

郭俊建,韩永清,赵勇.山东区域性辐射雾时空分布及地面气象要素特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(2):96-102.
GUO Junjian, HAN Yongqing, ZHAO Yong. Analysis of spatio-temporal distribution of regional radiation fog and characteristics of key meteorological elements in Shandong[J].Journal of Marine Meteorology,2020,40(2):96-102. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.010. (in Chinese)

山东区域性辐射雾时空分布及地面气象要素特征分析

郭俊建¹, 韩永清¹, 赵勇²

(1. 山东省气象台, 山东 济南 250031; 2. 枣庄市气象局, 山东 枣庄 277100)

摘要: 选取2016—2019年共61次山东区域性辐射雾天气过程,利用山东122个国家级气象观测站逐小时观测资料,对其时空分布及地面气象要素特征进行分析。结果表明:1)山东辐射雾具有显著的季节和日变化特征,主要发生在10月—次年2月,持续性大雾主要发生在1月和12月,一天中20时以后大雾频次增加,02—08时为雾最集中的时段,07时前后达到峰值,下午一般无强浓雾出现。2)辐射雾空间分布呈现明显“西多东少”格局,主要出现在鲁西北和鲁西南地区,山区和半岛沿海地区较少,强浓雾和特强浓雾主要分布在德州、聊城及菏泽等地。3)区域性辐射雾发生时,地面无突出风向,北风略占优势,风速多在 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下;各等级雾形成前气温和露点温度均存在不同程度的下降,20时气温与次日最低气温温差在 $2\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、14时地面露点与最低能见度时刻地面露点的温差在 $1\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时最有利于辐射雾的发生;随着辐射雾强度的增强,对温度露点差和地面相对湿度的要求越来越高,出现大雾时的温度露点差主要在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,相对湿度大于90%;出现浓雾、强浓雾和特强浓雾时的温度露点差小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度大于95%。

关键词: 区域性辐射雾; 时空变化; 气象要素

中图分类号: P426.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2020)02-0096-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2020.02.010

Analysis of spatio-temporal distribution of regional radiation fog and characteristics of key meteorological elements in Shandong

GUO Junjian¹, HAN Yongqing¹, ZHAO Yong²

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China; 2. Zaozhuang Meteorological Bureau, Zaozhuang 277100, China)

Abstract Based on the hourly observation data from 122 national meteorological stations in Shandong, the spatio-temporal distribution of 61 regional radiation fog processes in Shandong from 2016 to 2019 and characteristics of key meteorological elements are analyzed. The results are shown below. 1) There is an evident seasonal variation for radiation fog, which occurs most frequently from October to next February, and long-lasting heavy fog occurs most frequently in January and December. Its diurnal variation is also significant, the fog frequency increases from 20:00 to 07:00 next day with the high frequency during the period from 02:00 to 08:00 and the peak at around 07:00, while there is usually no thick radiation fog in the afternoon. 2) The radiation fog occurs more frequently in the west than in the east of Shandong. In detail, more fog events occur over the northwest and southwest of Shandong and less in the mountainous areas and coastal regions. The thick fog and dense fog events with the visibility lower than 200 m are mainly distributed in Dezhou, Liaochen, and Heze. 3) When the regional radiation fog occurs, the

收稿日期:2020-05-11; 修订日期:2020-05-29

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2017-040);国家自然科学基金项目(41475038)

作者简介:郭俊建,男,硕士,高级工程师,主要从事天气预报及业务系统研发,50665523@qq.com。

meteorological elements have the following characteristics. There are no significantly preferred wind directions although the northerly overwhelms the others to some degree, and the wind speed is mostly less than $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The air temperature and dew point both decreases before the formation of all levels of fogs, and radiation fog tends to occur when the difference between the air temperature at 20:00 and the minimum air temperature of the following day lies between $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and the difference between the dew point at 14:00 and that of the instant the minimum visibility occurs lies between $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. The heavier the fog, the higher the requirements for lower depression of the dew point and higher relative humidity. Most of the fog events with the visibility lower than 1 000 m are accompanied with the depression of the dew point lower than $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and relative humidity higher than 90%. When the fog events with the visibility lower than 500 m occur, the depression of the dew point decreases to be lower than $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ and the relative humidity increases to be more than 95%.

