

河南省春季一次大范围强浓雾的特征分析

肖瑶^{1,2} 史一丛^{1,3} 李宁^{1,2}

(1. 中国气象局(河南)农业气象保障与应用技术重点实验室, 河南 郑州 450003;

2. 河南省气象服务中心, 河南 郑州 450003;

3. 河南省气象台, 河南 郑州 450003)

摘要: 利用国家气象观测站资料对2021年3月11日夜间至12日白天河南省一次大范围强浓雾天气过程进行研究, 重点分析了这次强浓雾过程的时间特征、爆发性增强特征及其成因, 研究表明: 这次强浓雾过程具有爆发性增强特征, 统计40个典型强浓雾站点的爆发性增强作用时间在30 min以内, 平均仅为9.5 min。雾前降水造成的高湿环境和夜间晴空辐射降温为强浓雾过程提供了重要的触发和加强条件; 近地面大范围微风甚至是静风是这次强浓雾过程爆发的另一个有利条件, 近地面暖平流输送也是这次强浓雾过程爆发性发展和维持的重要原因。根据能见度变化划分了两种强浓雾爆发性增强的类型: “跳跃爆发型”和“直接爆发型”。两种类型中风起到不同作用: 前者风的作用会造成一定的湍流扩散, 影响能见度剧烈波动; 后者在风的作用下有利暖平流输送, 有利于强浓雾发展并持续。

关键词: 强浓雾, 特征, 爆发性增强类型, 成因

中图分类号: P456

文献标志码: A

Study of characteristics of a typical regional fog in Spring in Henan province

XIAO Yao^{1,2} SHI Yicong^{1,3}

(1. Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard Application Technique, CMA, Zhengzhou 450003, China;

2. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003, China;

3. Henan Meteorological Service Center, Zhengzhou 450003, China;)

Abstract: Based on the meteorological data from conventional observation stations, a typical large-scale regional heavy fog weather process in Henan Province in spring from the night of March 11 to the day of March 12, 2021 was analyzed. This study focused on the analysis of the time characteristics and explosive enhancement characteristics of the strong fog process, the results showed that the strong fog process had the characteristics of explosive enhancement. The explosive enhancement time of 40 typical heavy fog stations were less than 30 minutes, with an average of only 9.5 minutes. The high humidity environment caused by the precipitation before the fog and the radiation cooling at night provided important conditions for triggering and strengthening the strong fog process. Large-scale breeze or even calm wind near the surface was another favorable condition for explosive development of this fog process. The transport of warm advection near the surface was also an important reason for the explosive development and

收稿日期: 2022-xx-xx

基金项目: 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z034); 中国气象局(河南)农业气象保障与应用技术重点实验室科技计划项目(KM202011)、(KQ202318)共同资助。

作者简介: 肖瑶(1990-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事行业气象预报及应用研究, E-mail: xiaoyao_jms@163.com.

通讯作者: 史一丛(1986-), 男, 高工, 主要从事强对流和灾害性天气预报技术研究. E-mail: shiyicong_zz@163.com

maintenance of the heavy fog process. According to the change of visibility, two types of strong fog explosive enhancement were divided: "jump burst type" and "direct burst type". Wind played different roles in the causes of "jump burst" and "direct burst": In the former, the effect of wind caused turbulence diffusion and affected the dramatic fluctuation of visibility; The latter brought warm advection transport under the action of wind, which was conducive to the development and persistence of the fog.

Key words: heavy fog, characteristics, explosive enhancement type, factor

引言

雾是指悬浮在近地层大气中的大量微细水滴或冰晶的可见集合体,使水平能见距离降到1000m以内的一种常见的天气现象(李子华,2001)。其中水平能见度在500-1000m为大雾,200-500m为浓雾,50-200m为强浓雾,小于50m为特强浓雾。雾是一种灾害性天气,尤其是强浓雾时能见度骤降至百米甚至是几十米以下,极易引起追尾等事故,给交通运输和人民生命财产安全带来巨大威胁。因此,加强雾特别是强浓雾的研究分析、提升预报预警能力具有十分重要的现实意义。

近年来雾的发生发展机制及其特性受到越来越多学者(石林平和迟秀兰,1995;濮梅娟等,2008)的关注。雾通常是在稳定的天气背景下形成的,具有较强的地域性特征。大量研究(葛良玉等,1998;王继志等,2002;王玮等,2009;邓雪娇等,2002;许爱华等,2016)揭示了我国不同地区雾的气候特征和形成原因。何立富等(2006)针对华北平原持续性大雾研究表明地表净辐射引起的近地层冷却是大雾过程的触发和加强机制。焦圣明等(2016)对江苏地区一次持续性强浓雾过程的形成维持机制进行了研究,结果表明地面辐射冷却、低空下沉气流以及东南暖湿气流是形成这次强浓雾的重要原因。毛冬艳和杨贵名(2006)统计了华北平原产生雾前后的大气低层气象要素特征。喻谦花等(2012)分析了一次河南省大雾过程,结果表明边界层暖平流的输入有利于大雾的加强与维持。

随着近些年国内外对雾观测试验研究(Kunkel,1971;郭丽君等,2015)的增多,强浓雾的特性也受到越来越多的关注,其中其爆发性特征——即雾在极短时间内快速加强为强浓雾或特强浓雾的特征尤为重要。能见度在极短时间内的快速下降使得车辆很难快速做出反应和应对,极易造成重大交通事故,因此对于强浓雾爆发性等特征的研究尤为重要。美国波河河谷试验(Fuzzi et al,1992)发现雾层平流会导致雾在垂直方向上突然发展;李子华等(1999)在沪宁高速公路观测雾时,揭示了强浓雾发展的爆发性特征;2006-2007年对南京冬季几次地面雾爆发性增强过程的观测(刘端阳等,2009;陆春松等,2010),极大地丰富了雾爆发性增强的理论研究。

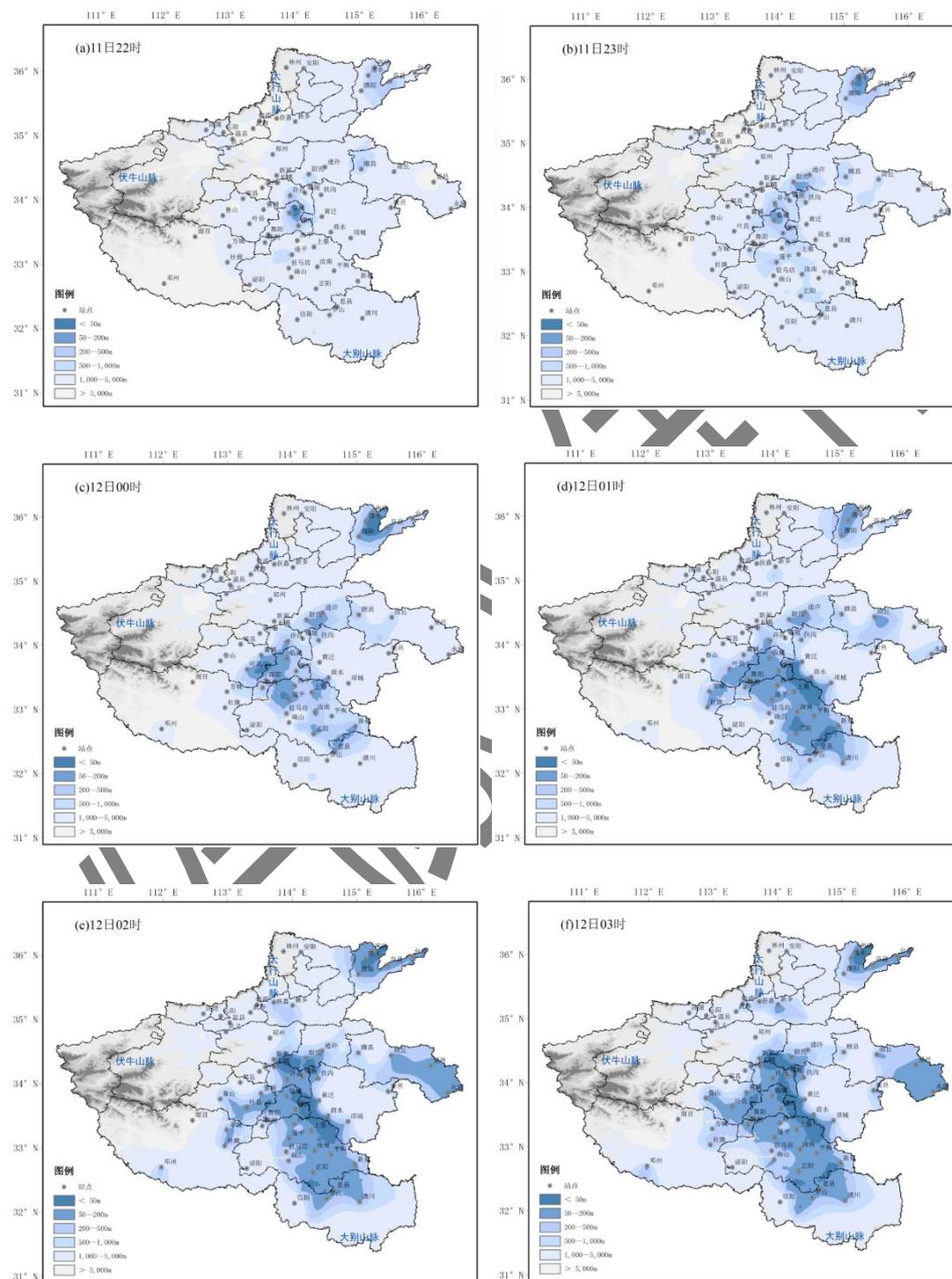
随着资料观测不断精细化,强浓雾的特征更易于被直观展示(严文莲等,2018;朱承瑛等,2018)。因此,强浓雾的发生发展有哪些特征,能见度是怎样变化的,强浓雾的爆发性增强是否具有区域性特征,等等问题有待于进一步的研究分析。2021年3月11日夜至12日白天河南省出现一次大范围强浓雾天气过程,河南省气象台在11日23时10分发布大雾黄色预警,12日00时30分升级为浓雾橙色预警,全省共发布90个大雾红、橙、黄色预警信号。受其影响除西部少数地区河南省绝大部分高速全线关闭,该过程是2019-2021年河南省影响范围最大的春季区域性强浓雾。本文对这次强浓雾过程展开分析研究,以揭示强浓雾过程的特征和发生发展机制,为强浓雾的研究预报服务提供依据。

