

胡孟然,孔海江,韩铮铮,等,2025.“22·12”郑州大雾天气成因分析[J].气象,51(7):865-875. Hu M R, Kong H J, Han Z Z, et al, 2025. Cause analysis of heavy fog weather in December 2022 in Zhengzhou[J]. Meteor Mon, 51(7):865-875(in Chinese).

“22·12”郑州大雾天气成因分析^{*}

胡孟然^{1,2,3} 孔海江^{3,4,5} 韩铮铮⁶ 田 力⁴ 齐伊玲⁴ 元保军⁷

1 安阳国家气候观象台,河南安阳 455000

2 河南省安阳市气象局,安阳 455000

3 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003

4 河南省气象台,郑州 450003

5 河南省大气污染综合防治与生态安全重点实验室,开封 475004

6 河南省濮阳市气象局,濮阳 457000

7 河南省气象探测数据中心,郑州 450003

提 要: 2022 年 12 月 28 日郑新黄河大桥因大雾发生多起车辆相撞的交通事故。利用 ERA5 再分析资料和地面观测数据,采用扰动法对此次大雾天气进行诊断分析,发现该大雾天气具有局地突发性强、能见度低、夜间降温明显的特点;大雾造成的低能见度,以及高湿和低温导致的桥面结冰湿滑,是造成车辆追尾事故的气象原因。天气形势稳定,低层弱冷空气与西南暖脊为雾区输送暖湿气流,环流形势有利于雾的生成。郑新黄河大桥附近水汽通量大,有弱的水汽辐合,存在浅薄的逆温层,辐射冷却作用强,为辐射雾的发生和持续提供了有利的动力、水汽和热力条件。风速、相对湿度、气温、比湿的扰动信号与相应的全场信号相比,可以更好地反映大雾的可预报信号,多扰动因子综合分析可得出雾的消散时间。

关键词: 辐射雾,天气分析,扰动,可预报信号

中图分类号: P458,P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.022101

Cause Analysis of Heavy Fog Weather in December 2022 in Zhengzhou

HU Mengran^{1,2,3} KONG Haijiang^{3,4,5} HAN Zhengzheng⁶ TIAN Li⁴ QI Yiling⁴ YUAN Baojun⁷

1 Anyang National Meteorological Observatory of Henan Province, Anyang 455000

2 Anyang Meteorological Office of Henan Province, Anyang 455000

3 CMA·Henan Agrometeorological Support and Applied Technique Key Laboratory, Zhengzhou 450003

4 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

5 Henan Key Laboratory of Comprehensive Prevention and Control of Air Pollution and Ecological Security, Kaifeng 475004

6 Puyang Meteorological Office of Henan Province, Puyang 457000

7 Henan Meteorological Observation Data Center, Zhengzhou 450003

Abstract: On 28 December 2022, multiple vehicle collisions occurred on the Zhengxin Yellow River Bridge due to heavy fog. Based on ERA5 reanalysis and surface observation data, the method of disturbance-based synoptic analysis is used to diagnose and analyze the heavy fog episode. The results show that the heavy fog weather had the characteristics of strong local suddenness, low visibility, and significant nighttime cooling. The low visibility caused by heavy fog and the ice and slippery bridge deck caused by high humidity and low temperature were the meteorological reasons for the vehicle rear-end collision accidents. The

^{*} 河南省自然科学基金项目(222300420468)、中国气象局复盘总结专项(FPZJ2023-079)、河南省级科技研发计划联合基金项目(232103810093)、河南省科技攻关项目(242102320016)和安阳国家气候观象台开放基金项目(AYNCOF202411)共同资助

2024 年 6 月 4 日收稿; 2025 年 2 月 21 日收修定稿

第一作者:胡孟然,主要从事天气预报、灾害性天气诊断研究. E-mail:1845682394@qq.com

通讯作者:孔海江,主要从事环境气象预报和灾害性天气诊断研究. E-mail:hjkong@foxmail.com

synoptic conditions were stable, with weak cold air at the bottom and warm ridges in the southwest transport of warm and humid airflow into the foggy area, and the circulation pattern was favorable for the generation of fog. The water vapor flux near the bridge was high, and there existed weak water vapor convergence, shallow inversion layer and strong radiation cooling effect, which provided favorable dynamic, water vapor, and thermal conditions for the occurrence and persistence of radiation fog. The disturbance signals of wind speed, relative humidity, temperature and specific humidity can better reflect the predictable signals of heavy fog compared to the corresponding disturbance signals. The comprehensive analysis of multiple disturbance factors can help determine the dissipation time of fog.

Key words: radiation fog, weather analysis, disturbance, predictable signal

引 言

雾是由悬浮在大气中的微小液滴构成的气溶胶,可对交通运输、社会经济和人民生活健康等方面造成严重危害和影响(乔崛和彭新东,2024;徐晓斌,2016;张浩等,2021)。受太行山、燕山山脉影响,华北平原近年来大雾频发(张庆等,2024),导致恶性交通事故时有发生,如2022年12月28日于郑新黄河大桥(以下简称郑新大桥)上发生的一次由低温和大雾造成的路面结冰和低能见度引发多车连环相撞的重大交通事故,事故涉及车辆多且损毁严重,造成1人死亡,交通中断或滞留时间达6 h以上。雾的形成机制复杂,对其预报预警难度大(石春娥等,2021;王庆等,2021),因此,进一步提高大雾天气的预报预警能力具有重大经济和社会意义。

一些学者基于数值模拟和实测资料开展大雾研究(高睿,2023;朱世珍等,2023;邵禹晨等,2019)。早期由于对雾中各物理过程缺乏更深刻的认识,模拟结果并不十分理想(黄建平等,1998;杨薇等,2022)。近年,刘志杰等(2024)利用实况融合海温和FY-4温度廓线资料协同同化的方法,对渤海海雾模拟的效果有明显改进;柳龙生等(2024)也发现同化观测资料对初始场的改进,能够较好地模拟海雾发生的初始阶段。由于资料、地形等的限制,对大陆地区雾的模拟效果不如对海雾的模拟(钱玮等,2020;王慧等,2022;崔寅平等,2023)。基于实测资料对雾分析的研究也相对较多(王楠楠,2023),但利用扰动法(钱维宏,2012;2013)分析大雾天气过程的研究并不多见。Qian et al(2019)分析了2016年1月浙江宁波舟山港的一次区域性海雾事件,发现对流层低层异常逆温及湿度正异常有利于沿海雾和雨形成,异常的温度-压力和湿度-风可用于提前几天预测与

沿海雾相关的低能见度过程。Qian et al(2021)通过比较异常场和全场方法在天气分析和预报中的优劣,发现扰动法更有助于识别灾害性天气系统的主要控制因素,增加了预报的可预测性。