Key words regional radiation fog; spatio-temporal variation; meteorological element

引言

随着我国经济社会的快速发展,大雾天气严重影响人类的正常生活生产活动,低能见度天气经常造成高速公路封闭、航班取消,经济损失巨大。大雾对空气质量存在不利影响,给人民生活和身体健康带来损害。山东主要以辐射雾和平流雾为主,是出现雾比较多的地区之一。辐射雾主要是由于下垫面夜间辐射冷却,使空气中水汽凝结而形成^[1]。在预报业务中,由于辐射雾发生时环境气象要素因子的复杂性,辐射雾的预报一直是个难点问题,对夜间到凌晨出现的辐射雾往往容易漏报,当凌晨辐射雾发生后再发布大雾预警信号而使预警效果大大降低。

近年来,国内外已有不少学者利用多种观测资料对各地雾的环流特征、持续性大雾的维持机制等进行了研究^[2-8],指出静稳天气形势、“上干下湿”、短波槽等机制在大雾生成和维持中的关键作用。还有许多学者对大雾的时空分布和要素特征进行了详细的分析^[9-14]。刘畅等^[15]对山东地区雾的季节特征和空间分布特征进行了统计分析。吕博等^[16]、孙颖等^[17]对山东典型的持续性大雾进行了分析,指出大雾的复杂演变过程,水汽输送、弱冷空气等在大雾生消阶段的关键作用。对于山东雾的研究总体较少,且研究主要基于人工观测的能见度资料进行统计分析,大多数台站仅有08、14、20时观测数据,难以准确描述持续时间较短的辐射雾。2013年以后,山东各地陆续实现了能见度的自动观测,能见度观测时间精度大大提高。因此,利用近几年高时间精度的能见度观测资料开展相关研究,对提高山东辐射雾的预报预警服务能力很有必要。

1 资料说明

本文使用的资料为2016—2019年山东122个国家气象观测站能见度、降水量、温度、风场逐时观测资料。山东能见度自动观测设备的建设始于2013年,此后通过陆续建设,2016年4月底,全省123个国家气象观测站全部建设完成。因此,从观测站点范围和资料都比较完整的角度考虑,采用2016—2019年的资料进行分析。为消除强降雨可能造成的低能见度天气,剔除了小时降水量 $R > 5 \text{ mm}$ 且能见度 $V < 1\,000 \text{ m}$ 的站点和时次,剔除海拔较高的泰山站,全省共有122个国家气象观测站参与统计。

个例选取标准参照《山东灾害天气预测技术手册》^[18]中关于雾的分类规定,每日出现雾站数小于总站数的10%为局地性雾,超过10%而小于等于1/4站数出现的雾为小范围雾,超过1/4站数出现的雾为大范围雾。区域性辐射雾(以下简称“辐射雾”)定义为:结合天气形势分析判定为辐射雾过程,且过程中不少于20站(约占山东总站数的16.3%)的能见度低于1 000 m。2016—2019年山东分别出现了16、6、19、20次区域性辐射雾过程,合计61次。其中,连续几天出现的持续性辐射雾过程中包含有短时间平流雾,一并进行统计。根据GB/T 27964-2011《雾的预报等级》^[19]规定,雾分为五个等级:轻雾($1\,000 \text{ m} \leq V < 10\,000 \text{ m}$)、大雾($500 \text{ m} \leq V < 1\,000 \text{ m}$)、浓雾($200 \text{ m} \leq V < 500 \text{ m}$)、强浓雾($50 \text{ m} \leq V < 200 \text{ m}$)和特强浓雾($V < 50 \text{ m}$)。按照该等级划分标准,本文主要分析能见度在1 000 m以下的山东辐射雾特征。

