张立,王玉龙,王媛.基于地基微波辐射计观测的东营地区低能见度天气指示性分析[J].海洋气象学报,2022,42(2):54-63.
ZHANG Li, WANG Yulong, WANG Yuan. An indicative analysis of low visibility weather in Dongying based on ground-based microwave radiometer observation[J]. Journal of Marine Meteorology,2022,42(2):54-63. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.006.(in Chinese)

基于地基微波辐射计观测的东营地区低能见度天气指示性分析

张立[1,2],王玉龙[1,2],王媛[1,2]
(1.山东省气象防灾减灾重点实验室,山东 济南 250031;2.东营市气象局,山东 东营 257000)

摘要: 针对东营市2016—2017年出现的27个低能见度天气过程,利用MP-3000A型地基微波辐射计二级数据,计算过程影响期间逐10 min的逆温层温差、逆温层厚度和低层相对湿度等物理量。结合空气质量和能见度变化情况,按照雾和霾、雾、降水三类天气对27次过程进行分类研究,总结地基微波辐射计观测的温湿度量对低能见度天气的指示意义和参考指标。结果表明:(1)雾和霾共同影响导致的低能见度天气出现在冬半年,$PM_{2.5}$浓度越大通常对应的能见度越低;逆温层温差和逆温层厚度与能见度的相关系数分别为-0.39和-0.45,逆温层温差增大指示能见度降低,逆温层厚度减小指示能见度升高。低层相对湿度在90%以上时,能见度受雾影响通常小于2 km;低层相对湿度在80%以下时,能见度受霾影响仍然维持在5 km以下。(2)雾影响导致的低能见度天气多出现在冬半年,与$PM_{2.5}$浓度无关;逆温层温差和逆温层厚度与能见度的相关系数分别为-0.54和-0.45。在逆温层生成和破坏阶段,逆温层温差变化幅度大,对能见度的指示性更强,而逆温层厚度变化幅度相对较小,多维持在300~400 m之间。低层相对湿度90%以上时能见度通常小于5 km,当低层湿层消失后能见度升高至5 km以上。(3)降水影响导致的低能见度天气出现在夏季,多伴随短时强降水出现,强降水时段逆温层温差达到8 ℃以上,逆温层厚度为500 m;强降水结束后,逆温消失,能见度转好。

关键词: 微波辐射计; 低能见度; 雾和霾; 逆温层温差; 逆温层厚度
中图分类号: P412.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)02-0054-10
DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.02.006

An indicative analysis of low visibility weather in Dongying based on ground-based microwave radiometer observation

ZHANG Li[1,2], WANG Yulong[1,2], WANG Yuan[1,2]
(1. *Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong*, *Jinan* 250031, *China*; 2. *Dongying Meteorological Bureau*, *Dongying* 257000, *China*)

Abstract With reference to the 27 low visibility weather processes in Dongying from 2016 to 2017, this research calculates the temperature difference of inversion layer, the thickness of inversion layer, and low-level relative humidity at 10-min intervals by using the secondary data of MP-3000A ground-based microwave radiometer. Combing the changes of air quality and visibility, the 27 processes are classified and studied according to three kinds of weather: fog and haze, fog, and precipitation. The temperature and humidity measurements of microwave radiometer are of indicative meaning and can be an index of

收稿日期: 2021-07-20; **修订日期:** 2022-02-15
基金项目: 山东省气象局科研项目(2016sdqxm14)
通信作者: 张立,男,高级工程师,主要从事天气预报业务及低能见度天气相关研究,dyzhangli@163.com。

reference for low visibility weather. The results are as follows. (1) The low visibility weather caused both by fog and haze appears in winter half year. Usually, the higher the $PM_{2.5}$ concentration, the lower the visibility. The correlation coefficient between the temperature difference of inversion layer and visibility is −0.39 and that between the thickness of inversion layer and visibility is −0.45. The temperature difference increase of inversion layer indicates the decrease of visibility, while the thickness decrease of inversion layer indicates the increase of visibility. Affected by fog, the visibility is usually less than 2 km when the low-level relative humidity is higher than 90%; affected by haze, the visibility can maintain below 5 km even as the low-level relative humidity is lower than 80%. (2) The low visibility weather caused by fog mostly occurs in winter half year, which has nothing to do with $PM_{2.5}$ concentration. The correlation coefficient between the temperature difference of inversion layer and visibility is −0.54 and that between the thickness of inversion layer and visibility is −0.45. In the formation or destruction stage of inversion layer, the temperature difference of inversion layer varies greatly and has a stronger indication for visibility, while the thickness of inversion layer is maintained between 300 m and 400 m and the range of variation is relatively small. When the low-level relative humidity is above 90%, the visibility is usually less than 5 km, whereas the visibility increases to be more than 5 km when the high-humidity layer disappears. (3) The low visibility weather caused by precipitation appears in summer and it is mostly accompanied by short-time heavy precipitation. The temperature difference of inversion layer can reach over 8 ℃ and the thickness of inversion layer can reach 500 m during the period of heavy precipitation; the inversion disappears and the visibility increases after the heavy precipitation.

Key words　microwave radiometer; low visibility; fog and haze; temperature difference of inversion layer; thickness of inversion layer

引言

根据气候资料分析,东营的低能见度天气多是由雾和霾造成的。雾和霾本质上是影响视程的不同自然现象,雾是由大量 3~100 μm 的水滴或冰晶组成的乳白色悬浮体,霾则是由 0.01~10.00 μm 极细微的气溶胶粒子均匀地浮游在空中导致空气普遍混浊的天气现象。研究[1]表明,当今我国主要城市的雾和霾已经不完全是自然现象,气溶胶污染日趋严重已变成雾和霾天气频发的主要原因,$PM_{2.5}$浓度是影响能见度的主要因子[2]。大气污染物主要聚集在边界层[3],当大气状态稳定、对流层低层有逆温时,会限制污染物的垂直扩散[4]。逆温越强,则气溶胶浓度越大,最低能见度越差且持续时间越长[5]。当边界层水汽含量大时,气溶胶粒子极易吸湿增长,雾滴增大[6],会出现雾和霾混合的情况[7],导致大气能见度进一步降低[8]。因此,在有利于出现雾和霾的天气形势下,对流层低层的逆温和水汽条件对雾和霾的出现有直接影响[9-10]。

