

孙颖, 马艳, 高荣珍, 等. 山东一次持续性平流辐射雾过程特征及成因分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 128-135.
Sun Ying, Ma Yan, Gao Rongzhen, et al. Analysis of the characteristics and causes of a sustained advection-radiation fog process in Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018, 38(4): 128-135. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.014. (in Chinese)

山东一次持续性平流辐射雾过程特征及成因分析

孙颖^{1,3}, 马艳², 高荣珍², 薛允传², 江敦双², 凌艺²

(1. 青岛市城阳区气象局, 山东 青岛 266109; 2. 青岛市气象局, 山东 青岛 266100; 3. 青岛市气象灾害防御工程技术研究中心, 山东 青岛 266100)

摘要: 2017年1月1—5日, 山东出现了一次大范围的平流辐射雾过程。利用山东地区自动气象站观测资料、青岛探空站资料、风廓线雷达资料和NCEP/NCAR再分析资料, 通过分析此次连续大雾过程的大尺度环流背景场、温湿场特征, 地面、高空气象要素条件, 揭示了其形成原因、维持机制和消散机理。结果表明: 中高纬度平直的大气环流、静稳的垂直结构是此次大雾形成的背景条件; 水汽输送阶段变化造成的低层水汽浓度变化是大雾阶段变化的原因; 两次弱低槽冷锋过程显著增加了雾的强度和范围, 也使雾的性质由平流雾变为辐射雾。当低层水汽持续减少, 中低层东风气流增强并破坏了大气的稳定层结时, 大雾逐渐消散。

关键词: 持续性大雾; 平流辐射雾; 水汽输送; 弱低槽冷锋

中图分类号: P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)04-0128-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.04.014

Analysis of the characteristics and causes of a sustained advection-radiation fog process in Shandong

SUN Ying^{1,3}, MA Yan², GAO Rongzhen², XUE Yunchuan², JIANG Dunshuang², LING Yi²

(1. Chengyang Meteorological Bureau, Qingdao 266109, China; 2. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266100, China; 3. Qingdao Engineering Technology Research Center for Meteorological Disaster Prevention, Qingdao 266100, China)

Abstract A large range of 5-day advection-radiation fog weather occurred in Shandong Peninsula from 1 to 5 January 2017. By analyzing the large-scale circulation, the temperature and humidity field, and surface and upper meteorological elements, the formation, maintenance, and dissipation of the fog are revealed based on automatic weather station data in Shandong, sounding data and wind profile radar data in Qingdao as well as conventional observation data and NCEP/NCAR reanalysis data. The results are as follows. The flat atmospheric circulation in middle and high latitudes and the static atmospheric vertical structure are the background conditions of this fog. The density change of the water vapor resulting from the phase change during its transfer causes the phase change of the fog. Two weak cold front processes significantly enhance the intensity of the fog and expand its effect range, and also make the advection fog develop into a radiation one. When the moisture on the low layer declines and the easterly wind speed on the boundary layer increases and destroys the stable atmospheric stratification, the fog gradually dissipates.

Key words sustained heavy fog; advection-radiation fog; water vapor transfer; weak cold front

收稿日期: 2018-01-17; 修订日期: 2018-07-09

基金项目: 山东省气象局科研项目(sdqd2017-05)

作者简介: 孙颖, 女, 硕士, 工程师, 主要从事区域气候与海气相互作用、天气预报相关研究, sunying88@foxmail.com。

引言

大雾是一种灾害性天气现象,它的出现会严重降低大气的能见度(小于1 000 m),导致交通瘫痪、机场关闭、海上船舶安全事故发生;大雾与空气中的颗粒物混合,加重了污染物浓度,降低空气质量,影响人的身体健康^[1]。近些年,气象工作者利用多种方法和数据从诸多方面对连续性大雾成因、特征和预报进行了研究。华北平原连续性大雾一般有特定的天气形势背景条件以及稳定的边界层条件^[2]。大尺度平直纬向流场和低层的浅槽活动是北方大雾形成的重要条件^[3],北上的低空西南急流为浓雾的启动和长时间的维持提供了大量的水汽^[4],低空逆温的维持和增厚又与大雾的持续性有关^[4-5]。另外,低空下沉运动、地面有辐射逆温也是大雾形成和长时间不消的重要条件^[6]。陆地雾多发生在层结稳定、风力微弱及低层水汽充沛的天气条件下,或发生在近地表有强烈辐射降温的夜间,有明显的地域特征^[4]。地面中尺度辐合线(区)与辐射降温有利于形成辐射雾^[7]。低层有小槽影响,且温度平流弱,地面风小有利于华北地区雾的形成^[8]。随着冬季城市污染气体的排放,气溶胶浓度的增加也提高了中国北方地区大雾出现的频率^[9]。一些学者还针对辐射雾、华北持续大雾及海雾等进行了结构特征的研究^[10-15]。

