

花丛,张碧辉,张恒德. 2015. 2013 年 1—2 月华北雾、霾天气边界层特征对比分析. 气象, 41(9):1144-1151.

2013 年 1—2 月华北雾、霾天气 边界层特征对比分析^{*1}

花 丛 张碧辉 张恒德

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用地面观测资料、中国气象局 PM_{2.5} 质量浓度数据、L 波段探空秒数据等,对华北地区三个大城市(北京、石家庄和太原)的雾、霾及晴天天气的地面风场特征及 PM_{2.5} 浓度分布情况进行了统计分析。同时分析了典型雾、霾天气过程中的边界层气象要素垂直结构及逆温层特征,并与晴天过程做了对比。通过对不同强度雾、霾天气过程的边界层动力、热力学结构差异的讨论,发现逆温强度与雾、霾天气的能见度有负相关关系,并对雾、霾天气的发生有一定的预报指示意义。

关键词: 雾、霾天气过程, 边界层特征, L 波段探空秒数据, 逆温强度

中图分类号: P466

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.09.012

Analysis on Boundary Layer Characteristics in Fog and Haze Processes in North China from January to February 2013

HUA Cong ZHANG Bihui ZHANG Hengde

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Surface observation, CMA PM_{2.5} concentration, L-band sounding second data and other information are used to analyze surface wind characteristics and mass concentration of PM_{2.5} on fog, haze and clear days in Beijing, Shijiazhuang and Taiyuan from January to February 2013. Typical fog-haze processes are selected to analyze vertical structure of boundary layer and inversion layer characteristics, which are also compared with those of clear days. Dynamical and thermal differences in boundary layer are summarized according to different intensities in fog-haze processes. Analysis result shows that inversion intensity has a negative correlation with visibility, which has some indicating importance in fog and haze predictions.

Key words: fog-haze processes, boundary layer characteristics, L-band sounding second data, inversion intensity

引 言

2013 年 1—2 月,华北地区爆发了多次严重雾、霾天气过程,持续时间长,影响范围广,雾、霾两种天气现象反复交替出现,引起全社会的高度关注(安林昌等,2013;关月等,2013)。随着经济发展的加速和

人类活动范围的不断扩大,大气气溶胶浓度呈现显著增加的趋势。受其影响,霾的发生频率明显增加(孙彧等,2013)。有研究表明雾、霾之间有着较为密切的相关关系(Gautam et al, 2007),在一定的气象条件下,这两种天气现象可以发生相互转化(张小曳等,2013)。已有研究指出,雾、霾是大气边界层动量、热量、水汽的湍流运动以及大气污染等复杂过程

* 气象关键技术集成与应用重点项目(CMAGJ2014Z16)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306015)共同资助

2014 年 6 月 4 日收稿; 2015 年 6 月 8 日收修定稿

第一作者:花丛,主要从事短期天气预报和环境气象工作. Email:floweronly@163.com

的综合结果。如刘熙明等(2010)指出,近地面大气边界层较大的相对湿度、较小的风速和风速垂直切变、稳定的层结结构以及较低的气温是北京持续大雾天气形成的主要原因;杨军等(2010)发现雾的多层结构有助于贴地强逆温层的维持;张光智等(2005)和 Li 等(2012)分别通过边界层探测资料 and 模式模拟指出低空风切变可以激发湍流,从而触发大雾过程;蔡子颖等(2012)发现,在雾的维持阶段,雾中近地面长波辐射达到平衡,净长波辐射为 0,可用于区分雾、霾天气;此外,逆温层的生消变化对霾的形成也有重要影响(俞剑蔚等,2009;刘梅等,2014;Viezec et al,1969)。

目前在中央气象台及各地方台站的常规业务中,对雾、霾的预报预警主要基于对天气形势的分析把握。然而从上述分析可见,边界层结构对雾、霾形成、维持和消散起关键作用。加强对雾、霾过程边界层特征的分析,有助于拓宽雾、霾预报思路,加强对不同强度雾、霾过程的把握能力,为开发客观预报产品打下基础。同时,新型探测资料的应用在了解雾、霾演变特征及强度变化方面也起到了不可替代的作用。

本文主要利用 L 波段探空秒数据、中国气象局大气成分观测网 PM_{2.5} 质量浓度数据及地面观测等资料,研究 2013 年 1—2 月华北主要大城市不同强度雾、霾天气下的边界层特征,并与晴天天气下的边界层特征进行了对比。

1 地面资料修正

中华人民共和国气象行业标准《霾的观测和预报等级》(中国气象局,2010)中霾观测的判识条件规定:“相对湿度小于 80%,判识为霾;相对湿度 80%~95%时,按照地面气象观测规范规定的描述或大气成分指标进一步判识”。然而由于各省在观测中曾长期使用当地经验值作为判别标准(吴兑,2005),故当前地面观测数据中对于雾、霾两种天气现象仍存在部分混淆现象。因此在对雾、霾进行统计分析前需要进行订正,以加强数据的一致性和可比较性。结合地面相对湿度资料,将相对湿度 80%以下的雾修订为霾,95%以上的霾修订为雾。由于目前大气成分数据并不完善,故相对湿度为 80%~95%的观