探空数据可以描绘大气中气象要素廓线[11],由于传统探空气球探测站点布局有限,使得利用微波辐射计获得探空数据成为补充手段。CHAN[12]和 WARE et al.[13]论述了微波辐射计反演数据的可靠性,杨莲梅等[14]和刘红燕等[15]研究表明微波辐射计对温度、水汽的探测能力较好。由于微波辐射计观测的连续性,可利用其反演数据得到连续的对流层低层逆温和湿度数据,并分析其与能见度变化的相关性。在前期科研工作者[16-17]已经确定逆温变化会导致能见度变化的基础上,本文尝试利用更精细的逆温数据和相对湿度数据找到不同类型低能见度天气的指示性指标。

1　资料与方法

1.1　资料来源

本研究使用了东营国家级地面气象观测站数据、微波辐射计数据和气溶胶浓度观测数据。其中,MP-3000A 型地基微波辐射计安装在东营国家级地面气象观测站观测场内。WAN et al.[18]分析了该设备的温度、水汽等信息的准确性,结果显示质量控制后的温度与实况相关性为 0.98,水汽与实况相关性为 0.89。本研究使用的地基微波辐射计反演的温度、水汽及相对湿度数据,为经质量控制后的二级数据。气溶胶浓度观测数据来自安装在东

营市生态环境局院内的国控环境空气质量自动监测站,距东营国家级地面气象观测站直线距离为1.1 km。

1.2 方法

选取2016—2017年的低能见度天气过程并进行分型,分析天气形势特征。利用微波辐射计反演的温度和相对湿度资料,计算低能见度天气过程时段逐10 min的逆温层温差和逆温层厚度,与常规观测数据、气溶胶浓度观测数据综合分析,得出$PM_{2.5}$浓度特征、逆温层特征和低层湿度特征对能见度变化的指示关系。

1.2.1 个例选取和分型

低能见度天气过程个例分别从雾和霾两方面选定。

(1)雾。参考大雾黄色预警信号发布标准,以最低能见度<0.5 km为条件选定,共有14个个例,均出现在10月—次年3月。另选取夏季(6—8月)最低能见度<1 km的7个个例作为补充。

(2)霾。从天气成因入手,以连续3 d中$PM_{2.5}$浓度>150 $\mu g \cdot m^{-3}$判定为重污染天气[19]为条件选定,共有13个个例。合并后去掉重复,2016—2017年东营共有27个低能见度天气过程个例。

根据《霾的观测和预报等级》[20]中霾观测的判识条件(能见度小于10 km,排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪、风暴等天气现象造成的视程障碍。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示进一步判识),结合雾的形成机制,利用$PM_{2.5}$浓度和相对湿度共同判定个例为雾影响或霾影响。

对于选定的27个低能见度天气过程个例,一般情况下$PM_{2.5}$浓度>150 $\mu g \cdot m^{-3}$时有霾,相对湿度≥80%时有雾,以上两个条件同时符合为雾和霾共同影响。按此分型方式,结合天气特点,将以上27个低能见度天气个例分为三类:雾和霾共同影响15例(占55%),雾影响7例(占26%),降水影响5例(占19%)。其中,2017年10月14日个例中$PM_{2.5}$最大浓度为151 $\mu g \cdot m^{-3}$,但因为天气特点符合辐射雾特征,所以定型为雾影响。

1.2.2 逆温层温差和逆温层厚度计算

因雾和霾低能见度天气主要与对流层低层逆温有关,而高空1 000 m以下的平均水汽密度与$PM_{2.5}$浓度相关性更好[21],本文主要研究1 000 m以下的逆温情况。MP-3000A型微波辐射计探测最大高度为10 000 m,500 m以下高度的探测间隔为50 m,500~2 000 m高度的探测间隔为100 m,因此在0~1 000 m高度共有16层探测数据。利用微波辐射计资料计算逐层垂直温差和厚度,将存在逆温层次的数据相加,即得到1 000 m以下的逆温层温差(Δt)和逆温层厚度(Δh)。图1给出了逆温层特征量计算示意图,其中:$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \cdots + \Delta t_n$,$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \cdots + \Delta h_n$;逆温层底部($H_0$)为靠近地面第一层出现逆温的底部高度。$\Delta t$、$\Delta h$和$H_0$都可以反映逆温情况,$\Delta t$反映逆温的大小程度,$\Delta h$反映逆温层垂直厚度,$H_0$反映逆温层距离地面的高度。利用$\Delta t$、$\Delta h$、$H_0$三个物理量可定量描述1 000 m以下大气逆温状况,即使存在多层逆温,计算结果也可客观反映大气低层逆温的整体状况。

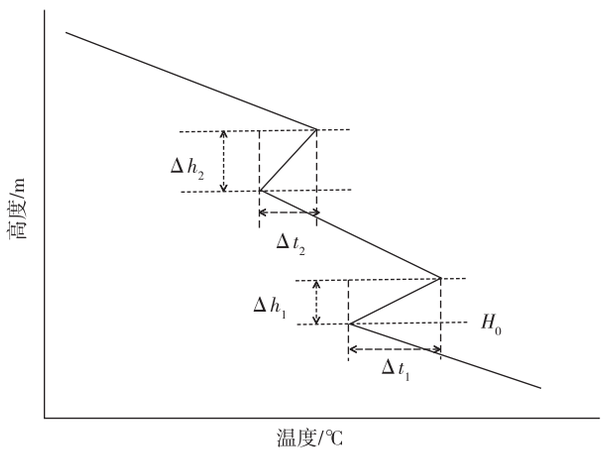

图1 逆温层特征量计算示意图

Fig.1 Schematic diagram of characteristic quantity about inversion layer

2 指示性分析

2.1 雾和霾共同影响个例

2.1.1 个例特征和天气形势

雾和霾共同影响个例均出现在冬半年,大部分持续3 d以上。本研究选取的个例中,最低能见度小于0.1 km的5个个例均为雾和霾共同影响。具体特征及最低能见度日08时天气形势详见表1。

由天气形势分析发现,500 hPa偏西气流配合850 hPa低槽加暖脊,最低能见度多在0.1 km以下;500 hPa偏西气流配合850 hPa西南气流加暖脊,最低能见度在1 km以下;500 hPa西西北气流时最低能见度多为1.0~1.5 km;500 hPa西北气流时能见度相对最好。地面形势多为弱气压场,其中鞍形场控制时能见度最低。

