

杜传耀,于丽萍,王 緬,等. 2015. 对雾-霾过程的综合探测. 气象,41(12):1525-1530.

对雾-霾过程的综合探测^{*}

杜传耀¹ 于丽萍¹ 王 緬² 马京津¹ 李 栋¹
张春波¹ 孟 磊¹ 王 璐¹

1 北京市气象台,北京 100089
2 中国气象局气象探测中心,北京 100081

提 要: 通过大气细粒子激光雷达和台站探测仪器,探测北京一次雾-霾天气过程,结合地面观测和高空探测气象要素的变化,分析了该雾-霾天气过程能够持续的气象条件:(1)温度持续上升,相对湿度维持在 50% 以上,风速基本在 2 m·s⁻¹ 以下,高温、高湿、小风速等气象条件不利于颗粒物的迅速扩散;(2)逆温层的持续存在,大气对流减弱,阻止了颗粒物向高空扩散,颗粒物大量积累。以上两个主要原因造成了该雾-霾天气过程的持续。降水对颗粒物的冲刷、湿沉降作用以及冷空气的到来造成地面风力增大,促使了雾-霾天气过程的最终消散。从细粒子激光雷达探测结果发现,在每天中午雾-霾垂直高度都会降低,整个过程中细粒子激光雷达和地面仪器探测的结果基本一致,但通过激光雷达和 L 波段探空资料对比发现,在存在饱和水汽天气状况时,细粒子激光雷达探测雾-霾高度偏低。

关键词: 细粒子激光雷达, 雾-霾, 气象要素, 综合探测

中图分类号: P412 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.12.010

Comprehensive Detection of Fog and Haze Process

DU Chuanyao¹ YU Liping¹ WANG Mian² MA Jingjin¹ LI Dong¹
ZHANG Chunbo¹ MENG Lei¹ WANG Lu¹

1 Beijing Weather Observatory, Beijing 100089
2 Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081

Abstract: One fog and haze weather process was detected by an atmosphere fine-particle lidar and instruments of Beijing Weather Observatory. Combining the changes of surface observation and high-level weather elements, this paper analyzes the meteorological conditions for the maintenance of this fog-haze event. First, temperature continues to rise, humidity is above 50%, wind speed is basically below 2 m·s⁻¹, such conditions of high humidity, light wind are not conducive to rapid spread of particulate matter. Second, persistence of inversion layer and weakened atmospheric convection prevents the diffusion of particles to high altitude causing massive accumulation of particulate matter. The above two main reasons result in persistence of the fog and haze process. The fog and haze process is eventually dissipated by the rain erosion to particulate matter, the role of wet deposition and the increase of surface wind arrival. From detection results of atmosphere fine particle lidar we found the fog and haze vertical height reduces very quickly. The detection results of the fine particle lidar and ground instruments are basically the same. However, comparing the detection results of the fine particle lidar and the L-band sounding radar, under the saturated vapor condition, the fog-haze height detected by the fine particle lidar is lower.

Key words: fine-particle lidar, fog and haze, meteorological element, comprehensive detection

^{*} 大气细粒子和臭氧时空探测激光雷达系统研发和使用示范(2011YQ120024)和中国气象局气候变化专项(CCSF201402)共同资助
2014 年 5 月 19 日收稿; 2015 年 7 月 10 日收修定稿
第一作者:杜传耀,主要从事大气探测和综合观测工作.Email:duchuanyao@126.com

引 言

现阶段由于工业化发展、汽车尾气的排放和燃煤供暖等,造成大量的细粒子颗粒物的排放,从而导致了雾-霾天气的日益加剧(过宇飞等,2013;刘爱君等,2004;伍红雨等,2011),有些细粒子产生后,并不是简单的存在于环境中,它会参与大气环境中的一些化学变化,产生新的颗粒物,带来二次污染(牛彧文等,2006;张小曳等,2012;张懿华,2011),除此之外,雾-霾还会导致能见度下降(白志鹏等,2006;吴兑等,2006;于凤莲等,2002),引发交通事故,有些直径较小的颗粒物可以直接吸入人体(蒋红梅等,2011;曲红梅等,2006),对人体造成伤害(蔡子颖等,2012;邱勇等,2011;万征等,2011;岳常丽等,2009;张蕴晖等,2006),所以对其研究就显得非常重要。本文对影响北京的一次雾-霾天气过程进行了探测记录,对其能够持续及消散的气象条件作了简要分析。同时,通过将激光雷达探测数据和 L 波段探空雷达数据的对比,对激光雷达的雾-霾探测能力作了初步分析,要更深入了解细粒子激光雷达对雾-霾过程的探测能力还需进一步研究。