测维持原记录。

2 近地面要素统计分析

2.1 地面风场统计分析

水汽含量和污染物浓度是影响能见度变化的重要因子,而风是输送水汽和污染物的载体。因此通过分析风向和风速特征可以在一定程度上了解雾和霾形成的原因。雾、霾天气多发于静稳天气形势下,其地面风场特征与晴天天气有较明显不同。同时受地理位置影响,不同城市在同一类天气现象中的风场特征体现出不同特点。选取北京(54511)、石家庄(53698)和太原(53772)三站作为华北大城市代表站,利用每日 8 次的地面观测资料,对 2013 年 1—2 月(共 472 个时次)雾、霾和晴天天气中的风向、风速分别进行统计。其中晴天天气定义为地面天气现象为晴(编码 00)、少云(编码 01)或多云(编码 02)的情况。统计结果如表 1 所示。在三个城市中,石家庄的雾、霾出现次数最多,分别为 143 和 149 次,占到总统计时次的 30.3%和 31.6%,即 1—2 月,石家庄有 61.9%的时间均受雾、霾等低能见度天气的影响。北京观测到雾 77 次、霾 123 次,分别占总数的 16.3%和 26.1%,合计有 42.4%的统计时次受到雾或霾的影响。太原雾、霾的出现频率最低,共占总时次的 17.6%。

表 1 2013 年 1—2 月华北大城市雾、霾和晴天天气时次统计

Table 1 Statistics of fog, haze and clear days in North China metropolises from January to February 2013

	北京(54511)	石家庄(53698)	太原(53772)
雾/时次	77	143	43
霾/时次	123	149	40
晴天/时次	243	155	315

通过对风向的统计(图 1)可以看出,出现雾、霾天气时,北京的主导风以偏东风和西南风为主,这两个风向有利于水汽和污染物从天津及河北中南部向北京的输送,且分别与北京北侧的燕山和西侧的太行山形成交角,有助于水汽和污染物在城区的积累。不同之处在于,偏北风也是雾天的一种主要风向,而霾天气下北风的出现率很低。在晴天天气时,风向以偏北风为主,可见北方冷空气对清洁大气有明显作

