

邓长菊, 尹晓惠, 甘璐. 2014. 北京雾与霾天气大气液态水含量和相对湿度层结特征分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 193–199, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13078. Deng Changju, Yin Xiaohui, Gan Lu. 2014. Stratification characteristic analysis of atmospheric liquid water content and relative humidity during fog and haze weather in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 193–199.

北京雾与霾天气大气液态水含量和相对湿度层结特征分析

邓长菊¹ 尹晓惠² 甘璐¹

¹ 北京市气象服务中心, 北京 100089

² 北京市气象台, 北京 100089

摘 要 为了研究空气中的水汽层结变化对雾、霾生消的影响, 对北京 2011 年 10 月至 2012 年 2 月雾、霾天气个例中能能见度变化和地基微波辐射计观测的相对湿度及液态水含量资料进行分析, 结果表明: 大气总液态水含量时序图对预报雾、霾没有参考意义, 无论是大气总液态水含量数值的大小, 还是大气总液态水含量随时间的变化都不能预测雾、霾的生成与消散。但不同时刻大气液态水含量的廓线图对雾、霾天气的预报还是具有指示意义的, 因为雾、霾生消前后大气液态水含量层结变化明显。进一步分析不同情况的雾、霾天气发现: 雾、霾生消前后均无降水出现和先出大雾后降水的情况, 即降水后消散的雾、霾天气, 大气相对湿度的变化和液态水含量的变化主要集中在 3 km 以下; 对于先降水后出大雾的情况, 整层大气相对湿度的变化都很明显, 液态水含量的变化主要在 3~7 km 之间。由于降水既可以增加近地面的空气湿度, 又可以消耗空气中的水汽, 因此降水既是大雾形成的有利条件, 也是大雾消散的有利条件。有降水出现的大雾天气, 有饱和层 (空气相对湿度达到或接近 100%), 无降水出现的重霾天气, 则没有饱和层, 且整体相对湿度偏低。

关键词 雾 霾 相对湿度 大气总液态水 微波辐射计

文章编号 1006-9585 (2014) 02-0193-07

中图分类号 P426.4⁺1

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13078

Stratification Characteristic Analysis of Atmospheric Liquid Water Content and Relative Humidity during Fog and Haze Weather in Beijing

DENG Changju¹, YIN Xiaohui², and GAN Lu¹

¹ Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089

² Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

Abstract To study the effects of the stratification changes of water vapor on fog and haze, the variation of visibility relative to the liquid water content and relative humidity observed by microwave radiometer during fog and haze events from October 2011 to February 2012 in Beijing was analyzed. The sequence diagram results showed that atmospheric liquid water content is not a suitable reference for forecasting fog and haze, nor is time variation for forecasting its generation or dissipation. However, the various times in the profile diagram of atmospheric liquid water content can indicate the presence of fog and haze because the stratification of liquid water content obviously changes during the generation and dissipation of fog and haze. Further analysis on the various conditions of the fog and haze showed that variations in relative humidity and liquid water content were concentrated mainly below 3 km. Non-precipitation occurred during fog and haze; fog occurred prior to precipitation, and haze dissipated after the precipitation ended. Under the

收稿时间 2013-05-07 收到, 2014-01-08 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41175014, 北京市气象局精细化预报创新团队

作者简介 邓长菊, 女, 1969 年出生, 学士, 高工, 主要从事天气预报服务工作。E-mail: liudengjj@sohu.com

conditions of heavy fog after precipitation, the variation of atmospheric relative humidity was obvious, and the changing of liquid water content occurred between 3–7 km. Precipitation is favorable for the dissipation of fog because it can increase the humidity level near the ground and consume the water vapor in the air. Heavy fog combined with precipitation resulted in a saturated layer with relative humidity close to 100%, whereas heavy haze with no precipitation did not form a saturated layer, and the relative humidity was relatively low.

