

“22·12”河南郑州大雾天气成因分析¹

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 安阳国家气候观测台, 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

摘要: 2022年12月28日郑州-新乡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,以及高湿度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,环流形势有利雾的生成。郑州-新乡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扰动信号分解之前的原场信号相比,可以更好的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: P44/45

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.022101

河南省自然科学基金(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(232103810093)、河南省科技攻关项目(242102320016)和安阳国家气候观测台开放基金项目(AYNCOF202411)共同资助

2024-06-04 收稿

2025-02-21 收修订稿

作者简介: 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.

Cause Analysis of "22•12" Fog Weather in Zhengzhou, Henan Province

Hu Mengran^{1,2,3}, Kong Haijiang^{3,4,5*}, Han Zhengzheng⁶, Tian Li⁴, Qi Yiling⁴, Yuan Baojun⁷

1. Anyang National Meteorological Observatory, Anyang, 455000.

2. Anyang Meteorological Bureau, Anyang, 455000.

3. Key Laboratory of Agrometeorological Support and Application Technology of China Meteorological Bureau, Zhengzhou, 450003.

4. Henan Meteorological Bureau, Zhengzhou, 450003

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

6. Puyang Meteorological Bureau, Puyang, 457000

7. Henan Meteorological Detection Data Center, Zhengzhou, 450003.

Abstract: On December 28, 2022, multiple vehicle collisions occurred at the Zhengzhou-Xinxiang Yellow River Bridge due to heavy fog. Using ERA5 reanalysis and ground observation data, the "Anomaly-based synoptic analysis" was used to diagnose and analyze the heavy fog episode. It was found that: the heavy fog weather has the characteristics of strong local suddenness, low visibility, and significant nighttime cooling; The low visibility caused by heavy fog, as well as the ice and slippery bridge deck caused by high humidity and low temperature, are the meteorological reasons for rear end vehicle accidents. The weather situation is stable, with weak cold air at the bottom and warm ridges in the southwest transporting warm and humid airflow in the foggy area, and the circulation pattern is favorable for the generation of fog. The water vapor flux near the Bridge is high, with weak water vapor convergence and a shallow inversion layer And strong radiation cooling effect, which provides 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 decomposes the entire field signals. The comprehensive analysis of multiple disturbance factors can determine the dissipation time of fog.

Keywords: Radiation fog; Weather analysis; Anomaly; Predictable signal.

51 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
52 康等方面造成严重危害和影响(乔岷和彭新东, 2024; 徐晓斌, 2016; 张浩等, 2021)。受太行山、燕山山
53 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
54 12 月 28 日于郑州-新乡黄河大桥(郑-新大桥)上发生的一次低温和大雾造成的路面结冰和
55 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,
56 交通中断或滞留时间达 6 h 以上。雾的形成机制复杂,对雾的预报预警难度大(石春娥等, 2021;
57 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。

58 较多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)。
59 早期由于对雾中各物理过程缺乏更深刻的认识,模拟结果并不理想(黄建平等, 1998; 杨薇等, 2022)。
60 最近,刘志杰等(2024)利用 CODAS 实况融合海温和 FY-4 温度廓线资料协同同化的方法,
61 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,
62 能够较好的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(钱
63 玮等, 2020; 王慧等, 2022; 崔寅平等, 2023)效果不如对海雾的模拟。基于实测资料对雾分析的研究(王
64 楠楠, 2023)也相对较多,但利用扰动法(钱维宏, 2012; 2013)去分析大雾天气过程的研究并不多
65 见。Qian et al (2019)分析了 2016 年 1 月浙江省宁波-舟山港的一次区域性海雾事件,发现对
66 流层低层异常逆温及湿度正异常有利沿海雾和雨形成,异常的温度-压力模式和湿度-风模式
67 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
68 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,
69 增加了预报的可预测性。

70 本文拟对 2022 年 12 月 28 日郑-新大桥大雾和低温天气进行诊断分析,并将常规天气形
71 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,
72 诊断大雾生成和持续的物理机制,力求能深入认识此次大雾的主要成因,减少雾害造成的损
73 失,提高短临预报准确率,确保公路交通的安全。

74 1 资料和方法

75 1.1 资料

76 本研究使用的数据集,分别是:

77 (1) 大气再分析数据:欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 1 h 一次的 ERA5 数
78 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
79 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。

80 (2) 辐射数据:ECMWF 提供的水平网格距为 0.25° 的网格小时平均地表净长波辐射通
81 量、平均地表直接短波辐射通量。

82 (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、省级常规气象观测
83 站(新乡市韩董庄站)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、
84 2 m 风速、能见度等,数据已经过质量控制;以及郑州国家基本气象站 08 时、20 时探空站
85 资料。

86 全文如无特别说明，均为北京时。

87 1.2 方法

88 对于此次大雾事件，我们使用了逐小时资料和扰动分析方法 (Qian et al, 2021; 钱维宏等, 2022)。
89 在逐小时变量气候定义下将其简单物理分解成两部分：气候和异常，用于天气分析和预报。
90 其中逐小时的“气候”是通过 30 年 (1991—2020 年) 的 ERA5 再分析数据 (Hersbach et al, 2020)
91 进行平均估算得到的；逐小时的“异常”，即瞬时扰动分量是利用小时实况大气变量减去瞬
92 变气候变量得到的：

$$93 \quad V_{anomaly}(\lambda, \psi, p, t) = V_{total}(\lambda, \psi, p, t) - V_{climatology}(\lambda, \psi, p, t) \quad (1)$$