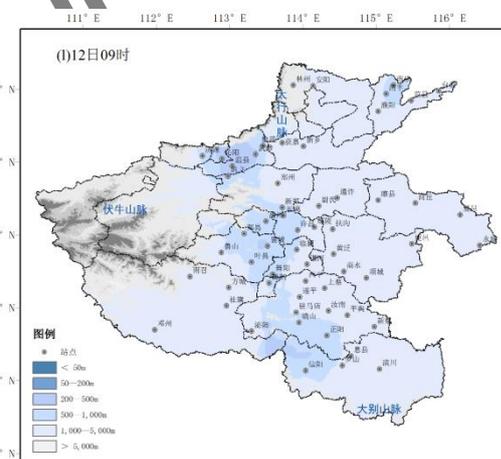
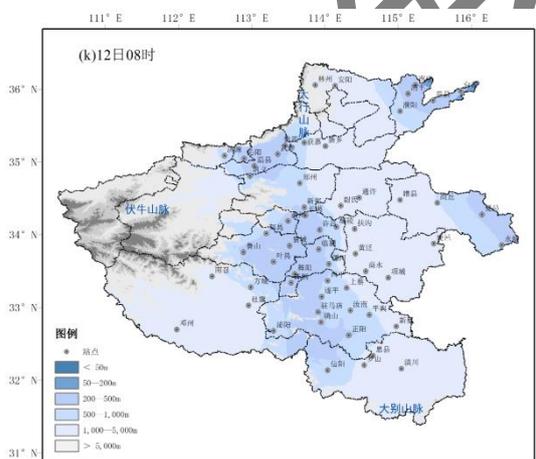
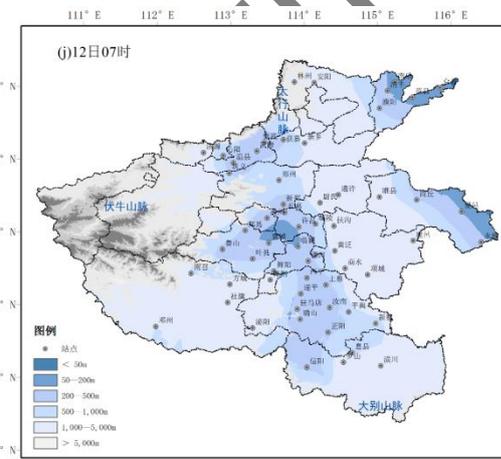
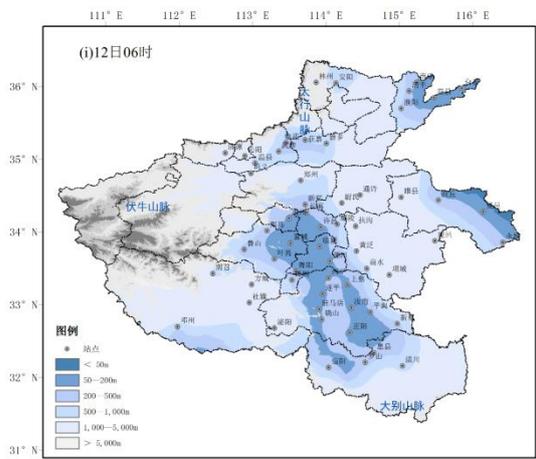
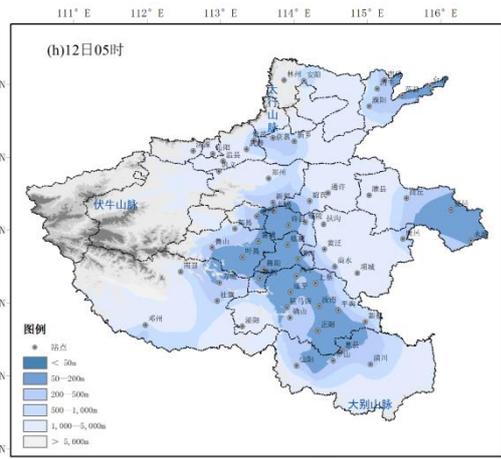
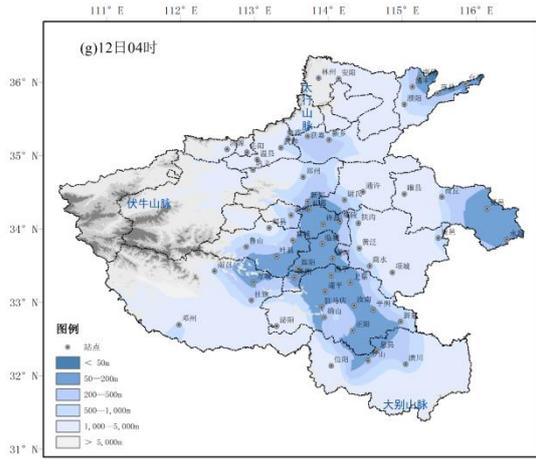
1 强浓雾过程

2021年3月11日夜至12日白天河南省出现大范围强浓雾天气,其中58个国家站能见度小于200米,最低能见度出现在清丰和濮阳站能见度低至40m。本文基于河南省121

个国家气象观测站数据,采用天气分析和统计方法,对这次大范围强浓雾过程进行研究分析。

图 1 给出了本次强浓雾过程的能见度小时变化。2021 年 3 月 11 日 20 时开始河南省京广线及其以东地区开始起雾,22 时许昌、漯河、商丘局地出现能见度低于 200 m 的强浓雾,并逐步发展增强,随后新乡、濮阳、郑州、开封、平顶山、周口、驻马店、南阳、信阳等相继出现能见度低于 200 米的强浓雾。12 日 11 时-12 时强浓雾逐渐开始减弱消散。





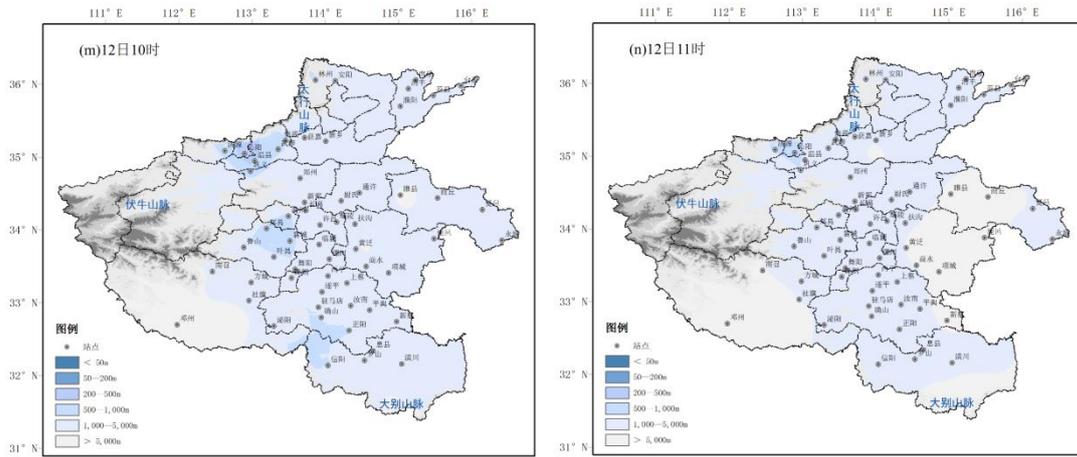


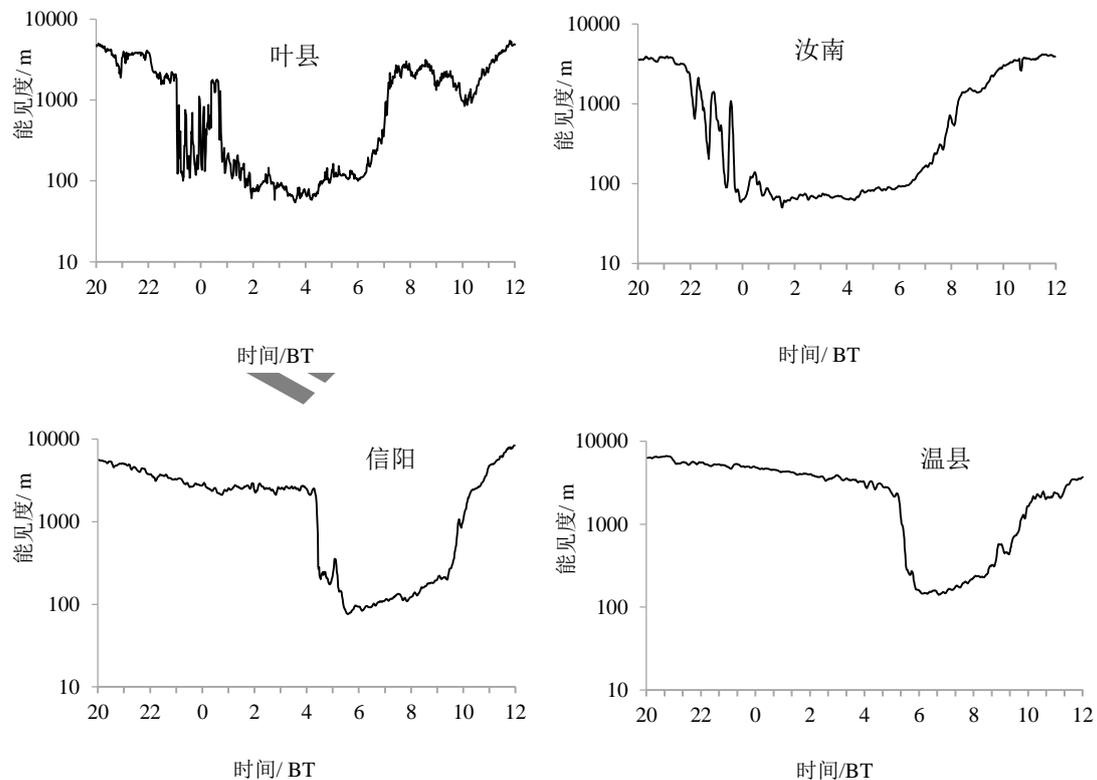
图1 2021年3月11日22时-12日11时河南省能见度分布(单位: m)

Fig.1 The distribution of visibility during the fog event in Henan Province from 22:00 BT 11 to 12 February 2021 (unit: m)

2 强浓雾过程特征

2.1 爆发性增强特征

通过各站点能见度变化曲线分析本次强浓雾过程变化特征, 研究发现大部分站点强浓雾的形成都具有爆发性增强的特征, 即向强浓雾发展时大部分站点的能见度都是在极短时间内急剧下降的。图2给出了6个国家站的能见度变化曲线, 可以看出, 这些站点强浓雾形成时速度极快, 叶县站11日23:04能见度为1830m, 仅2 min迅速下降为123 m; 信阳站12日04:23能见度为2292 m, 仅2 min下降为200 m; 泌阳站12日05:12能见度为1242 m, 仅5 min下降为181 m。