本文拟对2022年12月28日郑新大桥大雾天气进行诊断分析,并将常规天气形势分析与扰动法相结合,在分析天气实况的基础上,剖析其形成的动力、水汽、和热力条件,诊断大雾生成和持续的物理机制,力求深入认识此次大雾的主要成因,以期提高短时临近预报准确率,减少雾害造成的损失,确保公路交通的安全。

1 资料和方法

1.1 资 料

本研究使用的数据集分别是:

(1)大气再分析数据:欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的每小时一次的ERA5数据集(水平网格距为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)(Hersbach et al,2020)。高空数据包括:风场、位势场、温度场、垂直速度场、比湿和相对湿度等;地面数据包括:2 m温度、海平面气压等。

(2)辐射数据:ECMWF提供的小时平均地表净辐射通量、平均地表直接短波辐射通量。

(3)地面观测数据:河南省气象探测数据中心提供的地面气象站和新乡市韩董庄省级气象观测站的逐小时数据集,对天气要素的观测包括气温、露点温度、相对湿度、2 m风速、能见度等,数据均已经过质量控制;以及郑州国家级气象观测站08时、20时探空站资料。

全文如无特别说明,时间均为北京时。

1.2 方 法

对于此次大雾事件,使用逐小时资料和扰动分析方法(Qian et al,2021;钱维宏等,2022)。在逐小时变量气候定义下将其简单分为两部分:气候值和扰动值,用于天气分析和预报。其中逐小时的气候值是通过 30 年(1991—2020 年)的 ERA5 再分析数据(Hersbach et al,2020)进行平均值计算得到的;逐小时的扰动值如式(1)所示:

$$V_{\text{anomaly}}(\lambda, \phi, p, t) = V_{\text{total}}(\lambda, \phi, p, t) - V_{\text{climatology}}(\lambda, \phi, p, t) \quad (1)$$

式中: λ 、 ϕ 、 p 、 t 分别表示经度、纬度、气压、时间, V_{total} 、 $V_{\text{climatology}}$ 、 V_{anomaly} 分别表示每小时的实况值、气候平均态、分解提取出的扰动值。

在扰动场上评估一个场相对于正常情况(气候)的扰动程度是定量的,但扰动场仅与气候相关,不能显示全貌(Qian et al,2021)。本文将扰动场与全场(实况)一起使用,参考全场天气系统,根据扰动场推断物理发展。

2 大雾天气概况

2.1 实况描述与统计

2022 年 12 月 27 日 18 时至 28 日 14 时,河南出现一次较大范围大雾天气。通过分析此时间段内研究区域周围三个市(郑州、新乡、焦作)的国家级气象

观测站最小能见度值(图 1)发现,27 日夜间大雾从郑州东部、新乡东北部向西扩散,在 28 日凌晨至上午已影响至郑新大桥(图略),大桥附近获嘉、原阳、中牟、郑州、武陟五个站点能见度分别为 0.04、0.2、0.16、1.2、0.8 km,即研究区域东部能见度局地降至 0.04 km,为特强浓雾。另外,各站点低能见度持续时间有差异(图略),其中原阳站持续时间最长,为 11 h,武陟站 28 日 07 时能见度小于 1 km,最长持续时间为 8 h,位于原阳、武陟站中间位置的郑新黄河大桥(以下简称郑新大桥,该位置无观测站点)也在 28 日 07 时左右出现大雾,从而引发多车连环相撞的重大事故。

考虑到观测站点的限制以及大雾扩散方向,地面气象要素选用离研究区域相对最近的韩董庄省级气象观测站(以下简称韩董庄站,距大桥直线距离为 6.74 km),而能见度数据选用获嘉、原阳、中牟、武陟四个国家级气象观测站数据。

2.2 气象要素实况特征

2 m 气温、2 m 湿度、温度露点差和 2 m 风向风速对能见度有着显著的影响(高睿,2023;窦刚和陈春艳,2023;贺哲等,2023)。从获嘉、中牟、原阳、武陟站的小时能见度及韩董庄站气象要素(气温、最低温度、温度露点差、风速、相对湿度)变化曲线(图 2)可以看出,28 日 05—11 时,韩董庄站温度露点差小于 0.4℃,水汽含量接近饱和,加之前期降水影响,郑新大桥附近平均相对湿度高达 97% 及以上,日出

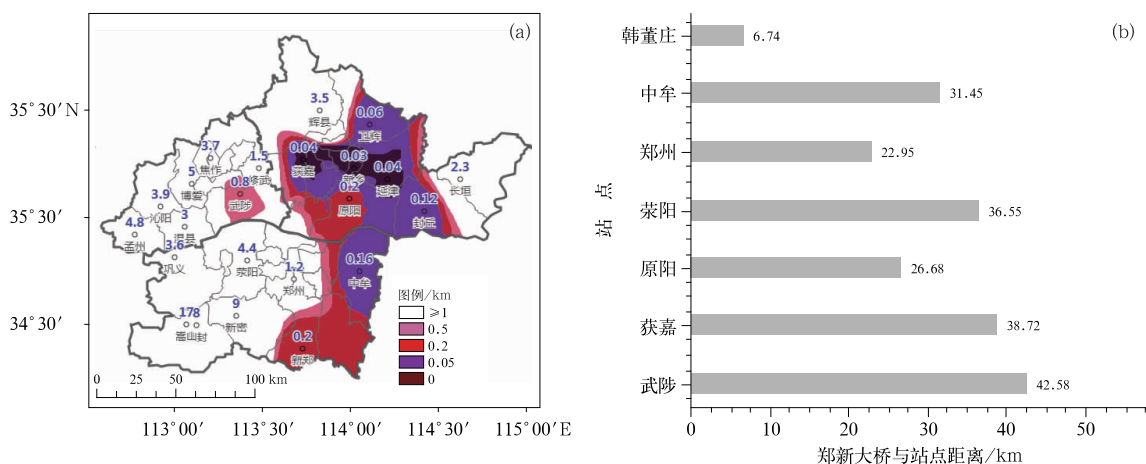
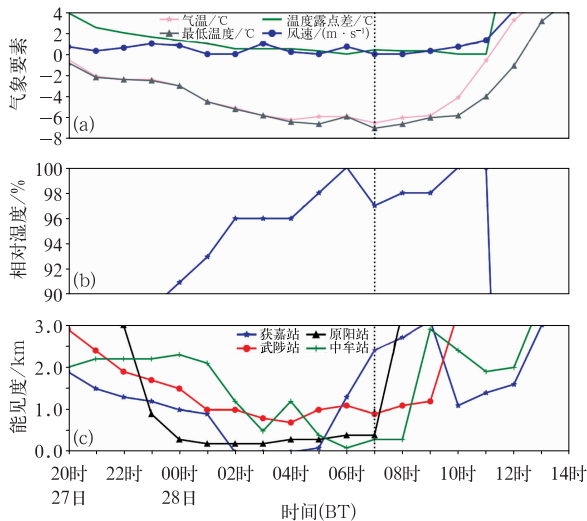