94 式中： λ , ψ , p , t 分别表示经度、纬度、气压、时间， $V_{total}(\lambda, \psi, p, t)$ 为每小时变量，
95 $V_{climatology}(\lambda, \psi, p, t)$ 为气候学变量， $V_{anomaly}(\lambda, \psi, p, t)$ 为分解提取出的异常。

96 在异常图上评估一个场相对于正常情况 (气候) 的异常程度是定量的，但异常场仅与气
97 候相关，不能显示全貌 (Qian et al, 2021)。本文将扰动图与全场图一起使用，参考全场天气系
98 统，根据异常场推断物理发展。

99 2 大雾天气概况

100 2.1 实况描述与统计

101 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
102 时间段内研究区周围三个市 (郑州、新乡、焦作) 的国家气象站最小能见度值 (图 1a) 发
103 现，27 日夜间大雾从郑州东部、新乡东北部向西扩散，在 28 日凌晨至上午雾区已影响至郑
104 -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 40 m、
105 200 m、160 m、1200 m、800 m，即研究区东部能见度局地降至 40 m，为特强浓雾。另外，
106 各站点低能见度持续时间有差异 (图 1b)，其中原阳站持续时间最长，为 11 h，武陟站 28
107 日 7 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-新大桥 (该
108 位置无观测站点) 也在 28 日 7 时左右出现大雾，从而引发多车连环相撞的大事故。

109 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其他国家
110 站、区域站最近的韩董庄省级常规气象观测站数据 (距大桥直线 6.74 km)，而能见度数据
111 选用获嘉、原阳、中牟、武陟四个国家基本气象站数据情况代表郑-新大桥附近的情况。
112

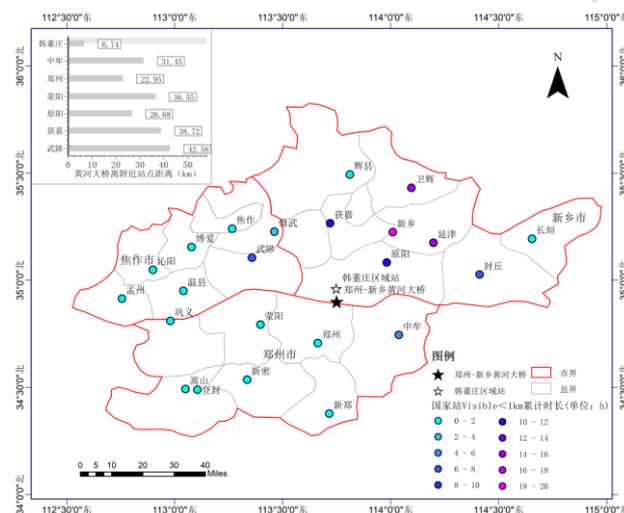
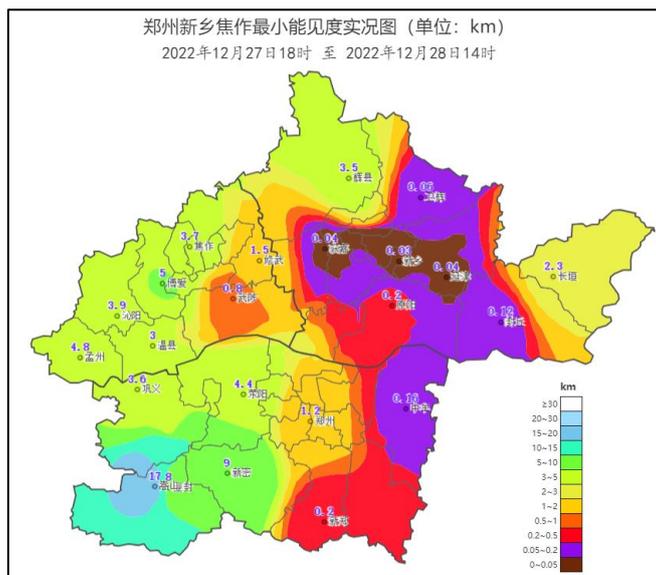


图 1 2022 年 12 月 27 日 18 时至 28 日 14 时 (a) 郑州、新乡、焦作最小能见度实况 , (b) 各国家站能见度低于 1 km 持续时长及研究区距附近站点距离

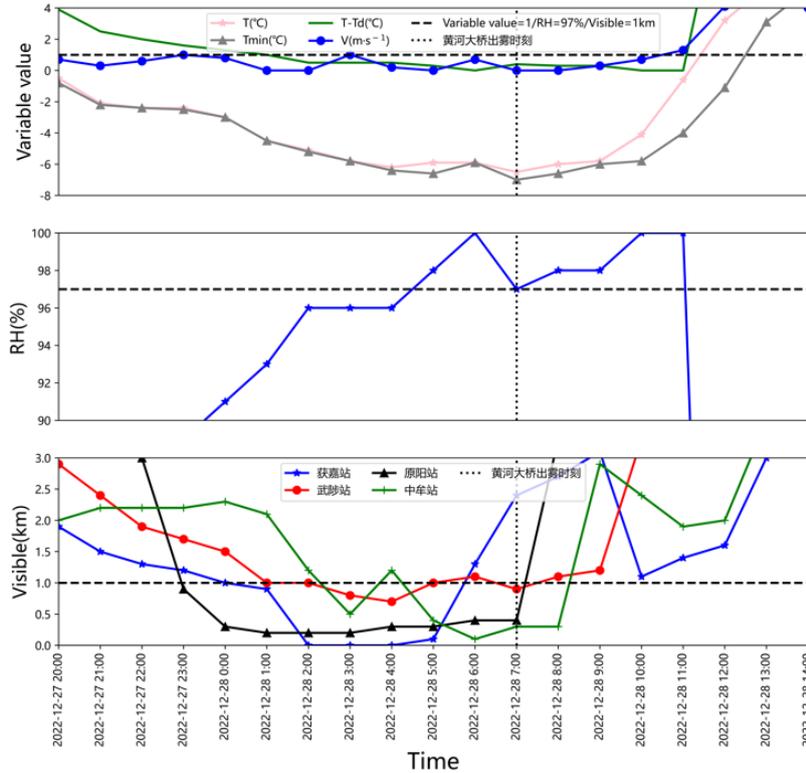
Fig.1 Temporal and Spatial Characteristics of the low visibility of Zhengzhou, Xinxiang and Jiaozuo National Basic Meteorological Stations from 18: 00 on December 27th to 14: 00 on December 28th, 2022.