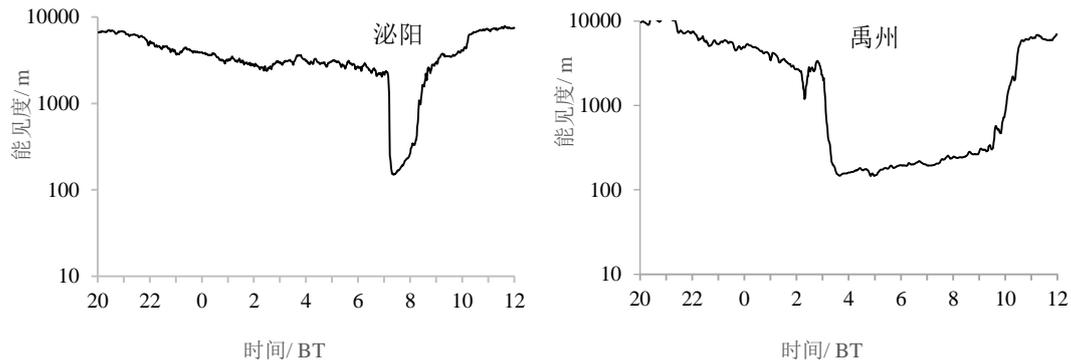


图2 2021年3月11日20时至12日12时河南省6个站点能见度变化曲线

Fig.2 The evolution of visibility at 6 station in Henan province from 20:00 BT 11 to 12:00 BT 12 March 2021

2.2 强浓雾过程时间特征

为进一步认识强浓雾的特征，参考朱承瑛^[22]对雾过程的关键时间点给出定义。起雾时间是指能见度开始降到1000 m 以下的时间。爆发性增强开始时间是指能见度开始陡降（达到强浓雾）的时间，爆发性增强结束时间是指能见度陡降成强浓度的时间，爆发性增强作用时间是指从爆发性增强开始时间到爆发性增强结束时间的的时间间隔。强浓雾最长持续时间是指能见度连续低于200 m 的最长持续时间。雾消结束时间是指能见度回升到1000 m 并稳定高于1000 m 的时间，雾消开始时间是指能见度开始回升（并达到雾消）的时间，雾消作用时间是指从雾消开始时间到雾消结束时间的的时间间隔。经统计，本次过程达到强浓雾的58个国家站中具有典型爆发性增强特征的站点40个，以这40个站点为代表分析强浓雾生消的时间特征。需要说明的是部分站点能见度具有多次爆发的特性，本文仅统计了第一次爆发性增强的时间。从图3中我们可以得到强浓雾生消演变的如下特征，其中00时表示00-01时发生，以此类推。

本次大范围强浓雾的起雾时间（图3a）在20时至次日08时，其中23时至次日01时最为集中，占总站数的50%。次日04-05时发生时间有所减少，06-07时有所回升，08时之后没有发生。强浓雾的爆发性增强开始时间（图3b）与起雾时间特征相似，这也说明大部分站点一一起雾能见度就迅速下降至强浓雾。

统计强浓雾爆发性增强作用时间（图3c）可以看出，爆发性增强作用时间在30min以内，其中10min以内的站点占65%，最长作用时间为27min，最短仅1min，平均作用时间为9.5min。

结合强浓雾最长持续时间（图3d）来看，强浓雾最长持续时间在8h以内，主要集中在3-4h，占总站数的46%，持续时间最短为30min，最长为459min，平均最长持续时间193.6min。

统计雾消开始时间（图3e）可以看出，雾消开始在次日02-11时，其中次日07-09时最为集中，占总站点的63%。雾消开始的最早时间次日0:06，最晚时间为11:03。雾消结束时间（图略）和雾消开始时间特征规律相似。

雾消作用时间（图3f）在85min以内，其中15-30min的站点占总站数的49%，最长作用时间为82min，最短为7min。雾消平均作用时间为35min，明显长于爆发性增强的作用时间。

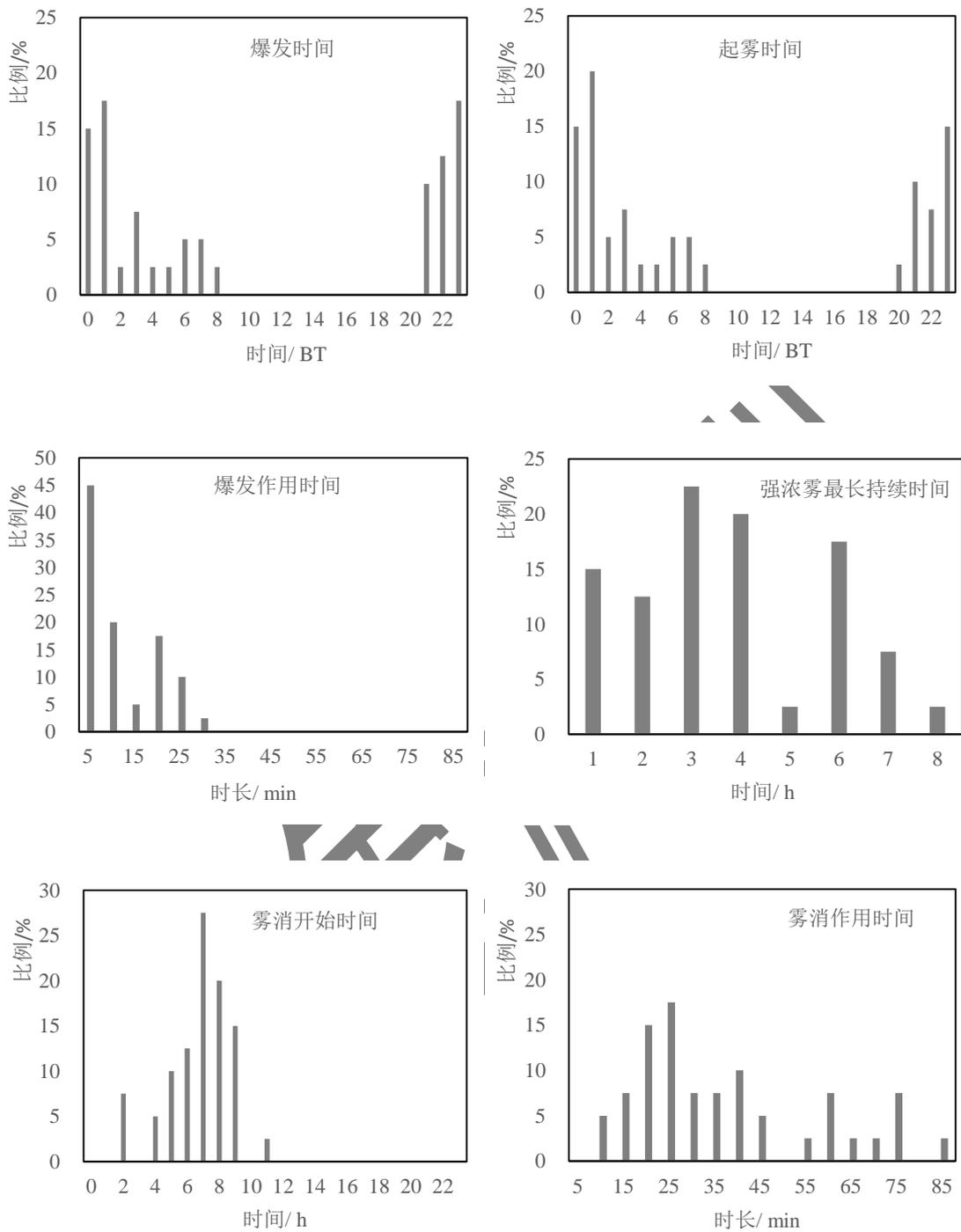


图3 强浓雾特征时间统计图

(a) 起雾时间 (b) 爆发性增强开始时间 (c) 爆发性增强作用时间 (d) 强浓雾最长持续时间 (e) 雾消开始时间 (f) 雾消作用时间

Fig.3 Characteristic time statistics of heavy fog

(a) starting time of fog-rising (b) starting time of heavy fog explosive enhancement (c) time of heavy fog enhancement (d) maximum duration of heavy fog (e) starting time of fog elimination (f) time of fog elimination

2.3 爆发性增强类型

强浓雾具有爆发性增强的特征，但能见度变化特点不尽相同。根据各站点爆发性增强的能见度变化曲线划分为两种类型（如图 4）：第一类是上下剧烈波动后达到强浓雾并维持，本文将这种类型简称为“跳跃爆发型”；第二类是直接迅速爆发形成强浓雾并维持，本文将这种类型简称为“直接爆发型”。分别绘制这次过程两类爆发性增强的能见度变化特征曲线示意图，如图 5。

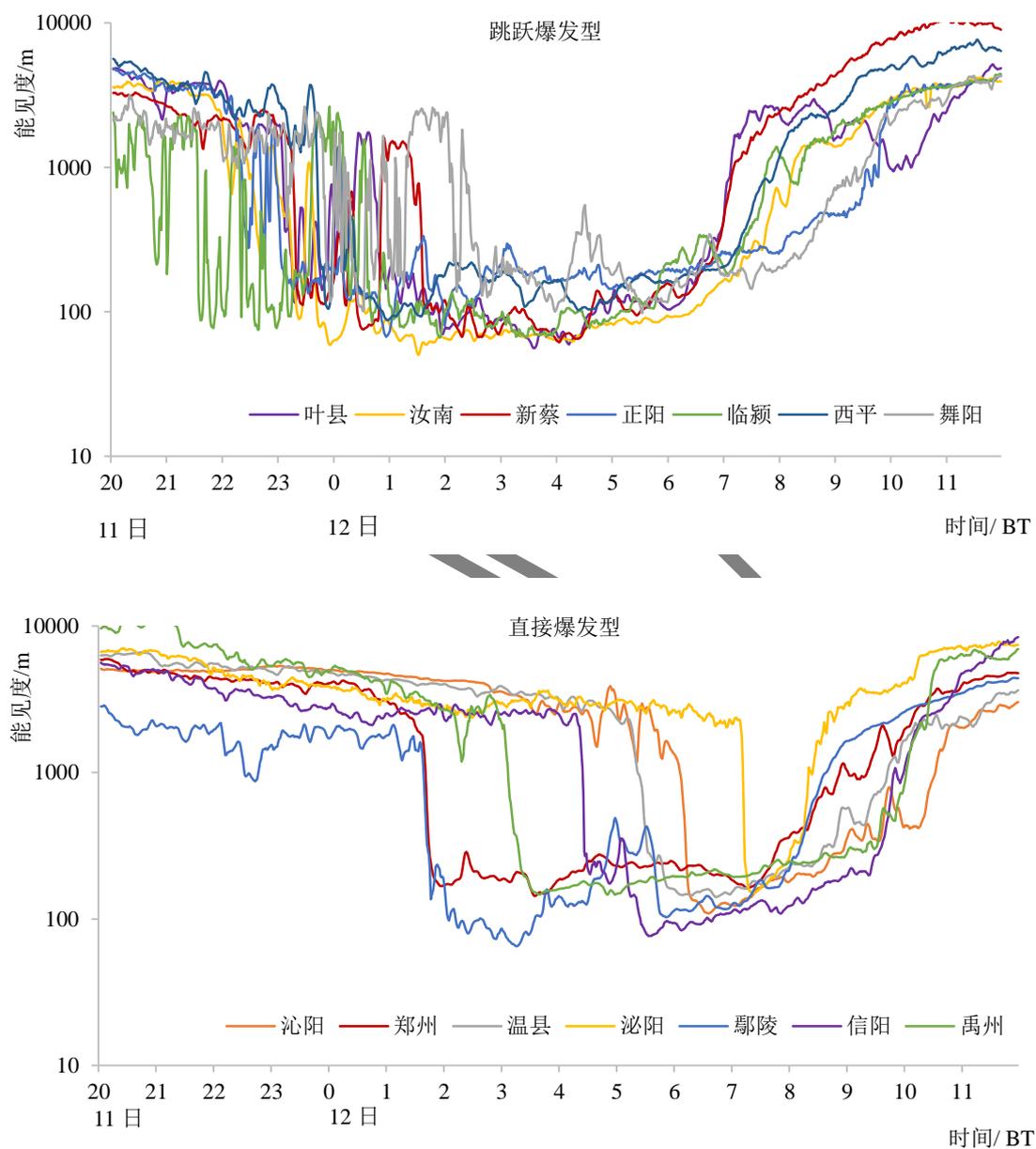


图 4 2021 年 3 月 11 日 20 时至 12 日 12 时河南省能见度变化曲线

Fig.4 The evolution of visibility in Henan Province from 20:00 BT 11 to 12:00 BT 12 March 2021