1 数据资料获取

激光雷达数据源自安装在北京市观象台的一台细粒子时空探测激光雷达,该激光雷达采用的激光发射功率为 400 mW,发出 355 和 532 nm 两种波长的激光脉冲,单脉冲能量 20 mJ,激光束经准直后发

散角小于 1 mrad,激光束直径约 3 mm,在探测过程中,激光脉冲进入大气后,大气中的粒子对激光产生米散射,其中方向为 180°的散射即后向散射被激光雷达的接收系统接收,接收后由雷达的探测系统将接收到的回波信号反演成消光系数。通过消光系数的强度分布就可以直观地看到细粒子的空间分布情况,该雷达的探测理想有效范围白天是 8 km,夜晚是 15 km。研究所用台站仪器为常规探测仪器。

2 数据分析

2.1 地面观测数据分析

北京市南郊观象台 2014 年 2 月 20—26 日探测到了一次雾-霾天气过程,过程中地面气象要素变化非常明显(图 1),从 19 日 00:00 至 27 日 23:59 温度、湿度、能见度和风速等气象要素的变化情况看,20 日进入重污染天气后,地面能见度急剧下降,由 30 km 左右下降到 1 km 左右,相对湿度由原来的 25% 上升到 80% 左右,温度从 20 日开始也持续升高,这种情况一直持续到 26 日 16 时左右,此时开始出现降雨,颗粒物被雨水冲刷而沉降,颗粒物的浓度得以降低,同时 26 日夜间、27 日凌晨冷空气开始进入北京,从图 1 气温的日平均变化图中可以看到,26 日为气温的转折点,气温开始下降,受冷空气的影响,空气流动变大,地面风速增大,从图 1 中可以看出,风速从 26 日的 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐变大到 27 日的 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,大的风速有利于颗粒物的快速扩散,降雨和由冷空气带来的大风最终促使强雾-霾天气的彻