图 1 (a)2022 年 12 月 27 日 18 时至 28 日 14 时河南省国家级气象观测站最小能见度(数字,填色)实况,

(b)研究区距附近站点距离

Fig.1 (a) Low visibility (number, colored) and (b) the distance between the research area and nearby stations of national meteorological stations in Henan Province from 18:00 BT 27 to 14:00 BT 28 December 2022



注:能见度来源为国家级气象观测站数据,气象要素和相对湿度来源为韩董庄站数据,垂直虚线为出雾时刻。

图 2 2022 年 12 月 27—28 日郑新大桥附近气象站点的
(a) 气象要素, (b) 相对湿度, (c) 小时能见度
Fig. 2 (a) Variations of meteorological elements,
(b) relative humidity and (c) hourly visibility at
meteorological stations near Zhengxin Bridge
from 27 to 28 December 2022

后温度露点差增大,能见度随之转好。

平均温度和最低温度变化趋势相似,均在 28 日 04—09 时处于“低谷期”,且处于 $-7.0 \sim -5.9^{\circ}\text{C}$,在 28 日 06 时气温略升且风速很小,这可能是因为风速很小时,大量水汽凝结成雾释放潜热造成。随着太阳辐射加强,温度迅速升高。值得注意的是,最低温度在 -5.9°C 以下,地面结冰会增大严重交通事故发生的可能性;早高峰期间大桥通行车辆增多,水汽凝结于增多的污染颗粒物上可形成雾,且废气烟尘与雾混合还会延后雾散时间,加剧了大雾对交通的影响。

图 3 为韩董庄站风玫瑰图,可以看出,在 28 日 05—08 时研究区域出雾时刻的风速 $\leq 0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表现为小风、弱风,其能使辐射冷却作用和水汽传送到一定高度,是此次大雾出现的先决条件,这和许敏等(2022)研究结果相吻合。出雾时段,研究区域地面风速以弱西风为主,风速增大有利雾散。

3 常规天气形势分析

稳定的大气环流背景场是大雾长时间维持的基础(夏利等,2024)。此次大雾发生前期,即 12 月 25 日 08 时至 27 日 08 时,受高空冷涡和低层冷式切变线东移影响,河南大部分县(市)有雨夹雪或小雪,27 日夜间接变系统移出,河南高空转而受西北气流控制,天气转晴,地表雪融化的水分很快蒸发进入近地层大气中,这为 28 日大雾的形成提供了有利的水汽条件。

3.1 环流背景

分析 12 月 27 日 18 时至 28 日 14 时 500 hPa 温度-位势高度(图略)发现,27 日夜间接至 28 日上午,500 hPa 上基本为“两槽一脊”的环流形势,高空冷涡后部与高度脊之间(即蒙古国区域)有一个横槽,高空温度脊落后于高度脊,加速槽脊东移发展,冷气团中产生的水汽凝结物向东南方向落入郑新大桥附近较冷的气团内,经冷却使得近地面的低层空气达到饱和;暖脊的维持,导致冷空气移动较为缓慢,阻碍了脊的东移,天气形势稳定。1000 hPa 上气温和风速变化特征显示(图略),随时间变化气温

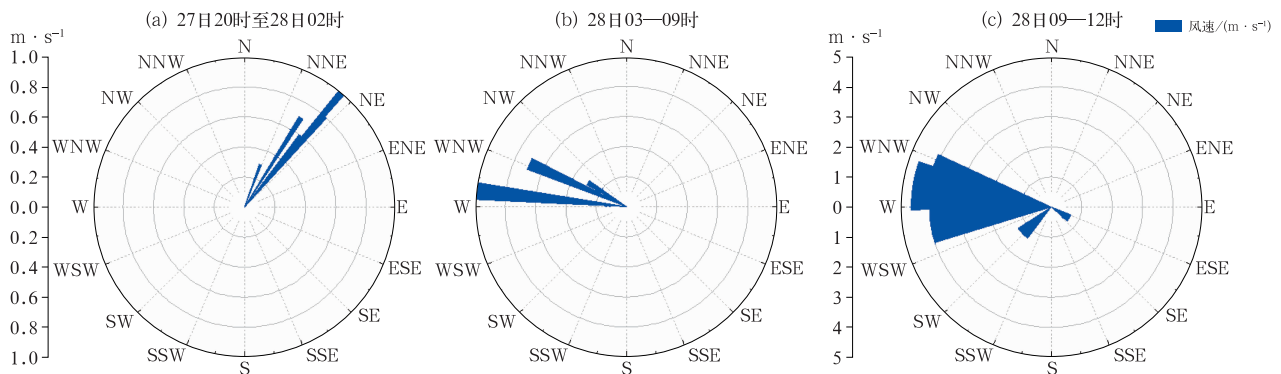


图 3 2022 年 12 月 27—28 日韩董庄站风玫瑰图

Fig. 3 Wind rose diagram at Handongzhuang Station from 27 to 28 December 2022

降低,大桥附近风速小,27日18—23时,在大桥西部冷舌伸入,北方干冷空气与南方暖槽后部暖湿空气在大桥附近交汇,带来了有利的成雾条件;27日23时至28日07时,研究区域附近为静风或小风,是此次大雾持续时间长、浓度大的原因之一,西南部暖气团继续北进,郑新大桥附近偏西风逐渐增大。地面形势场上,研究区域基本处于均压场内,为弱的气旋性辐合区,随后研究区域西南部的暖高压东移配合高空槽东移,地面锋面系统靠近(图略),大气层结稳定性被破坏,大雾消散。

3.2 物理量分析

大雾的形成不仅需要稳定的天气形势,还需要有利的物理量(动力、水汽和热力条件)支撑(苟杨等,2024;贺哲等,2023)。

3.2.1 动力条件

图4为1000 hPa涡度场,由图可见,郑-新大桥在12月27日23时至28日02时处于正涡度区($0\sim 8\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$),正涡度对应的地面气流为弱辐