山东多辐射雾和平流雾^[16-17],2017年1月1—5日山东出现了连续5 d的大雾,此次大雾分布范围广、浓度大、持续时间长,导致山东境内多条高速公路封闭,机场多个航班延误或取消,造成了较大的经济损失,也给人民生活 and 身体健康造成较大影响。对于此次持续性大范围的大雾天气过程,应用常规气象观测资料、NCEP/NCAR(1°×1°)逐6 h全球再分析资料(FNL)、探空资料、风廓线雷达资料,从天气背景、物理量场等多方面进行分析,总结了连续性大雾天气的成因,为今后的预报提供参考。

1 天气实况

2017年1月1—5日山东出现了一次连续性大雾天气过程,雾的性质为混合雾(平流辐射雾)。其中,1日山东全省有轻雾,08时个别站能见度低于500 m甚至50 m,且分布零散;1日夜间—2日雾浓度增强,大雾范围由鲁西北向半岛推进,2日08时,山东大雾达95站,其中浓雾65站;3日雾浓度和范围稍减弱,半岛地区能见度回升,鲁中鲁西北大雾

持续;4日雾再次加强,4日08时,全省有103站出现浓雾,其中59站能见度不足50 m,雾强度达到此次大雾过程最强阶段;5日白天大部分地区雾减弱消散,鲁西南仍有轻雾,7日有弱冷空气伴随降水,鲁西南雾彻底消散。本文对此次大雾较大的时段(2017年1月1—5日)进行研究,青岛位于半岛地区,在本次大雾过程中,其雾的变化与山东地区整体大雾变化基本一致,后文将主要以青岛作为代表站,对此次大雾过程进行诊断分析。表1给出1月1—5日山东省123个国家气象观测站雾的站数统计,此次大雾过程具有范围广和强度大的特点,且在4日强度达到最强。

表1 2017年1月1日08时—5日08时山东省出现大雾站数

Table 1 Number of stations affected by the fog in Shandong Province from 08:00 BST on 1 to 08:00 BST on 5 January 2017

时间	大雾(<1 000 m)	浓雾(<500 m)	强浓雾(<50 m)
1日08时	54	16	4
2日08时	95	65	26
3日08时	79	67	31
4日08时	111	103	59
5日08时	53	29	4

2 大尺度环流背景场特征

2.1 高空环流形势

2017年1月1日08时—4日20时(北京时,下同)欧亚500 hPa高空图(图略)上,亚洲中高纬度为一槽一脊型,低槽位于里海以西,贝加尔湖以东为一高压脊,我国北方大部分地区受弱高压脊控制,为西西北气流,没有明显的温度平流,南支槽和副热带高压(以下简称“副高”)脊线位于15°N附近,副高稳定且强度较强。1日20时,500 hPa有浅西风槽移近,无降水,山东逐渐受槽后偏西气流控制,环流平直。1日20时、3日20时低层850 hPa分别有槽东移,850 hPa、925 hPa为西南风,有暖脊或暖平流。暖平流的存在,有利于低空逆温层的维持,大气较长时间处于静稳天气形势。

2.2 地面形势

分析大雾期间海平面平均气压场(图略),山东位于均压场,等压线稀疏。其中,1日20时、3日20时,山东均位于鞍形场内,高压中心位于蒙古,高压东南侧等压线相对密集,有东北—西南向的弱冷锋

位于鲁西南;2日02时、4日02时,弱冷锋过境山东,在弱冷锋附近及锋后,雾的面积扩大,浓度加强,随着地面弱冷锋南下,雾区范围迅速向东南扩展,2日、4日凌晨全省大部地区达到大雾乃至浓雾级别。弱冷锋过后,等压线变稀疏,雾区范围减小,雾浓度减弱。两次地面弱冷锋影响均伴随雾的浓度加强,面积扩大,大雾过程与弱冷空气活动关系密切。

2.3 温湿场

图1给出了大雾前后925 hPa沿120°E(山东范围:34~39°N、114~122°E,青岛站:36.07°N、120.33°E)温度平流及1000 hPa相对湿度、975 hPa