雾和霾共同影响过程通常是污染物逐渐堆积、$PM_{2.5}$浓度逐渐增大、能见度逐渐降低的过程。$PM_{2.5}$浓度和能见度变化为反相关，且变化时间基本一致。能见度在 0.2 km 以下时 $PM_{2.5}$浓度多数达到 250 μg·m^{-3}以上。以 2016 年 2 月 1—4 日过程（图 2）为例，分析可见，在过程第 1 日，$PM_{2.5}$最大浓度达到 150 μg·m^{-3}以上，能见度仅在早晨逆温层破坏时降低到 3~5 km，中午即转好。过程第 2 日以后，$PM_{2.5}$浓度的日最大值逐渐升高，日最低能见度逐渐降低且影响时段逐渐增加。

表 1　2016—2017 年东营雾和霾共同影响个例特征和天气形势

Table 1　Characteristics and synoptic situations of cases affected both by fog and haze in Dongying from 2016 to 2017

开始日期（维持天数/d）	过程 $PM_{2.5}$浓度最大值/（μg·m^{-3}）	过程最低能见度/m	500 hPa 形势	850 hPa 形势	地面形势
2017-12-28(4)	276	46	高压脊底部偏西气流	切变线+暖脊	鞍形场前部
2017-12-28(9)	483	51	偏西气流+浅槽	西南气流+暖脊	鞍形场
2016-01-01(3)	288	53	偏西气流	低槽+暖脊	低压带内弱气压场
2016-11-13(2)	235	59	西北气流	西南气流+暖舌	弱气压场
2016-12-17(6)	259	72	偏西气流+小槽	低槽+暖脊	弱低压
2017-01-11(3)	307	103	偏西气流	西北气流	弱气压场
2017-02-12(5)	218	108	西北气流	小槽	弱气压场
2016-12-02(4)	265	109	偏西气流	西南气流+暖脊	弱低压
2017-10-21(1)	256	362	槽前西南气流	偏北气流	均压场
2016-03-01(5)	220	954	偏西气流	西南气流+暖脊	弱低压
2016-03-17(3)	282	1 004	西西北气流+东北低涡	高压环流+暖脊	低压带
2016-01-14(3)	322	1 166	西西北气流+东北低涡	小槽	弱低压
2016-03-12(3)	234	1 173	西北气流	偏北气流	冷锋前倒槽
2017-02-03(4)	241	1 440	西西北气流	小槽	弱气压场
2016-02-01(4)	230	3 229	西北气流	切变线	弱气压场

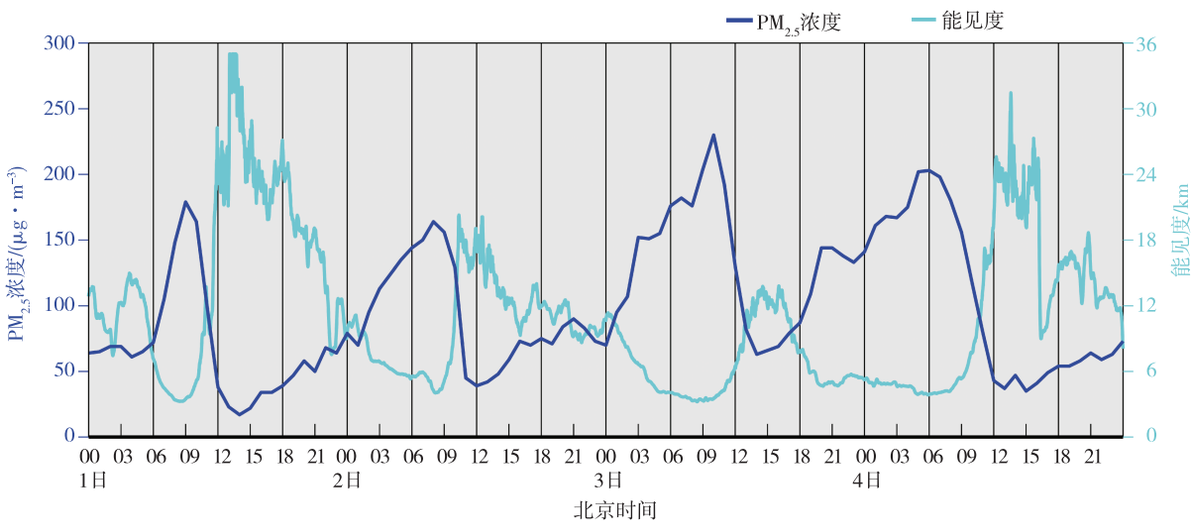

图 2　2016 年 2 月 1—4 日东营能见度和 $PM_{2.5}$浓度变化

Fig.2　Variation of visibility and $PM_{2.5}$ concentration in Dongying from 1 to 4 February 2016

2.1.2　逆温层特征量的指示性分析

逆温日变化具有夜间开始增强、日出前最强、日出后逐渐减弱的规律。能见度伴随逆温增强而降低，逆温最强时最低，逆温减弱后升高。此类天气过程也是逆温逐渐增强、能见度逐渐降低的过程，具体演变以 2016 年 12 月 28 日—2017 年 1 月 5 日过程（图 3）为例说明。在过程前期（2016 年 12 月 28—30 日），逆温时段基本在 18 时—次日 09 时，

最大逆温层温差(Δt_{max})为5 ℃左右,最大逆温层厚度(Δh_{max})为400~600 m,最低能见度为3~5 km,多数情况下逆温破坏2 h后能见度升高至10 km以上。在过程中期(2016年12月31日—2017年1月1日),逆温时段在16时—次日11时,Δt_{max}为5~7 ℃,Δh_{max}为600 m,日最低能见度在1 km以下,最高能见度为3~5 km。在过程后期(2017年1月2—4日),逆温基本全天存在,仅在14时左右强度弱些,Δt_{max}为8~10 ℃,Δh_{max}为600~800 m,日最低能见度在0.1 km以下,最高能见度为2~3 km。在过程结束阶段(2017年1月5日),受冷空气影响,$PM_{2.5}$浓度降低,逆温消散,能见度转好。