用。对于石家庄站,偏北风在三种天气状况下出现频率较高,说明偏北风是此季节该站的主导风向;当雾、霾天气发生时,无其他主导风向,说明该站处于弱系

统中,且无明显外来水汽和污染物输送。对于太原站,偏东风为该季节的主导风向;北风在晴天天气中所占比重较高;霾天气中偏西风占到较高比例。

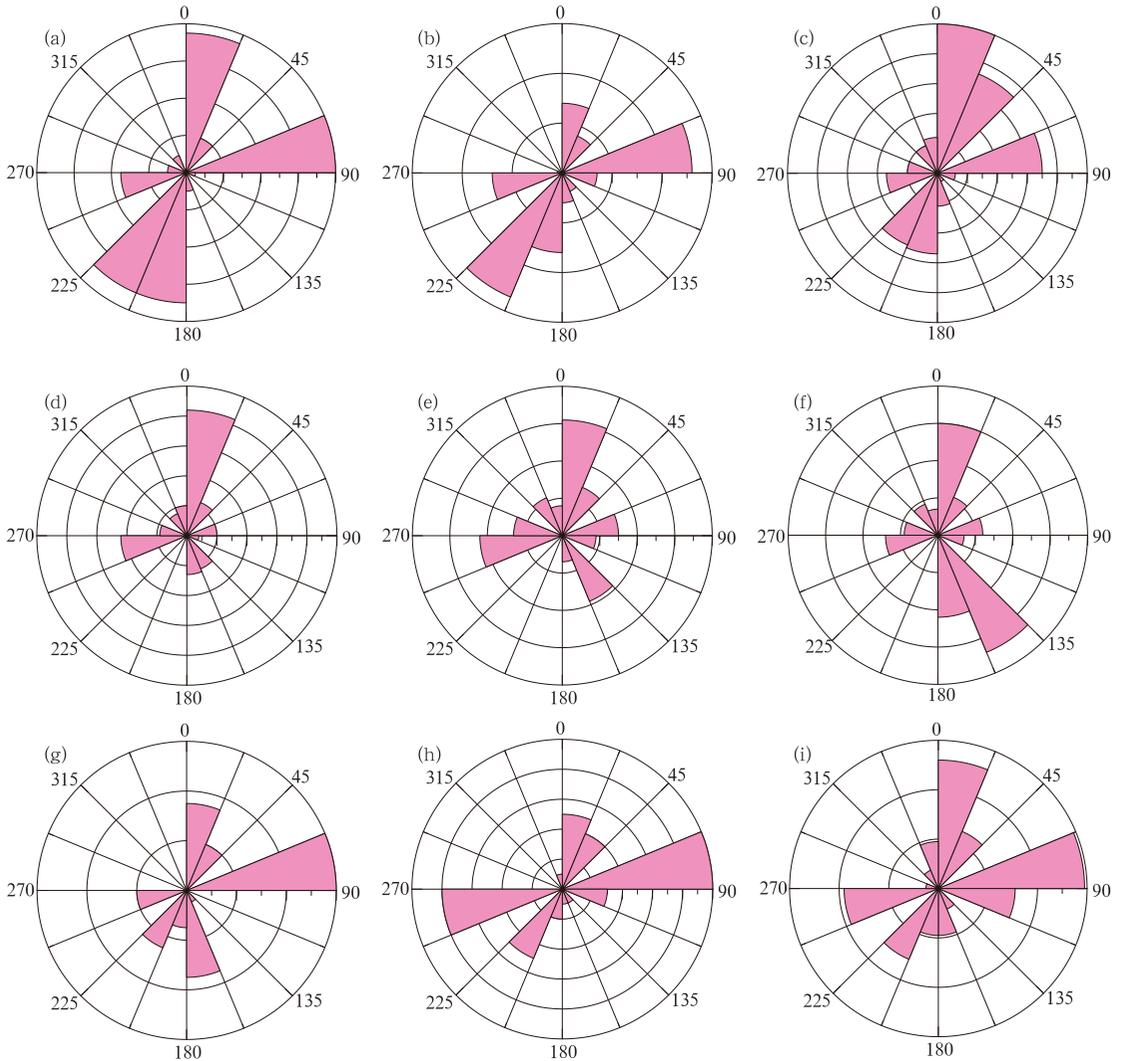


图1 2013年1—2月北京(a~c)、石家庄(d~f)、太原(g~i)的雾(a,d,g)、霾(b,e,h)和晴天(c,f,i)天气风向玫瑰图

Fig. 1 Wind rose diagram of fog (a,d,g), haze (b,e,h), and clear days (c,f,i) in Beijing (a~c), Shijiazhuang (d~f), and Taiyuan (g~i) from January to February 2013

从对北京、石家庄和太原三站的地面风速统计结果上看(图2),雾、霾天气多发生在静风或弱风环境下。其中,当风速大于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时很少观测到雾,但在 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速条件下仍可以观测到霾,说明雾对静稳环境的要求更高。当风速增大至 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上时,静稳环境被破坏,雾、霾天气几乎不会出现。在风速小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下,北京有56.6%的概率出现雾或霾天气,石家庄的这一概率为71.2%,太原为25.4%。可见对于北京和石家

庄,风速可以作为是否出现雾或霾的重要判据。

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度统计分析

观测数据显示,2013年1—2月的雾、霾过程中,首要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$ 。已有的试验和监测均表明 $\text{PM}_{2.5}$ 的消光作用可使大气能见度下降,从而导致霾的形成。此外,由于部分 $\text{PM}_{2.5}$ 可通过吸湿增长活化为云雾凝结核,故雾中也有大量 $\text{PM}_{2.5}$ 粒子的参与。因此,分析 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度有助于加深对

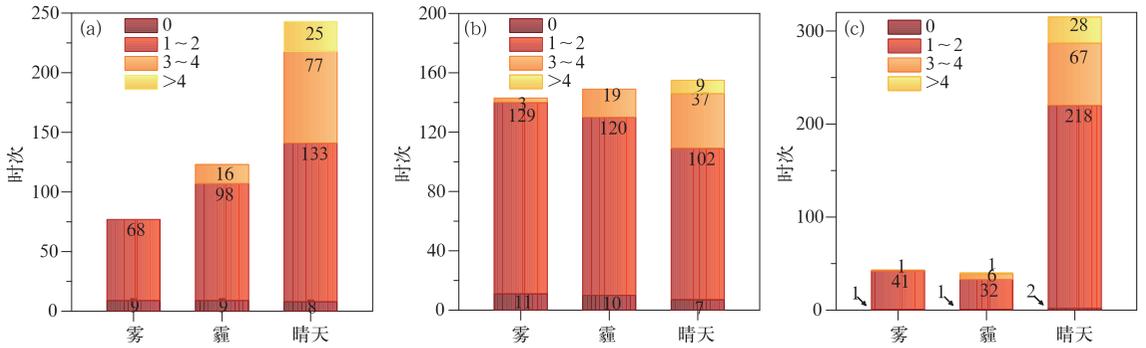


图 2 2013 年 1—2 月北京(a)、石家庄(b)和太原(c)在雾、霾及晴天天气下风速(单位: $m \cdot s^{-1}$)分布
Fig.2 Distribution of wind velocity on fog, haze and clear days in Beijing (a), Shijiazhuang (b) and Taiyuan (c) from January to February 2013 (unit: $m \cdot s^{-1}$)