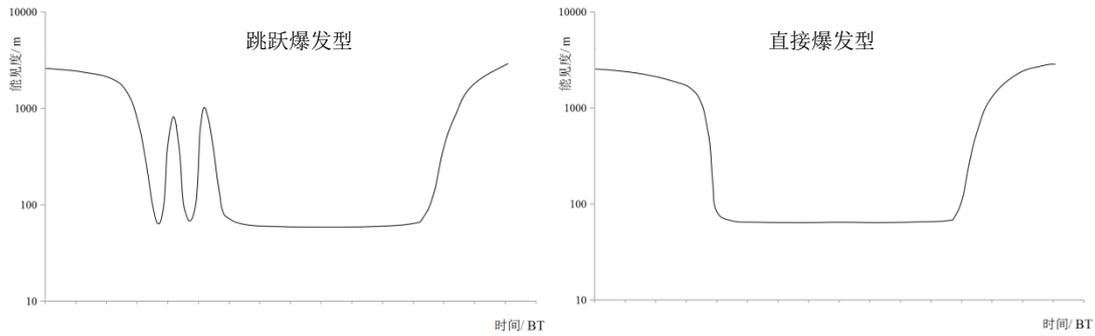


图5 2021年3月11日20时至12日12时强浓雾过程能见度变化曲线示意图

Fig.5 The diagram of the visibility in Henan Province from 20:00 BT 11 to 12:00 BT 12 March 2021

2.4 两类爆发型站点的时空特征分析

在这次过程 40 个典型爆发性增强的站点中，经统计跳跃爆发型 21 个，直接爆发型 19 个。分别绘制跳跃爆发型和直接爆发型的站点位置（图 6），可见，跳跃爆发型主要分布在平顶山、漯河、驻马店一片以及商丘、濮阳等，而直接爆发型主要位于济源、焦作、新乡、郑州、许昌、周口、驻马店、信阳一线。同时研究还发现，跳跃爆发型的“爆发期”主要集中在 11 日 23 时-12 日 01 时，而直接爆发型的“爆发期”主要在 12 日 00 时之后。图 4 也能较好的证明这一结论。分析认为在强浓雾发展初期“条件”不够充分，强浓雾爆发后能见度仍有波动，不易长时间维持；而到强浓雾发展成熟期，强浓雾一经爆发更容易持续。两类爆发型站点的发生发展机制将在下文进行讨论。

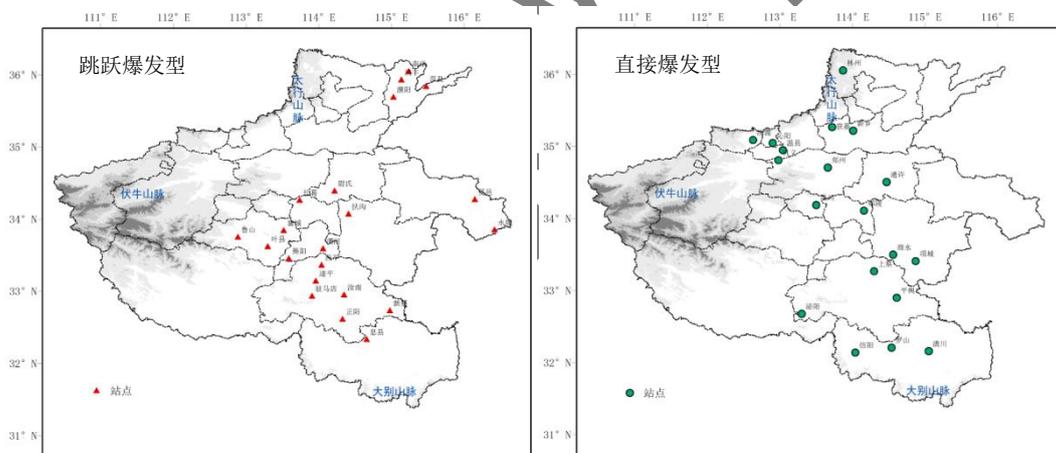


图6 2021年3月11日至12日河南省强浓雾爆发性增强站点分布

Fig.6 Distribution of strong fog explosive enhancement stations in Henan Province from 11 to 12 March 2021

3 强浓雾成因分析

3.1 天气背景分析

2021年3月11日受西风槽东移影响，河南省普降小雨，3月11日20时500hPa低槽已移至东海，河南受槽后西北气流控制，天空转晴（图7）。700hPa和850hPa均为偏北风，850hPa有一小低压中心位于江苏沿海，但925hPa处在小高压北部，为弱的西南风，低层有暖湿平流，温度露点差3~4℃。至12日08时，700hPa逐渐转为弱脊控制，850hPa转为偏南风，底层暖平流加强，省内高空站低层均有明显逆温。

11日夜，河南省地面处在高压带中，为弱的均压场，以东南风为主，风力小，由于

前期降水，地面相对湿度大，尤其是京广线以东部分地区相对湿度达到 100%。且 11 日夜间上述地区天空状况较好，受晴空辐射降温的影响，有利于出现强浓雾天气。下面将对这次大范围强浓雾的成因进行分析。

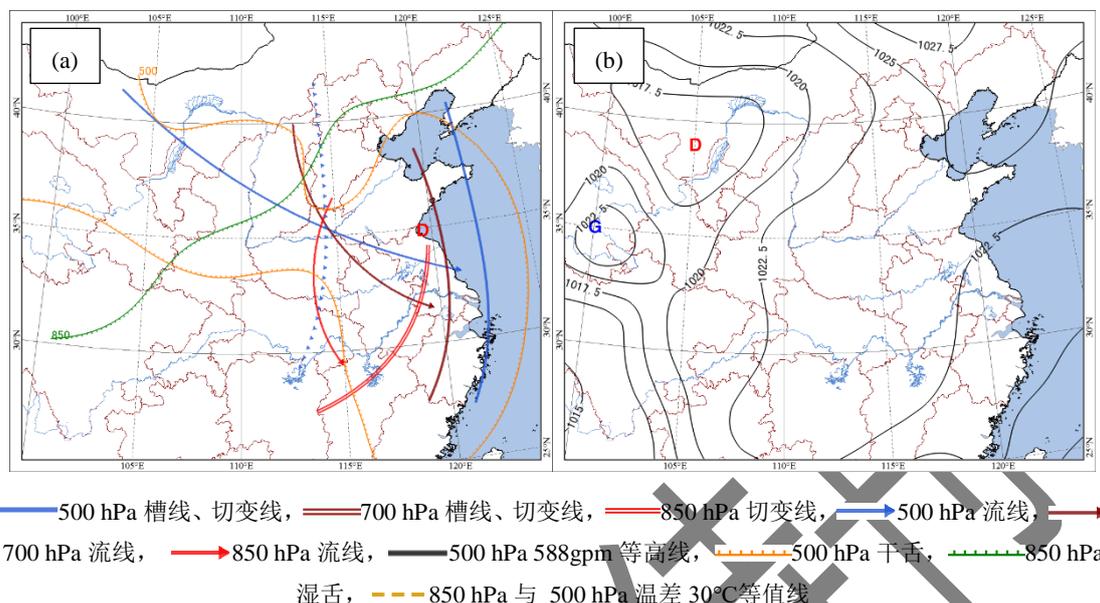
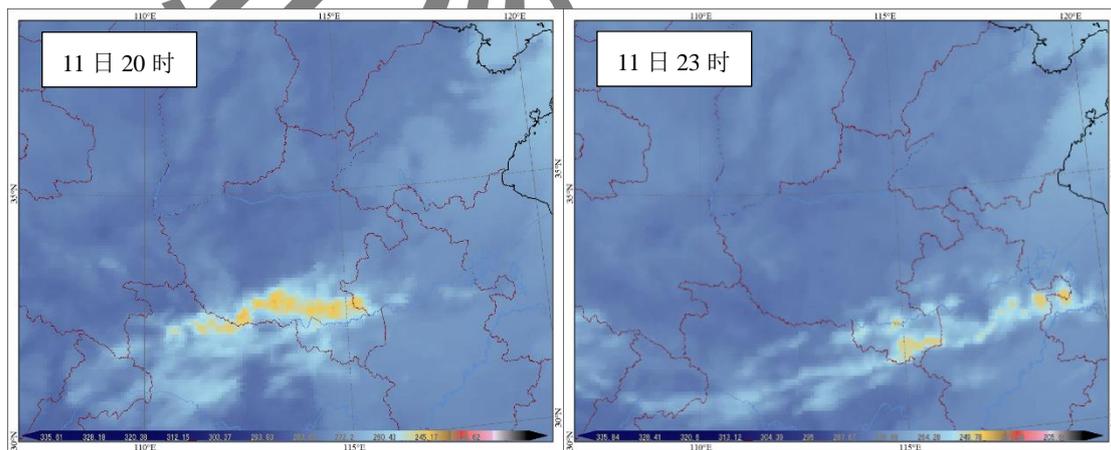


图 7 2021 年 3 月 11 日 20:00 (a)高空中分析综合图和(b)地面形势图

Fig.7 Upper-level mesoscale composite chart(a) and surface weather pattern(b) at 20:00 on 11 March 2021

3.2 辐射降温作用

图 8 给出了 11 日夜间到 12 日白天卫星云图的演变情况，可以看出这个时段内河南上空云系较少：11 日 20:00 河南省南部、西部上空有部分云系，随着云系东移，23 时除东南部部分地区，其他大部分地区上空云层打开，此时雾开始大面积生成并加强，至 12 日 02 时河南上空晴空少云，对应着雾区进一步扩大和加强。总体来看，雾区的产生和范围与晴空少云区有一定的一致性。