基于以上资料处理规则,2016—2019年全省61

次辐射雾过程各站累计有大雾24 093时次,浓雾9 877时次,强浓雾12 840时次,特强浓雾2 530时次。

2 山东辐射雾时空分布特征

2.1 时间变化

图1给出了山东区域性辐射雾过程次数和时次数的月分布。由图1a可以看出,2016—2019年,3月、6月、7月山东均未出现区域性辐射雾过程,其他各月均有发生,但多发生在秋、冬季,辐射雾过程从10月开始显著增多,11月最多,10月—次年1月的过程占全年的87%。进一步普查了2010年以来的区域性辐射雾过程,结果也表明在春、夏季几乎无区域性辐射雾过程。由大雾的时次(图1b)来看,1月和12月雾的时次数最多,占比分别为32%和33%,合计占全年总数的65%,表明1月、12月更容易出现大范围 and 持续性的辐射雾过程;浓雾、强浓雾和特强浓雾的时次数也表现出上述特征。辐射雾天气具有显著的季节特征,主要集中在秋、冬季的原因是期间山东静稳天气多,多短波槽活动,辐射降温明显。

由日变化(图2)来看,山东辐射雾存在显著的夜间和上午多、下午少的日变化特征。傍晚前后随着辐射降温,大雾时次逐步增加,02—08时为雾时次集中的时段,早晨07时前后大雾时次达到峰值,此后时次逐渐减小。浓雾和强浓雾表现出和大雾相似的日变化特征,下午几乎无超强浓雾存在。雾的日变化与太阳辐射密切相关,与气温的日变化较为一致,日落后气温开始下降,到日出前温度降到一天中最低,日出前相对较低的气温使得地面空

气很容易达到饱和,从而形成辐射雾。日出以后温度逐渐升高,雾开始慢慢消散直至中午前后大部分雾消散。进一步分析发现,下午大雾仍没有消散的主要原因为:一是因为能见度越低消散的时间越晚;另一方面主要是短波槽经过前,西南向的暖湿气流输送到冷的下垫面,性质转为平流雾,导致整个白天都存在能见度低于1 000 m的大雾,个别时次能见度甚至不足200 m。

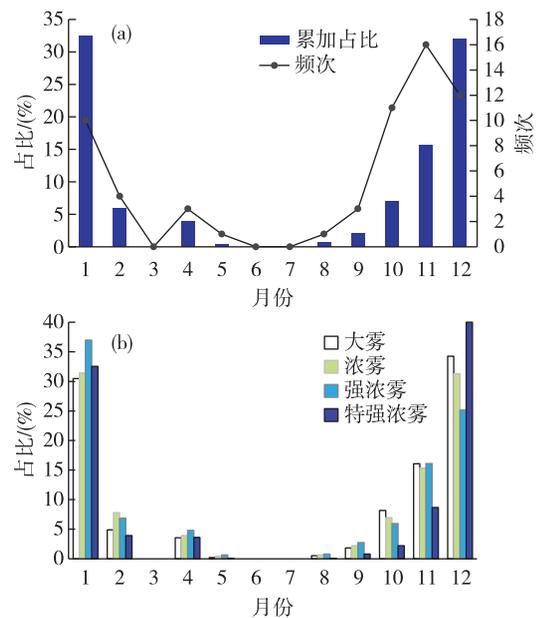


图1 2016—2019年山东区域性辐射雾过程频次和占比(a)及分等级雾的占比(b)月分布

Fig.1 Monthly variation of frequency and percentage of regional radiation fog processes in Shandong from 2016 to 2019 (a) and monthly percentage of all levels of radiation fog processes (b)