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; 赛刚和陈春艳, 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 (T)、最低温度 (Tmin)、温度露点差 (T-Td)、风速 (V)、相对湿度 (RH)) 变化曲线 (图 2) 中可以看出, 温度露点差与能见度的变化趋势有着很好的一致性, 在 28 日凌晨 5—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 -5.8~-7℃ 之间, 在 28 日 06 时气温略升, 且风速很小, 这可能是由于风速很小时, 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℃ 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

131 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
 132 影响。



133

注：能见度来源为国家基本气象站数据、气象要素来源为韩董庄省级常规气象观测站数据。

134

图 2 郑-新大桥附近观测站点的小时能见度及气象要素变化曲线

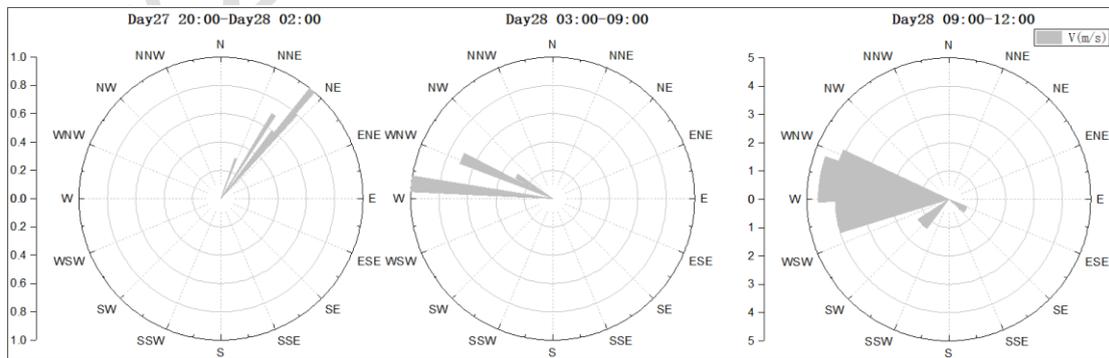
135

Fig.2 Hourly visibility and variation curve of meteorological elements of observation stations near Zhengzhou-Xinxiang Bridge

136

137

138 图 3 为韩董庄站风速、风向影响能见度的等值线图，可以看出，在 28 日 05—08 时研究
 139 区出雾时刻的风速 $\leq 0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，表现为小风、弱风，其能使辐射冷却作用和水汽传送到一定
 140 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
 141 地面风速以弱西风为主，风速增大对雾散。



142

图 3 2022 年 12 月 27 日 20 时至 28 日 14 时韩董庄省级常规气象观测站风速风向的等值线

143

Fig.3 Isograms of wind speed and direction at Handongzhuang Provincial Conventional Meteorological

144

Observatory from 20: 00 on December 27th to 14: 00 on December 28th, 2022.

145

146 3 常规天气形势分析

147 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
148 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
149 有雨夹雪或小雪，27日夜间切变系统移出，河南高空转受西北气流控制，天气转晴，地表
150 雪融化的水分很快蒸发进入到近地层大气中，这为28日大雾的形成提供了有利的水汽条件。

151 3.1 环流背景

152 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日夜至
153 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
154 古地区）有一横槽高空温度脊落后于高度脊，加速槽脊东移发展，更冷气团中产生的水汽凝
155 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；
156 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
157 和风速变化特征显示（图略），随时间变化气温降低，大桥附近风速小，27日18—23时，
158 在大桥西部冷舌伸入，北方干冷空气与南方暖倒槽后部暖湿空气在大桥附近交汇，带来了
159 有利的成雾条件；27日23时至28日07时，研究区附近为静风或小风，是此次大雾持续时间
160 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
161 形势场上，研究区基本处于均压场内，为弱的气旋性辐合区，随后研究区西南部的暖高压东
162 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。

163 3.2 物理量诊断

164 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（动力条件、水汽条件和热
165 力条件）支撑（苟杨等，2024；贺哲等，2023）。

166 3.2.1 动力条件

167 图4为1000 hPa涡度场，可以看出，大桥在27日23时至28日02时处于正涡度区，
168 在 $0\sim 8\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 之间，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
169 大量凝结核核化增长，07时实况开始出雾，研究区附近为负涡度区，对应的地面气流为弱
170 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。