Keywords Fog, Haze, Relative humidity, Atmospheric liquid water, Microwave radiometer

1 引言

近年来,大范围的持续雾、霾天气频繁发生,由于其能见度低和空气污染严重,极大地影响了人们的身体健康和交通出行。为了有效防范雾、霾的影响,了解雾、霾天气的成因和特点是十分必要的。

雾与霾是两个不同的概念,形成的机理和特征也有所区别。在早期研究中,国内外学者对雾、霾形成的天气条件和如何区分雾与霾做过较细致的分析(吴兑,2006,2007,2008;吴兑等,2007b;李崇志等,2009)。目前,国内外学者普遍认为相对湿度高、大气层结稳定、风力较小的气象条件是雾与霾形成的主要原因(郑国光等,2010);并制定了《雾的预报等级》国家标准(杨贵名等,2011)和《霾的观测和预报等级》气象行业标准(吴兑等,2010),其中以相对湿度 80%和 95%为阈值区分雾与霾及雾、霾混合物的方法,已经成为气象行业规范内容。

其它关于雾、霾的研究主要有针对雾、霾的物质组成及其源汇分析,以及针对雾、霾的时空分布特征及其污染过程等。其中王继志等(2002)对北京城市雾的特征及其演变进行了研究,李子华等(2008)、史军等(2010)、吴彬贵等(2010)、伍红雨等(2011)、周贺玲等(2011)对华东、华南和北京—天津—河北等区域性的雾、霾气候特征和趋势进行了分析研究。除了气候特征等方面,对雾、霾天气气溶胶光学特性、细粒子浓度的监测分析研究也正在逐渐深入(王京丽和刘旭林,2006;樊文雁等,2009;颜鹏等,2010;于兴娜等,2012)。在雾、霾天气的影响和与交通能见度的关系方面,袁成松等(2003,2007)、冯民学等(2003)、张朝林等(2007)、吴兑等(2007a)、张利娜等(2008)、马志强等(2012)结合北京、上海、南京等地的高速公路能见度和交通资料进行大量的分析研究。

对于雾、霾预报的研究,目前主要还是采取天气学的方法,也有利用支持向量机方法做预报的探

索(贺皓和罗慧,2009),不过,准确性和时效性还有待提高。为了探索雾、霾的形成机理,本文基于地基微波辐射计资料,分析不同天气条件下雾、霾天气的空气相对湿度和液态水含量变化特征,对雾、霾预报具有一定的指示意义。

2 资料

选取 2011 年 10 月至 2012 年 2 月雾、霾天气个例进行研究。冷空气活动偏弱、低层风力小、湿度大是雾与霾形成的主要原因,而降水天气对空气湿度的影响最大,因此研究中根据雾与霾天气生成和消散过程中是否出现降水分 2 类:无降水出现的雾、霾天气和有降水出现的雾、霾天气。对于有降水出现的雾、霾天气,又根据降水和雾、霾出现的先后分为:先有降水后出现雾与霾和先出现雾与霾后有降水两种情况进行分析。

利用北京南郊观象台的地基微波辐射计观测的相对湿度和液态水含量资料,分析两种资料的时序图和廓线图产品,在不同雾与霾天气中的演变特征,以期在预报中做参考。

3 大气总液态水含量时序图与廓线图对雾与霾天气预报的指示意义

3.1 大气总液态水含量时序图分析

大气总液态水含量时序图对预报雾与霾没有参考意义。无论是大气总液态水含量数值的大小,或是其随时间的变化都不能预测雾与霾的生成与消散。比如 2011 年 12 月 4 日和 7 日的过程。

由图 1 和图 2 可见,4 日 05:00(北京时间,下同)至 16:00 液态水含量下降阶段和 16:00 后上升阶段,能见度都是变小的,且 17:00、20:00、23:00 的观测能见度都在 1 km 以下,为大雾。7 日 04:00 至 08:00 液态水含量上升,此后下降,在其上升阶段有降水和大雾,能见度 0.9 km,12:00 以后下降阶段,能见度转好,最后达到 30 km。这说明在大

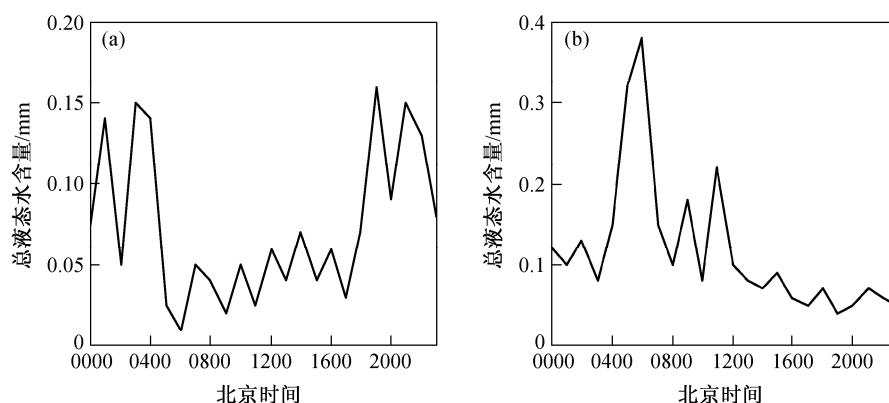


图1 2011年12月(a)4日和(b)7日大气总液态水变化

Fig. 1 Variations of atmosphere total liquid water content on (a) 4 Dec and (b) 7 Dec 2011

