

肖瑶,史一丛,李宁,等,2024.河南省春季一次大范围强浓雾特征分析[J].气象,50(10):1256-1267. Xiao Y, Shi Y C, Li N, et al, 2024. Study of characteristics of a typical regional heavy fog in spring in Henan Province[J]. Meteor Mon, 50(10):1256-1267(in Chinese).

河南省春季一次大范围强浓雾特征分析*

肖 瑶^{1,2} 史一丛^{1,3} 李 宁^{1,2} 席世平^{1,2} 夏依聪^{1,2}

1 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室,郑州 450003

2 河南省气象服务中心,郑州 450003

3 河南省气象台,郑州 450003

提 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类型,即跳跃爆发型和直接爆发型。风在两种类型中起到不同作用:在跳跃爆发型中,风会造成一定的湍流扩散,使得能见度剧烈波动;而在直接爆发型中,在风的作用下暖平流输送,有利于强浓雾的发展和维持。

关键词: 强浓雾,爆发性增强类型,能见度,晴空辐射,暖平流

中图分类号: P458, X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.062401

Study of Characteristics of a Typical Regional Heavy Fog in Spring in Henan Province

XIAO Yao^{1,2} SHI Yicong^{1,3} LI Ning^{1,2} XI Shiping^{1,2} XIA Yicong^{1,2}

1 CMA/Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, Zhengzhou 450003

2 Henan Meteorological Service Center, Zhengzhou 450003

3 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

Abstract: Based on the meteorological data from conventional observation stations, a typical large-scale regional heavy fog process in Henan Province from the night of 11 to the day of 12 March 2021 is analyzed. The study focus is on the analysis of the time characteristics and explosive enhancement characteristics of the heavy fog process. The results show that this heavy fog process had the characteristics of explosive enhancement. The explosive enhancement time at 40 typical heavy fog stations was less than 30 min, with an average of only 9.5 min. The high humidity environment caused by the precipitation ahead of the fog and the clear-sky radiation cooling over night provided important conditions for triggering and strengthening the heavy fog process. Large-scale breeze or even calm wind near the surface was another favorable condition for explosive development of this fog process. In addition, the transport of warm advection near the surface was also an important cause for the explosive development and maintenance of the heavy fog

* 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z034)、河南省科技攻关(联合基金)项目(242103810105)和中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室科技计划项目(KM202011、KQ202318、KL202407)共同资助

2023 年 1 月 27 日收稿; 2024 年 7 月 22 日收修定稿

第一作者:肖瑶,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,主要从事强对流和灾害性天气天气预报研究. E-mail: shiyicong_zz@163.com

process. According to the variation of visibility, two types of heavy fog explosive enhancement are divided, i. e., jump-burst type and direct burst type, in which wind played different roles. In the former, the effect of wind caused turbulence diffusion and affected the dramatic fluctuation of visibility, while the latter had warm advection transport under the action of wind, which was conducive to the development and persistence of the fog.

Key words: heavy fog, explosive enhancement type, visibility, clear-sky radiation, warm advection

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 1000 m 以内的一种常见的天气现象(李子华,2001)。其中水平能见度在 500~1000 m 为大雾,200~500 m 为浓雾,50~200 m 为强浓雾,小于 50 m 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;王伟等,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;Guo et al,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,此类问题有待于深入研究分析。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,河南省气象台在 11 日 23:10(北京时,下同)发布大雾黄色预警,12 日 00:30 升级为强浓雾橙色预警,全省共发布 90 个大雾红、橙、黄色预警信号。受其影响,除西部少数地区外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,为强浓雾的预报服务提供依据。

1 强浓雾过程

2021 年 3 月 11 日夜间至 12 日白天,河南省出现大范围强浓雾天气,其中 58 个国家级气象观测站(以下简称国家站)能见度小于 200 m,最低能见度出现在清丰站和濮阳站,能见度低至 40 m。基于河南省 121 个国家站数据,采用天气分析和统计方法,分析此次大范围强浓雾过程。