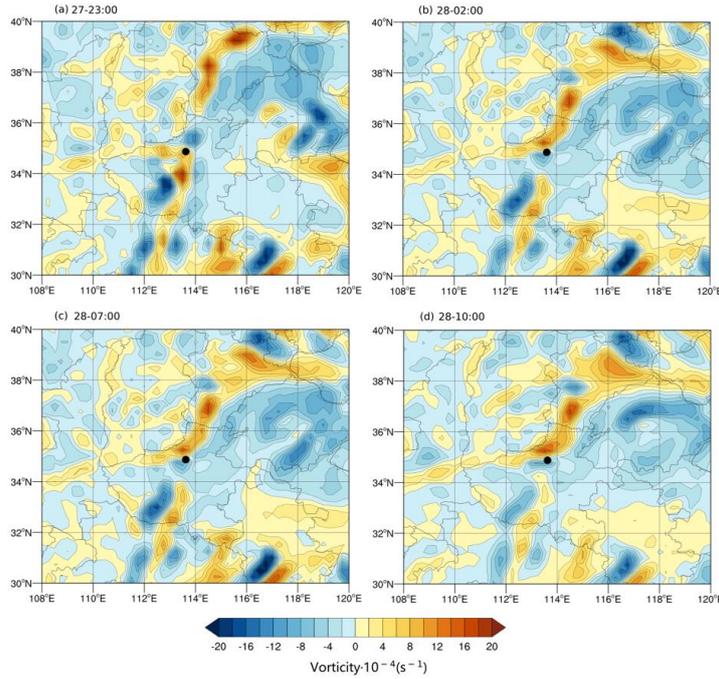


图 4 2022 年 12 月 27 日 23 时至 28 日 10 时郑-新大桥附近 1000 hPa 典型时刻涡度图

Fig.4 Vorticity maps of 1000hPa near the Zhengzhou-Xinxiang Bridge at typical times from 23: 00 on December 27th to 10: 00 on December 28th, 2022.

3.2.2 水汽条件

2022 年 12 月 25—26 日降水过程的增湿作用是此次雾水汽的重要来源。整个大雾过程中, 1000 hPa 研究区附近相对湿度接近 60% (图 5a), 观测站相对湿度高达 97%及以上 (图 2)。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。

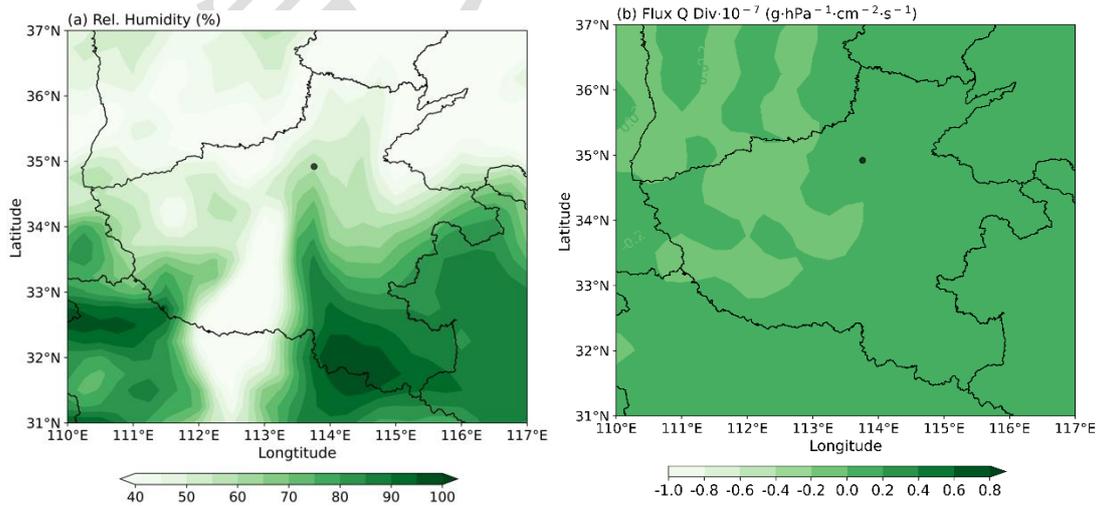


图 5a 相对湿度(单位:%)

图 5b 水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

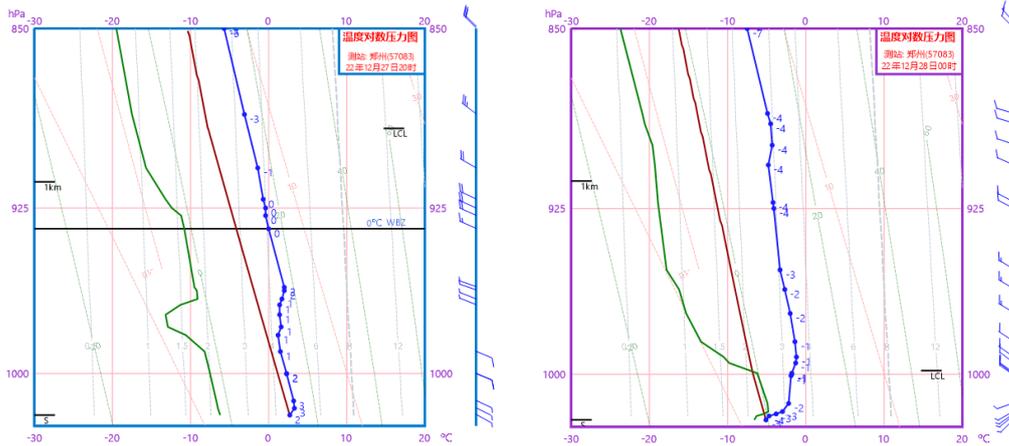
注: 实心圆代表郑-新大桥位置

图 5 2022 年 12 月 28 日 07 时郑-新大桥附近 1000 hPa 水汽条件图

Fig.5 1000hPa water vapor condition map near the Zhengzhou-Xinxiang Bridge at 07: 00 on December 28th, 2022