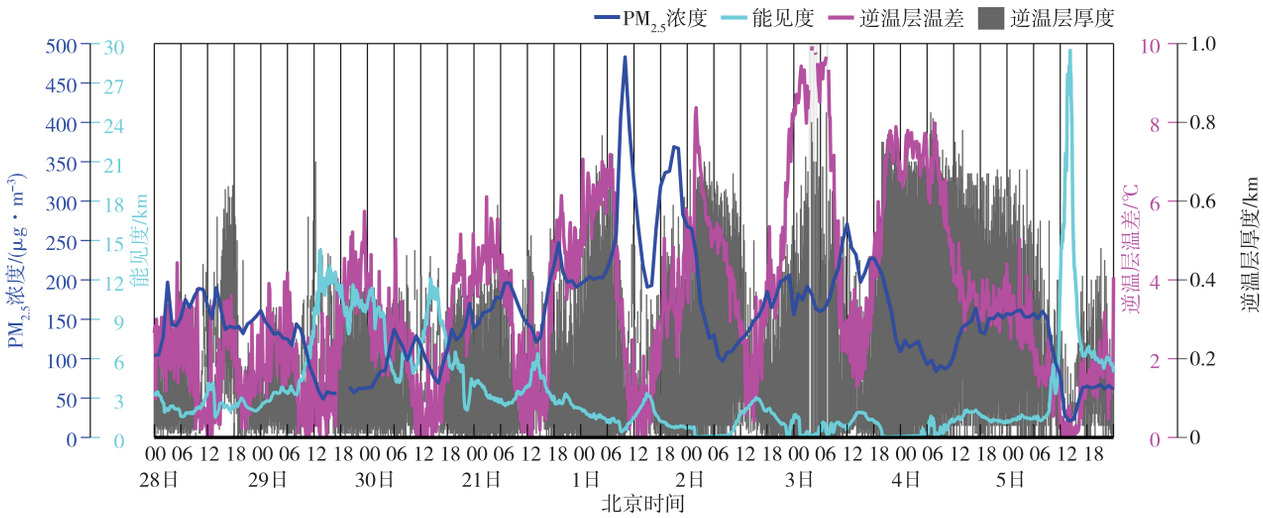

图3 2016年12月28日—2017年1月5日东营能见度、$PM_{2.5}$浓度、逆温层温差和逆温层厚度变化

Fig.3 Variation of visibility, $PM_{2.5}$ concentration, and temperature difference and thickness of inversion layer in Dongying from 28 December 2016 to 5 January 2017

逆温层温差(Δt)、逆温层厚度(Δh)、逆温层底部(H_0)与能见度的联动变化规律为:当逆温增强时,H_0降低,Δt和Δh均增大,Δt可提前于Δh变化10~30 min,能见度降低;当逆温减弱时,H_0升高,多数情况下Δt和Δh均减小,且Δt也提前于Δh变化,能见度升高。对此类型15个个例的Δt和Δh分别与能见度数据逐10 min进行相关性分析,Δt与能见度的相关系数为-0.39,Δh与能见度的相关系数为-0.45。

Δh与能见度的相关性优于Δt,主要原因是有时Δt减小但Δh未减小,此时能见度不会升高。以图3为例分析,2016年12月28日是过程开始第1日,下午至傍晚Δh维持在600 m,Δt为4 ℃,日最大能见度为4 km;29—30日下午至傍晚Δh在300~400 m之间,Δt为3~4 ℃,日最大能见度在10 km以上。可见,在Δt差别不大的前提下,Δh的不同直接导致能见度差别较大。2017年1月4日中午至1月5日上午,能见度也在Δh减小后才升高。综上,Δh对雾和霾共同影响天气中能见度的指示性更好。同时,个例中未曾发现Δt大,而Δh小的情况。

2.1.3 低层相对湿度的指示性分析

低层相对湿度具有白天小、夜间大的日变化规律,其数值越大、湿层越高,对应能见度越低。以2016年11月13—14日过程(图4)为例分析可见,13日白天低层相对湿度在80%以下,能见度受霾影响维持在4~5 km之间;13日21时—14日10时低层出现厚度为300 m、相对湿度为90%以上的高湿区,能见度小于2 km。14日06—10时低层饱和高湿区逐渐抬升至400 m以上,能见度维持在0.1 km以下。低层高湿区消失后,能见度明显升高。

2.2 雾影响个例

2.2.1 个例特征和天气形势

该类型个例多在冬半年出现,大部分仅维持1 d,最低能见度在0.1~1.0 km之间。能见度与$PM_{2.5}$浓度无关,具体特征及最低能见度日08时天气形势详见表2。

3个个例为雾和降水共同影响,天气形势为500 hPa处于槽前西南气流,850 hPa为槽前或切变控制,地面为弱气压场。4个个例为辐射雾,500 hPa天气形势多为弱高空槽,850 hPa多为弱高压环流控制,地面为弱气压场或弱高压前部,常伴有北风。

2.2.2 逆温层特征量的指示性分析

逆温日变化也具有夜间开始增强、日出前最

强、日出后逐渐减弱的规律，逆温最强时能见度最差。以 2017 年 3 月 29 日过程（图 5）为例，分析可见，凌晨以后逆温层温差（Δt）逐渐增大，逆温层厚度（Δh）维持在 300~400 m 之间，能见度逐渐降低。07 时左右，Δt 达到 5 ℃，能见度为 0.2 km，Δt 最大时段与能见度最低时段吻合。07—09 时逆温层逐渐破坏，Δt 迅速减小，而 Δh 变化不大，能见度缓慢升高。09 时以后，Δh 迅速减小，逆温层底部（H_0）升高，直至 10 时后 Δh 完全消失，能见度升高至5 km 以上。

逆温层温差（Δt）、逆温层厚度（Δh）、逆温层底部（H_0）与能见度的联动变化规律为：当逆温增强时，H_0降低，Δt 和 Δh 同时增大，能见度降低；当逆温减弱时，H_0升高，Δt 和 Δh 均减小，Δt 可提前于 Δh 变化 60 min，能见度升高。对此类型 7 个个例的 Δt 和 Δh 分别与能见度数据逐 10 min 进行相关性分析，Δt 和 Δh 与能见度的相关系数均为-0.34。为了更好地说明逆温与能见度的关系，剔除逆温为 0 的时段再次计算，Δt 与能见度的相关系数为-0.54，Δh 与能见度的相关系数为-0.45。