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 20:00 开始,河南省京广线及其以东地区开始起雾,22:00 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 m 的强浓

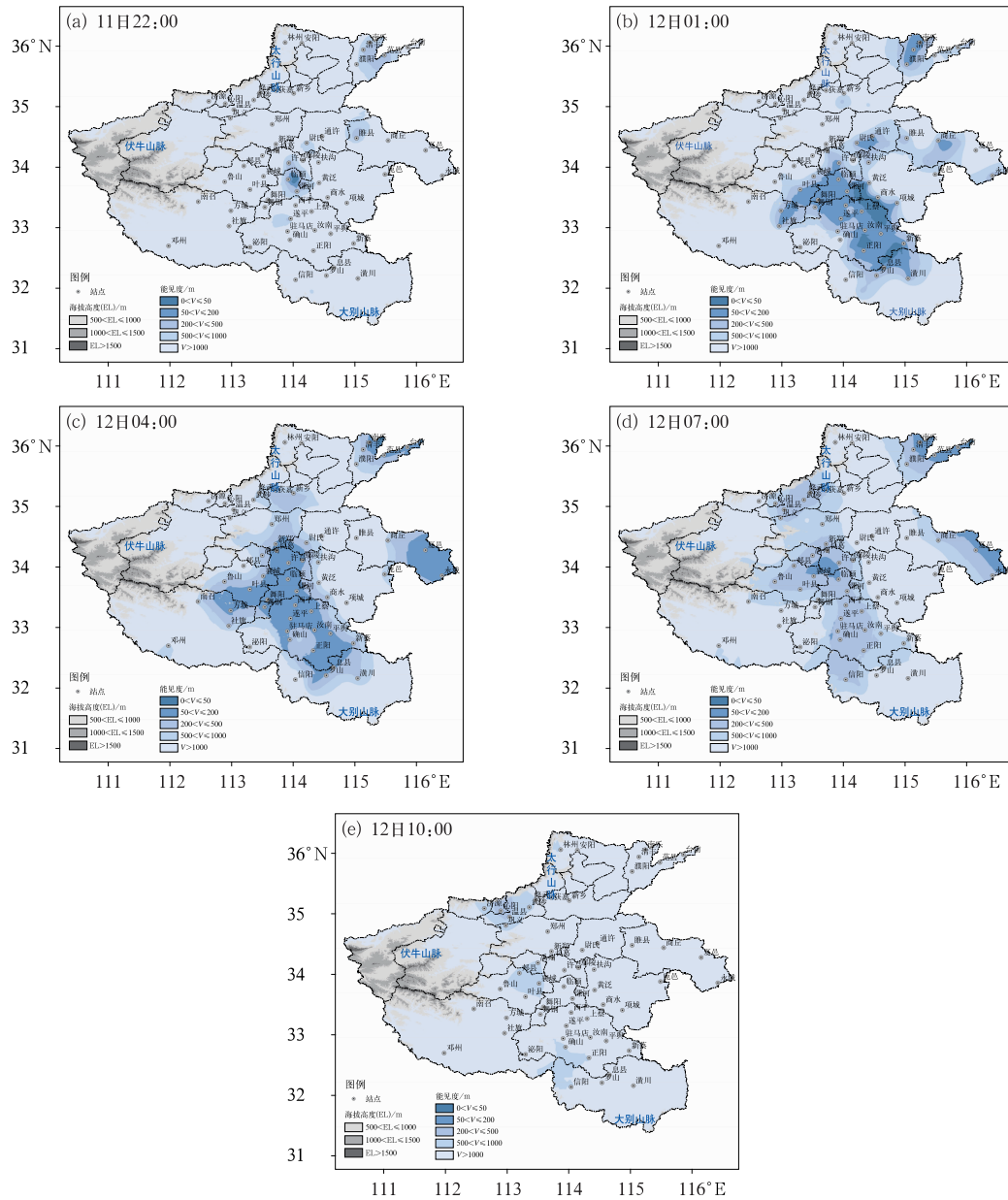


图 1 2021 年 3 月 11 日 22:00 至 12 日 10:00 河南省能见度分布
Fig. 1 Distribution of visibility during the fog event in Henan Province
from 22:00 BT 11 to 10:00 BT 12 March 2021