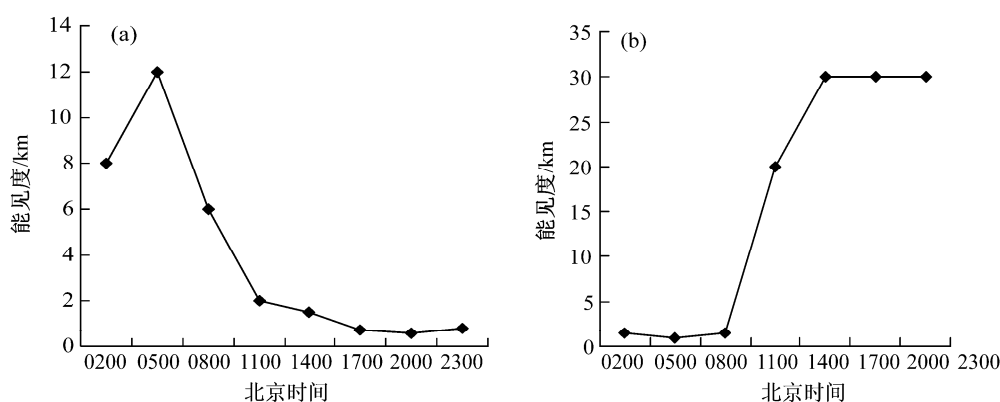


图2 同图1, 但为能见度

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for visibility

气总液态水含量上升和下降阶段, 都能形成大雾。且大气总液态水含量的增加或减少并不一定伴随能见度的下降或上升, 因此不能以其变化趋势来判定大雾的生成或消散。

分析大气总液态水含量的数值, 4日08:00至16:00, 其值不足0.05 mm, 能见度在1 km以下。7日16:00至24:00, 其值同样在0.05 mm以下, 能见度却在30 km以上。因此用大气总液态水含量的数值的大小也不能判定大雾生消和现状。

3.2 不同时刻液态水含量的廓线图分析

通过不同时刻液态水含量的廓线图对比分析, 发现它对雾、霾天气的预报还是具有较好的指示意义的。

以2011年12月2~3日雾、霾天气为例(从图3可见), 在大雾出现之前, 大气液态水(最大 2 g/m^3 左右)主要集中在3~7 km高度层里, 在转大雾过程中, 随着能见度的降低, 该层次的液态水含量是下降的, 而3日02:00、05:00能见度最低时段, 尤其是05:00能见度为0 km时, 该层次的液态水含

量已经降到 0.2 g/m^3 以下, 但是在3 km以下, 液态水含量却是增加的, 尤其是近地面层液态水含量增加明显。大雾消散时, 近地面层(1 km以下层)液态水含量迅速下降到非常小。

可见, 在浓雾或重度霾的生消过程中, 大气液态水含量的层结变化明显。

4 无降水出现的雾、霾天气

以2012年1月9~10日的这次过程为例, 分析雾、霾生消前后均没有降水出现的天气微波辐射计资料(如图4), 可以看出整层大气相对湿度的变化特点是:

(1) 雾、霾生成和消散前后相对湿度的变化主要集中在3 km以下层, 3 km以上层相对湿度的变化很小。且3 km以下层, 相对湿度的变化随着高度的增加而减小, 离地面越近, 变化越大。