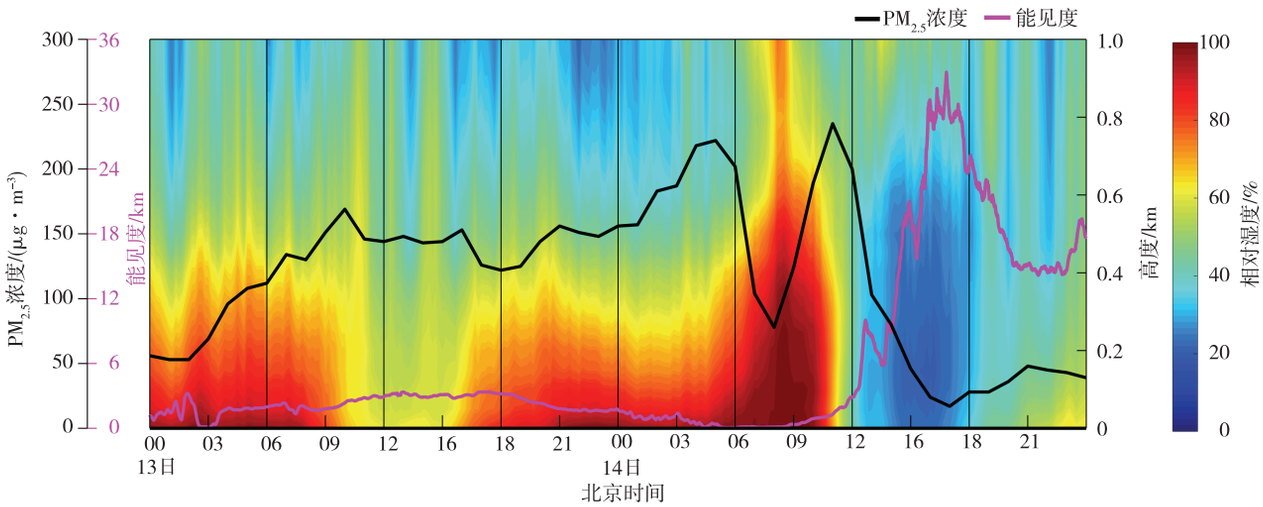

图 4　2016 年 11 月 13—14 日东营能见度、$PM_{2.5}$浓度和 1 km 以下相对湿度（色阶）变化

Fig.4　Variation of visibility, $PM_{2.5}$ concentration, and relative humidity (color scale) below 1 km in Dongying from 13 to 14 November 2016

表 2　2016—2017 年东营雾影响个例特征、天气形势和低能见度成因

Table 2　Characteristics, synoptic situations, and causes of low visibility of cases affected by fog in Dongying from 2016 to 2017

开始日期（维持天数/d）	过程 $PM_{2.5}$浓度最大值/（μg·m^{-3}）	过程最低能见度/m	500 hPa 形势	850 hPa 形势	地面形势	低能见度成因
2016-02-12(2)	114	147	槽前西南气流	槽前暖脊	鞍型场	雾和降水
2017-03-29(1)	114	256	西西北气流	弱高压环流	鞍形场前部	雾
2017-10-14(1)	151	323	槽前西南气流	弱高压环流	弱高压前部	雾
2017-10-08(1)	107	337	槽前西南气流	切变线	倒槽	雾和降水
2017-01-29(1)	121	380	槽前西南气流	西北气流	高压前部	雾和降水
2016-07-18(1)	142	932	弱高压	弱切变线	弱气压场	雾
2017-06-14(1)	—	551	横槽	弱高压环流	弱高压	雾

Δt 与能见度的相关性优于 Δh，主要原因是在雾的增强阶段 Δt 与能见度相关性更好。以图 5 为例分析可知，2017 年 3 月 29 日 05—07 时是雾的增强阶段，能见度由 2.0 km 降低至 0.2 km，Δt 由 2 ℃跃增至 5 ℃，而 Δh 维持在 350 m 左右。所以，Δt 对雾影响天气中能见度的指示性更好。

2.2.3　低层相对湿度的指示性分析

近地面层充沛的水汽是形成大雾的必要条件[22]。以 2017 年 1 月 29 日过程（图 6）为例，有降水时整层相对湿度接近饱和。以 2017 年 3 月 29 日过程（图 7）为例，无降水时相对湿度 90%以上的高湿区达 200 m。无论是否伴有降水，相对湿度 90%

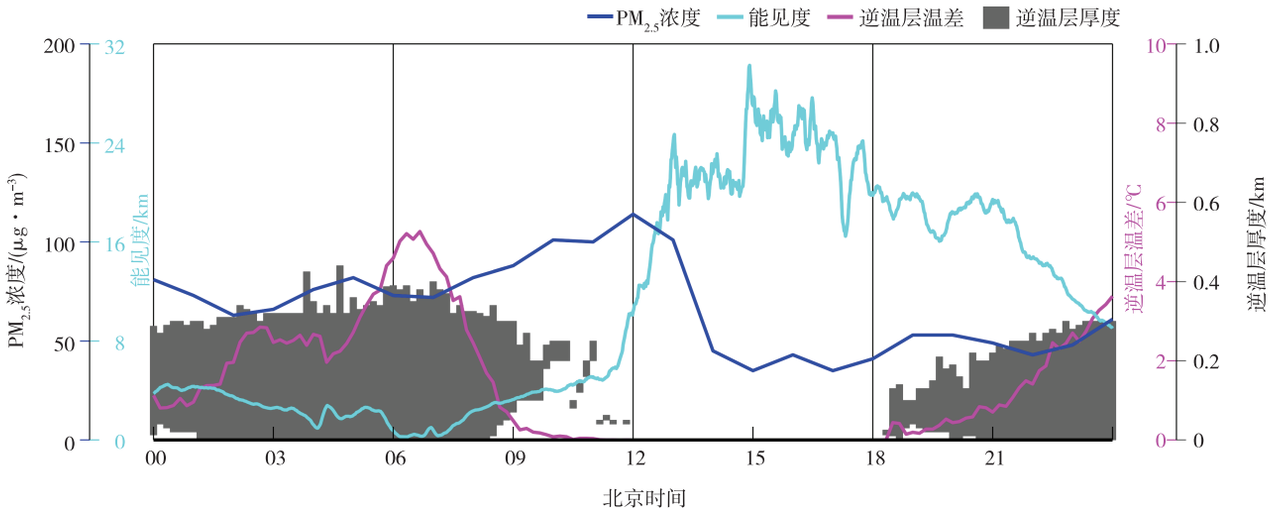

图 5 2017 年 3 月 29 日东营能见度、$PM_{2.5}$浓度、逆温层温差和逆温层厚度变化

Fig.5 Variation of visibility, $PM_{2.5}$ concentration, and temperature difference and thickness of inversion layer in Dongying on 29 March 2017