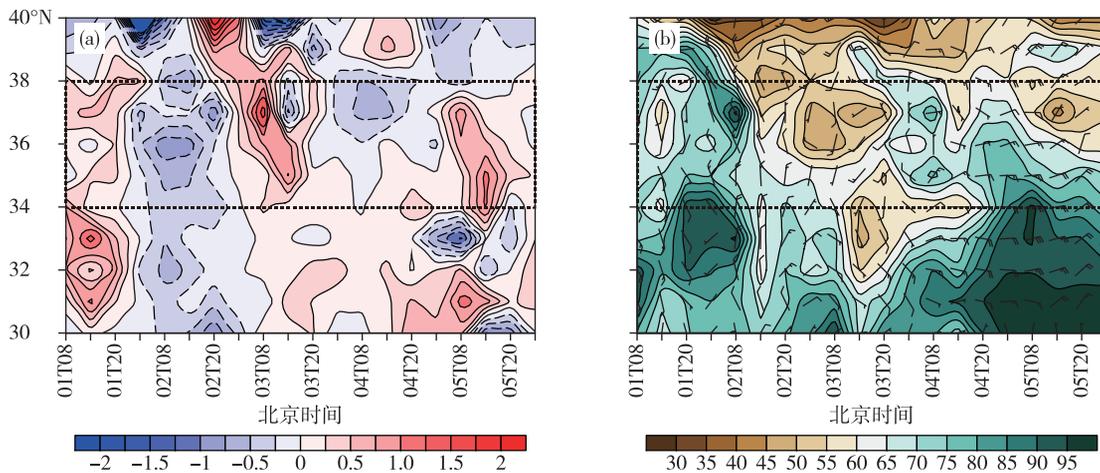


图1 2017年1月1—5日沿120°E 925 hPa温度平流(a;填色,单位: $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-2}$)和1000 hPa相对湿度(填色,单位:%)、975 hPa风场(b)(虚线框区为山东所在纬度范围)

Fig.1 Evolution of temperature advection at 925 hPa (a; colored, units: $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-2}$), relative humidity at 1000 hPa (colored, units: %), and wind field at 975 hPa (b) along 120°E from 1 to 5 January 2017 (the dotted box for the latitude range of Shandong)

3 气象要素特征

3.1 地面气象要素特征

以青岛站为代表将此次大雾过程划分为5个阶段(图2)。1)大雾前期(1日01时—2日07时),这一时期受西南暖湿气流影响,近地面层以南风为主,有来自南部海洋暖湿平流作用,能见度逐渐下降,低于3 km(图2a),山东大部地区以轻雾为主,低层夜间有小槽过境,能见度继续下降;2)大雾形成及维持阶段(2日07时—3日07时),近地面层由南风转为北风,弱冷空气的降温作用(图2b),叠加夜间辐射降温,水汽凝结,温度露点差减小,能见度下降,青岛能见度于2日02时降至500 m以下甚至100 m以下(图2a),相对湿度达到90%以上(图2c),温度露点差小于2 °C(图2d),大雾持续20 h,

风场随时间演变图。1日08时—2日02时、3日02—20时,山东所在的纬度为暖平流(图1a),并且多为西南风(图1b),槽前西南风输送暖湿水汽,使得雾区相对湿度逐渐增大,平流作用造成山东出现大范围轻雾。2日02时—3日02时、3日20时—5日02时,低层小槽东移,槽后弱冷平流输送,此时近地面层水汽充沛,而上层水汽输送不明显(图略),上干下湿,夜间晴空辐射降温明显,辐射过程对雾有加强作用。大雾形成后,低层西北干冷空气输送,切断了水汽的持续补充,1000 hPa相对湿度减小,大雾持续一段时间后逐渐减弱。

气温维持在 $-1.7 \sim 2.6 \text{ } ^\circ\text{C}$ (图2b),温差4.3 °C。在北风持续约29 h后,相对湿度下降,大雾减弱并进入间歇阶段,能见度逐渐回升;3)大雾间歇阶段(3日07—20时),3日随着日出增温(图2b),能见度升至2.5 km,且该时段大气相对湿度稍降,最低时达到66%(图2c),温度露点差有所抬升(图2d);4)大雾重现阶段(3日20时—5日08时),3日夜间又有一低槽影响山东,低层暖湿气流输送提供水汽,槽后冷空气造成弱降温,青岛出现大雾甚至浓雾天气,浓雾持续4 h,能见度最低达34 m(图2a),大雾持续24 h,大雾持续期间,2 m气温为0.8~5 °C(图2b),温差4.2 °C,温度露点差不足2 °C(图2d);5)大雾消散阶段(5日08—20时),相对湿度减小,温度露点差增大,大雾渐趋消散。

大雾发展过程中,地面各气象要素之间有一定

的变化规律:雾浓时,能见度减小,气温下降,温度露点差减小,相对湿度增大;雾散时则相反。

大雾形成及维持阶段和大雾重现阶段均发生在南风时或南风转北风之后,说明前期低层持续偏

南风有利于青岛站大雾的形成,弱冷空气能增加雾的强度。青岛站在大雾前期以及大雾间歇阶段10 min平均风速小于4 m·s⁻¹(图2e),且有统计^[18]指出青岛站前期风速小于7 m·s⁻¹的大雾占大雾发