186 3.2.3 热力条件

187 近地层的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）。从温度对
188 数压力图 6 中得到，27 日 20 时（图 6a）至 28 日 08 时（图 6b），由于弱冷空气动量下传
189 和地面冷垫作用，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，
190 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
191 持在 $1\sim 2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间，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 2）。
192 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。总体来讲，逆温层的稳定
193 存在和近地面温度低、湿度高对此次大雾持续时间有重要影响。



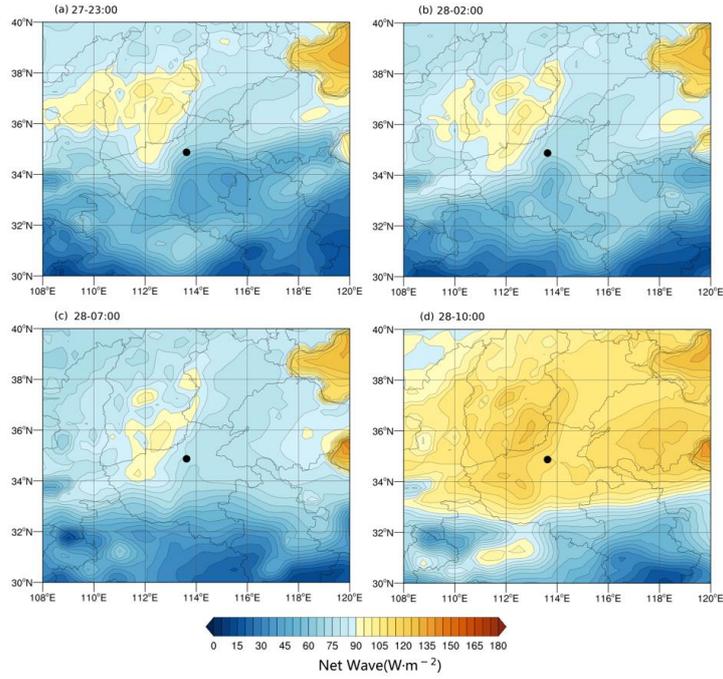
194 图 6a Day27-20: 00

195 图 6b Day 28-08: 00

196 图 6 2022 年 12 月 (a) 27 日 20 时、(b) 28 日 08 时郑州站温度对数压力图

197 Fig.6 T-LogP diagram of Zhengzhou Station at 20: 00 on December 27th and 08: 00 on December 28th, 2022.

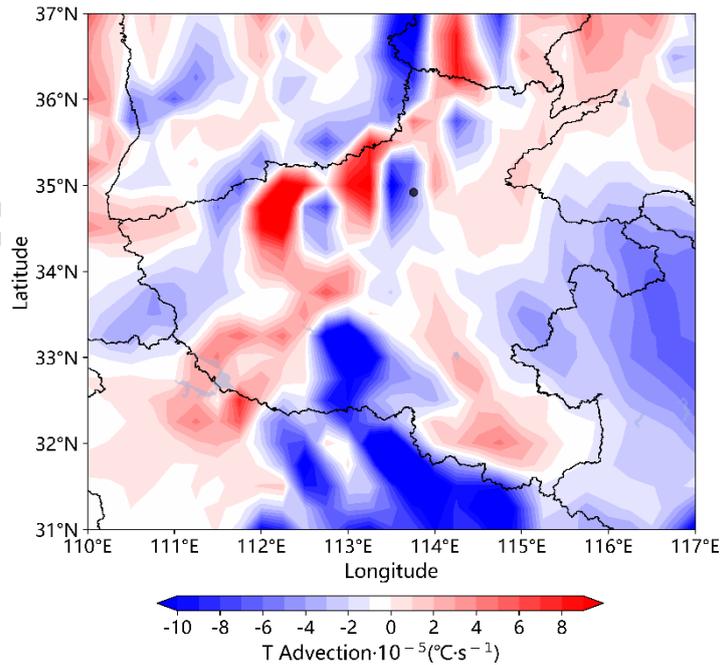
198 对比分析地面净辐射通量变化（图 7）发现，27 日 23 时至 28 日 07 时郑-新大桥处于地
199 面辐射支出低值区，且随着时间推移，支出值逐渐增加，即研究区出现辐射冷却效应且逐渐
200 加强，配合冷空气降温限制了湍流的发展，加之高湿及小风条件，为辐射雾的形成、发展提
201 供了极有利的条件。郑-新大桥附近有效辐射强度 $32\sim 85\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，强度较弱，可能是由于大
202 量雾滴形成释放潜热，减少了地表辐射冷却，产生了负反馈效应，这与图 2 中最低温度略回
203 升的现象一致。28 日 10 时太阳短波辐射增强，雾滴蒸发。



204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214

图 7 2022 年 12 月 27 日 23 时-28 日 20 时郑-新大桥附近地面典型时刻净辐射通量图
Fig.7 Map of ground net radiation flux near the Zhengzhou-Xinxiang Bridge at typical times from 23: 00 on December 27th to 10: 00 on December 28th, 2022.

温度平流是天气系统发展的重要热力学因子之一，利用 1000 hPa 温度平流图（图 8）特征分析可见，研究区附近有弱冷平流，量值约为 $5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ，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。



215

216
217
218

图 8 2022 年 12 月 28 日 07 时郑-新大桥附近 1000 hPa 温度平流图
Fig.8 Temperature advection map of 1000hPa near the Zhengzhou-Xinxiang Bridge at 07: 00 on December 28th,
2022.