(2) 能见度最低时, 近地面层(1 km以下至地面)的相对湿度最大。

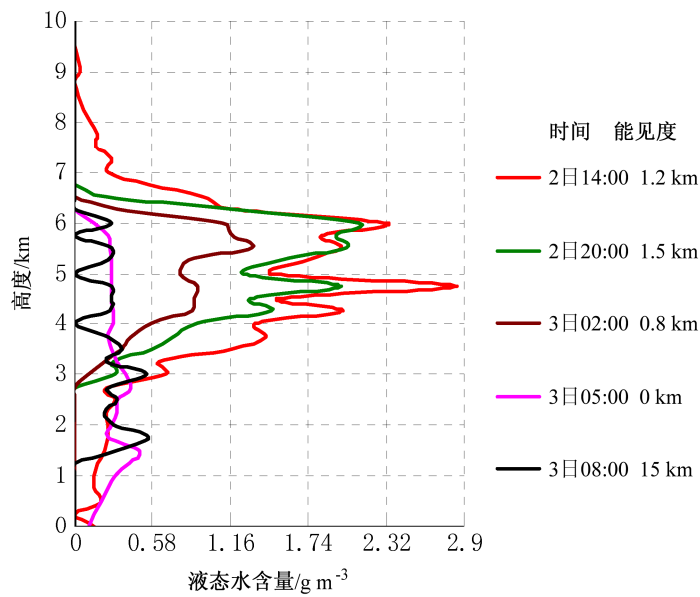


图3 2011年12月2~3日大雾前后液态水廓线变化

Fig. 3 Variation of atmosphere liquid water content profile before and after the fog during 2-3 Dec 2011

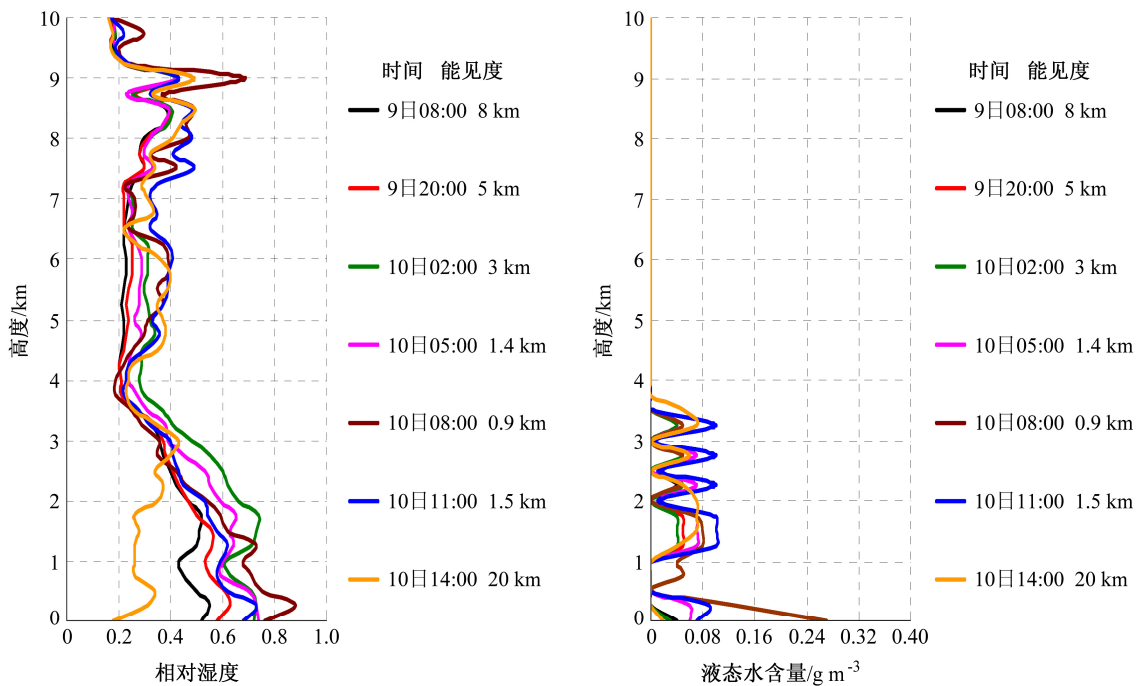


图4 2012年1月9~10日相对湿度和液态水廓线变化图

Fig. 4 Variations of relative humidity and liquid water content profile during 9-10 Jan 2012

(3) 500 m 以下有逆湿层, 且逆湿层相对湿度大于 80%。

(4) 整层空气相对湿度较低, 没有饱和层。

整层液态水含量的变化特点是:

(1) 整层液态水含量都很小, 尤其是 3 km 以上。

(2) 同相对湿度一样, 液态水含量的变化主要也集中在 3 km 以下, 且近地面层 500 m 以下变化

幅度最大。

(3) 雾最浓时, 500 m 以下液态水含量明显高于形成和消散阶段的含量。

5 先降水后出大雾的情况

降水使空气湿度增加, 是大雾形成的有利条件。一般先出降水、后出大雾的情况, 是因为降水

导致空气湿度增加达到或接近饱和而形成的, 前提是降水后没有明显的冷暖平流和风, 并能维持相对静稳的天气条件, 或有明显的辐射降温, 空气中水汽才能达到或接近饱和而成雾。

以 2011 年 12 月 2~3 日的过程为例, 2 日 08:00 至 14:00 之间有小雪, 雪后能见度逐步降低, 轻雾转大雾, 到 3 日 05:00 观象台能见度为 0 km。分析这次过程的相对湿度和液态水含量变化, 其整层大气相对湿度的变化特点是:

(1) 降水时段整层相对湿度都很大, 高、中、低各层都有不连续的饱和层存在。

(2) 整层相对湿度的变化也都很大, 尤其是 3 km 以上和 500 m 以下。

(3) 大雾生成阶段, 降水趋于结束, 能见度降低, 3 km 以上的相对湿度迅速减小, 3 km 以下相对湿度的变化比较缓慢, 500~2000 m 层存在饱和层。

(4) 大雾消散阶段, 500 m 以上相对湿度都变化不大, 500 m 以下相对湿度迅速减小到 80% 以下。

整层液态水含量的变化特点是:

(1) 3~7 km 层的液态水含量明显高于其它层, 大雾前后液态水含量的变化也主要集中在该层。

(2) 雾生成到最浓阶段, 3~7 km 层的液态水含量急剧减小, 3 km 以下到地面液态水含量增加。

(3) 大雾消散阶段 1 km 以上层液态水含量变化很小, 1 km 以下液态水含量减小。

可见, 降水消耗了大气中的水汽, 起初导致中高层相对湿度和液态水含量减小, 近地面层相对湿度和液态水含量增加, 大雾随之形成。此后, 当中高层水汽消耗殆尽, 近地面层相对湿度和液态水含量也逐渐减小, 大雾得以消散 (见图 5)。

6 先出大雾后降水的情况

对于先出大雾后出降水的情况, 大气相对湿度的变化与总液态水层结的变化, 同没有降水的雾、霾天气相似, 主要集中在 3 km 以下。如 2011 年 12 月 6~7 日的这次雾、霾天气, 此次过程前期一直有雾与霾天气持续, 其中 4 日、5 日连续 2 d 的后半夜到次日的早晨, 都出现了降雪或雨夹雪, 但降水很弱, 能见度一直较低, 只有 0.6~3 km。直到 7 日凌晨出现了明显的降雪天气后, 大雾才彻底消散 (05:00 观测资料显示为间歇性中雪, 能见度 0.9 km, 11:00 能见度 20 km)。本次大雾生成和消散前后相对湿度和液态水含量廓线变化见图 6。