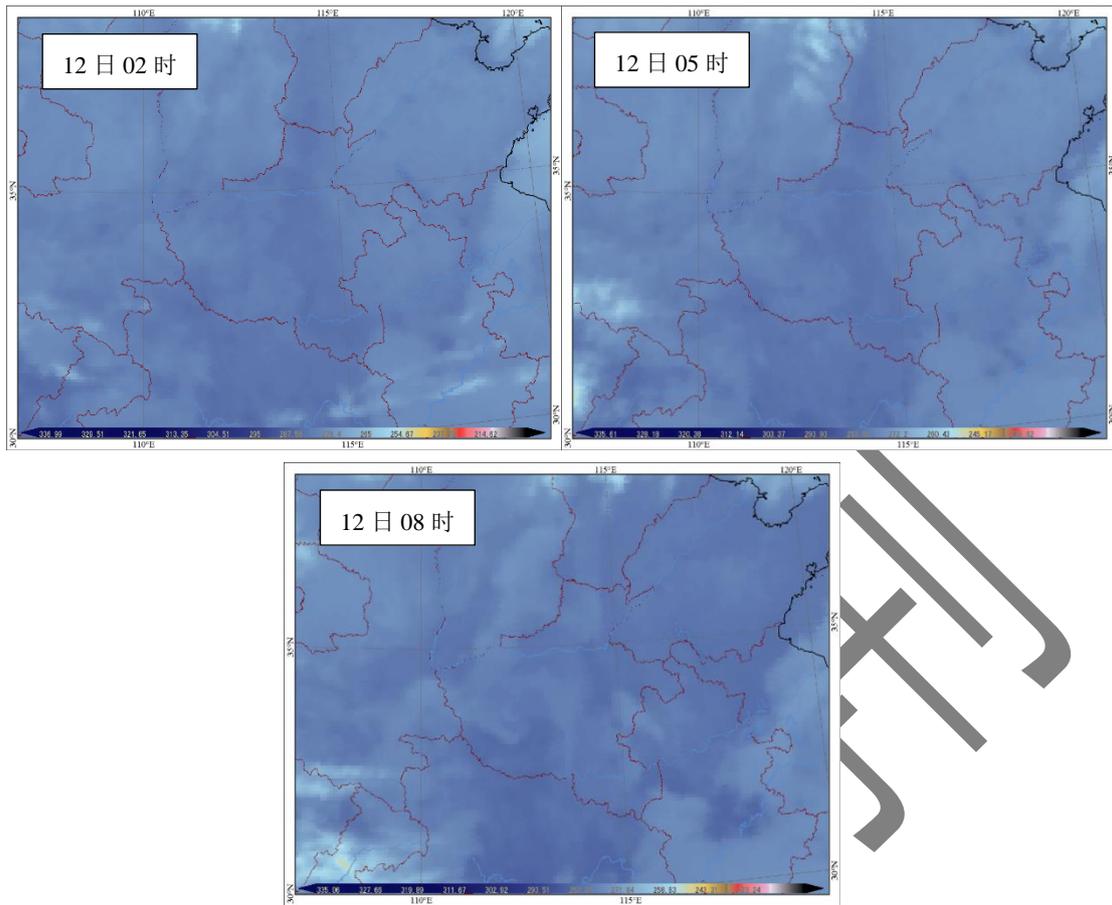
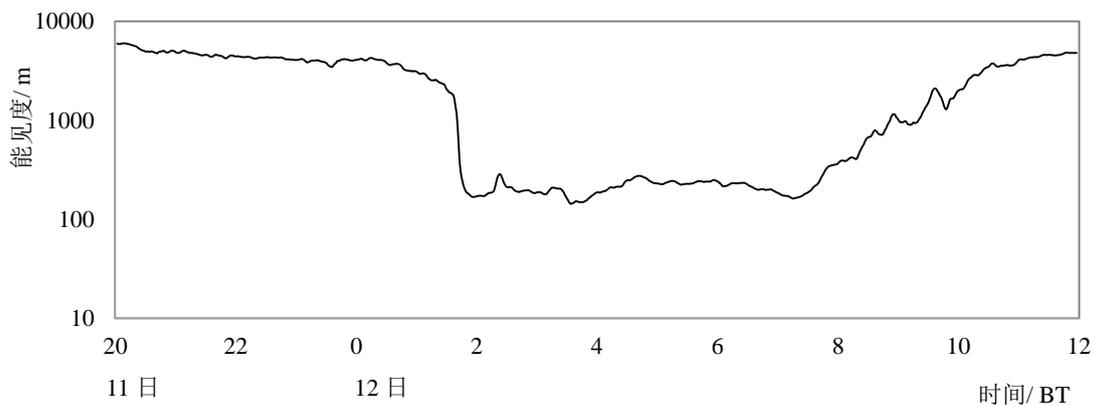
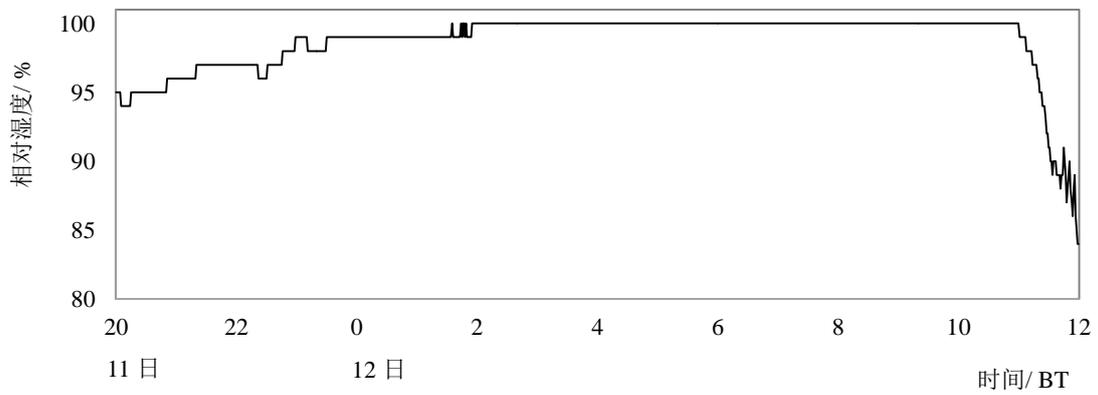
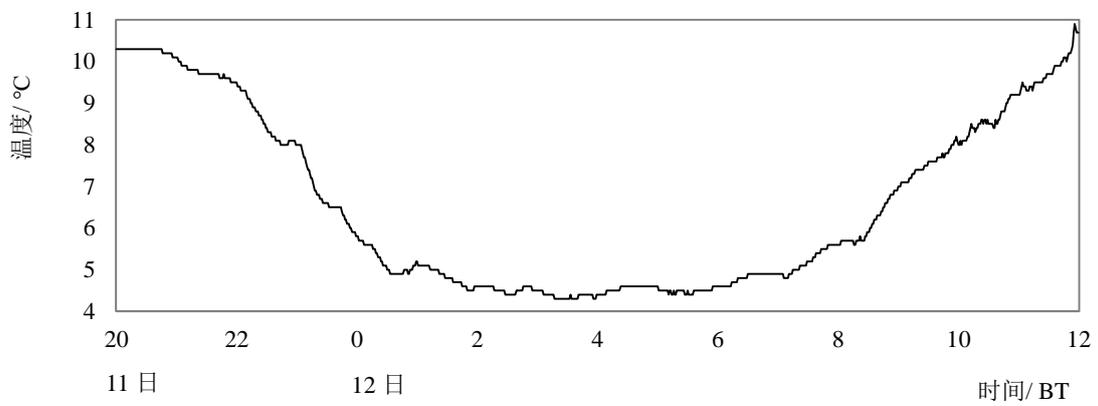
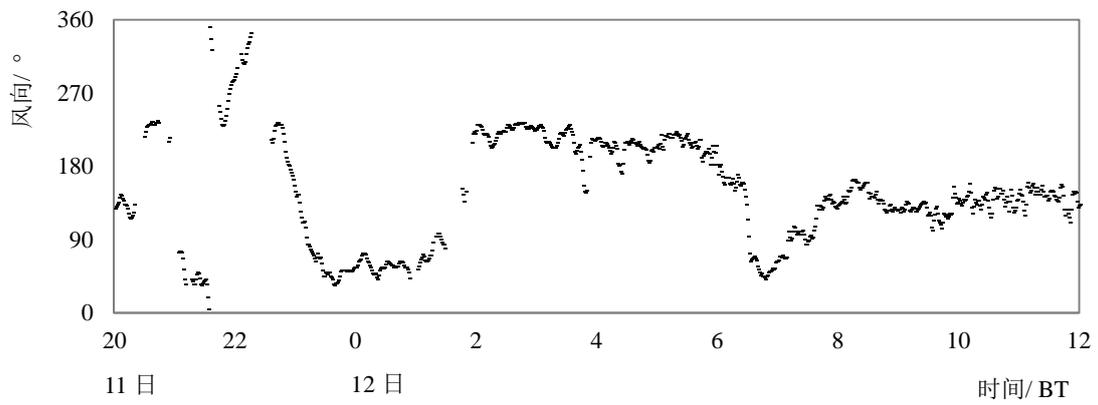
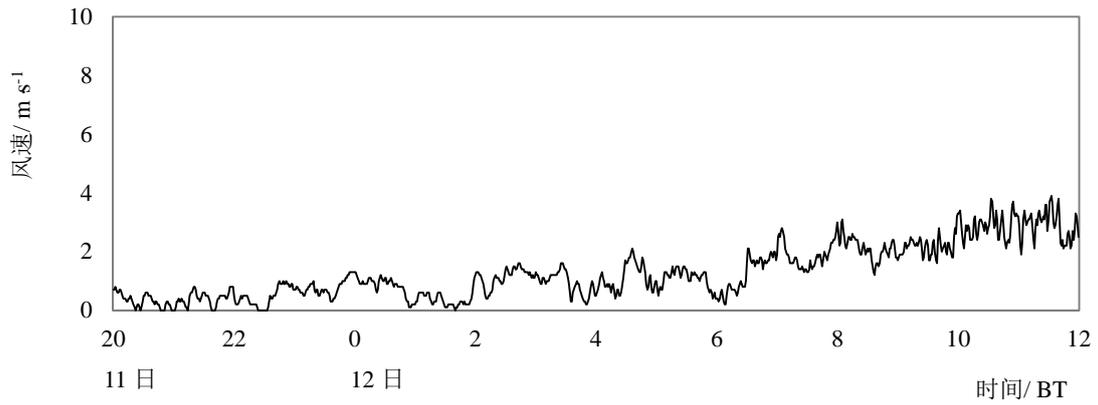


图 8 2021 年 3 月 11 日 20 时至 12 日 08 时雾过程中红外云图逐 3 小时演变情况

Fig.8 Evolution of infrared cloud images during the fog process from 20:00 BT 11 to 08:00 BT 12 March 2021