雾、霾成因的了解。

利用中国气象局大气成分观测网资料对北京、石家庄和太原不同天气条件下 $PM_{2.5}$ 浓度的分布情况进行了统计。从图 3 来看,北京发生雾、霾天气时,分别有 81.58%和 86.96%的时次 $PM_{2.5}$ 浓度超过 $75 \mu g \cdot m^{-3}$,达轻度以上污染,但不同浓度等级的 $PM_{2.5}$ 所占比例相差不大。在晴天天气下,77.14%的时次 $PM_{2.5}$ 浓度低于 $75 \mu g \cdot m^{-3}$,为优—良的标准,大气成分与雾、霾天有明显不同。与北京类似,太原在雾、霾天气下分别有 93.02%和 90.00%的时次 $PM_{2.5}$ 浓度超过 $75 \mu g \cdot m^{-3}$,且不同等级的 $PM_{2.5}$ 分布形态相近。可见对北京和太原来说,不同浓度的 $PM_{2.5}$ 在雾、霾天气中出现概率相近,区分雾、霾应主要参考相对湿度。

对于石家庄,雾天的 $PM_{2.5}$ 浓度全部超过 $115 \mu g \cdot m^{-3}$,达中度以上污染,其中 75.52%的时次 $PM_{2.5}$ 超过 $250 \mu g \cdot m^{-3}$,达严重污染。霾发生时,中度污染以上的 $PM_{2.5}$ 浓度占 94.63%,其中 57.05%为严重污染。从各等级 $PM_{2.5}$ 浓度所占比例看,雾天比霾天的污染情况更加严重。此外,在晴天天气下,有 65.36%的时次 $PM_{2.5}$ 超过 $115 \mu g \cdot m^{-3}$ 。

从以上分析可以看出,雾、霾天气中的 $PM_{2.5}$ 浓度与晴好天气有较明显区别,但雾与霾中的 $PM_{2.5}$ 浓度相近。即在当前城市环境条件下,雾已并非仅仅是“悬浮在近地层大气中的大量微细乳白色水滴或冰晶的可见集合体”[《雾的预报等级》(GB/T27964-2011)],而是大量气溶胶粒子吸湿增长的结果,相对湿度成为区分雾、霾的主要参考因子。在现行的观测和预报标准下,相对湿度在 80%~95%

的雾、霾天气难以明确区分,有待进一步探讨和改进。

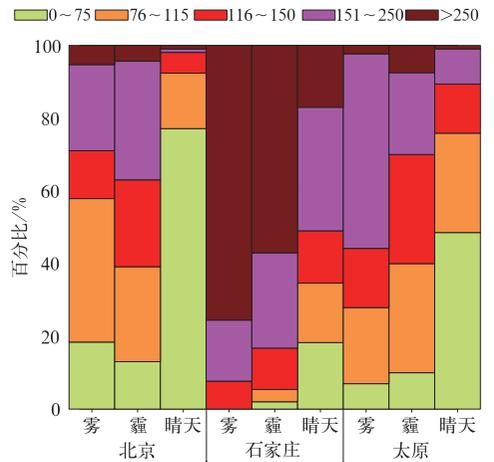


图 3 2013 年 1—2 月北京、石家庄和太原在雾、霾及晴天天气下 $PM_{2.5}$ 浓度分布特征
($PM_{2.5}$ 浓度在 $0 \sim 75 \mu g \cdot m^{-3}$ 为优—良, $76 \sim 115 \mu g \cdot m^{-3}$ 为轻度污染, $116 \sim 150 \mu g \cdot m^{-3}$ 为中度污染, $151 \sim 250 \mu g \cdot m^{-3}$ 为重度污染, $>250 \mu g \cdot m^{-3}$ 为严重污染)
Fig.3 Distribution of $PM_{2.5}$ concentration on fog, haze and clear days in Beijing, Shijiazhuang and Taiyuan from January to February 2013
($0 \sim 75 \mu g \cdot m^{-3}$, good-moderate; $76 \sim 115 \mu g \cdot m^{-3}$, USG; $116 \sim 150 \mu g \cdot m^{-3}$, unhealthy; $151 \sim 250 \mu g \cdot m^{-3}$, very unhealthy; $>250 \mu g \cdot m^{-3}$, hazardous)

3 典型雾、霾和晴天天气边界层垂直结构特征

L 波段探空系统能够连续自动测定高空气压、气温、湿度和风等要素,垂直分层密,可获取较详细

的边界层探测数据,为了解大气边界层状况提供了方便。下面以北京站(54511)为例,选取典型雾、霾和晴天天气过程对边界层垂直结构特征进行分析。

3.1 2013年1月21—23日雾过程分析

1月21—23日,亚洲中高纬500 hPa以平直的纬向型环流为主,无明显槽脊活动。地面冷高压中心位于蒙古国以北,华北地区位于高压前部,等压线稀疏,水平气压梯度较小(图略)。本次过程水汽含量较高,地面相对湿度大,华北大部地区观测到轻雾,部分地区出现持续性大雾。