此次过程整层大气相对湿度的变化特点是: 降水出现前, 0~3 km 层相对湿度明显增加, 降水后则迅速减小。3 km 以上降水前后相对湿度变化不大。

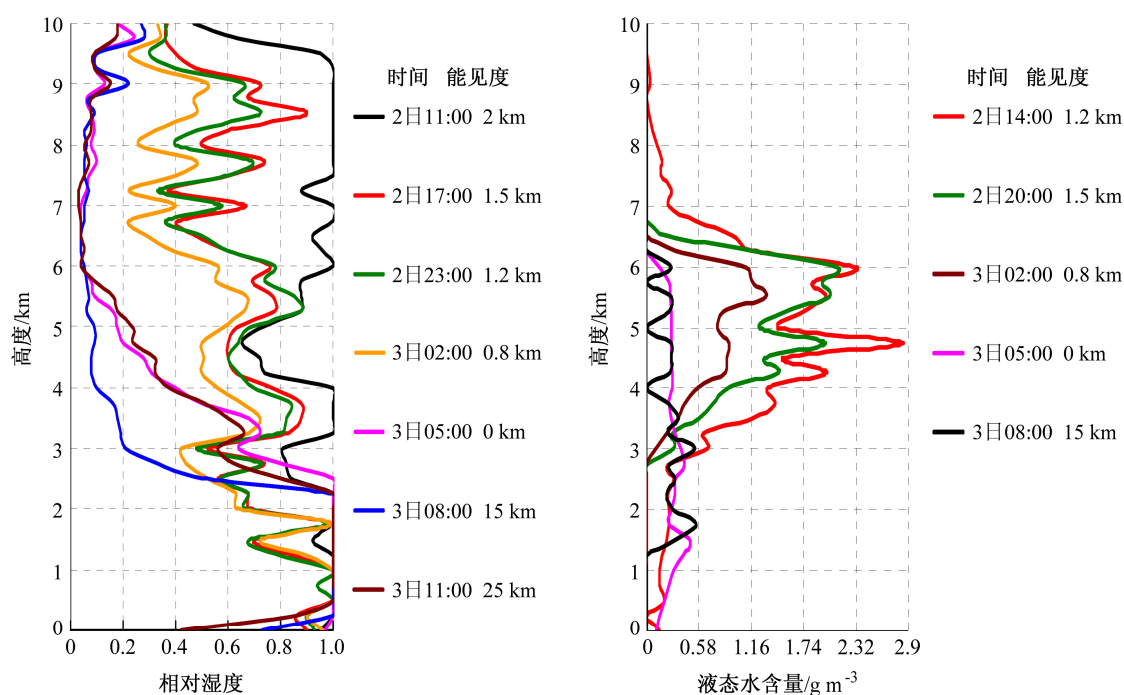


图 5 2011 年 12 月 2~3 日相对湿度和液态水廓线变化图

Fig. 5 Variation of relative humidity and liquid water content profile during 2-3 Dec 2011

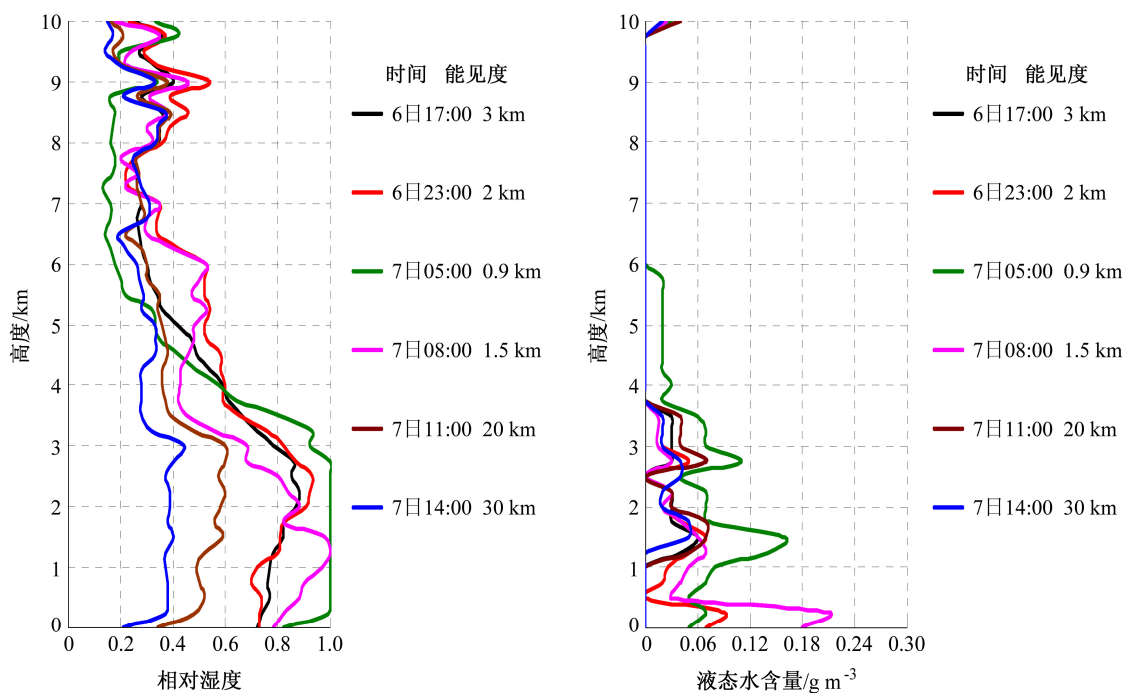


图6 同图5, 但为2011年12月6~7日

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for 6-7 Dec 2011

整层液态水含量的变化特点是: 降水出现前, 0~3 km 层液态水含量明显增加, 降水后则迅速减小。3 km 以上液态水含量降水后减小。

7 结论

(1) 大气总液态水时序图对预报雾与霾没有参考意义。无论是某时刻大气总液态水含量数值的大小, 还是大气总液态水含量随时间的变化都不能预测雾、霾的生成与消散。但雾、霾生成前后液态水含量的廓线变化明显, 因此通过不同时刻液态水含量的廓线对比分析, 对雾、霾天气的预报还是具有指示意义的。