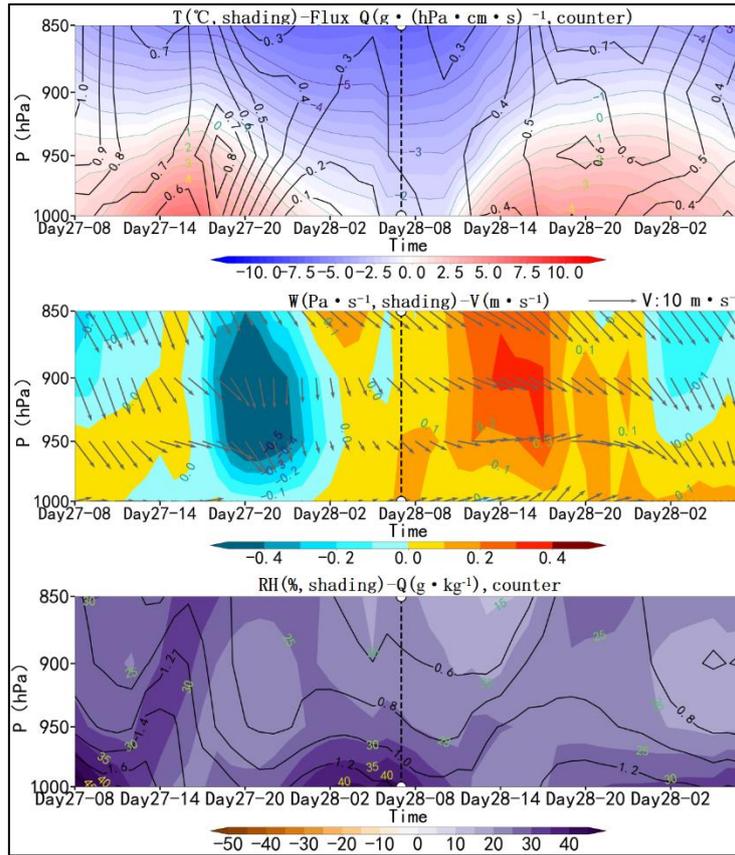
219 4 扰动天气形势分析

220 研究对比分析了温度、水汽通量、垂直速度、风速、相对湿度和比湿的原场、扰动场（图
221 9）。图 9a 中温度原场图显示，28 日 02 时至出雾前，1000~950hPa 为等温层结，随着高空
222 冷空气下沉，05 时起等温层结厚度减小，雾滴碰并发展，水汽通量值维持在 0.35
223 $\text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$ ，这可能是风速带来的水汽。图 9b 温度扰动图上气温显示负异常，较常
224 年偏低 1.84°C ，水汽通量值较正常值（气候）呈负异常，约为 $2.5 \text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$ ，这也
225 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
226 诊断。

227 垂直速度的对比图可以看到，28 日 02 时后，925 hPa 以下全场图中的垂直速度为
228 $0\sim 0.1 \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ，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
229 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
230 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
231 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
232 时间。

233 Qian et al (2021) 指出雾作为近地面的水汽凝结现象，原始湿度场必然为一相对湿度高值
234 区。从图 9a 相对湿度原场中可以看出，在大雾形成之前，郑-新大桥附近地区近地面比湿都
235 在 $1 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。扰动图中，28 日 05 时之前，1000hPa 上相对湿度异常值反而减弱，呈现
236 为负异常信号，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
237 时左右，雾区明显表现为一高湿正异常区，相对湿度较常年增大约 5%~10%，比湿较常年偏
238 低 $0.25\sim 0.5 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，较气温、垂直速度等要素的异常特征，湿度异常天气图上扰动信号更清
239 晰和放大，极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
240 度、比湿正异常信号逐渐减小，雾体消散。

241



242

243

244

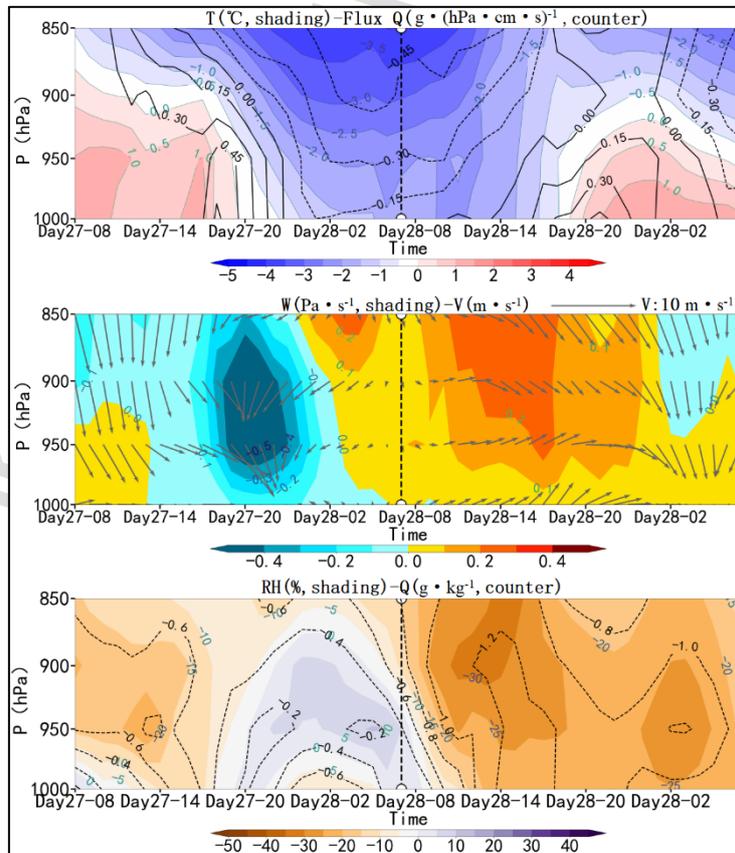
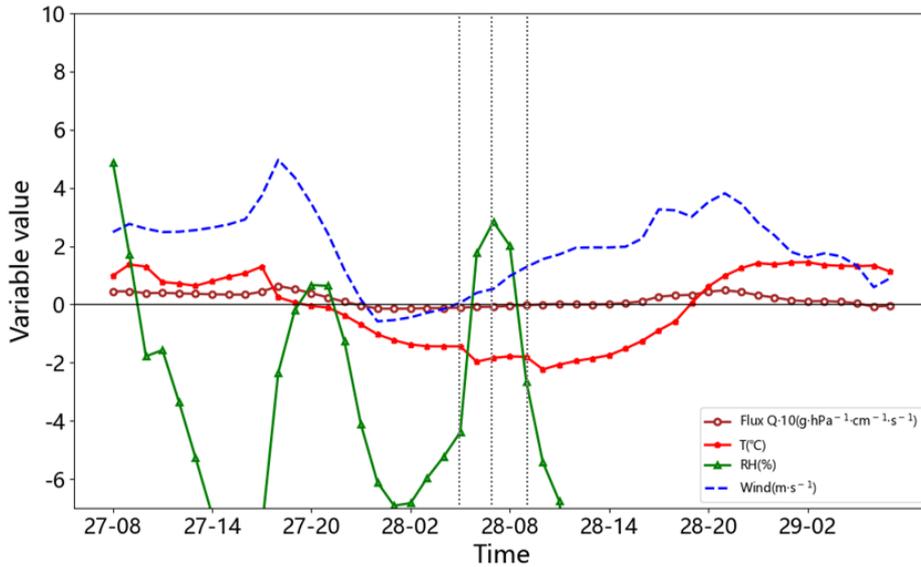