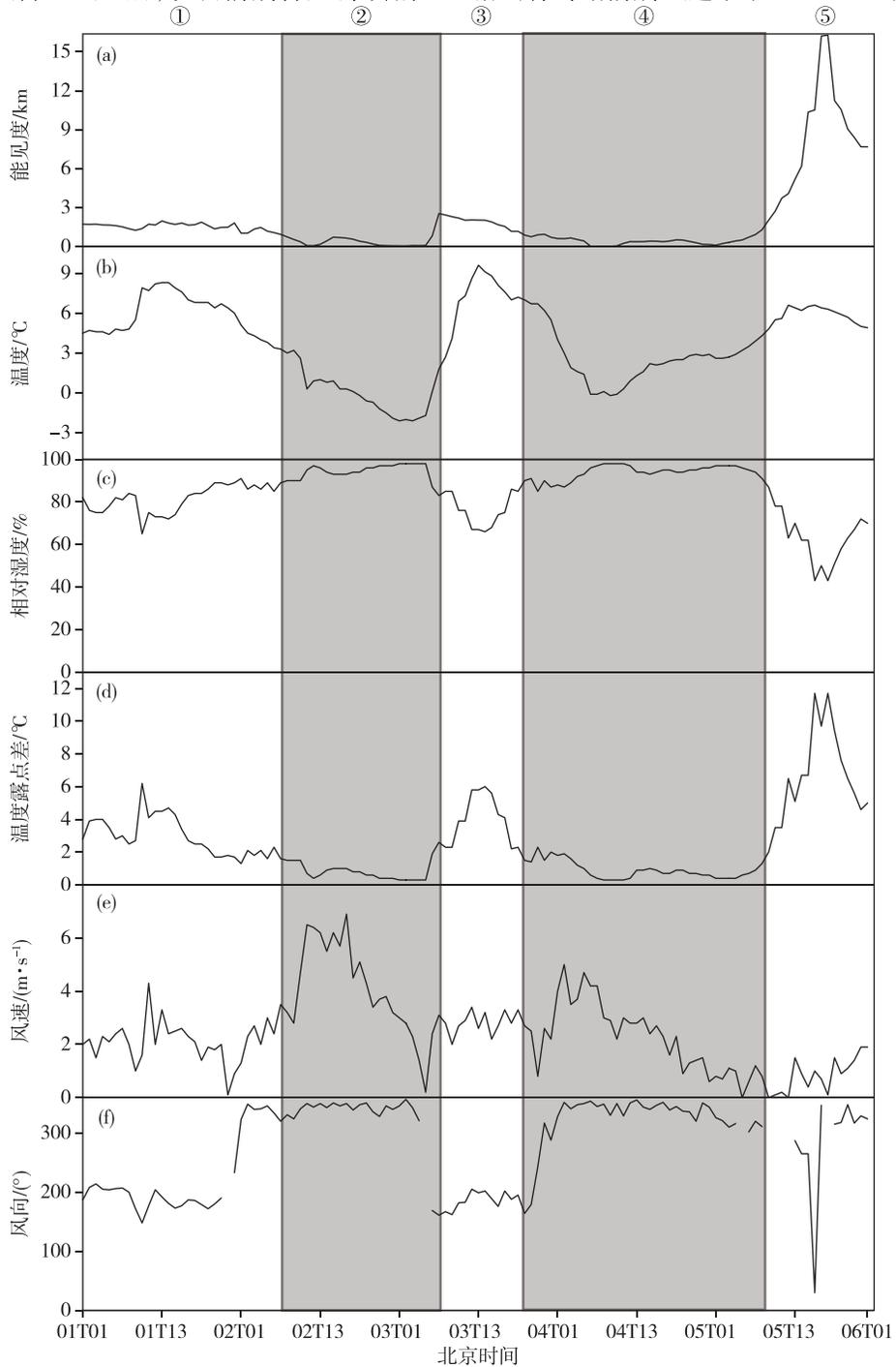


图2 青岛站2017年1月1—5日能见度(a;单位:km)、温度(b;单位:°C)、相对湿度(c;单位:%)、温度露点差(d;单位:°C)、风速(e;单位:m·s⁻¹)、风向(f;单位:°)随时间演变图及大雾阶段分割(①大雾前期,②大雾形成及维持阶段,③大雾间歇阶段,④大雾重现阶段,⑤大雾消散阶段)

Fig.2 Evolution of visibility (a; units: km), temperature (b; units: °C), relative humidity (c; units: %), depression of the dew point (d; units: °C), wind speed (e; units: m·s⁻¹), and wind direction (f; units: °) at Qingdao Station from 1 to 5 January 2017 and fog stages (① the early phase, ② the formation and maintenance phase, ③ the intermittent phase, ④ the recurrence phase, ⑤ the dissipation phase)

生总数的 95%,说明较小的风速有利于雾的生成。大雾形成及维持阶段、大雾重现阶段的风为偏北风(图 2f),风速均经历先增大后减小的过程,且风速最大值接近 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 2e),两个阶段风速较大时段均对应气温下降,有弱冷空气影响,能见度先降后升,说明弱冷空气对大雾具有加强作用,而持续偏北风对大雾有减弱作用。大雾形成及维持阶段风速较大雾重现阶段大,对应该阶段大雾持续时间更短,说明风速越大对大雾削弱作用越强。

根据山东的地理和气候特征,全省分为鲁西北、鲁中、鲁南和半岛 4 个气候区域。此次大雾影响范围广,在 4 个区域各选一个代表站,即德州(鲁西北)、青岛(半岛)、莱芜(鲁中)和菏泽(鲁南)站,分