雾, 12 日 11:00—12:00 强浓雾逐渐开始减弱消散。

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, 这些站点强浓雾形成时速度极快, 3 月 11 日 23:04 叶县站能见度为 1830 m, 仅 2 min 迅速下降为 123 m; 12 日 04:23 信阳站能见度为 2292 m, 仅 2 min 下降为 200 m。

2.2 强浓雾过程时间特征

为进一步认识强浓雾的特征, 参考朱承瑛等 (2018) 对雾过程关键时间点的定义。起雾时间是指

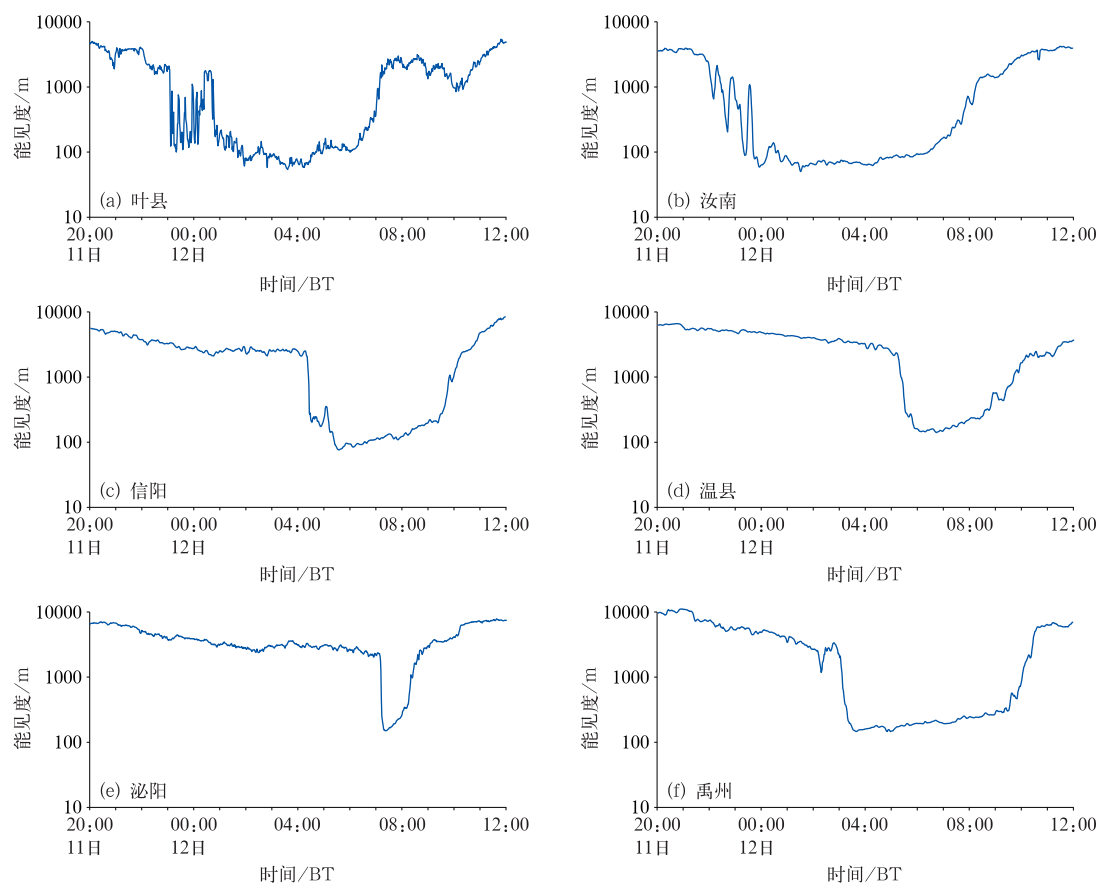


图 2 2021 年 3 月 11 日 20:00 至 12 日 12:00 河南省 6 个站能见度变化

Fig. 2 Evolution of visibility at six stations in Henan Province from 20:00 BT 11 to 12:00 BT 12 March 2021