晴空少云使得地面长波辐射加强，温度下降。为进一步讨论长波辐射降温作用对雾的形成和加强的影响，以郑州站为例绘制其气象要素变化和地表净辐射演变情况（图 9）。地表净辐射通量是地球表面太阳短波净辐射通量和长波净辐射通量之和（高扬子等，2013）。3 月 11 日 16 时之前净辐射为正值，表示该时段以太阳短波净辐射为主；18 时开始净辐射通量转为明显的负值，即该时段内以地面长波辐射为主。随着夜间地面长波辐射加强，气温迅速下降，11 日 21:00 气温为 10.1 °C，到 12 日 0:34 气温下降为 4.9 °C，降温率达 1.5 °C·h⁻¹，促使空气达到饱和成雾，并快速发展为强浓雾。综上，夜间晴空辐射引起近地面降温对这次强浓雾过程有重要的触发和增强作用。





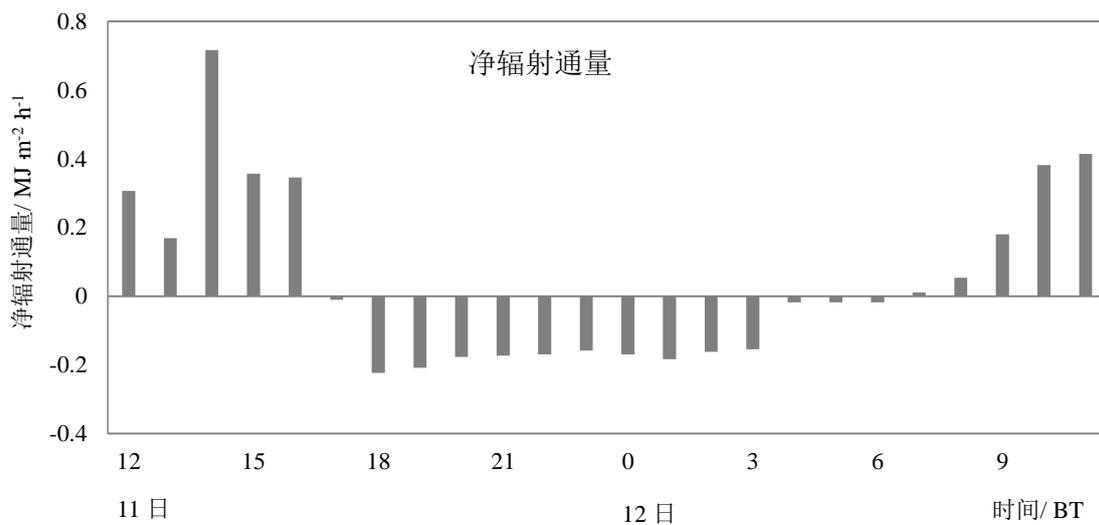


图9 2021年3月11日至12日郑州站各气象要素和小时净辐射随时间的变化

Fig.9 Temporal evolution of different meteorological factors and hourly net radiation in Zhengzhou station from 11 to 12 March 2021

3.3 近地面微风（静风）作用

11日夜间至午夜，河南省东北部、中部、南部部分站点已经有强浓雾形成，大部分站点的能见度呈现剧烈波动的特征。从地面风场（图8）可以看出，在弱均压场的控制下，濮阳东北部、许昌、漯河、周口、驻马店等地风速小于 1 m s^{-1} 甚至是静风，这些区域很好的对应了雾的发展区域。贺皓等（2004）、毛冬艳和杨贵名（2006）先后对雾与风场的关系进行了统计分析，研究指出近地面水平风场的 u 场和 v 场在 0 值附近，即低层的水平风很弱时发生雾的频率最大。以驻马店汝南站为例（图9），在雾形成并持续的绝大部分时段风速都小于 2 m s^{-1} ，在爆发初期 22 时左右，相对湿度达到 100%，风速基本上都小于 1 m s^{-1} ，此时能见度三次波动低值区都很好的对应了风速波动的低谷区，尤其是 12 日 01:00 前后出现了一段较长时间的静风，此时汝南站稳定维持能见度低于 100m 的强浓雾，这说明在这次过程前期弱风尤其是静风是非常有利于雾形成的，这也与朱乾根等（1992）指出的微风对雾的形成最为有利的结论一致。

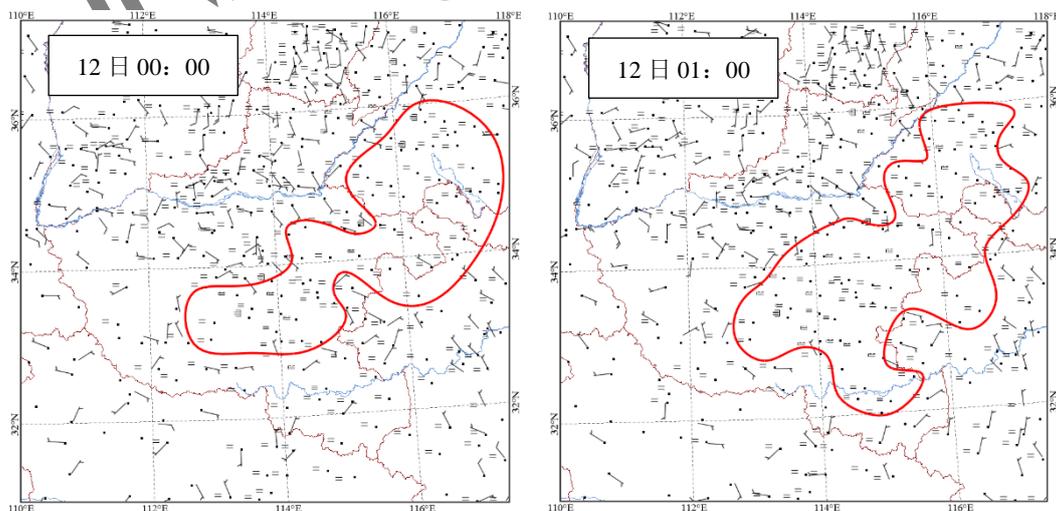
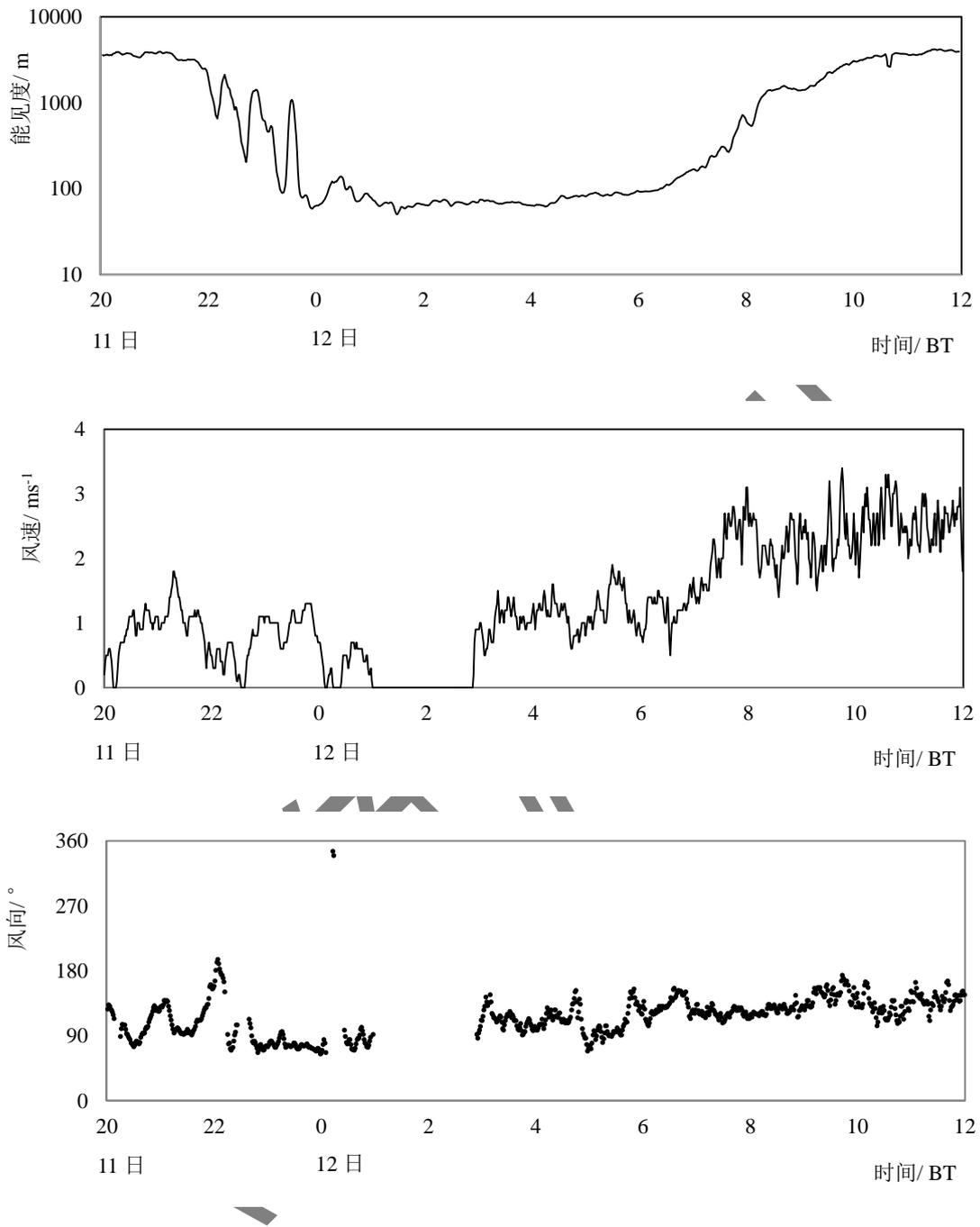