22日08时,北京站观测有能见度1.5 km的轻雾,地面相对湿度88%;至20时,相对湿度89%,能见度下降至0.9 km。根据中华人民共和国国家标准《雾的预报等级》(GB/T 27964-2011),雾的等级由轻雾加强为大雾。从湿度廓线上看,08时<100 m为相对湿度>80%的湿层,雾的厚度十分浅薄。100 m以上相对湿度急剧减小至<50%。干层的存在将加速雾滴的蒸发,不利于雾的维持和增强。至20时,雾层明显加厚,相对湿度>80%的湿层延伸

至330 m左右。

温度廓线(图4)显示,08时300 m以下为贴地强逆温层,逆温强度达 $2.07^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$,大气层结十分稳定。然而由于湿层过于浅薄,无法形成深厚的雾层。与之形成对比的是20时逆温层位于250~450 m的离地层中,逆温层底与贴地湿层顶高基本对应,逆温强度约为 $1.75^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ 。强稳定层结有效抑制了空气的垂直运动,减少了湿层和干层之间的水汽交换,对雾的维持起到重要作用。

22日08和20时的地面观测风速分别为 1 和 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,均满足形成雾的弱风条件。从垂直廓线上看,08时从地面向上风速迅速增大,在150 m附近即达到 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极值,垂直风切变达到 0.047 s^{-1} 。较大的风切变加速了干湿气层间的水汽交换,不利于雾层的增厚。与之相反,20时低层风速的增加十分缓慢,350 m之下的风速均在小于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,有利于湿层的稳定。

从以上分析可以看出,尽管08和20时地面相对湿度和风速均十分接近,但边界层垂直结构存在较为明显的差异,从而导致雾的强度有所不同。

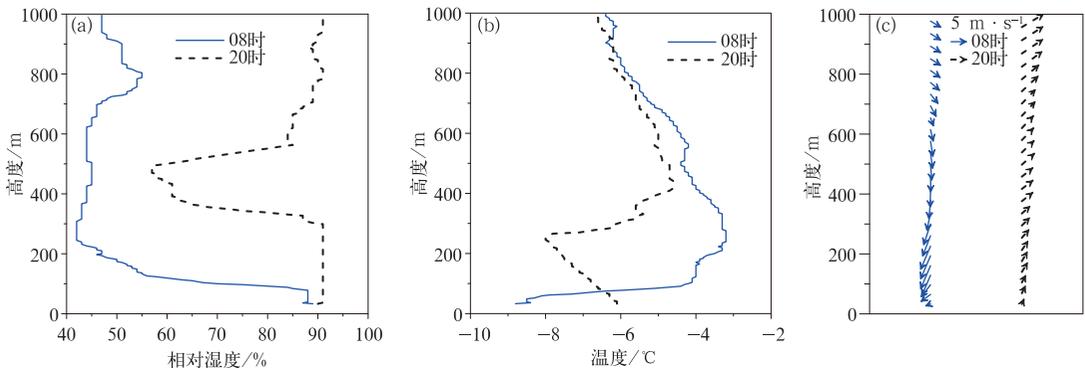


图4 2013年1月22日08和20时L波段探空系统探测的北京(54511)边界层垂直结构
(a)相对湿度, (b)温度, (c)风速和风向

Fig. 4 Vertical structure of boundary layer observed by L-band sounding in Beijing (54511) at 08:00 and 20:00 BT 22 January 2013
(a) relative humidity, (b) temperature, (c) wind speed and direction

3.2 2013年2月24—27日霾过程分析

2月24—27日,我国中东部地区受500 hPa弱高压脊控制,无明显冷空气活动。地面高压强度较弱,华北地区位于高压后部,气压梯度较小(图略)。本次过程相对湿度较小,华北地区出现大范围霾天气。

24日08时,北京出现能见度仅有2 km的霾,地面相对湿度70%, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度为 $125.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。霾天气持续至20时,随着相对湿度下降至48%,能

能见度上升至7 km,然而 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度激增至 $441.87\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。可见这里能见度增大主要由相对湿度减小造成,并不能完全表征大气污染物浓度的变化。

相对湿度廓线表明(图5),08时800 m以下的相对湿度一般>70%,其中320~600 m超过80%,湿层较为深厚,此时的霾天气以湿霾为主。至20时,500 m以下的贴地层相对湿度均<50%,以干霾为主。