析各区域大雾的变化及其与夜间辐射降温的关系(图 3a-d)。辐射降温用当日最高气温与次日早晨最低气温之间的差值近似表征。能见度低于 1 km 的雾最早出现于鲁西北(德州),能见度回升至 1 km 以上且稳定在 1 km 以上最早出现于鲁中(莱芜)、半岛(青岛)。由于各区域地理位置、地形地貌存在差异,4 个站点能见度变化趋势并不完全一致,大雾时段也不同,但各站夜间辐射降温最显著的日期均对应能见度的骤降,分别出现在 3 日清晨(德州)、4 日清晨(青岛)、3 日清晨(莱芜)、2 日清晨(菏泽),这说明在静稳天气形势下,夜间晴空辐射降温对雾浓度加强作用显著。

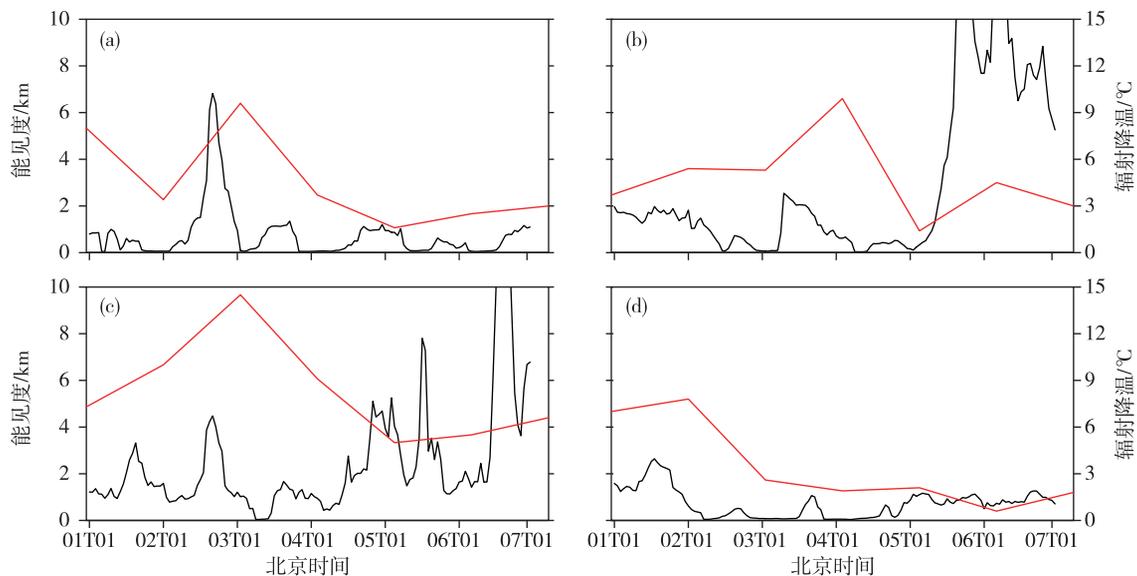


图 3 德州(a)、青岛(b)、莱芜(c)和菏泽(d)站辐射降温(红线;单位:°C)和能见度(黑线;单位:km)的时间变化

Fig.3 Evolution of radiation cooling (red line, units: °C) and visibility (black line, units: km) at Dezhou Station (a), Qingdao Station (b), Laiwu Station (c), and Heze Station (d)

3.2 高空气象要素特征

3.2.1 风垂直廓线气象要素特征

利用青岛风廓线雷达观测资料能够分析边界层、对流层风向风速对雾区的影响。2 日 01 时(图 4a)、3 日 23 时(图 4b)前后分别有低槽经过青岛,槽前 1 500 m 以下层均为偏南气流,风随高度顺转,有弱暖平流,槽前正涡度对应弱上升运动(图略),边界层厚度有所增加,湿区向高空发展;低槽过后,近地层转为偏北风,风随高度逆转,有弱冷平流,雾浓度增强且在垂直方向伸展较高。4 日 08—20 时(图 4c),1 000~4 000 m 高度处风速较大且风向变化无序,此时混合层高度高。4 日 22 时之前,大气边界层 1 500 m 范围内风切变很小,垂直方向湍能

受到抑制,大气层结稳定。4 日 22 时之后,1 000 m 高度处东风风速开始增大,随着近地层东风风速的持续增大,大气层结稳定性减弱,大雾进入消散阶段。

3.2.2 层结曲线特征

大气层结稳定,水平和垂直运动小是形成大雾的重要条件,而稳定的边界层结(逆温层)是大雾形成的重要特征,雾层一般发生在逆温层以下^[19]。表 2 列出的各项指标反映逆温层特征,可以看出,大雾期间逆温层底高度均接近 1 000 hPa,说明本次大雾期间以近地逆温为主,夜间的辐射降温有利于近地逆温的形成;双逆温层甚至多逆温层的存在进一步增强了大气层结的稳定性,有利于近地层水汽的积