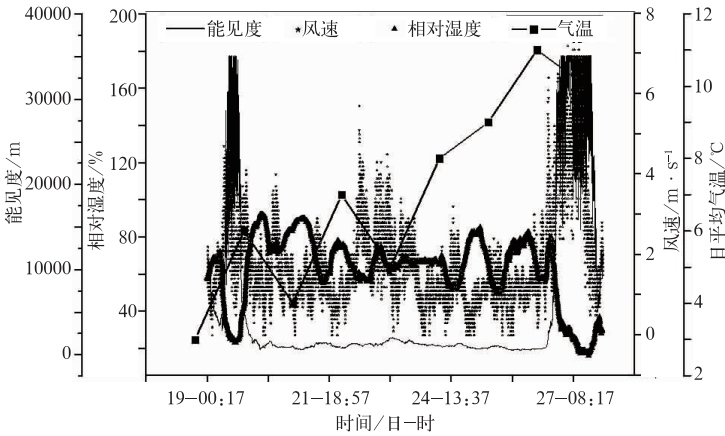


图 1 2014 年 2 月 19—27 日气象要素变化曲线

Fig. 1 Variation curve of meteorological elements in 19–27 February 2014

底结束,地面能见度重新上升到 30 km 左右,相对湿度下降到 20% 左右,气象要素恢复到雾-霾之前的状态。这次雾-霾天气之所以能够持续这么长时间,与对其有利的气象条件是分不开的,在这次雾-霾过程中,相对湿度和风速的变化情况(图 1),这段时间相对湿度一直保持在 50% 以上,风速大多在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下,大的湿度容易形成雾滴(刘梅等, 2014; 马翠平等, 2014),降低大气透明度,能见度在一般情况下和湿度是呈负相关的(李学彬等, 2007; 孙景群, 1985),湿度大时能见度往往是低的,持续的大湿度给这次雾-霾天气创造了条件,持续的小风速不利于颗粒物的迅速扩散,促使了颗粒物的大量堆积,造成了这次雾-霾过程的持续,除此之外,通过分析南郊观象台 19—26 日这段时间的高空探测的数据发现,从近地面到 3 km 范围内,每天几乎都有逆温层和低云的存在,逆温层和低云团的笼罩,使得大气垂直对流受阻(姜大膀等, 2011; 康志明等, 2005; 刘焕彬等, 2005; 饶晓琴等, 2008; 王玮等, 2009; 张礼春等, 2013),也是导致雾-霾持续不散的原因之一。

2.2 细粒子激光雷达探测分析

细粒子激光雷达对该次雾-霾的探测,图 2 是从 19—27 日逐日细粒子激光雷达探测的消光系数数据,消光系数和色标的对应关系如图,在消光系数越大说明雾-霾越严重,表现在图中就是颜色偏红色,每幅图基本上都是一天的数据,从前一日 00:00 至第二日的 23:59,例如图 2a 就是从 2014 年 2 月 19 日 00:05—23:56。从图中可以看出,19 日探测到的消光系数强度并不是很大,说明此时颗粒物的浓度相对较低,从 20 日开始近地面消光系数特别强,说明开始进入强雾-霾天气。随着过程的深入,雾-霾垂直厚度由起初的几百米逐渐增加,最厚时达到 2.0 km 左右,其中 21—24 日雾-霾垂直方向上升到了较大的高度,说明雾-霾垂直方向较为严重。但就近地面而言,24 和 25 日全天、26 日 16 时之前,激光雷达近地面几乎全红色,没有一丝缝隙,显示雾-霾较为严重。从图中还可以看到每天中午雾-霾垂直高度会低一些,这是由于中午太阳辐射变强,使大气