图10 2021年3月12日00时和01时河南地面风场

Fig.10 Surface wind field of Henan Province at 00:00 and 01:00 on March 12, 2021



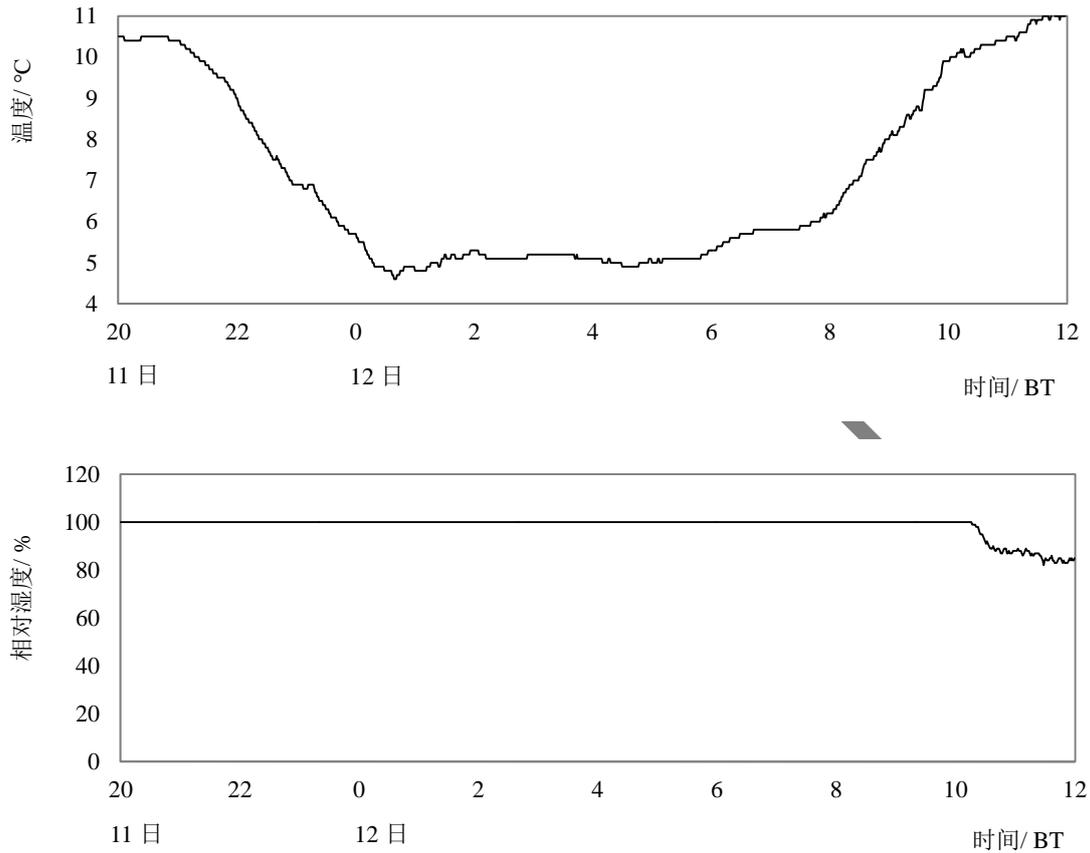
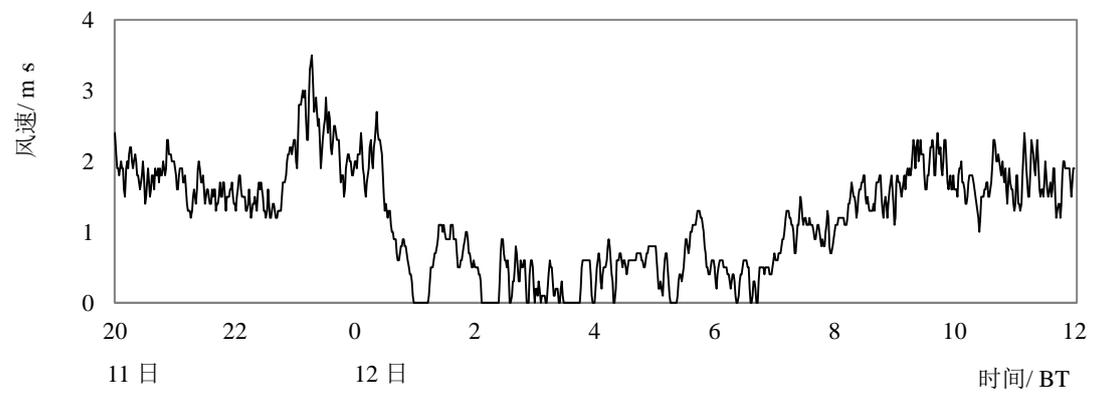
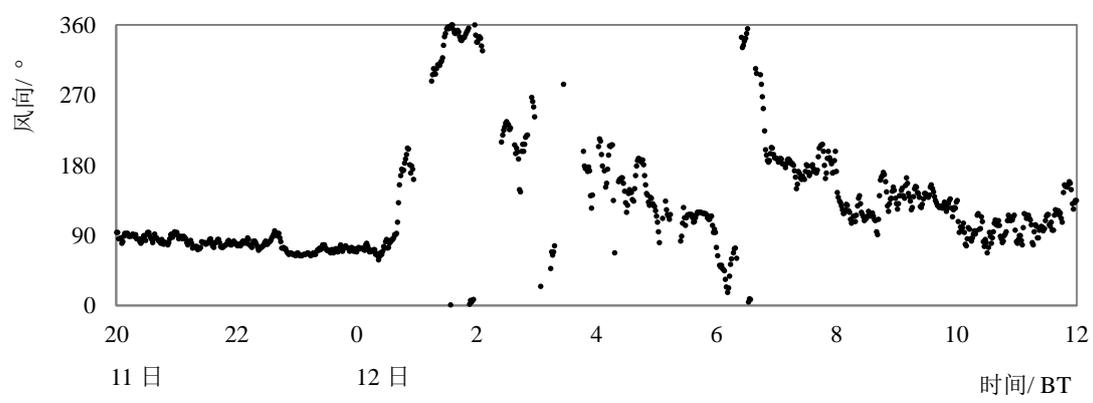
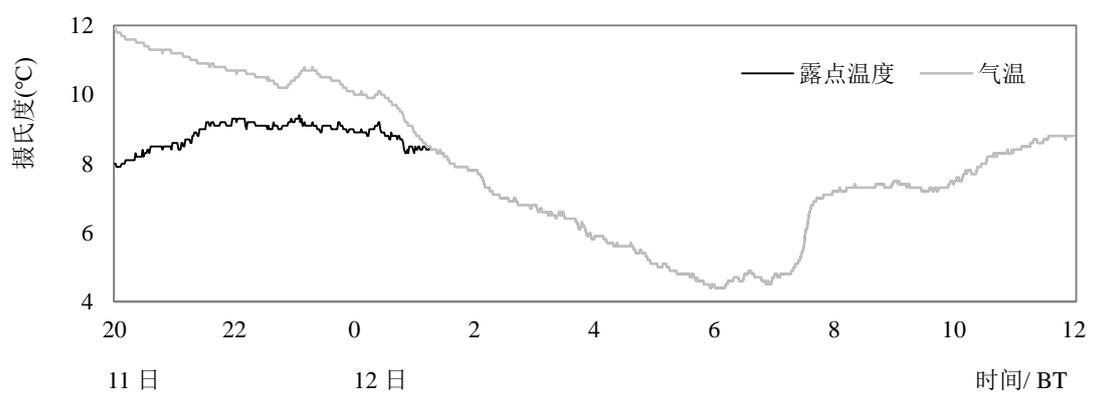
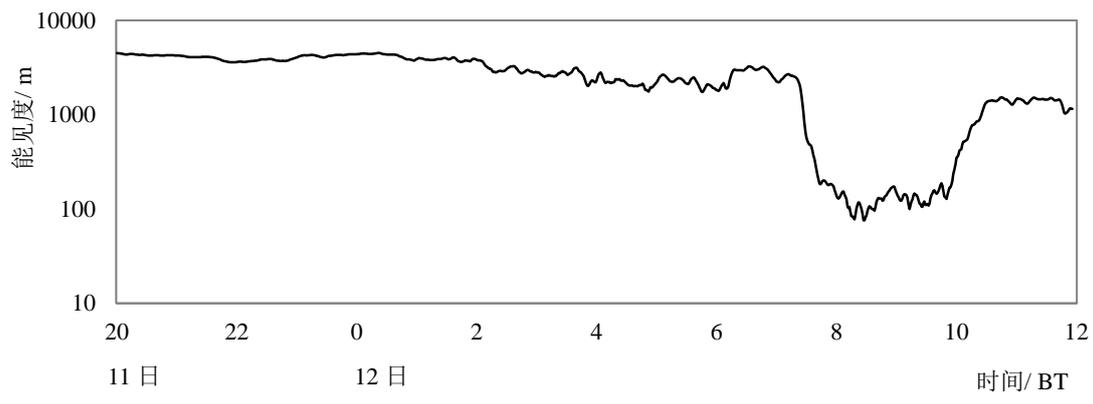


图 11 2021 年 3 月 11 日至 12 日汝南站各气象要素随时间的变化

Fig.11 Temporal evolution of different meteorological factors in Runan station from 11 to 12 March 2021

3.4 暖平流作用

本小节以河南西北部的济源站为例，分析这次过程的中后期强浓雾发展和维持的原因（图 12）。在河南西北部太行山的作用下，河南中东部的东南风在山前发生偏转，11 日夜间到 12 日早晨河南西北部以东北风为主。12 日 06-07 时，位于济源站东面的沁阳站露点温度由 5.2 °C 上升至 6.4 °C 并继续上升，能见度由 1.4 km 下降至 0.1 km，在东北风的作用下，有暖湿平流向济源站输送，07:00 到 07:44 济源站露点温度从 4.7 °C 迅速上升到 7 °C，暖湿空气平流遇到冷的下垫面下部冷却，能见度从 2434 m 迅速下降到 192 m。同时日出后温度上升蒸发加强，并伴有近地面层湍流加强，有利于地表水汽扩散。在近地面暖平流和湍流交换的共同作用下，济源站强浓雾爆发性发展。



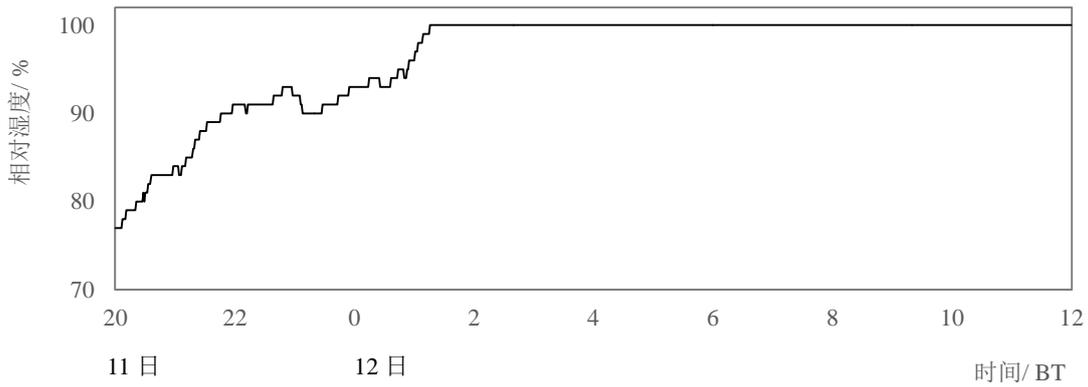


图 12 2021 年 3 月 11 日至 12 日济源站各气象要素随时间的变化

Fig.12 Temporal evolution of different meteorological factors in Jiyuan station from 11 to 12 March 2021