(2) 对于雾、霾生成前后均无降水出现的情况, 和先出大雾后降水的情况, 即降水后消散的雾、霾天气, 大气相对湿度的变化和液态水含量的变化主要集中在 3 km 以下。

(3) 对于先降水后出大雾的情况, 整层大气相对湿度的变化都很明显, 液态水含量的变化主要在 3~7 km 之间。

(4) 降水既可以增加近地面的空气湿度, 又可以消耗空气中的水汽, 因此降水既是大雾形成的有利条件, 也是大雾消散的有利条件。有降水出现的大雾天气, 有饱和层 (空气相对湿度达到或接近

100%), 无降水出现的重霾天气, 则没有饱和层, 且整体相对湿度偏低。

致谢 本文得到了北京市气象台首席廖晓农的指导, 在此特别表示感谢!

参考文献 (References)

- 冯民学, 袁成松, 卞光辉, 等. 2003. 沪宁高速公路无锡段春季浓雾的实时监测和若干特征 [J]. 气象科学, 23 (4): 435-445. Feng Minxue, Yuan Chengsong, Bian Guanghui, et al. 2003. Real-time monitoring and characteristics of fog causing low visibility on the Shanghai-Nanjing highway in Wuxi [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 23 (4): 435-445.
- 樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 2009. 北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 631-638. Fan Wenyan, Hu Bo, Wang Yuesi, et al. 2009. Measurements on the vertical distribution of PM_{2.5} concentration in fog and haze days in Beijing city [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 631-638.
- 贺皓, 罗慧. 2009. 基于支持向量机模式识别的大雾预报方法 [J]. 气象科技, 37 (2): 149-151. He Hao, Luo Hui. 2009. Fog forecast method based on SVM and model identification [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 37 (2): 149-151.
- 李子华, 杨军, 石春娥, 等. 2008. 地区性浓雾物理 [M]. 北京: 气象出版社, 160. Li zhihua, Yang Jun, Shi Chune, et al. 2008. The Physics of Regional Dense Fog (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 160.
- 李崇志, 于清平, 陈彦. 2009. 霾的判别方法探讨 [J]. 南京气象学院学