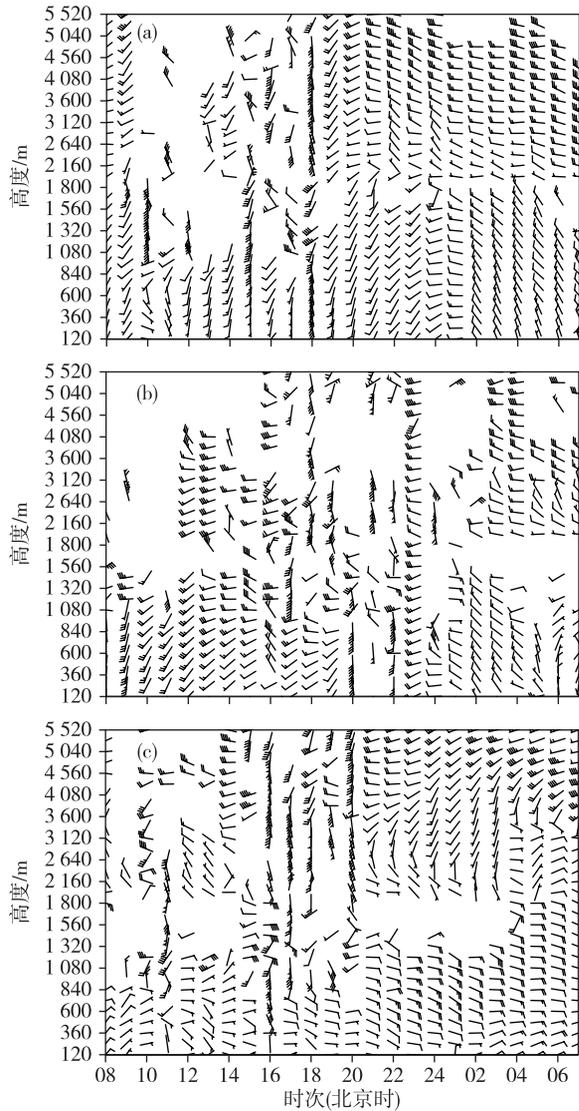


图4 2017年1月1日08时—1月5日07时雾过程青岛站风廓线雷达逐小时风向和风速垂直廓线图 (a.1日08时—2日07时,b.3日08时—4日07时,c.4日08时—5日07时)

Fig.4 Vertical profiles of hourly wind direction and wind speed during the fog from the wind profile radar at Qingdao Station from 08:00 BST on 1 to 07:00 BST on 2 (a), from 08:00 BST on 3 to 07:00 BST on 4 (b), and from 08:00 BST on 4 to 07:00 BST on 5 January 2017 (c)

蓄和维持；大雾期间低层温度露点差较小，1 000 hPa以下为2℃左右；3日、5日低层1 000 hPa温度露点差增大，与大雾减弱相一致。

4 持续性大雾成因及维持机制分析

4.1 水汽输送影响

此次山东持续大雾过程边界层水汽的输送和变化与大雾的阶段变化密切相关。大雾前期1日

08时(图5a)，比湿大值区位于我国东南海上，在长江中下游有一条东南—西北向的水汽通道随偏南风输送至山东，为大雾生成提供了充沛的水汽条件，2日凌晨，山东大雾形成。2日08时(图5b)是大雾维持期间，山东及周边比湿明显比前期更大，之后由于偏北干冷气流的持续影响，鲁西北和鲁中地区近地面层水汽持续减少，大雾减弱并进入间歇阶段。3日08时(图5c)，华北平原又处于较强的偏南风水汽输送通道内，水汽通量值最大中心为 $4 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，较1日08时更明显，且风速较大，为大雾的重现提供了丰沛的水汽。3日20时(图5d)，有南下的冷空气与北上的暖湿空气辐合交汇于山东，且冷空气势力更强，辐合线自鲁西北向南移动影响山东，辐合线处冷空气具有降温增湿作用，3日夜间—4日清晨雾的强度增加，进入大雾重现阶段。4日08时(图5e)，山东近地面层为东北风，有来自渤海上空的水汽补充，使大雾能继续维持，这也是鲁西北、鲁西南大雾消散迟缓的原因。5日08时(图5f)，东北向风场转为东风，且风速大，雾减弱消散。

表2 1—5日青岛站08时大气稳定性参数

Table 2 Atmospheric stability parameters at Qingdao Station at 08:00 during the fog event

时间	逆温层底高度/hPa	逆温层层数/层	1 000 hPa 温度露点差/℃
1日08时	—	0	2
2日08时	1 000	1	2
3日08时	1 016	2	23
4日08时	1 005	2	2
5日08时	1 017	2	10

4.2 弱低槽冷锋作用

此次大雾过程一个重要的特征是有两次低层浅槽的影响，且配合有弱的地面冷锋，雾的强度在槽后均有明显加强。这两个短波槽来自我国西北，经高原东移影响山东，槽本身较干(特别是850 hPa及以上层相对湿度小)，槽经过期间湿度不足以形成降水，这种“干性”短波槽对于静稳天气背景下的轻雾天气具有加强作用，常会导致雾的范围扩大或浓度增强，如2日、4日高空槽过后，强浓雾站数分别增加至26站和59站(表1)。短波槽在大雾过程中的作用：首先，槽前西南气流为大雾的形成提供了水汽，1日和3日(图5a、c)低层均有来自比湿大值区的水汽输送，使山东地区水汽增多；其次，低槽