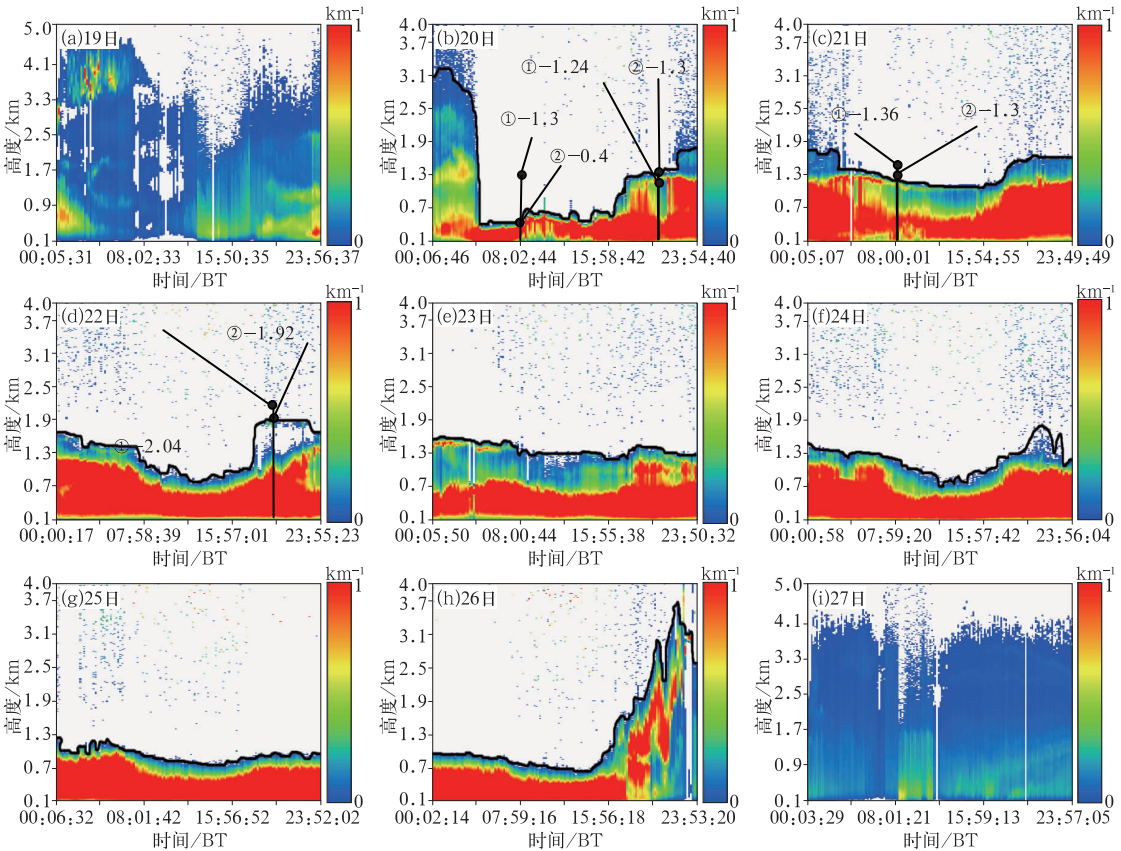


图 2 2014 年 2 月 19—27 日激光雷达探测的消光系数随高度变化情况
Fig. 2 Changes of extinction coefficients detected by the lidar
along with height in 19—27 February 2014

对流运动活跃,使雾-霾减轻的缘故,整个过程激光雷达探测的结果是 20 日进入雾-霾天气,26 日下午 16 时后近地面雾-霾逐渐消散,整个天气过程演变和地面设备探测结果吻合很好,特别是在探测雾-霾的开始和结束的时间点上和地面仪器对照得很好,从一定程度上说明激光雷达对此次雾-霾过程探测的合理性。

对雾-霾垂直高度的探测,这里还利用了 L 波段探空雷达,探空数据在雾-霾期间有两个特征,有明显逆温层存在和近地面的高湿区段,并且逆温层和高湿区段中的湿度峰值区在同一高度出现,如果探空数据中,从近地面开始,湿度基本保持在一个较高的值不变,且风速在这段高度较小,在满足这种气象要素条件下,如果在某个逆温层上方湿度迅速降低,出现一个突变,上文讨论中提到能见度和湿度呈负相关,湿度迅速降低,能见度应该是随之迅速好转,并且在逆温层上方大气不再受逆温层屏蔽,空气流动通畅,有利于颗粒物水汽的迅速扩散,也是雾-霾扩散的有利性条件,那么可以判断,在该逆温层和湿

度峰值同时出现(同时也是湿度迅速降低开始)处上方,雾-霾迅速减轻,甚至消失,从而认为该位置所在高度探空探测确定的雾-霾的最低垂直高度。对于雾-霾高度的确定,以往也有文章指出霾有一定的厚度并以逆温层为上界(刘攸弘,2004),这里加上湿度骤减这个条件来描述雾-霾高度更加确切,之所以把该方法确定的雾-霾高度说成雾-霾最低高度,是因为这种方法确定的雾-霾高度可能会比实际偏低,因为是把湿度峰值处定为了雾-霾高度,实际上在湿度转折点以上,湿度由大变小还有一个过渡区,该区域应该也是雾从有到无的一个过渡区,但是由于湿度究竟降低到多少,雾全部消散不好确定,这里就把雾-霾开始消散之前的这个高度当作了探空确定的雾-霾高度,雾-霾垂直方向消散的过渡区没算,实际中应该比这个高度要高。这里说是雾-霾高度是一个通称,由于高空数据只有湿度,没有垂直颗粒物数据,所以这里说的雾-霾更偏重于雾。此外,为了减小误差只选探空资料中很明显满足上面条件的数据与激光雷达探测数据作对比,对于存在争议的和暂