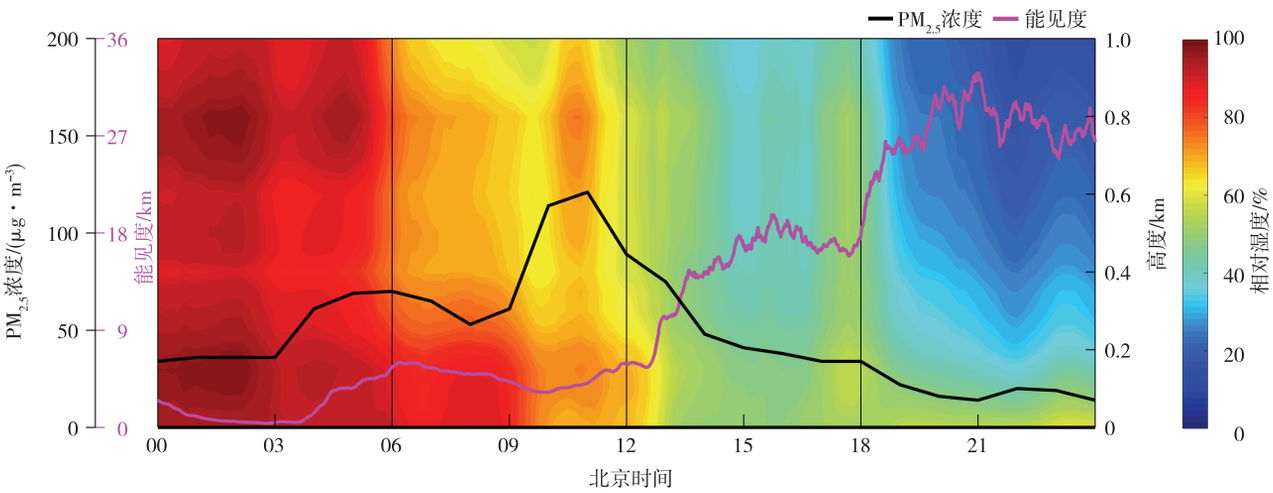

图 6 2017 年 1 月 29 日东营能见度、$PM_{2.5}$浓度和 1 km 以下相对湿度(色阶)变化

Fig.6 Variation of visibility, $PM_{2.5}$ concentration, and relative humidity (color scale) below 1 km in Dongying on 29 January 2017

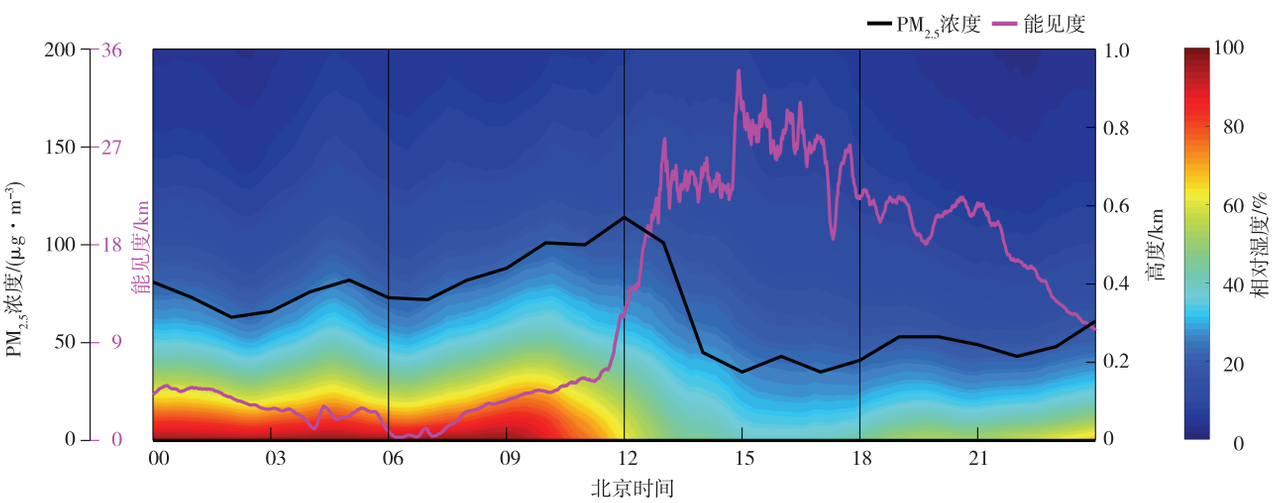

图 7 2017 年 3 月 29 日东营能见度、$PM_{2.5}$浓度和 1 km 以下相对湿度(色阶)变化

Fig.7 Variation of visibility, $PM_{2.5}$ concentration, and relative humidity (color scale) below 1 km in Dongying on 29 March 2017

以上的低层高湿区与能见度小于 5 km 的时段对应，低层相对湿度小于 80% 以后能见度升高至 5 km 以上。

2.3　降水影响个例

2.3.1　个例特征

该类型个例均出现在夏季，最低能见度在 0.6~1.0 km 之间。低能见度仅在强降水时段出现，降水强度多在 20 mm·h^{-1}以上，强降水结束后，能见度迅速升高。空气质量与低能见度无关。具体特征详见表 3。

2.3.2　逆温层特征量的指示性分析

逆温仅在强降水时段显著增强，逆温层温差（Δt）、逆温层厚度（Δh）增大，能见度降低。以 2016 年 8 月 14 日过程（图 8）为例，分析可见，09—10 时出现强度为 46 mm·h^{-1}的短时强降水，Δt 达到 8 ℃以上，Δh 为 500 m，能见度由 5.0 km 降低至 0.6 km。强降水时段结束后逆温显著减弱，能见度迅速升高至 5.0 km 以上。

表 3　2016—2017 年东营降水影响个例特征

Table 3　Characteristics of cases affected by precipitation in Dongying from 2016 to 2017