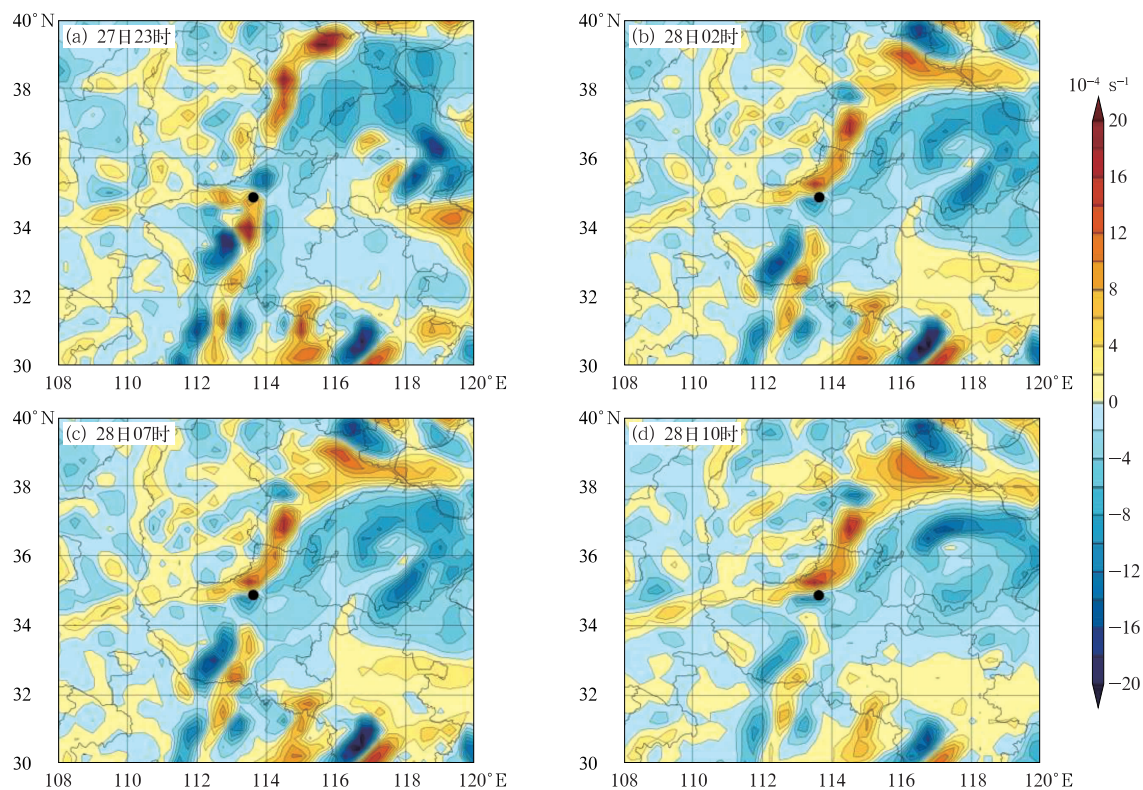
合上升气流,能向上输送热量和水汽,使大量凝结核化增长,28日07时为大桥开始出雾时刻,研究区域附近为负涡度区,对应的地面气流为弱辐散下沉气流;正负涡度值均较小,保证了近地层气流的相对稳定,有利于雾的发展。

3.2.2 水汽条件

25—26日降水过程的增湿作用是此次大雾过程中水汽的重要来源,整个过程中,1000 hPa研究区域附近相对湿度接近60%(图5a),韩董庄站相对湿度高达97%及以上(图2b)。1000 hPa郑新大桥附近为水汽通量的正值集中区(图略),西部有明显的水汽输送,且研究区域基本上处于水汽通量散度的负值区(图5b),有弱的水汽辐合,可以为雾的生成和维持提供一定的水汽补充和相对稳定的空间。

3.2.3 热力条件

近地层逆温层是辐射雾形成的必要条件之一(周文君等,2023;王宏斌等,2021)。从 $T-\ln p$ 图(图6)可见,27日20时(图6a)至28日08时(图6b),由于弱冷空气动量下传和地面冷垫作用,



注:实心圆代表郑新大桥位置,下同。

图4 2022年12月27—28日郑新大桥附近1000 hPa典型时刻涡度

Fig. 4 Vorticity of 1000 hPa near the Zhengxin Bridge at typical time from 27 to 28 December 2022

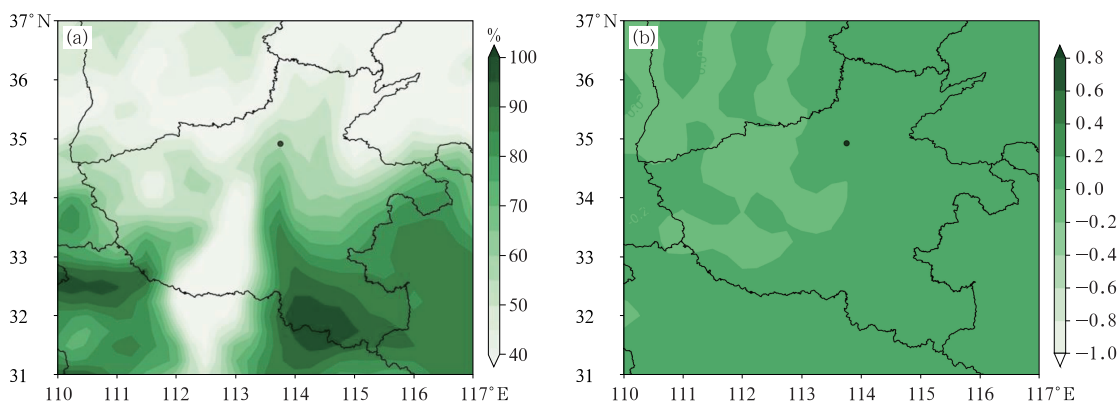


图 5 2022 年 12 月 28 日 07 时郑新大桥附近 1000 hPa(a)相对湿度,
(b)水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 (a) Relative humidity, (b) water vapor flux divergence (unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
at 1000 hPa near the Zhengxin Bridge at 07:00 BT 28 December 2022

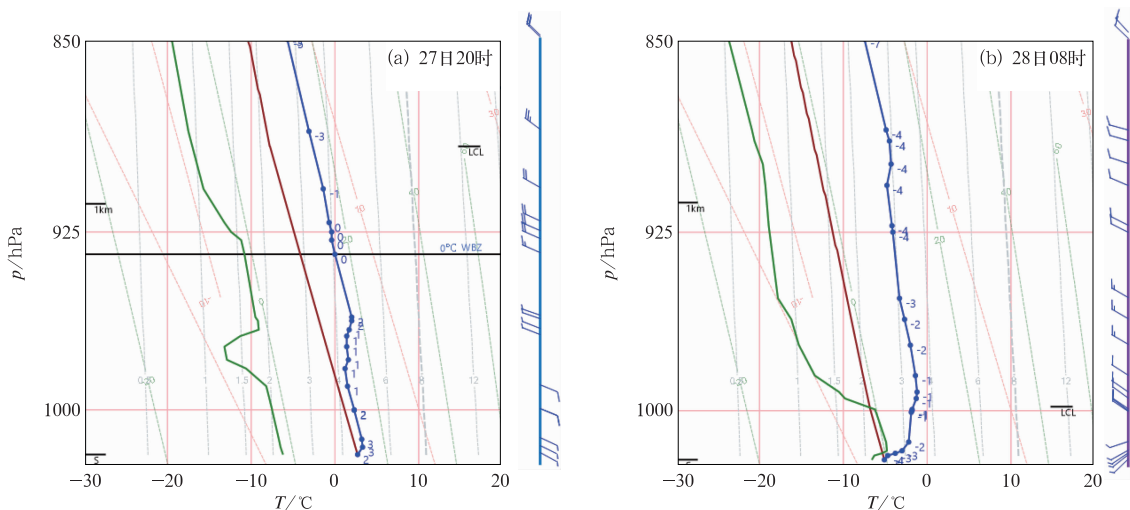


图 6 2022 年 12 月 27—28 日郑州站典型时刻 $T-\ln p$ 图

Fig. 6 $T-\ln p$ diagram of Zhengzhou Station at typical time from 27 to 28 December 2022