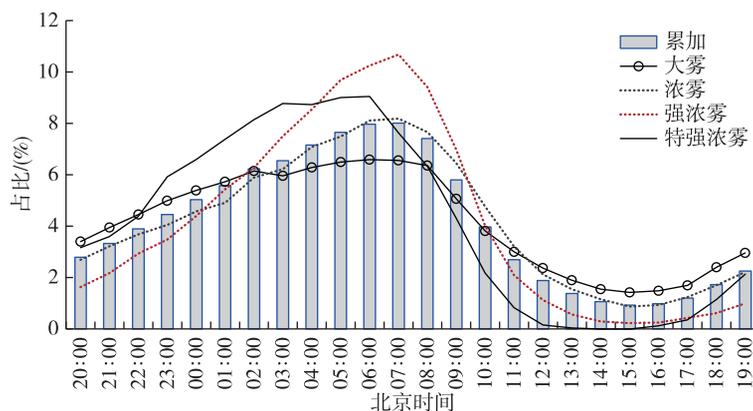


图2 2016—2019年山东区域性辐射雾时次日变化特征

Fig.2 Diurnal variation of cumulative number of regional radiation fog processes in Shandong from 2016 to 2019

2.2 空间分布

山东地处华北平原的南部,地形复杂,西北部为平坦的黄河冲积平原,中部为隆起的山地,东部和南部为和缓起伏的丘陵区,山东半岛向东伸向大海,半岛地区三面环海,特殊的地形对辐射雾空间分布有很大影响。

由 2016 年以来山东发生的区域性辐射雾过程各国家级气象观测站各等级雾出现频次(图 3)看,各等级大雾的空间分布特征基本相同,空间分布极不均匀,总体呈现“西多东少”的格局,最高值出现

在鲁西北和鲁西南地区,最低值出现在鲁中山区和半岛沿海,具有非常明显的地域性特点。聊城、德州、滨州西北部、菏泽、济宁和泰安西部地区是山东各级辐射雾出现最频繁的区域,单站出现大雾时次在 300 次以上,尤其是特强浓雾,一般只出现在这些地区;淄博北部、潍坊北部、临沂南部和半岛内陆地区也是山东大雾天气易发区,单站出现大雾时次多在 200 次以上;济南南部、淄博南部、泰安东部、枣庄等地的山区及山东半岛的沿海地区为各等级辐射雾的低值区,明显少于周边地区。

