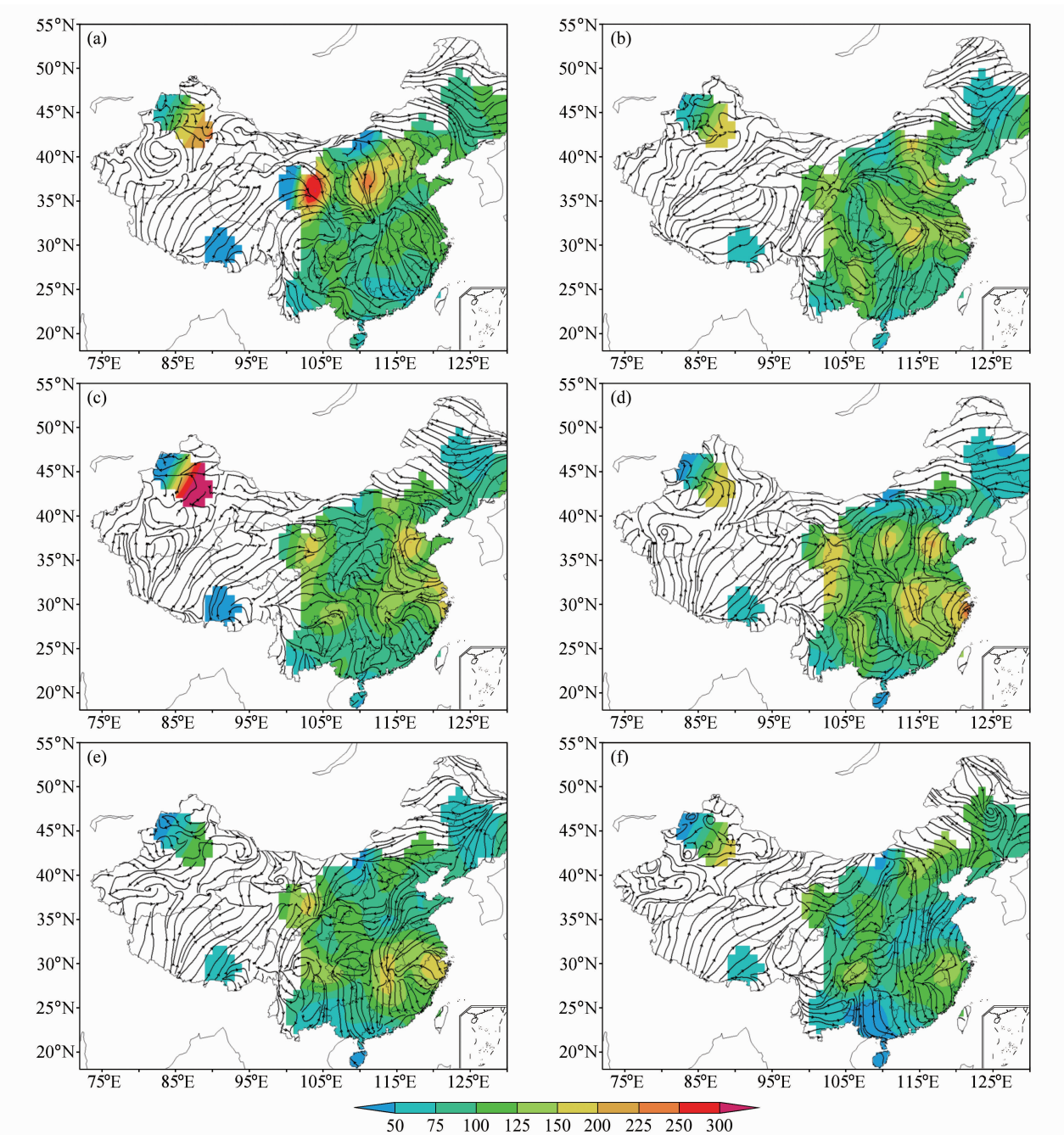


图 11 2008 年 1 月 6~11 日 API 分布及当日 00 时地面流场：(a) 1 月 6 日；(b) 1 月 7 日；(c) 1 月 8 日；(d) 1 月 9 日；(e) 1 月 10 日；(f) 1 月 11 日
Fig. 11 API distributions and surface stream lines at 0000 UTC during 6-11 Jan 2008: (a) 6 Jan; (b) 7 Jan; (c) 8 Jan; (d) 9 Jan; (e) 10 Jan; (f) 11 Jan

相关，近地面温度递减率 (γ) 与能见度呈明显正相关。可把 $R_h \geq 85\%$ 、 $\gamma < 0.0\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 作为大雾形成的预报因子，把 $\gamma > 0.65\text{ }^\circ\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 作为大雾消散的重要依据。