- 报, 32 (2): 327–332. Li Chongzhi, Yu Qingping, Chen Yan. 2009. Discussion of haze distinction method [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 32 (2): 327–332.
- 马志强, 赵秀娟, 孟伟, 等. 2012. 雾和霾对北京地区大气能见度影响对比分析 [J]. 环境科学研究, 25 (11): 1208–1214. Ma Zhiqiang, Zhao Xiujuan, Meng Wei, et al. 2012. Comparison of influence of fog and haze on visibility in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 25 (11): 1208–1214.
- 史军, 崔林丽, 贺千山, 等. 2010. 华东雾和霾日数的变化特征及成因分析 [J]. 地理学报, 65 (5): 533–542. Shi Jun, Cui Linli, He Qianshan, et al. 2010. The changes and causes of fog and haze days in Eastern China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 65 (5): 533–542.
- 王继志, 徐祥德, 杨元琴. 2002. 北京城市能见度及雾特征分析 [J]. 应用气象学报, 13 (Z1): 160–169. Wang Jizhi, Xu Xiangde, Yang Yuanqin, et al. 2002. A study of characteristics of urban visibility in Beijing and the surrounding area [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (Z1): 160–169.
- 王京丽, 刘旭林. 2006. 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, 64 (2): 221–228. Wang Jingli, Liu Xulin. 2006. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (2): 221–228.
- 吴兑. 2006. 再论都市霾与雾的区别 [J]. 气象, 32 (4): 9–15. Wu Dui. 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (4): 9–15.
- 吴兑, 赵博, 邓雪娇, 等. 2007a. 南岭山地高速公路雾区恶劣能见度研究 [J]. 高原气象, 26 (3): 649–654. Wu Dui, Zhao Bo, Deng Xuejiao, et al. 2007a. A study on bad visibility over foggy section of freeway in Nanling Mountainous region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (3): 649–654.
- 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 2007b. 都市霾与雾的区分及粤港澳的灰霾天气观测预报预警标准 [J]. 广东气象, 29 (2): 5–10. Wu Dui, Deng Xuejiao, Bi Xueyan, et al. 2007b. Distinguishing of fog or haze and the operational criteria for observation, forecasting and early warning of haze in urban areas of Guangdong, Hongkong and Macau [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), 29 (2): 5–10.
- 吴兑. 2007. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. 气象, 31 (4): 3–7. Wu Dui. 2007. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (4): 3–7.
- 吴兑. 2008. 霾与雾的识别和资料分析处理 [J]. 环境化学, 37 (2): 327–330. Wu Dui. 2008. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data [J]. Environmental Chemistry (in Chinese), 37 (2): 327–330.
- 吴兑, 汤仕文, 邓雪娇, 等. 2010. 霾的观测和预报等级 [S]. QX/T 113–2010. Wu Dui, Tang Shiwen, Deng Xuejiao, et al. 2013. Observation and forecasting levels of haze (in Chinese) [S]. QX/T 113–2010.
- 吴彬贵, 解以扬, 吴丹朱, 等. 2010. 京津塘高速公路秋冬雾气象要素与环流特征 [J]. 气象, 36 (6): 21–28. Wu Bingui, Xie Yiyang, Wu Danzhu, et al. 2010. Characteristics of meteorological elements and circulation in fog events along Beijing–Tianjin–Tanggu expressway [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (6): 21–28.
- 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 [J]. 气象, 37 (5): 607–614. Wu Hongyu, Du Yaodong, He Jian, et al. 2011. Climatic characteristic and variations of haze days and fog days in South China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (5): 607–614.
- 杨贵名, 林建, 宗志平. 2011. 雾的预报等级 [S]. GB/T 27964–2011. Yang Guiming, Lin Jian, Zhong Zhiping. 2011. Grade of fog forecast (in Chinese) [S]. GB/T 27964–2011.
- 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 2010. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性 [J]. 应用气象学报, 21 (3): 257–265. Yan Peng, Liu Guiqing, Zhou Xiujie, et al. 2010. Characteristics of aerosol optical properties during haze and fog episodes at Shangdianzi in northern China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (3): 257–265.
- 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 等. 2012. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 [J]. 环境科学, 33 (4): 1057–1062. Yu Xingna, Li Xinmei, Deng Zengrandeng, et al. 2012. Optical properties of aerosol during haze–fog episodes in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 33 (4): 1057–1062.
- 袁成松, 卞光辉, 冯民学, 等. 2003. 高速公路上低能见度的监测与预报 [J]. 气象, 29 (11): 36–40. Yuan Chengsong, Bian Guanghui, Feng Minxue, et al. 2003. Monitoring and forecasting of low visibility on highways [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (11): 36–40.
- 袁成松, 梁敬东, 焦圣明, 等. 2007. 低能见度浓雾监测、临近预报的实例分析与认识 [J]. 气象科学, 27 (6): 661–665. Yuan Chengsong, Liang Jingdong, Jiao Sengming, et al. 2007. Case analysis and explanation of low visibility's thick fog observation and nowcast [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 27 (6): 661–665.
- 张朝林, 张利娜, 程丛兰, 等. 2007. 高速公路气象预报系统研究现状与未来趋势 [J]. 热带气象学报, 23 (6): 652–658. Zhang Chaolin, Zhang Lina, Chen Conglan, et al. 2007. Advances in road weather forecasting system and its future development [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (6): 652–658.
- 张利娜, 张朝林, 王必正. 2008. 北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析 [J]. 大气科学, 32 (6): 1229–1240. Zhang Lina, Zhang Chaolin, Wang Bizheng, et al. 2008. Evolution characteristics of atmospheric visibility in the Beijing expressway and the corresponding physical analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1229–1240.
- 郑国光, 矫梅燕, 张国材, 等. 2010. 现代天气业务 [M]. 北京: 气象出版社, 349–362. Zheng Guoguang, Jiao Meiyang, Zhang Guocai, et al. 2010. Modern Meteorological Service (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 349–362.
- 周贺玲, 李丽平, 乐章燕, 等. 2011. 河北省雾的气候特征及趋势研究 [J]. 气象, 37 (4): 462–467. Zhou Heling, Li Liping, Le Zhangyan, et al. 2011. Climatic characteristics of fog in Hebei Province and trend research [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (4): 462–467.