逆温层从 950 hPa 左右降至 975 hPa 以下,将大量水汽等聚压在逆温层下,加大了层结稳定度;同时受高空温度槽影响,边界层风向从偏东风转为偏西风主导,风速维持在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,降温作用促使地面充足的水汽凝结,导致能见度急剧下降(图 2c)。日出后弱冷空气继续南下,近地层逆温层被破坏,大雾随之消散。总体上讲,逆温层的稳定存在和近地面低温、高湿对此次大雾持续时间有重要影响。

对比分析地面净辐射通量变化(图 7)发现,27 日 23 时至 28 日 07 时郑新大桥处于地面辐射支出低值区,且随着时间推移,支出值逐渐增加,即研究区域出现辐射冷却效应且逐渐加强,配合冷空气降温限制了湍流的发展,加之高湿及小风条件,为辐射雾的形成、发展提供了极有利的条件。郑新大桥附

近净辐射强度为 $32 \sim 85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,强度较弱,可能是由于大量雾滴形成释放潜热,减少了地表辐射冷却,产生了负反馈效应,这与图 2a 中最低温度略回升的现象一致。28 日 10 时太阳短波辐射增强,雾滴蒸发。

温度平流是天气系统发展的重要热力学因子之一,由 1000 hPa 温度平流图(图 8)可见,研究区域附近有弱冷平流,约为 $-5 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,保证了大气的冷却条件,这与水汽通量散度(图 5b)的分布趋势表现一致。从辐射、平流两项的作用大小来看,地面长波辐射冷却作用强烈,远远超过平流冷却的作用,因此,导致这场大雾的主要热力原因是辐射冷却效应。

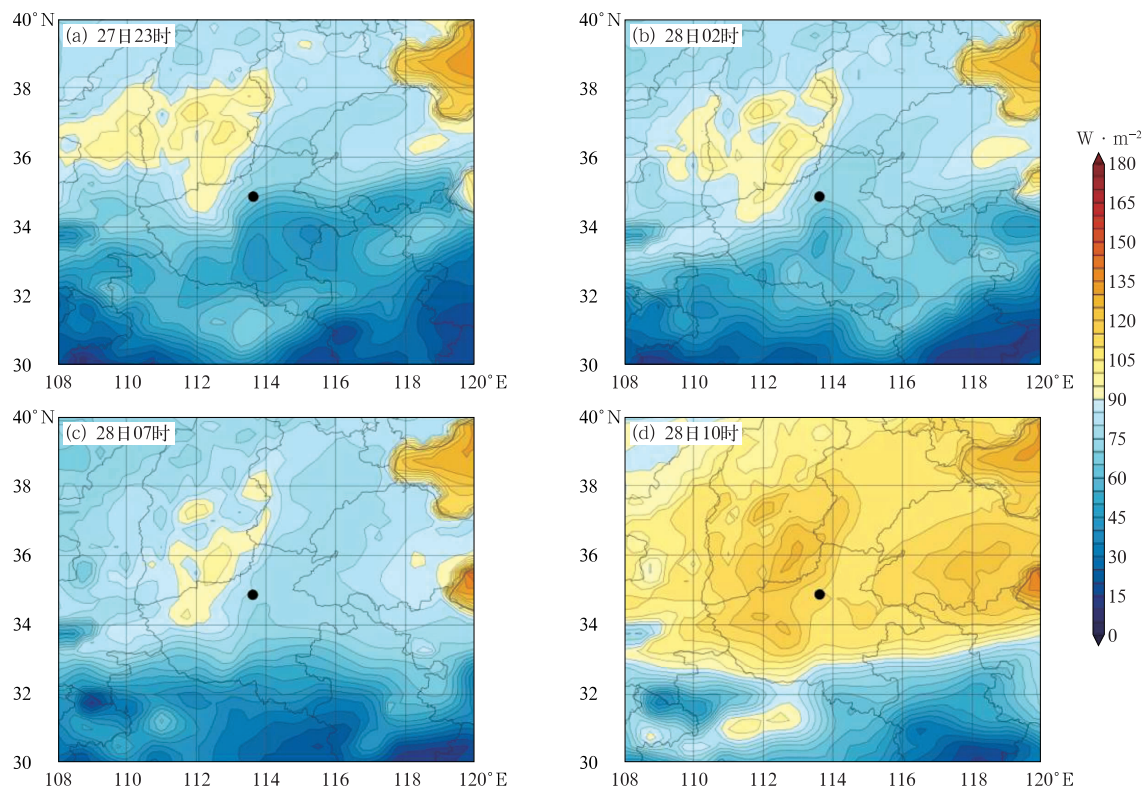


图7 2022年12月27—28日郑新大桥附近地面典型时刻净辐射通量
Fig.7 Surface net radiation flux near the Zhengxin Bridge at typical time
from 27 to 28 December 2022

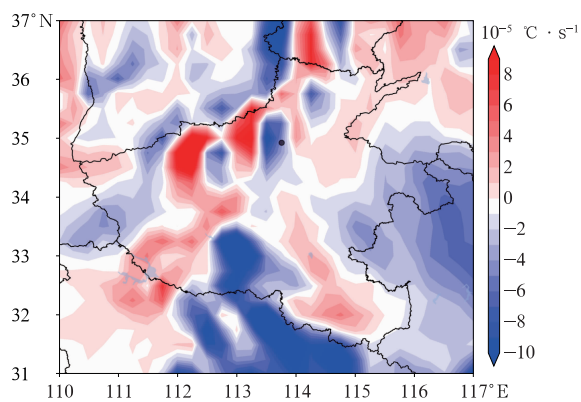


图8 2022年12月28日07时
郑新大桥附近1000 hPa温度平流
Fig.8 Temperature advection of 1000 hPa
near the Zhengxin Bridge
at 07:00 BT 28 December 2022

4 扰动天气形势分析

研究对比分析了温度、水汽通量、垂直速度、风速、相对湿度和比湿的全场、扰动场(图9)。图9a₁

中温度全场图显示,28日02时至出雾前,1000~950 hPa为等温层结,随着高空冷空气下沉,05时起等温层结厚度减小,雾滴碰并发展,水汽通量维持在 $0.35 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,这可能是风速带来的水汽。图9b₁温度扰动图上气温显示负扰动,较常年偏低 1.84°C ,水汽通量较气候值呈负扰动,约为 $2.5 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,这也可能是由于大雾在准备阶段会消耗一定的水汽,但直接准确的大雾预报仍需要其他要素配合诊断。