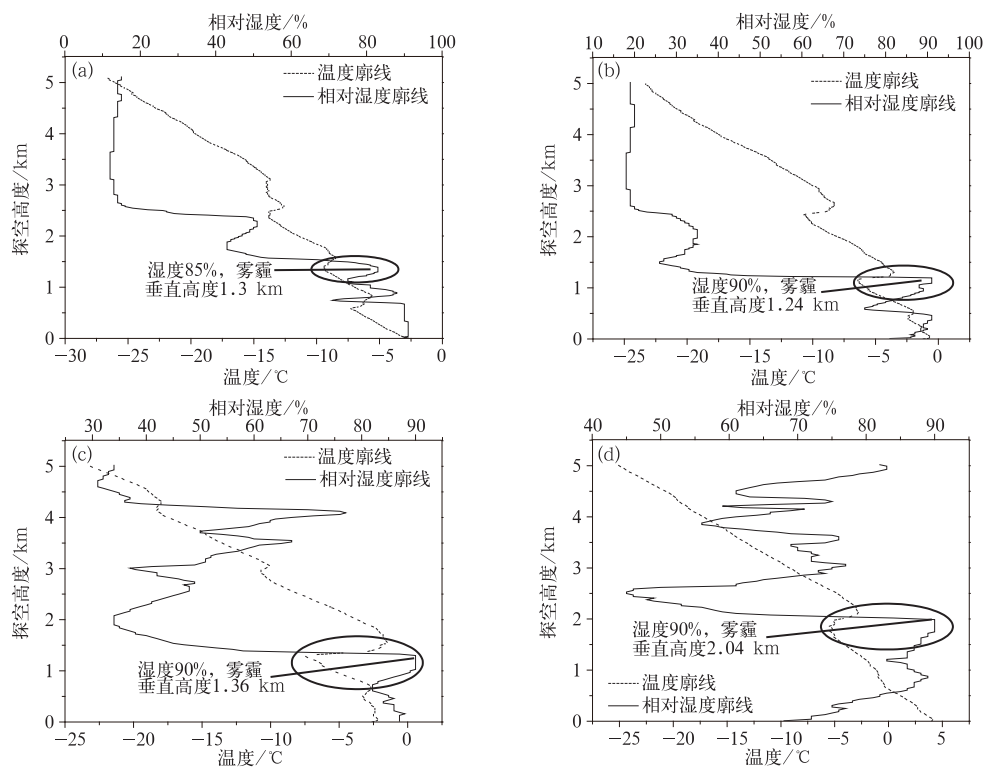


图 3 2014 年 2 月 20—22 日探空数据
(a) 20 日 07 时, (b) 20 日 19 时, (c) 21 日 07 时, (d) 22 日 19 时
Fig. 3 Upper air sounding data in 20—22 February 2014
(a) 07:00 BT 20 February, (b) 19:00 BT 20 February,
(c) 07:00 BT 21 February, (d) 19:00 BT 22 February

表 1 2014 年 2 月 20—22 日探空数据和激光雷达探测结果对比
Table 1 Comparison of sounding data and lidar detection result

探测时间/BT	激光雷达强信号 垂直高度/km	探空垂直确定重度 雾-霾高度/km	在垂直高湿区段内 相对湿度数值	近地面逆温层起始 至终止高度/km	地面能见度/m
20 日 07 时	0.40	1.30	80%~100%	0.62~0.89	770
20 日 19 时	1.30	1.24	75%~90%	1.19~1.34	750
21 日 07 时	1.30	1.36	70%~90%	1.34~1.50	760
22 日 19 时	1.92	2.04	70%~90%	2.00~2.17	1000

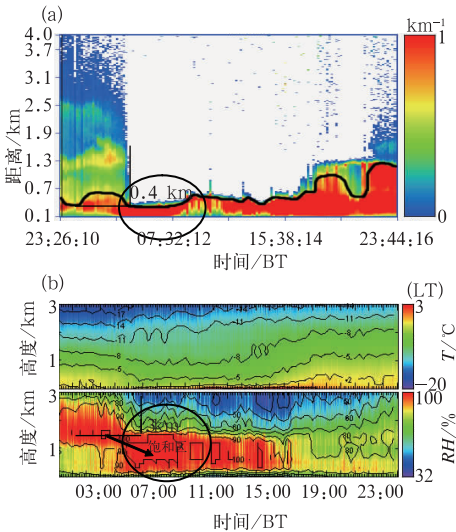


图 4 2014 年 2 月 20 日激光雷达(a)和微波辐射计(b)反演图

Fig. 4 Inversion maps of lidar (a) and microwave radiometer (b) in 20 February 2014