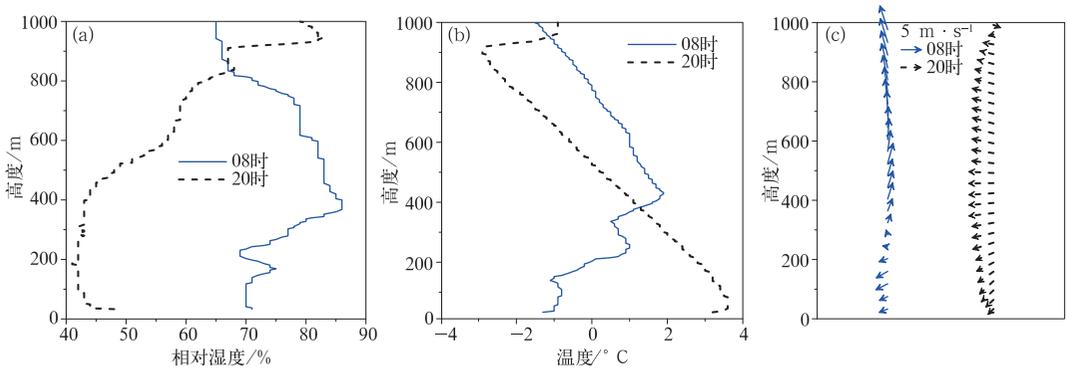


图 5 同图 4, 但为 2013 年 2 月 24 日

Fig. 5 Same as Fig. 4, but on 24 February 2013

温度层结曲线显示,08 时 250 m 以下大气以逆温或中性层结为主,350~450 m 有第二层逆温层,稳定层结较为深厚。与相对湿度曲线对比,逆温层与高湿区的位置高度吻合。而 20 时仅有贴地 80 m 的浅薄逆温层,静力稳定条件较之 08 时明显变差。

风矢量的变化也在一定程度上解释了霾强度的变化特征。08 时,近地层垂直风切变较小,400 m 以下风速 $\leq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,结合逆温层结形成典型静稳天气特征。20 时风速随高度逐渐增大,至 400 m 时增加到 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。较强的风切变加强了边界层内上下空气层间的湍流混合,从而使逆温层被破坏,相对湿度降低。此外,20 时近地层转为一致偏东风,风向与太行山形成垂直交角,有利于污染物在城区的堆积,从而在一定程度上解释了 $\text{PM}_{2.5}$ 粒子浓度的迅速增加。

于华北北部,强度较强,并不断有小股冷空气补充南下(图略)。地面相对湿度较低,华北大部地区以晴或多云为主,无明显雾、霾天气。

2 月 8 日北京天气晴,能见度超过 10 km。从 L 波段探空曲线上看(图 6),600 m 以下的近地层为干层,08 和 20 时相对湿度均小于 50%。贴地有厚度几十米的浅薄逆温层,且逆温强度较弱。近地层 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以内的弱风层较为浅薄,风速随高度不断加大,300 m 以内垂直风切变达 0.02 s^{-1} 。即晴天天气下边界层低层具有较大垂直风切变、低湿度和无明显逆温的特征。