对比垂直速度(图9a₂,9b₂)可见,28日02时后,925 hPa以下全场图中垂直速度为 $0 \sim 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,为弱上升区,风速为小风,07—08时为雾的出现与维持阶段,近地层垂直速度增大至 $0.1 \sim 0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,指示了雾体发展,能见度持续降低。扰动场上,在雾体的准备阶段,垂直速度为负效应,而06时左右,近地层气团转变为弱上升运动,垂直速度均较常年偏高至 $0 \sim 0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,风速扰动非常弱,配合垂直速度扰动从负转变为正的时间可指示出雾时间。

Qian et al(2021)指出雾作为近地面的水汽凝结现象,湿度全场必然为一相对湿度高值区。从

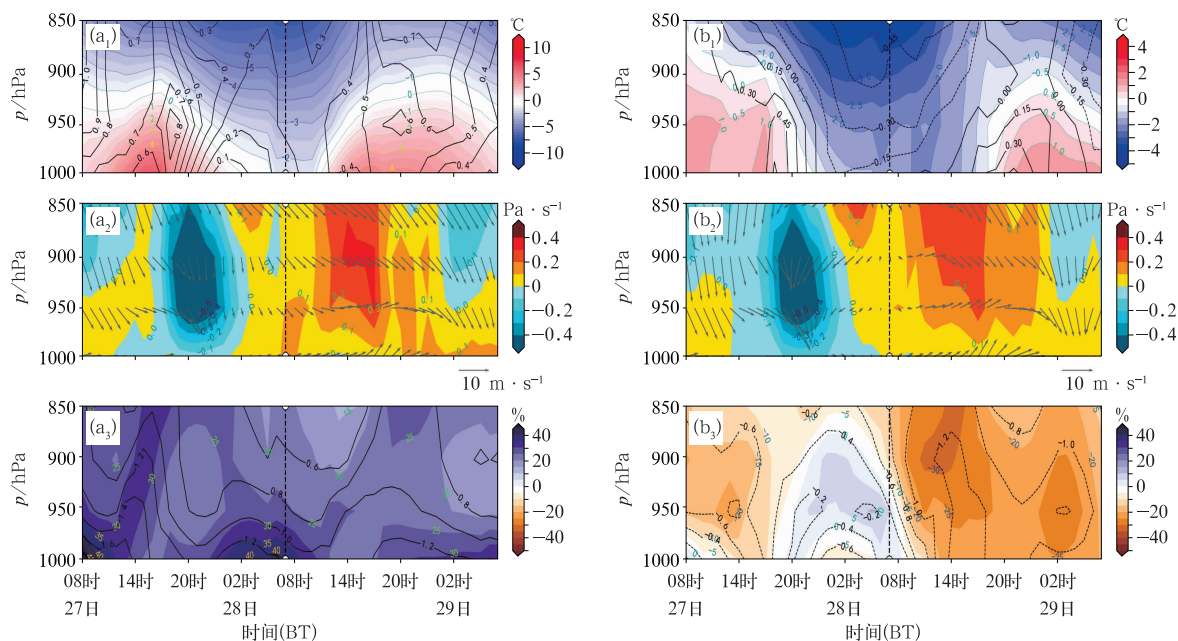


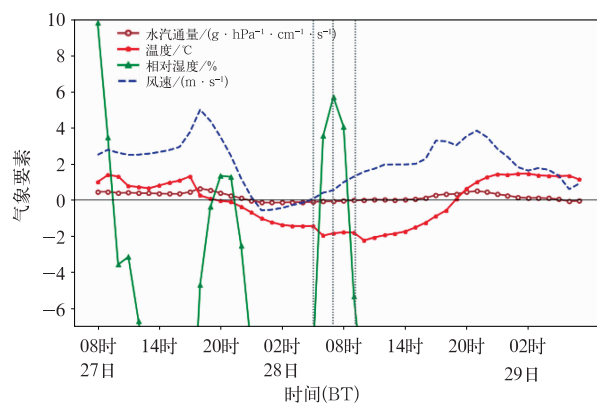
图 9 2022 年 12 月 27—29 日郑新大桥附近气象要素(a)全场和(b)扰动场垂直分布
(a₁, b₁)温度(填色和浅蓝色等值线)和水汽通量(黑色等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),
(a₂, b₂)垂直速度(填色)和风速(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
(a₃, b₃)相对湿度(填色)和比湿(等值线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 9 Time-height profiles of (a) total field and (b) disturbance field of meteorological elements near the Zhengxin Bridge from 27 to 29 December 2022

(a₁, b₁) temperature (colored and light blue contour) and water vapor flux
(black contour, unit: $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),
(a₂, b₂) vertical speed (colored) and wind speed (wind vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
(a₃, b₃) relative humidity (colored) and specific humidity (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

图 9a₃ 相对湿度全场中可以看出,在大雾形成之前,郑新大桥附近地区近地面比湿均在 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。扰动场中(图 9b₃),28 日 05 时之前,1000 hPa 上相对湿度扰动值反而减弱,呈现为负扰动信号,造成这一现象的原因是雾体处于准备阶段,水汽凝结消耗,而 28 日 05—09 时左右,雾区明显表现为高湿正扰动区,相对湿度较常年增大 $5\% \sim 10\%$,比湿较常年偏低 $0.25 \sim 0.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,较气温、垂直速度等要素的扰动特征,湿度扰动信号更清晰和放大,这较大程度增加了这次大雾的可预测性。随时间推移,水汽消耗,近地面层相对湿度、比湿正扰动信号逐渐减小,雾体消散。

辐射雾主要发生在近地层,为了更清晰地展示近地层扰动特征,分析了 1000 hPa 水汽通量、温度、相对湿度和风速随时间变化(图 10),结果显示:出雾时刻郑新大桥附近水汽通量扰动值仅为 $-0.08 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ (该值绘制时放大 10 倍),扰动



注:垂直虚线从左到右分别表示大雾的准备、出现、结束时间,水汽通量绘制时放大 10 倍。

图 10 2022 年 12 月 27—29 日郑新大桥附近 1000 hPa 气象要素时间变化

Fig. 10 Temporal variation of meteorological elements at 1000 hPa near the Zhengxin Bridge from 27 to 29 December 2022

特征优势不甚明显;温度的负扰动特征在27日06时附近有增强现象,这可能与辐射冷却效应有关,随着大雾的出现与维持,温度的负扰动信号变化不大,而大雾减弱时再次出现负扰动信号增强的趋势。相对湿度、风速的扰动特征类似,两者自负异常向正扰动信号转变并逐渐增大,正负扰动转变时间,对应大雾即将出现,可作为预报预警的参考依据。值得注意的是,风速在水滴向雾滴的转变时,出现负扰动峰值;出雾时刻相对湿度正扰动信号达到峰值(5.67%),风速正扰动值为 $0.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,随后风速扰动信号继续增大,而相对湿度扰动信号骤减,同时 $1000\sim 950\text{ hPa}$ 风切变值增大(图略),加之太阳辐射对地面加热,支撑辐射雾维持的必要条件不足,综合分析得出此时雾散。总的来说,温度负扰动、相对湿度和风速的正负扰动转变较基于全场持续增强的特征可更好地反映大雾的可预报性,参考扰动图上的可预报信息,可提升此次高影响天气预测质量。