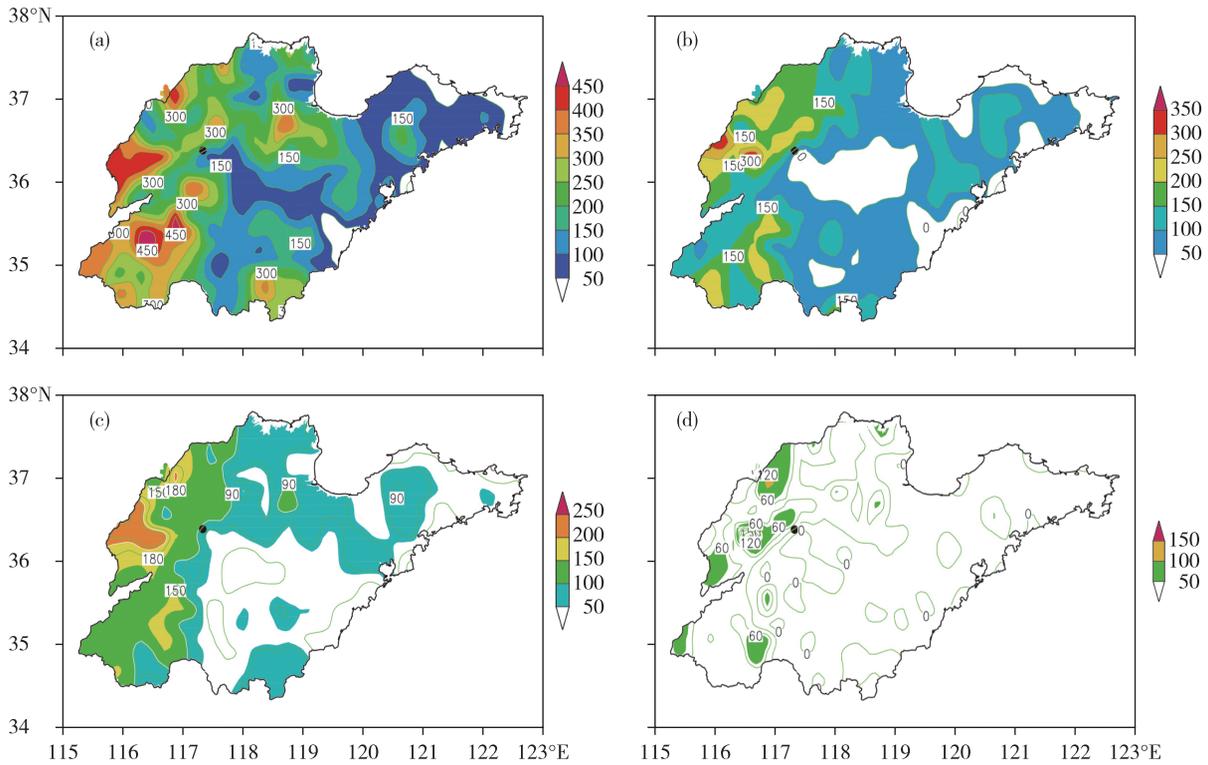


图 3 2016—2019 年山东区域辐射雾时次空间分布(a.大雾,b.浓雾,c.强浓雾,d.特强浓雾;填色,单位:时次;黑点位置为济南)

Fig.3 Spatial patterns of cumulative number of regional radiation fog processes in Shandong from 2016 to 2019 (a. normal fog, 500 m ≤ V < 1 000 m; b. moderate fog, 200 m ≤ V < 500 m; c. thick fog, 50 m ≤ V < 200 m; d. dense heavy fog, V < 50 m; shaded, units: times; black point for location of Jinan)

3 山东辐射雾气象要素特征分析

以下主要通过和辐射雾密切相关的 3 个气象条件对山东 61 次区域性辐射雾进行分析,以获取山东区域性辐射雾的地面气象要素特征。

3.1 水汽特征

近地面层充沛的水汽是形成大雾的必要条件,湿度越大,越有利于大雾的形成。由图 4a 可以看出,当出现大雾时,温度露点差($t-t_d$)小于 0.5 °C 的比例为 35%,0.5~1 °C 之间的比例达 38%, $t-t_d \leq 1$

°C 的比例达到 73%;大雾在 2 °C 以上的温度露点差占比为 6%。浓雾、强浓雾和特强浓雾的温度露点差类似,尤其强浓雾和特强浓雾基本相同,表现为 0.5 °C 以下的比例最大,分别为 64%、83%、83%,其次是 0.5~1 °C,占比分别为 32%、17%、17%, $t-t_d \leq 1$ °C 的比例分别达到 96%、99%、99%,三者的占比均高于大雾。由此可见,雾的强度越大,温度露点差越小。

图 4b 显示,辐射雾发生时相对湿度和温度露点差的变化规律基本一致。各等级雾的相对湿度

(H_R)在97%以上的占比均最高,大雾、浓雾、强浓雾和特强浓雾分别为大于等于34%、62%、79%和76%,相对湿度在95%~97%之间的占比分别为24%、26%、18%和20%;相对湿度 $H_R \geq 95\%$ 的占比各达到了58%、88%、97%和96%。相对湿度在90%以下的占比,只有大雾达到了12%,浓雾、强浓雾和特强浓度的占比均不足1%。

由此可见,随着辐射雾强度的增强,对温度露点差和地面相对湿度的要求越来越高。出现大雾时的温度露点差主要在2℃以下,相对湿度大于90%;出现浓雾、强浓雾和特强浓雾时的温度露点差小于1℃,相对湿度大于95%。