前后雾的性质发生了变化,槽经过前,西南向的暖湿平流输送到北方冷的下垫面上,产生平流雾,对应此次过程1日和3日白天到夜间的轻雾,低槽过后,近地面层反气旋性涡度增强,低层反气旋对应下沉气流,1日、3日夜间晴空辐射降温强烈,雾的浓度有明显增强,雾的性质变为辐射雾;再次,低空槽前西南暖平流输送,使逆温层增强增厚,锋后弱冷

空气对地面降温,增强了“下冷上暖”的逆温层结,使大气稳定性加强。

当大气的垂直稳定性遭到破坏或低层水汽不能得到持续补充时,雾浓度减弱或消散。5日低层水汽持续减少且低层东风气流增强,破坏了大气的稳定性,大雾过程结束。

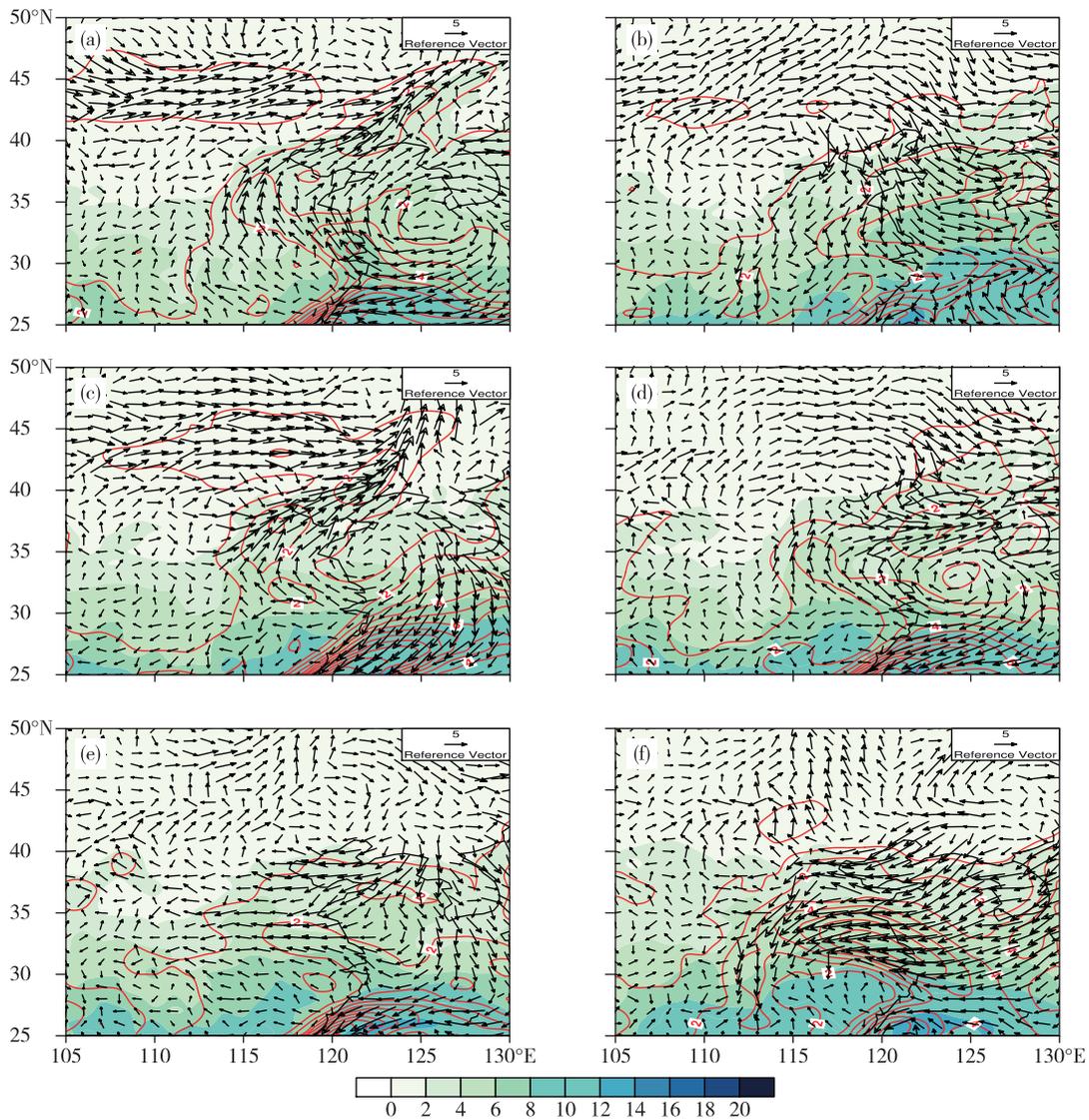


图5 大雾过程975 hPa水汽通量(红色等值线,间隔1;单位: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、比湿(填色;单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)及风矢量分布(a.1日08时,b.2日08时,c.3日08时,d.3日20时,e.4日08时,f.5日08时)