不能确定的资料这里没有采用。图 3 为研究所选的探空数据资料,在图 3 四幅图中已标出了由探空所确定的雾-霾垂直高度,并将该高度列于表 1,激光雷达探测的雾-霾高度在图 2 中用黑色廓线表示,该高度也列于表 1,两者确定的高度已在激光雷达探测图 2 中标出,图中标①是探空确定的雾-霾垂直高度,②是指激光雷达探测的雾-霾垂直高度,虽然探空确定的雾-霾高度已是雾-霾最低高度,但对比可发现激光雷达探测的雾-霾垂直高度总体还是要比探空确定的偏低,出现这种情况的原因:激光雷达在功率一定的情况下,穿透能力有限,在遇到水汽较重的雾-霾天气时,信号衰减严重,到最后就变成了无效的拖尾信号,反演出的就是一些噪点,导致了探测出的有效高度会偏低一些,从 20 日微波辐射计和激光雷达探测结果的对比来看(图 4),接近 05 时水汽有一个向下输送的过程,如图中椭圆形框所示,水汽在向下输送的同时,还在不断地加重,到达地面后,在 0.2~1.3 km 区域湿度达到了饱和状态,在

水汽往下输送前,从地面到 1.2 km 的高度范围内湿度基本保持在 80%左右,在 1.2~3.0 km 湿度处于 80%~100%的混合态,这种情况下,由于湿度在地面到 1.2 km 的范围内在 80%左右,激光信号在这段区域没有被削减得很多,仍然有足够的能量穿透了 1.2~3.0 km 这段湿度处于 80%~100%的混合态区域,此时激光雷达探测高度接近 3.0 km,和微波辐射计探测到的高湿度区的高度基本一致,在水汽下降后,高湿区接地,从近地面到 1.3 km 出现湿度基本为 100%的完全饱和区,在这种湿度基本饱和的情况下,激光雷达探测高度下降到了 0.4 km,比微波辐射计和 L 波段探空雷达探测的结果要偏低的多,而微波辐射计和同一时段的探空数据探测结果基本一致,说明在这种情况下,激光雷达信号会被雾滴水汽大大削弱,导致其探测结果偏低,以该雷达为例此时只能探测到离地面四五百米的高度,实际上根据探空数据可知,雾-霾的垂直高度至少为 1.3 km,所以这时激光雷达探测的结果已不能准确地描述雾-霾垂直方向的分布情况。在雾-霾进入前和结束后,19 和 27 日能见度基本都在 10 km 以上,有的时段能见度甚至在 20 km 以上,接近洁净大气,这种情况下,激光雷达探测高度应该是最理想的高度,从这两天激光雷达反演图(图 4a)中可以发现,实际探测高度在 4~5 km,这就说明该激光雷达实际探测最大高度范围为 4~5 km,比所给的理想高度 8~10 km 偏低。

3 结 论

本文利用细粒子激光雷达和台站现有探测仪器对北京的一次雾-霾天气过程进行综合分析,给出了该次雾-霾能够持续的气象条件和细粒子激光雷达探测结果和性能分析:

(1) 相对湿度始终维持在 50%以上,风速在 2 m·s⁻¹ 以下,不利于颗粒物的迅速扩散。逆温层和云团的持续存在,逆温层使大气层结稳定,大气对流

减弱,颗粒物大量积累,云团的存在也阻止了颗粒物向高空的扩散,综合以上两个主要因素最终造成了这次雾-霾天气过程。

(2) 降水对颗粒物的冲刷、湿沉降作用以及冷空气的到来使得地面风力增大,促使了这次天气过程雾-霾的消散。

(3) 细粒子激光雷达对该次雾-霾天气过程近地面的探测结果和地面仪器探测结果吻合较好,此外,从激光雷达探测的垂直廓线图中可以看出,每天中午雾-霾的垂直高度要比早上和晚上稍低。