5 结论与讨论

本文通过对2022年12月28日凌晨郑新大桥一次引发多车连环追尾事故的大雾天气成因分析,得出以下结论:

(1)此次大雾为典型的辐射雾,郑新大桥附近雾发生在28日07时左右,具有局地突发性强、持续时间长、能见度低、夜间降温明显的特点;其气象特征表现为: $0^{\circ}\text{C}\leq\text{温度露点差}<0.4^{\circ}\text{C}$ 、 $-7^{\circ}\text{C}\leq\text{气温或最低气温}<-5.9^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 97\%$ 、风速 $\leq 0.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (偏西北风影响)。大雾引发的低能见度,以及高湿和低温形成桥面结冰湿滑是造成追尾事故的气象原因。

(2)环流形势分析可知:此次大雾与对流层高空和地面环流形势演变特征密切相关,其主要影响天气系统是出现在中高层的横槽维持以及地面弱气压场系统。高空横槽维持,低层冷舌持续向雾区输送弱冷空气,西南暖脊东北向移动,为雾区输送暖湿气流,同时配合地面弱压场,环流形势有利出雾;前期降雪过程为雾区提供了较好的水汽条件。

(3)对辐射雾的物理量诊断分析发现:出雾时郑新大桥附近为负涡度值,整个过程涡度值很小,大桥西侧有水汽输送,有弱的水汽辐合,雾区动力、水汽

条件维持在一个微弱的相对稳定的状态;近地层存在浅薄的逆温层,地面长波辐射冷却作用强度为 $32\sim 85\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,为大雾的发生和持续提供了有力的动力、水汽和热力条件。

(4)通过对比分析影响此次辐射雾的气象因子的全场和扰动场特征得出:出雾时刻郑新大桥附近上空气温负异常,较常年偏低 1.84°C ,水汽通量扰动值为 $-0.08\text{ g}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,比湿扰动信号值为 $0.25\sim 0.50\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,垂直速度较常年偏高 $0\sim 0.5\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$;相对湿度正扰动信号峰值、风速正扰动值分别为 5.67% 、 $0.53\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,两者正负扰动转变时间可指示大雾即将出现,而气温负扰动信号的增强也可预示大雾的起止时间。基于全场和扰动场的因子,参考扰动图上的可预报信息,可较大程度提升此次高影响天气预测质量。多因子综合分析得出雾散时间为09时左右。

(5)日出后随着太阳短波辐射加热明显,温度升高且风速增大,水汽消耗,近地面层相对湿度、比湿正扰动信号均逐渐减小,雾体得以快速消散。

由于本文仅研究了一次郑新大桥附近辐射雾,初步得出了本次大雾气象特征、可预见扰动信号,辐射雾发生的环流型、规律特征有待更多个例的验证,同时,本研究尚未涉及雾微物理过程,有待进一步研究探讨雾爆发性增强的微物理特征和产生原因,相应地同样需要更多个例的验证。

参考文献

- 崔寅平,晋银保,张娟,等,2023.一次局地辐射雾过程及其水汽来源的数值模拟[J].中山大学学报(自然科学版)(中英文),62(5):171-180. Cui Y P, Jin Y B, Zhang J, et al, 2023. Numerical simulation of a local radiation fog process and its water vapor source [J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 62(5):171-180(in Chinese).
- 窦刚,陈春艳,2023.天山北坡一次大雾天气的数值模拟分析[J].沙漠与绿洲气象,17(3):26-34. Dou G, Chen C Y, 2023. Numerical simulation of a heavy fog weather on the north slope of the Tianshan Mountains[J]. Desert Oasis Meteor, 17(3):26-34(in Chinese).
- 高睿,2023.2021年11月白城机场一次冻雾过程诊断分析[J].自然科学,11(1):104-114. Gao R, 2023. Diagnostic analysis of a freezing fog process at Baicheng Airport in November 2021[J]. Nat Sci, 11(1):104-114(in Chinese).
- 苟杨,廖波,彭科曼,等,2024.黔南两次大范围爆发性增强的辐射雾对比分析[J/OL].(2024-11-11).沙漠与绿洲气象:1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1265.P.20241111.0944.002>.