图9 2022年12月27-28日郑-新大桥附近气象要素 (a) 全场和 (b) 扰动场时间-高度剖面图

Fig.9 Time-heightprofile map of original fieldand disturbance field of meteorological elements near the

245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258

辐射雾主要发生在近地层，为了更清晰的展示近地层扰动特征，本文也分析了 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负异常值仅为 $0.08\text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$ ，扰动特征优势不甚明显；温度的负异常特征在 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异常信号增强的趋势。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，正负异常转变时间，对应大雾即将出现，可作为预报员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，出现负异常峰值；出雾时刻相对湿度正扰动信号达到高峰值为 5.67%，风速正异常值为 $0.53\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，随后风速异常信号继续增大，而相对湿度异常信号骤减，同时 950~1000hPa 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，温度负异常、相对湿度和风速的正负异常转变较基于全场持续增强的特征更好的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。



259
260
261
262
263

注：灰色垂直虚线从左到右分别表示大雾的准备、出现、结束时间。

图 10 2022 年 12 月 27-28 日郑-新大桥附近 1000hPa 气象因子扰动场变化曲线

Fig.10 Variation curves of disturbance field of meteorological factors at 1000hPa near the Zhengzhou-Xinxiang Bridge on December 27-28, 2022

264 5 结论与讨论

265 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
266 因分析，得出以下结论：

267 (1) 此次大雾为典型的辐射雾，郑-新大桥附近雾发生在 28 日 7 时左右，具有局地突
268 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： $0^{\circ}\text{C} \leq$ 温度露
269 点差 $< 0.4^{\circ}\text{C}$ 、 $-7^{\circ}\text{C} \leq$ 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
270 风影响）。大雾引发的低能见度，以及高湿度和低温形成桥面结冰湿滑是造成追尾事故的
271 气象原因。

272 (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，

273 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
274 层冷舌持续向雾区输送弱冷空气，西南暖脊东北向移，为雾区输送暖湿气流，同时配合地面
275 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。

276 (3) 对辐射雾物理量诊断分析得出：出雾时郑-新大桥附近为负涡度值，整个过程涡度
277 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
278 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 $32\sim 85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，
279 为大雾的发生和持续提供了有力的动力、水汽和热力条件。

280 (4) 通过对比分析影响此次辐射雾的气象因子的原场和扰动场特征得出：出雾时刻郑-
281 新大桥附近上空气温负异常，较常年偏低 1.84°C ，水汽通量负异常值 $0.08\text{g} \cdot (\text{hPa} \cdot \text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$ ，
282 比湿异常信号值为 $0.25\sim 0.5\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，垂直速度较常年偏高 $0\sim 0.5\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ；相对湿度正异常信
283 号峰值、风速正异常值分别为 5.67% 、 $0.53\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，两者正负异常转变时间可指示大雾即
284 将出现，而气温负异常信号的增强也可预示大雾的起止时间。基于全场的信号，参考异常图
285 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
286 为 09 时左右。

287 (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
288 相对湿度、比湿正异常信号均逐渐减小，辐射雾雾体得以快速消散。

289 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
290 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
291 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，相应的同样需要
292 更多个例的验证。