(4) 通过 L 波段探空雷达和细粒子激光雷达两种探测手段确定雾-霾垂直高度,发现激光雷达确定的雾-霾垂直高度总体要比 L 波段探空雷达确定的高度偏低,通过与微波辐射计探测结果的对比,发现在水汽较重、相对湿度接近饱和状态时,偏低表现得更加明显,此时激光雷达探测高度只能达到四五百米,已不能正确地反映雾-霾的垂直分布。

参考文献

- 白志鹏,董海燕,蔡斌彬,等. 2006. 灰霾与能见度研究进展. 过程工程学报,6(2):37-41.
- 蔡子颖,韩素芹,吴彬贵,等. 2012. 天津一次雾过程的边界层特征研究. 气象,38(9):1103-1109.
- 过宇飞,刘端阳,周彬,等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究. 气象,39(10):1314-1324.
- 姜大膀,王式功,郎咸梅,等. 2001. 兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系. 兰州大学学报(自然科学版),37(4):133-138.
- 康志明,尤红,郭文华,等. 2005. 2004 年冬季华北平原持续大雾天气的诊断分析. 气象,31(12):51-56.
- 李学彬,徐青山,魏合理,等. 2007. 相对湿度与能见度的相关性研究 //2007 年中国气象学会年会气象综合探测技术分会场论文集,广州.
- 刘爱君,杜尧东,王惠英. 2004. 广州灰霾天气的气候特征分析. 气象,30(12):68-71.
- 刘焕彬,冯俊杰,王恒明. 2005. 济南低空逆温层特征分析. 山东气象,

25(1):25-27.

- 刘梅,严文莲,张备,等. 2014. 2013 年 1 月江苏雾-霾天气持续和增强机制分析. 气象,40(7):835-843.
- 刘攸弘. 2004. 广州城市灰霾的出现及其警示. 广州环境科学,19(2):12-14.
- 蒋红梅,王定勇. 2011. 大气可吸入颗粒物的研究进展. 环境科学动态,(1):11-15.
- 马翠平,吴彬贵,李江波,等. 2014. 一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析. 气象,40(6):715-722.
- 牛彧文,何凌燕,胡敏,等. 2006. 深圳冬、夏季大气细粒子及其二次组分的污染特征. 中国科学 化学,36(2):173-180.
- 邱勇,张志红. 2011. 大气细颗粒物免疫毒性研究进展. 环境与健康杂志,28(12):1117-1120.
- 曲红梅,牛静萍. 2006. 大气中 PM_{2.5} 致大鼠呼吸道急性损伤作用. 中国公共卫生,5(22):598-599.
- 饶晓琴,李峰,周宁芳,等. 2008. 我国中东部一次大范围霾天气的分析. 气象,34(6):89-96.
- 孙景群. 1985. 能见度和相对湿度的关系. 气象学报,43(2):230-234.
- 万征. 边波. 2011. 颗粒物大气污染:独立的心血管病危险因素. 中国循证心血管医学杂志,12(3):332-335.
- 王玮,黄玉芳,孔凡忠,等. 2009. 中国东部一场持续性大雾的诊断分析. 气象,35(9):84-90.
- 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. 气象学报,64(4):510-517.
- 伍红雨,杜尧东,何健,等. 2011. 华南霾日和雾日的气候特征及变化. 气象,37(5):607-614.
- 于凤莲,刘东贤,胡英. 2002. 有关气溶胶细粒子对城市能见度影响的研究. 气象科技,30(6):379-383.
- 岳常丽,刘红刚. 2009. 空气细颗粒物(PM_{2.5})及其致病性的研究现状. 临床与实验病理学杂志,25(4):437-439.
- 张礼春,朱彬,耿慧,等. 2013. 南京一次持续性浓雾天气过程的边界层特征及水汽来源分析. 气象,39(10):1284-1292.
- 张小曳,张养梅,曹国良. 2012. 北京 PM₁ 中的化学组成及其控制对策思考. 应用气象学报,23(3):257-264.
- 张懿华. 2011. 上海市典型霾污染过程二次无机气溶胶组分特征研究. 环境监测管理与技术,23(50):7-13.
- 张蕴晖,丁佳伟,曹慎,等. 2006. 大气细颗粒物(PM_{2.5})对心血管内皮细胞 NOS 的影响. 环境科学学报,26(1):142-145.