- html. Gou Y, Liao B, Peng K M, et al, 2024. Comparative analysis of two large-scale explosive enhancement radiation fogs in Southern Guizhou[J/OL]. (2024-11-11). Desert Oasis Meteor: 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1265.P.20241111.0944.002.html>(in Chinese).
- 贺哲, 竹磊磊, 席乐, 等, 2023. 基于高分辨率资料的南阳市冬半年大雾特征分析[J]. 气象与环境科学, 46(6): 1-9. He Z, Zhu L L, Xi L, et al, 2023. Characteristics analysis of heavy fog events in Nanyang in winter half year based on high-resolution data[J]. Meteor Environ Sci, 46(6): 1-9(in Chinese).
- 黄建平, 朱诗武, 朱彬, 1998. 辐射雾的大气边界层特征[J]. 南京气象学院学报, 21(2): 258-265. Huang J P, Zhu S W, Zhu B, 1998. Characteristics of the atmospheric boundary layer during radiation fog[J]. J Nanjing Inst Meteor, 21(2): 258-265(in Chinese).
- 柳龙生, 刘莲, 黄彬, 2024. 一次入海温带气旋背景下的海雾观测分析和数值模拟[J]. 大气科学, 48(4): 1627-1639. Liu L S, Liu L, Huang B, 2024. Observation and numerical simulation on a sea fog event during an extratropical cyclone entering the sea[J]. Chin J Atmos Sci, 48(4): 1627-1639(in Chinese).
- 刘志杰, 王伟, 廖志宏, 等, 2024. FY-4A 温度廓线和融合海温数据协同同化的海雾模拟效果分析[J]. 气象, 50(5): 547-560. Liu Z J, Wang W, Liao Z H, et al, 2024. Coordinate influence of FY-4A temperature profiles and fusion SST data on the sea fog simulation[J]. Meteor Mon, 50(5): 547-560(in Chinese).
- 钱玮, 宗晨, 袁成松, 等, 2020. 江苏地区夏季一次辐射雾的数值模拟及生消机理分析[J]. 气象科学, 40(2): 220-231. Qian W, Zong C, Yuan C S, et al, 2020. Numerical simulation and mechanism analysis of a summer radiation fog in Jiangsu Province[J]. J Meteor Sci, 40(2): 220-231(in Chinese).
- 钱维宏, 2012. 天气尺度瞬变扰动的物理分解原理[J]. 地球物理学报, 55(5): 1439-1448. Qian W H, 2012. Physical decomposition principle of regional-scale atmospheric transient anomaly[J]. Chin J Geophys, 55(5): 1439-1448(in Chinese).
- 钱维宏, 2013. 基于大气变量物理分解的低温雨雪冰冻天气的中期预报系统和方法: 中国, 102221714B[P]. Qian W H, 2013. Medium-range forecast system and method for low temperature, rain and snow and freezing weather based on atmospheric variable physical decomposition: CN, 102221714B[P](in Chinese).
- 钱维宏, 孔海江, 赵培娟, 等, 2022. 河南“21·7”特大暴雨常规与扰动天气形势分析[J]. 地球物理学报, 65(11): 4208-4224. Qian W H, Kong H J, Zhao P J, et al, 2022. Anomaly-based versus full-field-based weather analysis on the extraordinary storm in Henan Province in July 2021[J]. Chin J Geophys, 65(11): 4208-4224(in Chinese).
- 乔毓, 彭新东, 2024. 利用尺度自适应大气边界层湍流参数化方案对一次陆地浓雾的数值模拟[J]. 气象, 50(4): 449-460. Qiao J, Peng X D, 2024. Numerical simulation of a dense land fog by a scale-aware atmospheric boundary layer turbulent parameterization scheme[J]. Meteor Mon, 50(4): 449-460(in Chinese).
- 邵禹晨, 张雪蓉, 王博妮, 等, 2019. 一次中国东部大范围强浓雾的传播与扩展机制分析[J]. 气象, 45(4): 496-510. Shao Y C, Zhang X R, Wang B N, et al, 2019. Mechanism analysis of propagation and extension of an extensive dense fog event over eastern China[J]. Meteor Mon, 45(4): 496-510(in Chinese).
- 石春娥, 李耀孙, 张浩, 等, 2021. 安徽省不同等级雾和重度霾时空分布特征及地面气象条件比较[J]. 气象学报, 79(5): 828-840. Shi C E, Li Y S, Zhang H, et al, 2021. Comparisons of spatiotemporal distribution characteristics and surface meteorological conditions for fog and heavy haze events of different levels in Anhui Province[J]. Acta Meteor Sin, 79(5): 828-840(in Chinese).
- 王慧, 林建, 马占山, 等, 2022. 2018年2月琼州海峡持续性海雾过程的数值模拟分析[J]. 大气科学, 46(5): 1267-1280. Wang H, Lin J, Ma Z S, et al, 2022. Numerical simulation and analysis of the persistent sea fog in the Qiongzhou Strait in February 2018[J]. Chin J Atmos Sci, 46(5): 1267-1280(in Chinese).
- 王宏斌, 张志薇, 刘端阳, 等, 2021. 江苏不同等级雾的宏观和微观特征[J]. 高原气象, 40(5): 1177-1188. Wang H B, Zhang Z W, Liu D Y, et al, 2021. Characteristics of the macro-and micro-structures of the different grades fog in Jiangsu Province[J]. Plateau Meteor, 40(5): 1177-1188(in Chinese).
- 王楠楠, 2023. 乌鲁木齐国际机场一次高影响持续浓雾天气成因分析[J]. 民航学报, 7(5): 90-94, 119. Wang N N, 2023. Cause analysis of a high impact persistent heavy fog at Urumqi International Airport[J]. J Civil Aviat, 7(5): 90-94, 119(in Chinese).
- 王庆, 樊明月, 李季, 等, 2021. 济南冬季雾的微物理结构及其对能见度的影响[J]. 大气科学, 45(2): 333-354. Wang Q, Fan M Y, Li J, et al, 2021. The microphysical characteristics of winter fog in Jinan and its effect on visibility[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2): 333-354(in Chinese).
- 夏利, 夏菲, 蹇冬梅, 等, 2024. 达州一次持续性雾霾过程特征及成因分析[J]. 高原山地气象研究, 44(S1): 83-88. Xia L, Xia F, Jian D M, et al, 2024. Characteristics and cause analysis of a persistent haze process in Dazhou[J]. Plateau Mount Meteor Res, 44(S1): 83-88(in Chinese).
- 许敏, 李江波, 田晓飞, 等, 2022. 京津冀夏季雾的特征与预报[J]. 气象, 48(7): 899-912. Xu M, Li J B, Tian X F, et al, 2022. Characteristics and forecasting of summer fog in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Meteor Mon, 48(7): 899-912(in Chinese).
- 徐晓斌, 2016. 我国霾和光化学污染观测研究进展[J]. 应用气象学报, 27(5): 604-619. Xu X B, 2016. Observational study advances of haze and photochemical pollution in China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 604-619(in Chinese).
- 杨薇, 张春花, 冯箫, 等, 2022. 琼州海峡两次高压后部型海雾的对比分析和数值模拟[J]. 高原气象, 41(3): 762-774. Yang W, Zhang C H, Feng X, et al, 2022. Comparison and numeric simulation of two sea fog processes behind high pattern over Qiongzhou Strait[J]. Plateau Meteor, 41(3): 762-774(in Chinese).
- 张浩, 石春娥, 杨军, 等, 2021. 寿县不同强度雾的微物理特征及其与

- 能见度的关系[J]. 大气科学, 45(6):1217-1231. Zhang H, Shi C E, Yang J, et al, 2021. Microphysical characteristics of fog with different intensities and their relationship with visibility in Shouxian County[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6):1217-1231 (in Chinese).
- 张庆, 张楠, 陈子焯, 等, 2024. 多种机器学习方法在京津冀地区低能见度天气预报中的应用[J]. 气象科学, 44(2):362-374. Zhang Q, Zhang N, Chen Z X, et al, 2024. Application of multiple machine learning methods in low-visibility weather forecasting in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. J Meteor Sci, 44(2):362-374 (in Chinese).
- 周文君, 王宏斌, 高雅, 等, 2023. 基于旋翼无人机探测的一次强浓雾边界层结构分析[J]. 气象科学, 43(2):215-224. Zhou W J, Wang H B, Gao Y, et al, 2023. Analysis of the boundary layer structure of a heavy fog based on rotorcraft unmanned aerial vehicle observation[J]. J Meteor Sci, 43(2):215-224 (in Chinese).
- 朱世珍, 张昭艺, 吴诗晓, 等, 2023. 安徽寿县两次浓雾生消过程中两个高度微物理机理分析[J]. 气象, 49(3):327-339. Zhu S Z, Zhang Z Y, Wu S X, et al, 2023. Analysis of microphysical mechanisms at two heights during the two dense fog generation and disappearance processes in Shouxian, Anhui Province[J]. Meteor Mon, 49(3):327-339 (in Chinese).
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730):1999-2049.
- Qian W H, Du J, Ai Y, 2021. A review: anomaly-based versus full-field-based weather analysis and forecasting[J]. Bull Amer Meteor Soc, 102(4):E849-E870.
- Qian W H, Leung J C H, Chen Y L, et al, 2019. Applying anomaly-based weather analysis to the prediction of low visibility associated with the coastal fog at Ningbo-Zhoushan Port in East China [J]. Adv Atmos Sci, 36(10):1060-1077.

(本文责编:王婷波)