日期	$PM_{2.5}$浓度最大值/（μg·m^{-3}）	PM_{10}浓度最大值/（μg·m^{-3}）	O_3浓度最大值/（μg·m^{-3}）	最低能见度/m	最大降水强度/（mm·h^{-1}）
2016-07-01	64	97	165	963	24
2016-08-07	30	51	60	706	30
2016-08-14	51	87	139	668	46
2016-08-19	64	123	64	817	7
2017-07-07	63	137	199	919	50

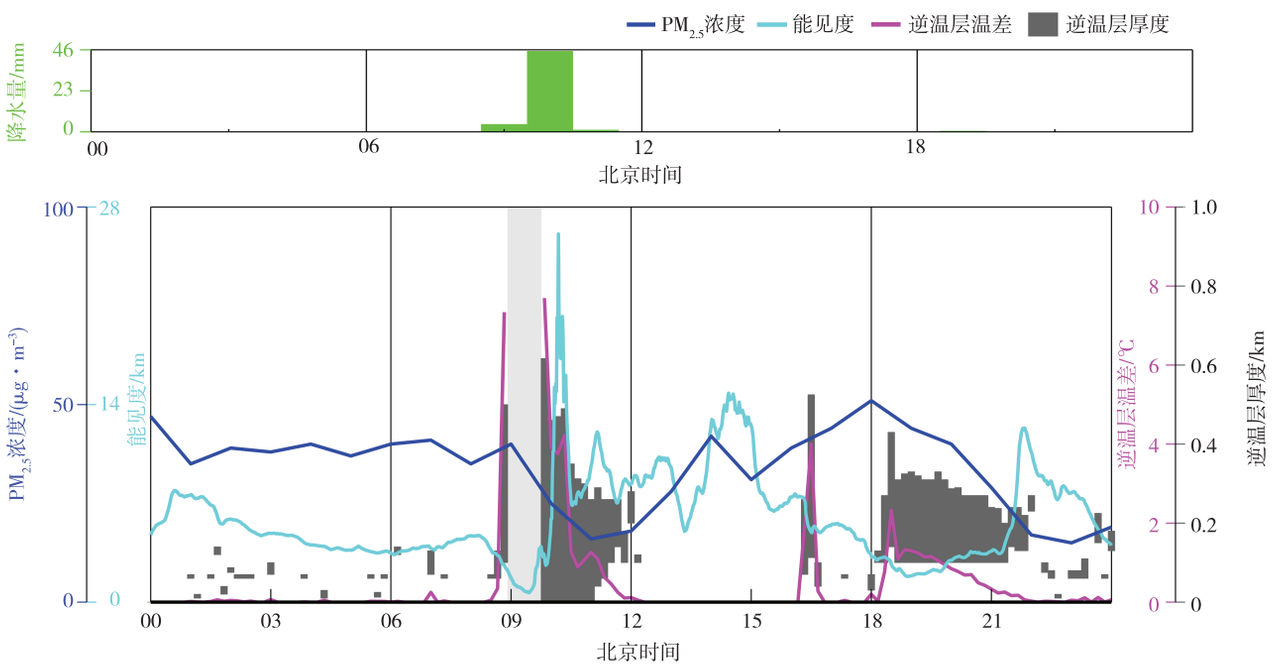

图 8　2016 年 8 月 14 日东营降水量、能见度、$PM_{2.5}$浓度、逆温层温差和逆温层厚度变化

Fig.8　Variation of precipitation, visibility, $PM_{2.5}$ concentration, and temperature difference and thickness of inversion layer in Dongying on 14 August 2016

2.3.3　低层相对湿度的指示性分析

强降水时段前后几小时，整层水汽饱和，相对湿度达到 100%，低层相对湿度不会随着能见度降低或升高而变化。以 2016 年 8 月 14 日过程（图 9）为例，分析可见，08—11 时低层相对湿度维持 100%，能见度经历了由 5.0 km 降低至 0.6 km 再升高至 10.0 km 两个阶段，所以低层相对湿度与能见度变化无关。09—10 时强降水时段，微波辐射计观

测的地面相对湿度为 70%，地面气象观测站记录的相对湿度为 100%，微波辐射计观测值明显偏小，这与设备自身局限性有关。

2.4 总体预报指标性分析

本文没有单一依据能见度数值定义低能见度天气，目的在于扩大入型样本数量，更全面地研究低能见度天气的演变过程。$PM_{2.5}$浓度、逆温层温差（Δt）、逆温层厚度（Δh）和低层相对湿度对不同类型低能见度天气各阶段的预报指示性分析见表 4。

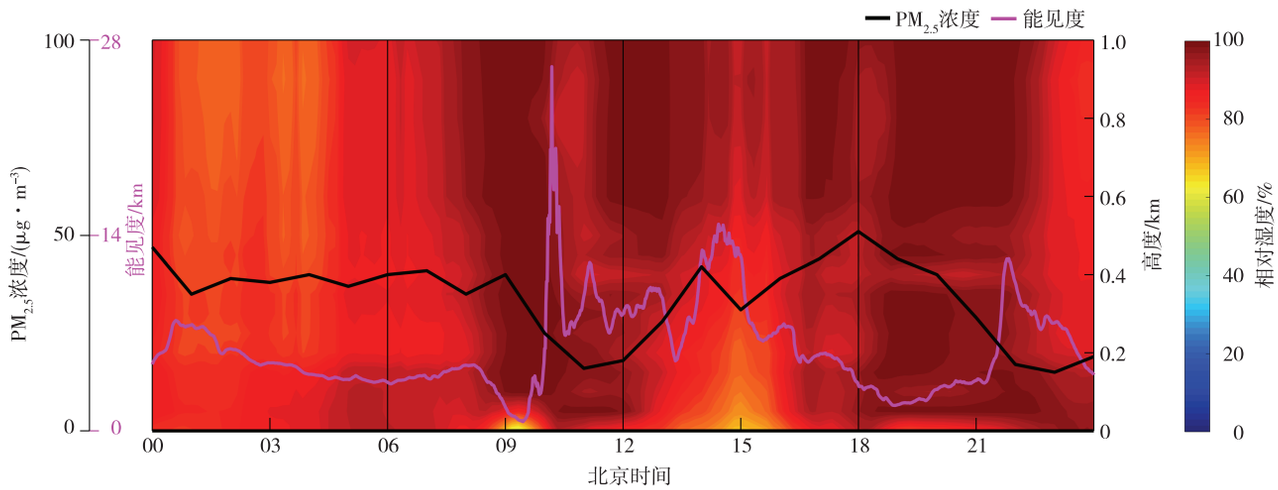

图 9 2016 年 8 月 14 日东营能见度、$PM_{2.5}$浓度和 1 km 以下相对湿度（色阶）变化

Fig.9 Variation of visibility, $PM_{2.5}$ concentration, and relative humidity (color scale) below 1 km in Dongying on 14 August 2016