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;雾消开始时间是指能见度开始回升(并达到雾消)的时间,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,雾消作用时间是指从雾消开始时间到雾消结束时间的时间间隔。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为 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。由图 3 可见此次强浓雾的生消演变特征,其中 00:00 表示 00:00—01:00,以此类推。

本次大范围强浓雾的起雾时间(图 3a)在 11 日

20:00 至 12 日 08:00,其中 11 日 23:00 至 12 日 01:00 最为集中,占总站数的 50%。12 日 04:00—05:00 发生时间有所减少,06:00—07:00 有所回升,08:00 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经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 30 min 以内,其中 10 min 以内的站点占 65%,最长作用时间为 27 min,最短仅为 1 min,平均作用时间为 9.5 min。

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 8 h 以内,主要集中在 3~4 h,占总站数的 46%,持续时间最短为 0.5 h,最长约为 7.7 h,平均最长持续时间约为 3.2 h。

统计雾消开始时间(图 3e)可以看出,雾消开始在 12 日 02:00—11:00,其中 07:00—09:00 最为集中,占总站点的 63%。雾消开始的最早时间为 12 日 00:06,最晚时间为 11:03。雾消结束时间

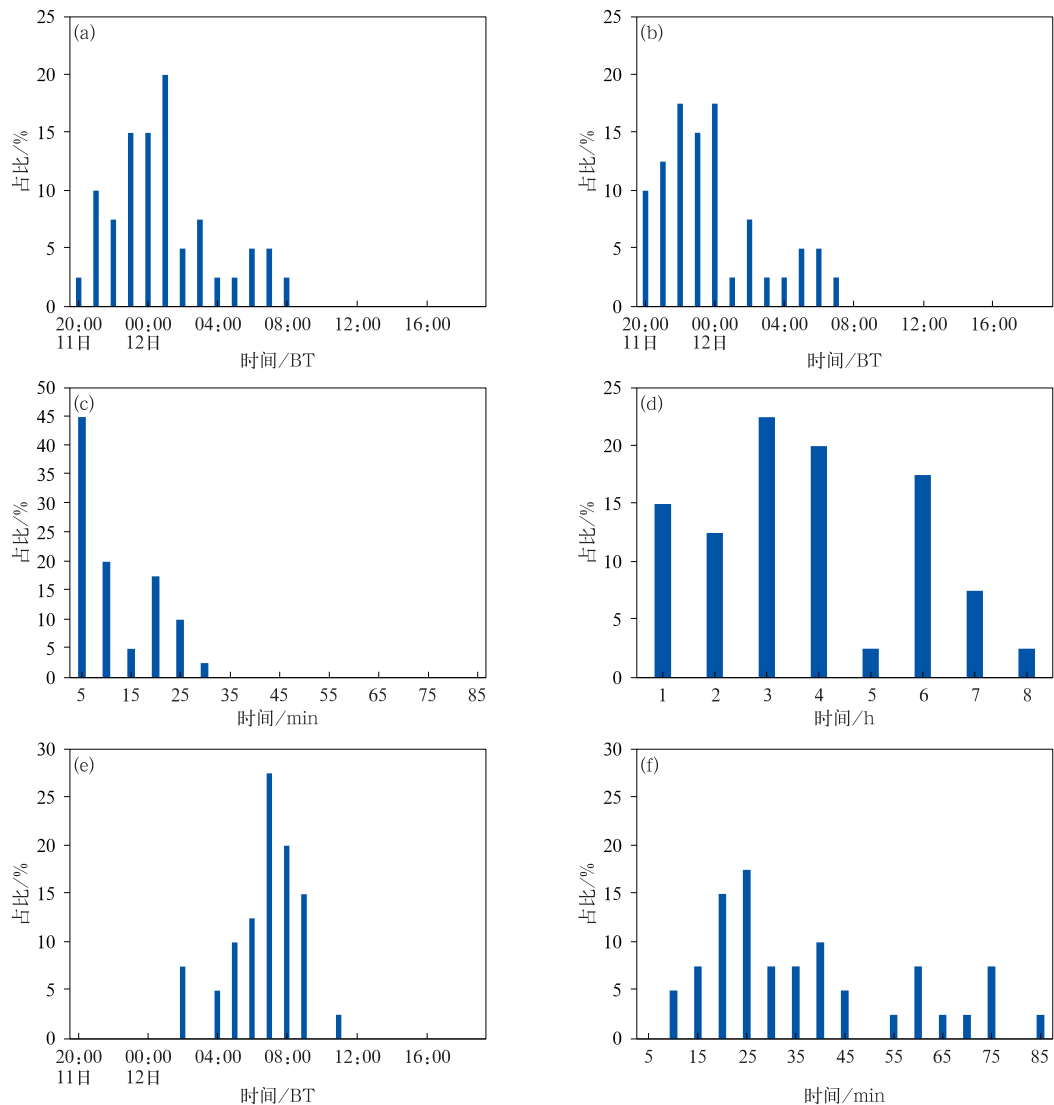


图 3 2021 年 3 月 11—12 日河南省强浓雾过程特征时间统计
(a)起雾时间,(b)爆发性增强开始时间,(c)爆发性增强作用时间,(d)强浓雾最长持续时间,
(e)雾消开始时间,(f)雾消作用时间

Fig. 3 Characteristic time statistics of typical regional heavy fog process in Henan Province from 11 to 12 March 2021

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

(图略)和雾消开始时间特征规律相似。

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

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(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 所示。

2.4 两类爆发型站点的时空特征分析

经统计,在这次过程 40 个典型爆发性增强的站点中,跳跃爆发型为 21 个,直接爆发型为 19 个。分别绘制跳跃爆发型和直接爆发型的站点位置(图 6),

跳跃爆发型主要分布在平顶山、漯河、驻马店一带以及商丘、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 3 月 11 日 23:00 至 12 日 01:00,而直接爆发型的“爆发期”主要在 12 日 00:00 之后,图 4 也能较好地证