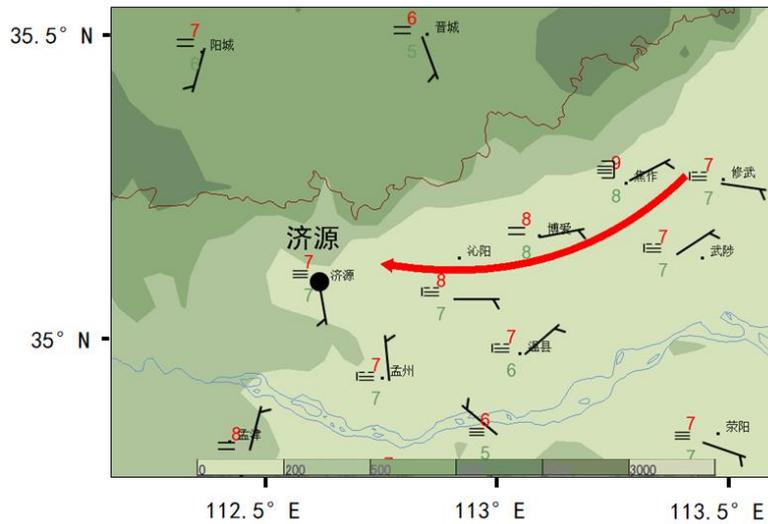


图 13 2021 年 3 月 12 日 08 时济源站地面图

Fig.13 Surface weather pattern in Jiyuan station at 08:00 on 12 March 2021

3.5 两类爆发型站点的成因分析

前文根据能见度变化曲线划分了两种爆发性增强类型，即“跳跃爆发型”和“直接爆发型”，两种类型的能见度变化曲线和爆发时间明显不同。以汝南站为代表的“跳跃爆发型”强浓雾主要发生在 11 日夜间，此时近地面高湿环境、长波辐射降温以及持续的微风（静风）形成了有利于强浓雾爆发的静稳形势，但此时在强浓雾发展初期“条件”不够充分，风的作用会造成一定的湍流扩散，因此影响能见度剧烈波动。而以济源站为代表的“直接爆发型”强浓雾，在风的作用下暖平流输送，温度显著回升，强浓雾爆发。强浓雾爆发前地面异常增温或温度维持不变，这种特征在“直接爆发型”的绝大多数站点中存在，此时风的作用有利于强浓雾发展并持续，这与前人的研究成果是一致的（黄继雄等，2011）。

4 结论

2021 年 3 月 11 日夜间至 12 日白天河南省出现一次大范围强浓雾天气过程，这次强浓雾过程是高空 500hPa 处于西北气流控制，低层配合有暖湿平流作用，地面处于均压场的天

气背景下产生的，对这次过程进行深入分析，得到如下结论：

1.这次强浓雾过程具有爆发性增强特征，统计 40 个典型强浓雾站点的发生发展特征发现：爆发性增强的作用时间在 30 min 以内，平均仅为 9.5 min；各站点强浓雾最长持续时间平均为 193.6 min，最长为 459 min；雾消作用时间平均为 35 min，明显长于爆发性增强的作用时间。

2.根据能见度变化曲线划分了两种爆发性增强类型：第一类是上下剧烈波动后达到强浓雾并维持，称为“跳跃爆发型”；第二类是直接迅速爆发形成强浓雾并维持，称为“直接爆发型”。

3.雾前降水造成的高湿环境和夜间晴空辐射降温为强浓雾过程提供了重要的触发和加强条件；近地面大范围微风甚至是静风是这次强浓雾过程爆发的另一个有利条件，近地面暖平流输送也是这次强浓雾过程爆发性发展和维持的重要原因。

4.“跳跃爆发型”和“直接爆发型”两种类型成因中风起到不同的作用：前者风的作用会造成一定的湍流扩散，影响能见度剧烈波动；后者在风的作用下暖平流输送，有利于强浓雾发展并持续。

参考文献：

- 邓雪娇, 吴兑, 叶燕翔, 2002. 南岭山地浓雾的物理特征[J]. 热带气象学报, 18(3): 227-236. Deng X J, Wu D, Ye Y X, 2002. Physical characteristics of dense fog at Nanling Mountain region[J]. J Trop Meteor, 18(3): 227-236 (in Chinese).
- 高扬子, 何洪林, 张黎, 等, 2013. 近 50 年中国地表净辐射的时空变化特征分析[J]. 地球信息科学学报, 15(1): 1-10. Gao Y Z, He H L, Lu Q Q, et al, 2013. Spatio-temporal variation characteristics of surface net radiation in China over the past 50 Years[J]. J Geo-Inform Sci, 15(1): 1-10 (in Chinese).
- 葛良玉, 江燕如, 梁汉明, 等, 1998. 1996 年岁末沪宁线持续五天大雾的原因探讨[J]. 气象科学, 18(2): 181-188. Ge L Y, Liang Y R, Liang H M, et al, 1998. Discussion on the reason of the five day sustained fog on Hu-Ning region in the end of 1996[J]. Sci Meteor Sin, 18(2): 181-188 (in Chinese).
- 郭丽君, 郭学良, 方春刚, 等, 2015. 华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析[J]. 中国科学: 地球科学, 45(4): 427-443. Guo L J, Guo X L, Fang C G, et al, 2015. Observation analysis on characteristics of formation, evolution and transition of a long-lasting severe fog and haze episode in North China[J]. Sci China Earth Sci, 58(3): 329-344.
- 贺皓, 吕红, 徐虹, 2004. 陕西省大雾的气候特征[J]. 高原气象, 23(3): 407-411. He H, Lü H, Xu H, 2004. Climatic characteristics of heavy fog in Shaanxi province[J]. Plateau Meteor, 23(3): 407-411 (in Chinese).
- 何立富, 李峰, 李泽椿, 2006. 华北平原一次持续性大雾过程的动力和热力特征[J]. 应用气象学报, 17(2): 160-168. He L F, Li F, Li Z C, 2006. Dynamic and thermal features of a sustained heavy fog event in Huabei plain[J]. J Appl Meteor Sci, 17(2): 160-168 (in Chinese).
- 黄继雄, 窦利军, 阿利曼, 2011. 首都机场平流雾特征分析与预报[J]. 气象科技, 39(1): 50-55. Huang J X, Dou L J, Aliman, 2011. Statistical characteristics and contrast analysis of an advection fog in capital airport[J]. Meteor Sci Technol, 39(1): 50-55 (in Chinese).
- 焦圣明, 朱承瑛, 朱毓颖, 等, 2016. 江苏地区一次罕见持续性强浓雾过程的成因分析[J]. 气象学报, 74(2): 200-212. Jiao S M, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2016. A discussion on the reason for a rare persistent heavy fog event in Jiangsu province[J]. Acta Meteor Sin, 74(2): 200-212 (in Chinese).
- 李子华, 黄建平, 周毓荃, 等, 1999. 1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征[J]. 气象学报, 57(5): 622-631. Li Z H, Huang J P, Zhou Y Q, et al, 1999. Physical structures of the five-day sustained fog around Nanjing in 1996[J]. Acta Meteor Sin, 57(5): 622-631 (in Chinese).
- 李子华, 2001. 中国近 40 年来雾的研究[J]. 气象学报, 59(5): 616-624. Li Z H, 2001. Studies of fog in China over the past 40 years[J]. Acta Meteor Sin, 59(5): 616-624 (in Chinese).

-
- 刘端阳, 濮梅娟, 杨军, 等, 2009. 2006年12月南京连续4天浓雾的微物理结构及演变特征[J]. 气象学报, 67(1): 147-157. Liu R Y, Pu M J, Yang J, et al, 2009. Microphysical structure and evolution of four-day persistent fogs around Nanjing in December 2006[J]. Acta Meteor Sin, 67(1): 147-157 (in Chinese).
- 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等, 2010. 南京冬季一次雾过程宏观结构的突变特征及成因分析[J]. 大气科学, 34(4): 681-690. Lu C S, Niu S J, Yang J, et al, 2010. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing[J]. Chin J Atmos Sci, 34(4): 681-690 (in Chinese).
- 毛冬艳, 杨贵名, 2006. 华北平原雾发生的气象条件[J]. 气象, 32(1): 78-83. Mao D Y, Yang G M, 2006. Meteorological conditions for fog formation over North China plain[J]. Meteor Mon, 32(1): 78-83 (in Chinese).
- 濮梅娟, 严文莲, 商兆堂, 等, 2008. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究[J]. 高原气象, 27(5): 1111-1118. Pu M J, Yan W L, Shang Z T, et al, 2008. Study on the physical characteristics of burst reinforcement during the winter fog of Nanjing[J]. Plateau Meteor, 27(5): 1111-1118 (in Chinese).
- 石林平, 迟秀兰, 1995. 华北平原大雾分析和预报[J]. 气象, 21(5): 45-47. Shi L P, Chi X L, 1995. The analysis and forecast of fog in North China Plain[J]. Meteor Mon, 21(5): 45-47 (in Chinese).
- 王继志, 徐祥德, 杨元琴, 2002. 北京城市能见度及雾特征分析[J]. 应用气象学报, 13(S1): 160-169. Wang J Z, Xu X D, Yang Y Q, 2002. A study of characteristics of urban visibility and fog in Beijing and the surrounding area[J]. J Appl Meteor Sci, 13(S1): 160-169 (in Chinese).
- 王玮, 黄玉芳, 孔凡忠, 等, 2009. 中国东部一场持续性大雾的诊断分析[J]. 气象, 35(9): 84-90. Wang W, Huang Y F, Kong F Z, et al, 2009. Diagnostic analysis on a sustained heavy fog event in the eastern China[J]. Meteor Mon, 35(9): 84-90 (in Chinese).
- 许爱华, 陈翔翔, 肖安, 等, 2016. 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, 42(3): 372-381. Xu A H, Chen X X, Xiao A, et al, 2016. Analysis on the characteristics of meteorological factors and forecast ideas for regional advection fog in Jiangxi[J]. Meteor Mon, 42(3): 372-381 (in Chinese).
- 严文莲, 朱承瑛, 朱毓颖, 等, 2018. 江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J]. 气象, 44(7): 892-901. Yan W L, Zhu C Y, Zhu Y Y, et al, 2018. Study on a wide range of explosive heavy fog in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 44(7): 892-901 (in Chinese).
- 喻谦花, 邵宇翔, 齐伊玲, 2012. 2012年河南省中东部一次大雾成因分析[J]. 气象与环境科学, 35(4): 27-32. Yu Q H, Shao Y X, Qi Y L, 2012. Formation cause analysis of a heavy fog in the Middle East of Henan province in 2012[J]. Meteor Environ Sci, 35(4): 27-32 (in Chinese).
- 朱承瑛, 朱毓颖, 祖繁, 等, 2018. 江苏省秋冬季强浓雾发展的一些特征[J]. 气象, 44(9): 1208-1219. Zhu C Y, Zhu Y Y, Zu F, et al, 2018. Some characteristics of the development of heavy fog in autumn and winter in Jiangsu province[J]. Meteor Mon, 44(9): 1208-1219 (in Chinese).
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等, 1992. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 1992. Synoptic Principles and Methods[M]. Beijing: Meteorological Press (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认)
- Kunkel B A, 1971. Fog drop-size distributions measured with a laser hologram camera[J]. J Appl Meteor, 10(3): 482-486.
- Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al, 1992. The Po Valley fog experiment 1989[J]. Tellus B: Chem Phys Meteor, 44(5): 448-468.