Fig.5 Water vapor flux (red isoline with an interval of one; units: $10^{-2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), specific humidity (colored; units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), and wind vector at 975 hPa (a. 08:00 BST on 1, b. 08:00 BST on 2, c. 08:00 BST on 3, d. 20:00 BST on 3, e. 08:00 BST on 4, f. 08:00 BST on 5)

5 结论

1)大雾期间欧亚中高纬度500 hPa环流形势为一槽一脊型,山东地区受高压脊控制,1日夜間和3

日夜間850 hPa山东有浅槽东移影响,地面以均压场为主。

2)大雾阶段均发生在南风或南风转北风之后,前期低层持续偏南风有利于大雾的形成,弱冷空气

可以增加雾的强度,而持续偏北风对大雾有减弱作用。静稳天气背景下,地面风速较小、夜间晴空辐射有利于雾的发展增强。大雾形成期间,垂直方向湍流受到抑制,存在近地逆温以及多层逆温,大气层结稳定,当1 000 m 高度处东风风速增大,垂直湍流增强,大气层结稳定性被削弱,大雾就减弱消散。

3)水汽输送的变化和两次弱低槽冷锋影响是此次大雾形成和维持的主要原因。在静稳天气背景下,大雾的阶段变化源于低层水汽的阶段变化,水汽输送的强度、方向直接影响雾的生成发展。两次弱低槽冷锋过程通过输送水汽、增加夜间辐射降温、增强逆温层结等方式使雾区的范围增大或浓度增强。大雾消散则是由于低层水汽不能持续补充以及大气的静稳结构遭到破坏所导致。

参考文献:

- [1] 师华定,史华伟,白鹤鸣,等.沙尘与大雾天气对京津石空气质量影响[J].生态环境学报,2014,23(2):262-266.
- [2] 李江波,赵玉广,孔凡超,等.华北平原连续性大雾的特征分析[J].中国海洋大学学报,2010,40(7):15-23.
- [3] 武辉芹,马翠平,赵娜,等.一次漏报大雾天气过程的分析[C]//中国气象学会.第31届中国气象学会年会.北京:中国气象学会,2014.
- [4] 吴彬贵,张宏升,汪靖,等.一次持续性浓雾天气过程的水汽输送及逆温特征分析[J].高原气象,2009,28(2):258-267.
- [5] 黄培强,王伟民,魏阳春.芜湖地区持续性大雾的特征研究[J].气象科学,2000,20(4):494-502.
- [6] 李子华,黄建平,周毓荃.1996年南京连续5天浓雾的物理结构特征[J].气象学报,1999,57(5):622-631.
- [7] 贺哲,王蕊,梁钰.2004-11-28~12-04华北等地大雾天气的中尺度分析[J].河南气象,2006,29(2):21-23.
- [8] 马翠平,吴彬贵,李江波,等.一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析[J].气象,2014,40(6):715-722.
- [9] 田心如,韩永翔,陈广昌,等.江苏省大雾的变化特征及气溶胶对其影响[J].中国环境科学,2014,34(10):2485-2489.
- [10] 王静菊,高小雨,高山红.一次黄海海雾的数据同化试验与形成机制研究[J].海洋气象学报,2017,37(1):42-53.
- [11] 黄辉军,詹国伟,刘春霞,等.一次华南沿海海雾个例的数值模拟研究[J].热带气象学报,2015,31(5):643-654.
- [12] 刘少军,吴胜安,李伟光,等.基于FY-3B卫星资料的中国南海海区1—3月海雾时空分布特征研究[J].海洋气象学报,2017,37(4):85-90.
- [13] 赵玉广,李江波,李青春.华北平原3次持续性大雾过程的特征及成因分析[J].气象,2015,41(4):427-437.
- [14] 朱佳蓉,漆梁波.上海地区辐射雾演变成因及模式预报[J].气象与环境学报,2017,33(1):1-11.
- [15] 陈龚梅,尹球,杨军.城市下垫面特性对辐射雾生消过程影响的数值研究[J].热带气象学报,2015,31(3):395-402.
- [16] 吕博,贾斌,韩风军,等.山东中西部一次持续性大雾的形成及维持机制[J].干旱气象,2014,32(5):830-836.
- [17] 刘畅,高留喜,王西磊,等.山东省大雾的气候特征分析[J].山东气象,2014,34(2):26-31.
- [18] 梁卫芳,侯忠新.青岛大雾的特征与预报[J].山东气象,2001,21(2):12-17.
- [19] 黄建平,朱诗武,朱彬.辐射雾的大气边界特征[J].南京气象学院学报,1998,21(2):258-265.