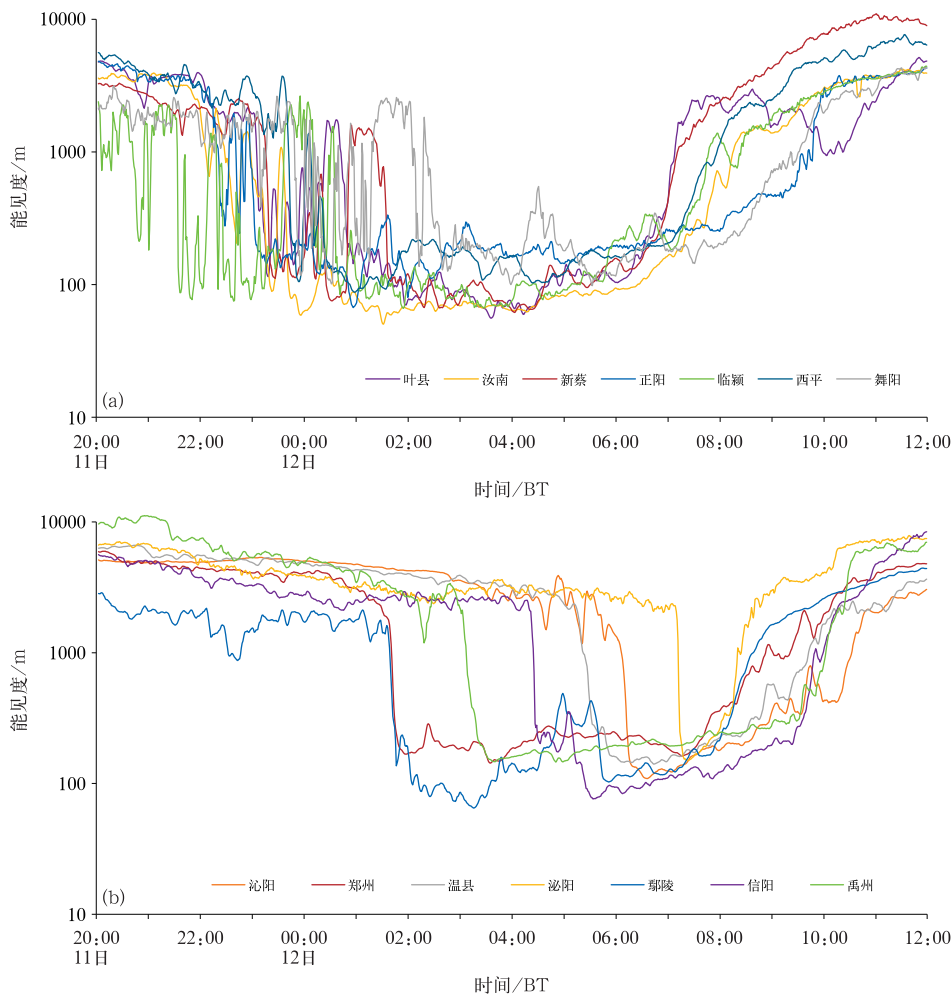


图 4 2021 年 3 月 11 日 20:00 至 12 日 12:00 河南省(a)跳跃爆发型和(b)直接爆发型强浓雾过程能见度变化
Fig. 4 Evolution of visibility of (a) jump burst type and (b) direct burst type of typical regional heavy fog processes in Henan Province from 20:00 BT 11 to 12:00 BT 12 March 2021

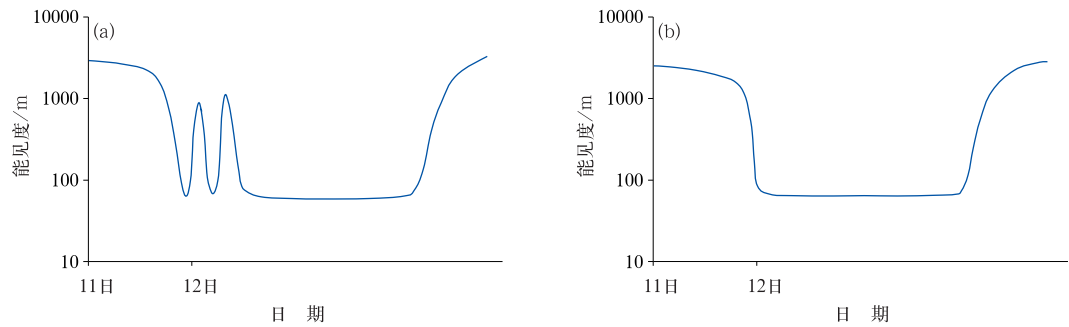


图 5 2021 年 3 月 11—12 日河南省(a)跳跃爆发型和(b)直接爆发型强浓雾过程能见度变化曲线示意图
Fig. 5 Diagram of visibility of (a) jump burst type and (b) direct burst type of typical regional heavy fog processes in Henan Province from 11 to 12 March 2021