综上,雾、霾天气的边界层垂直结构均具有低层逆温和小风的特征,与晴天天气有明显差别。通过对边界层垂直结构的深入分析,可提高对雾、霾强度的分级预报能力。

3.3 2013 年 2 月 7—9 日晴天天气

2 月 7—9 日,华北地区位于 500 hPa 高空槽后的西北气流中,环流经向度较大。地面高压中心位

4 逆温层特征

从前文对边界层垂直结构的分析可见,逆温层

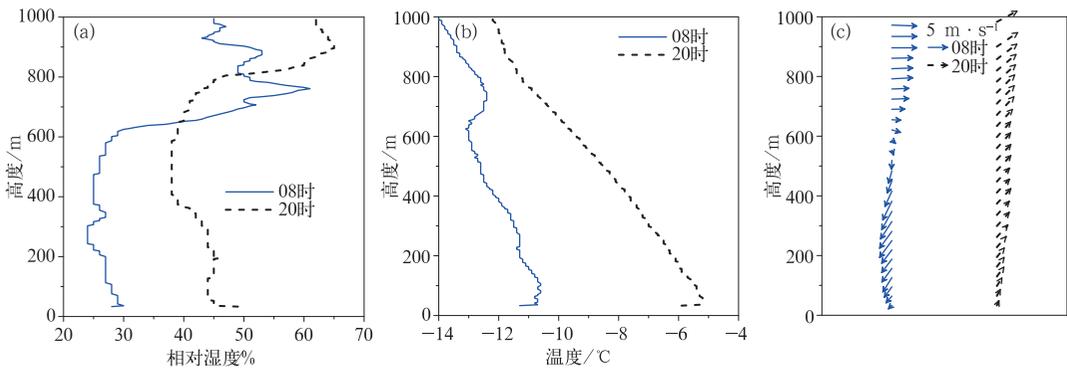


图 6 同图 4, 但为 2013 年 2 月 8 日

Fig. 6 Same as Fig. 4, but on 8 February 2013

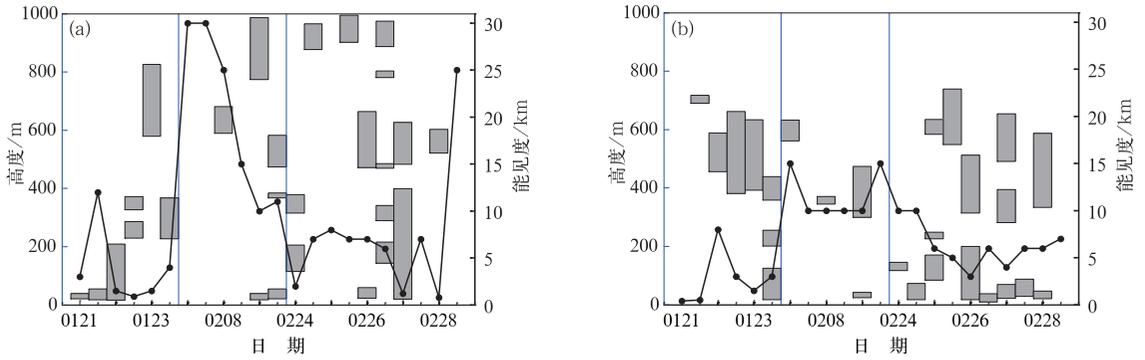


图7 2013年1月21—23日、2月7—9日、2月24—28日08和20时(a)北京和(b)太原雾、霾及晴天过程中逆温层分布和能见度情况

Fig. 7 The sequence of inversion layer and visibility on fog, haze and clear days in (a) Beijing and (b) Taiyuan at 08:00 BT and 20:00 BT during 21—23 January, 7—9 February and 24—28 February 2013

的位置和强度对于大气稳定层结的形成有重要意义。加深对逆温层特征的理解有助于更好地分析雾、霾的形成及强度变化。

鉴于上述3个过程中边界层高度均低于1000 m,故在此利用L波段探空秒数据比较雾、霾和晴天天气过程中北京和太原两站(石家庄暂无数据)1000 m以下逆温层层数、高度和厚度的分布情况。定义逆温强度为相邻两层间逆温强度的最大值。为剔除强度较弱的逆温层,只分析逆温强度 $>1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ 的逆温层,结果如图7所示。可以看到晴天与雾、霾的逆温层结构有明显差异。在雾、霾过程中,逆温层底高度较低,厚度较大,且常表现为多层结构。晴天天气中逆温层底一般较高或无逆温,且以单层结构为主。

分析北京站3次过程可以看到(表2),对于所有时刻平均逆温层数,霾过程最多,雾过程次之,晴天最少;对出现逆温时刻的最低层逆温层底高度求平均,雾过程最低,晴天天气次之,霾过程最高;对所有时刻求逆温层平均总厚度(所有高度的逆温层厚度相加,无逆温层时刻作为零值处理),霾过程厚度最大,雾过程厚度次之,晴天天气最薄。太原站相应时段逆温层特征量如表3所示。与北京站类似,逆温层层数霾过程最多,雾过程次之,晴天天气最少;逆温层底高度霾过程最低,晴天天气次之,雾过程最高;逆温层总厚度雾和霾接近,均高于晴天天气。

以上分析表明,逆温层层数和逆温层厚度对雾、霾天气具有更好的指示意义。相比雾过程,霾过程逆温层层数更多,厚度更大或者接近。

鉴于逆温层层数和厚度对雾、霾天气具有一定

表2 北京(54511)3次天气过程逆温层特征量分布
Table 2 Statistics of inversion layer characteristics on fog-haze and clear days in Beijing (54511)

	雾	晴天天气	霾
逆温层平均层数	1.2	1.0	1.4
逆温层底平均高度/m	182	209	372
逆温层平均总厚度/m	123	81	142

表3 太原(53772)3次天气过程逆温层特征量分布

Table 3 Statistics of inversion layer characteristics on fog-haze and clear days in Taiyuan (53772)

	雾	晴天天气	霾
逆温层平均层数	1.2	0.7	1.5
逆温层底平均高度/m	387	310	96
逆温层平均总厚度/m	154	49	151

的指示意义,同时逆温层强度也是表征层结特性的重要因素,因此综合考虑这三个要素计算整层逆温强度,此处定义为特定高度以下(此处为1000 m)所有逆温层顶和逆温层底温差之和。整层逆温强度和能见度的关系如图8所示。在这3次过程中,北京和太原的整层逆温强度和能见度之间呈现较好的负相关关系,相关系数分别为 -0.427 和 -0.439 ,均通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验。在雾、霾过程发生时,整层逆温强度一般 $>2\text{ }^{\circ}\text{C}$;而当能见度 $>10\text{ km}$ 时,整层逆温强度一般 $<1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