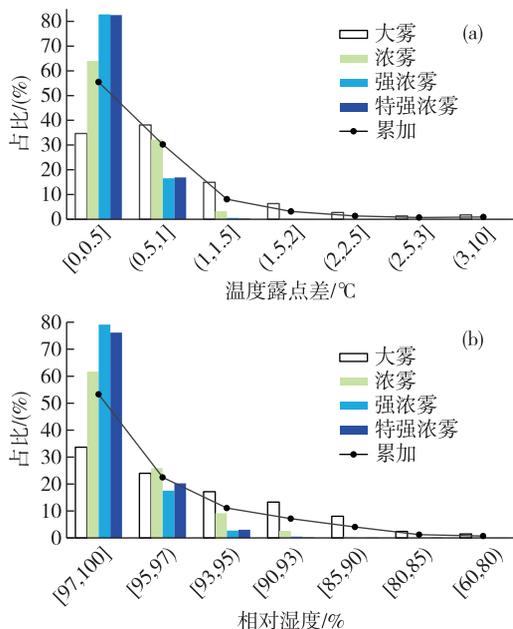


图4 2016—2019年山东区域不同等级辐射雾的温度露点差分布(a)和相对湿度分布(b)

Fig.4 Distribution of depression of the dew point (a) and relative humidity (b) of different levels of radiation fog processes in Shandong from 2016 to 2019

3.2 温度特征

夜间辐射雾发生时,往往晴空少云,地面有效辐射强、散热迅速,近地面气温逐渐下降,有利于水汽凝结成雾。为了定量刻画夜间降温情况,计算了不同能见度等级条件下20时气温与次日最低气温的差(图5)。结果显示,降温幅度在2~6℃时最有利于大雾、浓雾、强浓雾和特强浓雾发生,占比70%左右;其次是降温幅度在2℃以下,占比在18%~22%之间;降温幅度6~8℃占比最小,在13%左右。各等级雾的最有利降温幅度略有差异,大雾、浓雾、强浓雾占比排在前三位的气温差在2~5℃之间,特

强浓雾在3~6℃之间,表明雾的强度越强降温幅度越大。

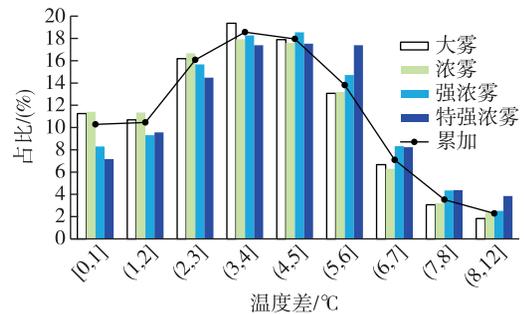


图5 2016—2019年山东区域不同等级辐射雾20时气温与次日最低气温温度差

Fig.5 Difference between the air temperature at 20:00 and the minimum air temperature of the following day for different levels of radiation fog processes in Shandong from 2016 to 2019

露点温度从下午到夜间的变化对于雾的形成影响较大,故实际预报业务中,预报员常将14时的露点温度作为次日大雾预报的参考指标之一。统计分析14时露点温度与次日最低能见度时露点温度的温差(图6),发现大雾和浓雾发生比例最高的露点温度温差均为1~2℃,占比为18%~19%,0~1℃温差次之,占比16%~18%,0~4℃温差累加比例为59%~61%;强浓雾发生比例最高的温差也是1~2℃,占比为18%,占比排在第2、3位的分别是2~3℃、3~4℃,各为17%和16%,0~4℃温差间隔1℃占比超过10%,累加比例为63%;与前3个等级雾不同的是,特强浓雾发生比例最高的露点温度温差为2~3℃,占比达21%,其次是3~4℃,占比为19%,0~5℃温差累加占比为77%。除此以外,各等级雾的露点温度温差在5℃以上的占比在5%~9%