293 致谢：感谢匿名审稿人的修改建议。

294

295 **参考文献:**
296 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),
297 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].
298 Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 62(5): 171-180 (in Chinese).
299 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.
300 Numerical simulation of a heavy fog weather on the north slope of the Tianshan Mountains[J]. Desert Oasis Meteor, 17(3): 26-34 (in
301 Chinese).
302 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
303 freezing fog process at Baicheng Airport in November 2021[J]. Nat Sci, 11(1): 104-114 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献
304 英文刊名, 请确认)
305 苟杨, 廖波, 彭科曼, 等, (2024-11-11). 黔南两次大范围爆发性增强的辐射雾对比分析[J/OL]. 沙漠与绿洲气象, 1-14.
306 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1265.P.20241111.0944.002.html>. Gou Y, Liao B, Peng K M, et al, (2024-11-11). Comparative analysis
307 of two large-scale explosive enhancement radiation fogs in Southern Guizhou[J/OL]. Desert Oasis Meteor, 1-14.
308 <http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1265.P.20241111.0944.002.html> (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献引用日期, 请确认)
309 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
310 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
311 Environ Sci, 46(6): 1-9 (in Chinese).
312 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,
313 1998. Characteristics of the atmospheric boundary layer during radiation fog[J]. J Nanjing Inst Meteor, 21(2): 258-265 (in Chinese).
314 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,
315 Liu L, Huang B, 2024. Observation and numerical simulation on a sea fog event during an extratropical cyclone entering the sea[J]. Chin
316 J Atmos Sci, 48(4): 1627-1639 (in Chinese).
317 刘志杰, 王炜, 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.
318 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
319 simulation[J]. Meteor Mon, 50(5): 547-560 (in Chinese).
320 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,
321 Zong C, Yuan C S, et al, 2020. Numerical simulation and mechanism analysis of a summer radiation fog in Jiangsu Province[J]. J Meteor
322 Sci, 40(2): 220-231 (in Chinese).
323 钱维宏, 2012. 天气尺度瞬变扰动的物理解析原理[J]. 地球物理学报, 55(5): 1439-1448. Qian W H, 2012. Physical
324 decomposition principle of regional-scale atmospheric transient anomaly[J]. Chin J Geophys, 55(5): 1439-1448 (in Chinese).
325 钱维宏, 2013-10-23. 基于大气变量物理解析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,
326 2013-10-23. Medium-range forecast system and method for low temperature, rain and snow and freezing weather based on atmospheric
327 variable physical decomposition: CN, 102221714B[P] (in Chinese).
328 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.
329 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
330 province in July 2021[J]. Chin J Geophys, 65(11): 4208-4224 (in Chinese).
331 乔蝠, 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
332 J, Peng X D, 2024. Numerical simulation of a dense land fog by a scale-aware atmospheric boundary layer turbulent parameterization
333 scheme[J]. Meteor Mon, 50(4): 449-460 (in Chinese).
334 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,
335 Zhang X R, Wang B N, et al, 2019. Mechanism analysis of propagation and extension of an extensive dense fog event over Eastern

336 China[J]. Meteor Mon, 45(4): 496-510 (in Chinese).

337 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):

338 828-840. Shi C E, Li Y S, Zhang H, et al, 2021. Comparisons of spatiotemporal distribution characteristics and surface meteorological

339 conditions for fog and heavy haze events of different levels in Anhui province[J]. Acta Meteor Sin, 79(5): 828-840 (in Chinese).

340 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

341 W, Liu D Y, et al, 2021. Characteristics of the macro-and micro-structures of the different grades fog in Jiangsu Province[J]. Plateau

342 Meteor, 40(5): 1177-1188 (in Chinese).

343 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,

344 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

345 Atmos Sci, 46(5): 1267-1280 (in Chinese).

346 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

347 analysis of a high impact persistent heavy fog at Urumqi International airport[J]. J Civil Aviat, 7(5): 90-94, 119 (in Chinese).

348 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

349 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):

350 333-354 (in Chinese).

351 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,

352 Jian D M, et al, 2024. Characteristics and cause analysis of a persistent haze process in Dazhou[J]. Plateau Mount Meteor Res, 44(S1):

353 83-88 (in Chinese).

354 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.

355 Characteristics and forecasting of summer fog in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Meteor Mon, 48(7): 899-912 (in Chinese).

356 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

357 advances of haze and photochemical pollution in China[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5): 604-619 (in Chinese).

358 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,

359 Zhang C H, Feng X, et al, 2022. Comparison and numeric simulation of two sea fog processes behind high pattern over Qiongzhou

360 Strait[J]. Plateau Meteor, 41(3): 762-774 (in Chinese).

361 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,

362 Shi C E, Yang J, et al, 2021. Microphysical characteristics of fog with different intensities and their relationship with visibility in

363 Shouxian County[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6): 1217-1231 (in Chinese).

364 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.

365 Zhang Q, Zhang N, Chen Z X, et al, 2024. Application of multiple machine learning methods in low-visibility weather forecasting in

366 Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. J Meteor Sci, 44(2): 362-374 (in Chinese).

367 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,

368 Wang H B, Gao Y, et al, 2023. Analysis of the boundary layer structure of a heavy fog based on rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle

369 observation[J]. J Meteor Sci, 43(2): 215-224 (in Chinese).

370 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

371 Z, Zhang Z Y, Wu S X, et al, 2023. Analysis of microphysical mechanisms at two heights during the two dense fog generation and

372 disappearance processes in Shouxian, Anhui Province[J]. Meteor Mon, 49(3): 327-339 (in Chinese).

373 Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 146(730): 1999-2049.

374 Qian W H, Leung J C H, Chen Y L, et al, 2019. Applying anomaly-based weather analysis to the prediction of low visibility

375 associated with the coastal Fog at Ningbo-Zhoushan Port in East China[J]. Adv Atmos Sci, 36(10): 1060-1077.

376 Qian W H, Du J, Ai Y, 2021. A review: anomaly-based versus full-field-based weather analysis and forecasting[J]. Bull Amer Meteor

377 Soc, 102(4): E849-E870.