(2) 近地面垂直速度、温度平流、水汽通量

散度与能见度无显著相关。但近地面水汽辐合对大雾形成具有促进作用，同样，近地面散度场的变化与能见度有一定的相关性，近地面辐合能促进大雾的形成。

(3) 上游空气污染具有平流输送特征，来自

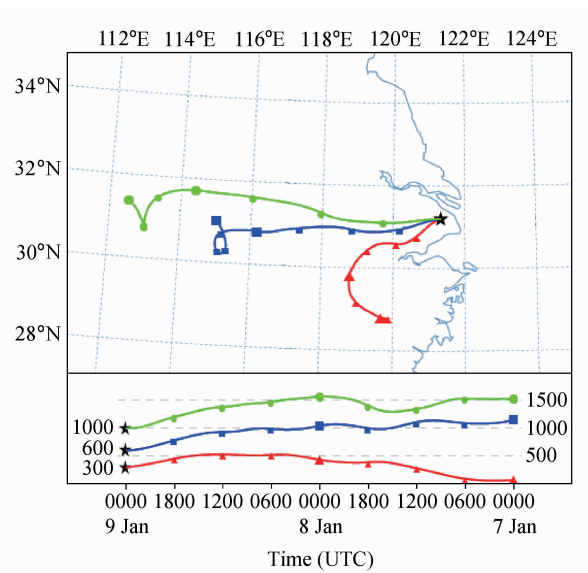


图 12 2008 年 1 月 9 日 0000 UTC 到达上海气团 300、600、1000 m 的 48 h 后向轨迹

Fig. 12 The 48-h backward trajectories of the air mass to Shanghai at the height of 300 m, 600 m, and 1000 m at 0000 UTC 9 Jan 2008

长江中下游地区的 PM₁₀ 输送导致上海 API 升高, 光学视程障碍加剧, 能见度下降。

(4) 空气污染对大雾形成或维持具有显著的促进作用。API 与相同时间段 (前一日 04 时至当日 03 时) 上海虹桥机场最低能见度呈强烈的反相关关系, 可以把“API 上升达到 150”作为上海虹桥机场出现大雾的一个重要的判断条件。

参考文献 (References)

- 樊琦, 王安宇, 范绍佳, 等. 2004. 珠江三角洲地区一次辐射雾的数值模拟研究 [J]. 气象科学, 24 (1): 1-8. Fan Qi, Wang Anyu, Fan Shaojia, et al. 2004. Numerical simulation study of a radiation fog in Pearl River delta regions [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 24 (1): 1-8.
- 孟燕军, 王淑英, 赵习方. 2000. 北京地区大雾日大气污染状况及气象条件分析 [J]. 气象, 26 (3): 40-42. Meng Yanjun, Wang Shuying, Zhao Xifang. 2000. An analysis of air pollution

- and weather conditions during heavy-fog days in Beijing area [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (3): 40-42.
- 苏维瀚, 张秋彭, 沈济, 等. 1986. 北京地区大气能见度与大气污染的关系初探 [J]. 大气科学, 10 (2): 138-144. Su Wei-han, Zhang Qiupeng, Shen Ji, et al. 1986. The relationship between visibility and air pollution in Beijing [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 10 (2): 138-144.
- 隋珂珂, 王自发, 杨军, 等. 2007. 北京 PM₁₀ 持续污染及与常规气象要素的关系 [J]. 环境科学研究, 20 (6): 77-82. Sui Keke, Wang Zifa, Yang Jun, et al. 2007. Beijing persistent pollution and its relationship with general meteorological features [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (6): 77-82.
- 王璟, 伏晴艳, 王汉峰, 等. 2008. 上海市一次罕见的连续 11 天空气污染过程的特征及成因分析 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 53-60. Wang Jing, Fu Qingyan, Wang Hanzhen, et al. 2008. Study on an infrequent multi-day air pollution episode in Shanghai [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 53-60.
- 王淑英, 张小玲, 徐晓峰. 2003. 北京地区大气能见度变化规律及影响因子统计分析 [J]. 气象科技, 31 (2): 109-114. Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Xu Xiaofeng. 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 31 (2): 109-114.
- 王喜全, 齐彦斌, 王自发, 等. 2007. 造成北京 PM₁₀ 重污染的二类典型天气形势 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 81-86. Wang Xiquan, Qi Yanbin, Wang Zifa, et al. 2007. The influence of synoptic pattern on PM₁₀ heavy air pollution in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 81-86.
- 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 Pearl River delta [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (4): 510-517.
- 赵庆云, 张武, 王式功. 2003. 空气污染与大气能见度及环流特征的研究 [J]. 高原气象, 22 (4): 394-396. Zhao Qingyun, Zhang Wu, Wang Shigong. 2003. A study on air pollution, visibility and general circulation feature [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (4): 394-396.