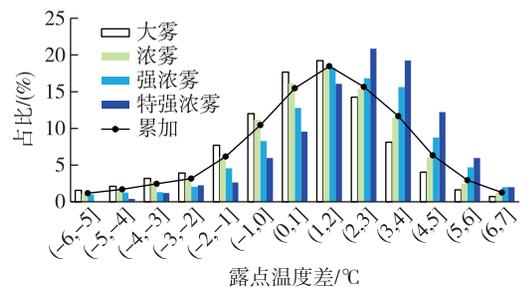


图6 2016—2019年山东区域不同等级辐射雾14时地面露点温度与次日最低能见度时刻露点温度的温差

Fig.6 Difference between the dew point at 14:00 and that of the instant the minimum visibility of the following day occurs for different levels of radiation fog processes in Shandong from 2016 to 2019

之间,占比较小;小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的累加占比中,大雾、浓雾、强浓雾和特强浓雾分别为31%、27%、19%和13%,其中大雾和浓雾在 $-1\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的占比分别达到了12%和11%,说明大雾和浓雾在露点温度升高 $1\sim 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情况下也可以出现。

以上分析表明,辐射雾形成前气温和露点温度均存在不同程度的下降,雾的强度越强降温幅度越大。20时气温与次日最低气温温差在 $2\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时、14时地面露点与最低能见度时刻地面露点的温差在 $1\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最有利于辐射雾的发生。

3.3 风场特征

3.3.1 风向

图7a给出不同等级辐射雾的8方位风向玫瑰图。分等级来看,各等级的最大风向频率均为北风,频率在17%以上,其他方位风频率略有差异。其中,大雾和浓雾的风向频率规律基本类似,风频排在前三位的依次为北风、西北风和东北风,3个风向的总频率在46%~47%之间,接近所有风向的半数,频率最小的是西南风,占9%;强浓雾和特强浓雾的风向频率较为接近,最大风向频率均为北风17%,除了特强浓雾的次风向频率为东南风16%以外,其他的风向频率均在10%~13%之间。总体来说,辐射雾发生时,各风向均可出现,以北风的风向频率最大,略占优势,西南风频率最小,其他6个方位风向频率在10%~13%之间,差异不大。以上辐射雾的风向分布规律与天气形势有关,山东出现大雾天气多维持静稳形势,地面处在高压前部或底部,为弱气压场,各地风向以本地地形风为主,无突出风向。

3.3.2 风速

风速(v)的统计结果(图7b)显示,各等级雾的风速特征基本类似。地面风速在 $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的占比最高,在42%~58%之间,雾浓度越大,该占比越高;其次是 $v\leq 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速,占比在22%~26%之间;各等级雾风速为 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的占比在14%~22%之间,累计 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下的风速比例在88%~98%之间;风速在 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的占比不超过1%。通过对各等级雾的风速大小进行比较,可以发现基本上雾的等级越高,风速越小。大雾和浓雾的风速基本相同,有96%的时次出现在 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下;出现特强浓雾时,98%的时次风速 $v\leq 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,当风速大于 $6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时不再出现特强浓度。

综上,山东辐射雾发生时,地面各种风向均可出现,北风略占优势,西南风出现概率最小;风速一

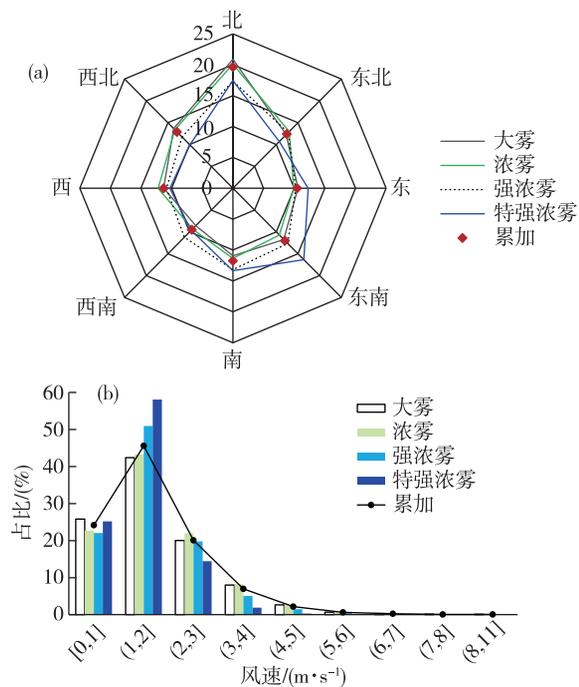


图7 2016—2019年山东区域不同等级辐射雾风场特征(a.风向,数字表示占比,单位:%;b.风速)