需要指出的是,这里关于整层逆温强度的讨论仅限于所选3次过程中北京和太原两站的情况,有一定的局限性。在未来的工作中可以尝试增加个例数量,以得出不同强度的雾、霾过程中整层逆温强度的阈值信息。

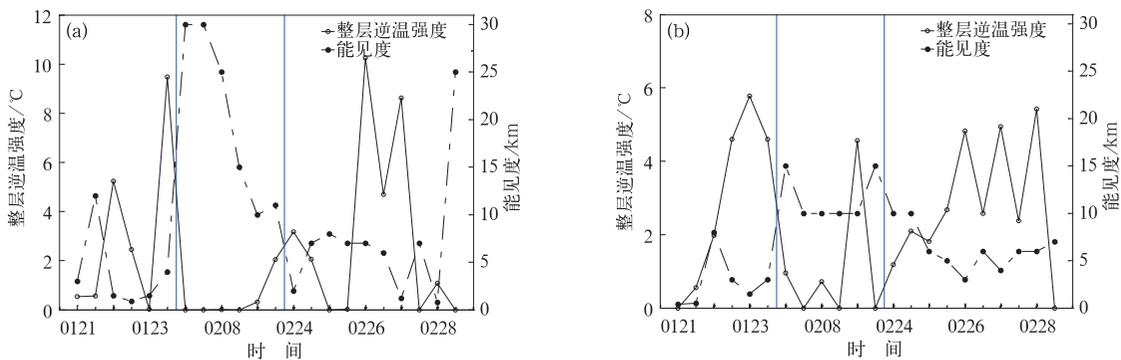


图8 同图7,但为整层逆温强度和能见度演变情况

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the intensity of the whole inversion layer and evolution of visibility

5 结论

(1) 在雾、霾天气下,北京的主导风以偏东风和西南风为主,石家庄无明显主导风向。对于太原站,霾天气中偏西风占到较高比例。当风速大于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时很少观测到雾,风速增大至 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时,雾、霾天气几乎不会出现。在风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的情况下,北京有 56.6% 的概率出现雾或霾天气,石家庄的这一概率为 71.2%,故对于这两个城市,风速可以作为是否出现雾或霾的重要判据。

(2) 北京、石家庄、太原发生雾、霾天气时均有超过 80% 的时次 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 达轻度以上污染。对于各城市,雾、霾天气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布情况相近,相对湿度是区分雾、霾的主要参考因子。

(3) 雾、霾天气的边界层垂直结构与晴天天气有明显差别,较强的雾、霾的形成均需要弱风切变、逆温层及湿层的配合。

(4) 雾、霾过程中,逆温层底高度较低,厚度较大,且常体现出多层结构。逆温层层数和厚度对雾、霾天气的预报具有较好的指示意义。相比雾过程,霾过程逆温层层数更多,厚度更大或者接近。在雾、霾过程发生时,整层逆温强度一般 $> 2 \text{ }^\circ\text{C}$; 而当能见度 $> 10 \text{ km}$ 时,整层逆温强度一般 $< 1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

若条件允许,后期可扩大关注范围,通过更多历史个例对 L 波段探空秒数据资料和边界层特征量进行统计分析,得到可在业务中加以应用的指标量。

参考文献

安林昌,张芳华. 2013. 2013年2月大气环流和天气分析. 气象, 39

(5); 659-664.

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.

关月,何立富. 2013. 2013年1月大气环流和天气分析. 气象, 39(4): 531-536.

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.

刘照明,胡非,邹海波,等. 2010. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析. 高原气象, 29(5): 1174-1182.

孙或,马振峰,牛涛,等. 2013. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征. 气候与环境研究, 18(3): 397-406.

吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. 气象, 31(4): 3-7.

杨军,王蕾,刘瑞阳,等. 2010. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和生消物理机制. 气象学报, 68(6): 998-1006.

俞剑蔚,孙燕,张备,等. 2009. 江苏沿江一次重霾天气成因分析. 气象科学, 29(5): 664-669.

张光智,卞林根,王继志,等. 2005. 北京及周边地区雾形成的边界层特征. 中国科学 地球科学, 35(增刊 I): 73-83.

张小曳,孙俊英,王亚强,等. 2013. 我国雾、霾成因及其治理的思考. 科学通报, 58(13): 1178-1187.

中国气象局. 2010. QX/T 113-2010. 霾的观测和预报等级.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 2011. GB/T 27964-2011. 雾的预报等级.

Gautam R, Hsu N C, Kafatos M, et al. 2007. Influences of winter haze on fog/low cloud over the Indo-Gangetic Plains. J Geophys Res, 112(D5): D05207.

Li P, Fu G, Lu C G, et al. 2012. The formation mechanism of a spring sea fog event over the Yellow Sea associated with a low-level jet. Wea Forecasting, 27(6): 1538-1553.

Viezee W, Oblanas J. 1969. Lidar-observed haze layers associated with thermal structure in the lower atmosphere. J Appl Meteor, 8(3): 369-375.