表 4 $PM_{2.5}$浓度等特征量对东营低能见度天气的预报指示性

Table 4 Prediction indication of characteristic quantities such as $PM_{2.5}$ concentration for low visibility weather in Dongying

类型	最低能见度/km	$PM_{2.5}$浓度/（μg·m^{-3}）	Δt/℃	Δh/m	低层相对湿度/%	高湿区厚度/m
雾和霾共同影响	3.0~5.0	150~200	5	400~600	<80	无
雾和霾共同影响	<1.0	>200	5~7	600	>90	300
雾和霾共同影响	<0.2	>250	8~10	600~800	100	400
雾和降水影响	0.1~0.4	无关	3	400	100	>1 000
辐射雾影响	0.2~1.0	无关	5	400	>90	200
降水影响	0.6~1.0	无关	>8	500	100	>1 000

3 结论与讨论

（1）对社会影响大的低能见度天气类型主要是雾和霾共同影响或者雾影响。由微波辐射计观测得到的特征量对两类天气的分析结果看，低层高湿区主要提供了低能见度天气的孕育环境，逆温层特征量的变化直接导致能见度变化。逆温层温差（Δt）和逆温层厚度（Δh）作为主要特征量，对能见度降低或升高阶段的指示性不同。在能见度降低阶段，Δt 和 Δh 同时增大，指示能见度降低，Δt 最大值与能见度最低值对应，Δh 的变化相对于 Δt 滞后 10~30 min；在能见度升高阶段，通常是 Δt 先开始减小，指示能见度开始升高，但只有在 Δh 明显减小后能见度才明显升高，这个滞后时间与天气系统有关。

（2）逆温层温差（Δt）和逆温层厚度（Δh）在天气形势稳定时变化规律具有一致性。在有冷空气或降水影响时，Δh 的变化会明显滞后于 Δt，主要包括以下两种情况。一是重污染雾和霾天气背景下冷空气开始影响阶段，通常 Δt 减小 1~2 h 后 Δh 开始减小。Δh 降低可作为冷空气影响下重污染雾和霾天气消散的指示性因子。二是重污染雾和霾天气背景下出现一般性降水时 Δt 会很快减小，但 Δh 通常会在降水结束后冷空气影响时才减小。这个时间间隔取决于天气系统影响进程，有可能达到 10 h以上。综上，在能见度精细化预报中，应结合天气形势对 Δt 和 Δh 两个物理量的变化及其预报指示性进行细致分析。

（3）降水会对微波辐射计观测准确度产生较明

显的影响，在本研究的 5 个夏季降水个例中，均出现降水时段微波辐射计观测的地面相对湿度偏小的情况。应对微波辐射计设备进行定期标定，确保其观测和反演数据的可靠性；使用者需要进一步探究各类天气条件下的数据订正和应用方法，使其在气象预报领域发挥更大的作用。

参考文献：

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

[2] 马志强，赵秀娟，孟伟，等.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，2012，25(11)：1208-1214.

[3] 陈训来，冯业荣，王安宇，等.珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究[J].中山大学学报(自然科学版)，2007，46(4)：103-107.

[4] 蔡子颖，韩素芹，张敏，等.天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用[J].环境科学，2018，39(6)：2548-2556.

[5] 王丛梅，杨永胜，李永占，等.2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J].环境科学研究，2013，26(7)：695-702.

[6] 王庆，李季，樊明月.济南爆发性增强冬季雾的物理特征分析[J].海洋气象学报，2020，40(2)：83-95.

[7] DENG Z Z, ZHAO C S, MA N, et al. Size-resolved and bulk activation properties of aerosols in the North China Plain[J]. Atmos Chem Phys，2011，11(8)：3835-3846.

[8] 戴永立，陶俊，林泽健，等.2006~2009 年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J].环境科学，2013，34(8)：2925-2932.

[9] 韩永清，孙兴池，李静，等.雾霾天气个例气象条件对比分析[J].气象科技，2017，45(1)：172-178.

[10] 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.

[11] 周秀骥.大气微波辐射及遥感原理[M].北京：科学出版社，1982.

[12] CHAN P W. Performance and application of a multi-wavelength, ground-based microwave radiometer in intense convective weather[J]. Meteor Z，2009，18(3)：253-265.

[13] WARE R, ALBER C, ROCKEN C, et al. Sensing integrated water vapor along GPS ray paths[J]. Geophys Res Lett，1997，24(4)：417-420.

[14] 杨莲梅，李霞，赵玲，等.MP-3000A 型地基微波辐射计探测性能及其在乌鲁木齐降水天气中的初步应用[J].干旱气象，2013，31(3)：570-578.

[15] 刘红燕，王迎春，王京丽，等.由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J].大气科学，2009，33(2)：388-396.

[16] 廖晓农，张小玲，王迎春，等.北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J].环境科学，2014，35(6)：2031-2044.

[17] 崔雅琴，张佃国，王洪，等.2015 年济南地区雾霾天气过程大气物理量特征初步分析[J].大气科学，2019，43(4)：705-718.

[18] WAN W L, SUN R, ZHANG H W, et al. Analysis and correction of the observation error of the microwave radiometer in dongying city[C]//2017 2nd International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST). Shenzhen：IEEE，2017：387-393[2021-07-19]. https://ieeexplore.ieee.org/document/8210542.

[19] 郭立平，乔林，石茗化，等.河北廊坊市连续重污染天气的气象条件分析[J].干旱气象，2015，33(3)：497-504.

[20] 中国气象局.霾的观测和预报等级：QX/T 113—2010[S].北京：气象出版社，2010.

[21] 郝巨飞，王晓娟，齐佳慧，等.MWP967KV 型微波辐射计对重污染天气的探测分析[J].环境科学与技术，2018，41(5)：198-205.

[22] 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)：92-102.