Fig.7 Characteristics of wind direction (a, the number for percentage, units: %) and speed (b) of different levels of radiation fog processes in Shandong from 2016 to 2019

般小于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $1\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 最有利,能见度越低风速越小。

4 结论

本文利用逐时自动气象站观测资料,对山东2016—2019年61次区域性辐射雾天气过程的雾时空分布及气象要素特征进行了统计分析,总结出山东区域性辐射雾的主要特征和预报着眼点:

1) 山东区域性辐射雾具有显著的季节和日变化特征。辐射雾主要出现在秋冬季,12月—次年1月是山东区域辐射雾最频发时段;02—08时为雾最集中的时段,07时前后达到峰值,下午一般无强浓雾出现。

2) 空间分布上,山东区域性辐射雾呈现“西多东少”的格局,主要出现在鲁西北和鲁西南地区,山区和半岛沿海地区较少,强浓雾和特强浓雾主要分布在德州、聊城及菏泽等地。

3) 区域性辐射雾发生时,地面气象要素场表现为以下特征:地面无突出风向,北风略占优势,风速多在 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下;各等级雾形成前气温和露点温度均存在不同程度的下降,20时气温与次日最低气

温温差在 $2\sim 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,14时地面露点与最低能见度时刻地面露点的温差在 $1\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 最有利于辐射雾的发生;随着辐射雾强度的增强,对温度露点差和地面相对湿度的要求越来越高,出现大雾时的温度露点差主要在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,相对湿度大于90%;出现浓雾、强浓雾和特强浓雾时的温度露点差小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度大于95%。

值得注意的是,在冬季持续静稳形势下,山东有的辐射雾天气过程会伴随平流雾出现,导致雾的范围和强度增大、持续时间长。这种雾同样具有明显的日变化特征,可持续几天,但每天雾的落区、强度和起止时间会有不同,给雾的精细化预报和预警信号发布带来难度。

参考文献:

- [1] 全国科学技术名词审定委员会.大气科学名词[M].3版.北京:科学出版社,2009:18-19.
- [2] WESTCOTT N E. Some aspects of dense fog in the midwestern United States[J]. Wea Forecasting, 2007, 22(3):457-465.
- [3] 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(自然科学版),2010, 40(7):15-23.
- [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] 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.
- [6] 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.
- [7] 刘小宁,张洪政,李庆祥,等.我国大雾的气候特征及变化初步解释[J].应用气象学报,2005,16(2):220-230.
- [8] 林建,杨贵名,毛冬艳.我国大雾的时空分布特征及其发生的环流形势[J].气候与环境研究,2008,13(2):171-181.
- [9] 崔驰潇,包云轩,袁成松,等.江苏省沿海高速公路雾的时空变化特征研究[J].科学技术与工程,2015, 15(12):6-20.
- [10] 王博妮,濮梅娟,田力,等.江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究[J].气象,2016, 42(2):192-202.
- [11] 许爱华,陈翔翔,肖安,等.江西省区域性平流雾气象要素特征分析及预报思路[J].气象,2016,42(3):372-381.
- [12] 罗喜平,周明飞,汪超,等.贵州区域性辐射大雾特征与形成条件[J].气象科技,2012,40(5):799-806.
- [13] 胡跃文,秦杰,苏静文,等.2016—2017年贵州大雾时空分布及气象要素演变分析[J].气象,2019,45(5):659-666.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [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] 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.
- [18] 曹钢锋,张善君,朱官忠,等.山东天气分析与预报[M].北京:气象出版社,1988:162-163.
- [19] 中国气象局.雾的预报等级:GB/T 27964-2011[S].北京:中国标准出版社,2011.