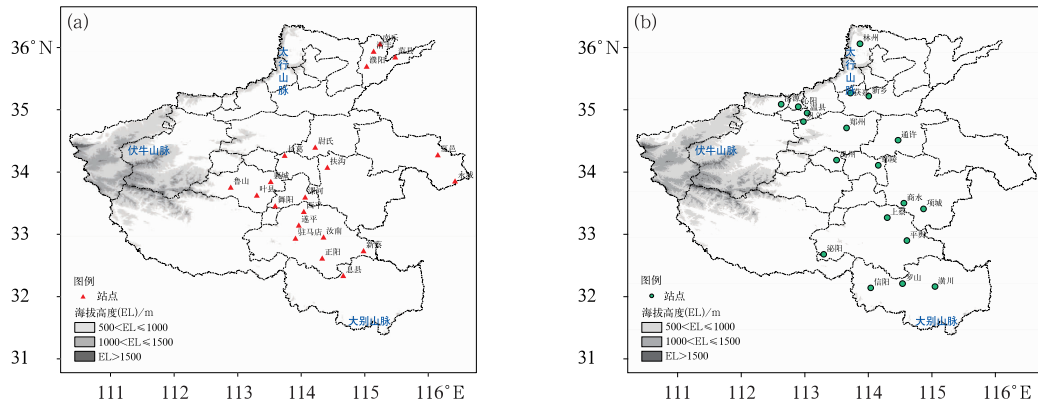


图 6 2021 年 3 月 11—12 日河南省(a)跳跃爆发型和(b)直接爆发型强浓雾爆发性增强站点分布

Fig. 6 Distribution of (a) jump burst type and (b) direct burst type heavy fog processes enhancement stations in Henan Province from 11 to 12 March 2021

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。

3 强浓雾成因分析

3.1 天气背景分析

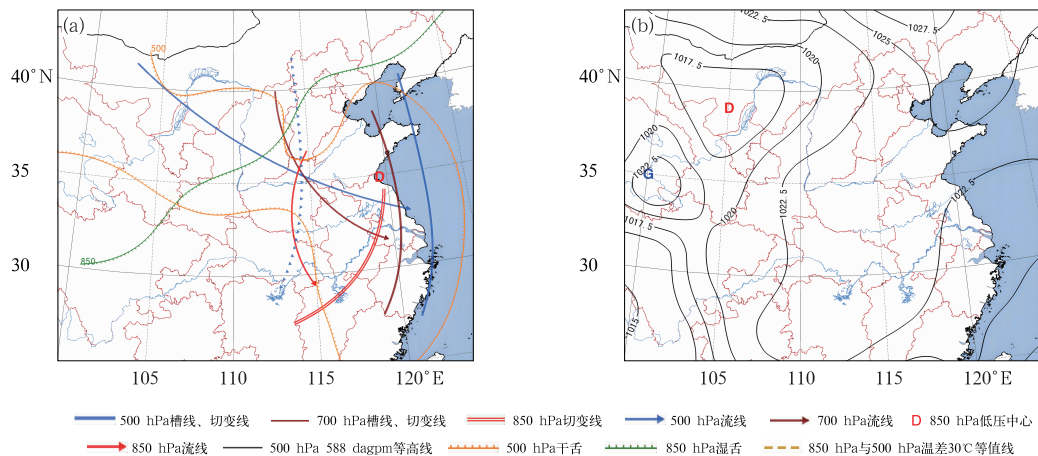
3 月 11 日,受西风槽东移影响,河南省普降小雨,20:00,500 hPa 低槽已移至东海,河南受槽后西北气流控制,天空转晴(图 7)。700 hPa 和 850 hPa 均为偏北风,850 hPa 有一个小低压中心位于江苏沿海,但 925 hPa 处在小高压北部,为弱的西南风,

低层有暖湿平流,温度露点差为 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。至 12 日 08:00,700 hPa 逐渐转为弱脊控制,850 hPa 转为偏南风,低层暖平流加强,省内高空站低层均有明显逆温。

11 日夜間,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 日夜間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。下文将对这次大范围强浓雾的成因进行具体分析。

3.2 辐射降温作用

图 8 给出了 3 月 11 日夜間到 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



注:图 b 中等值线为海平面气压,单位:hPa;D 为低压中心;G 为高压中心。

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

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

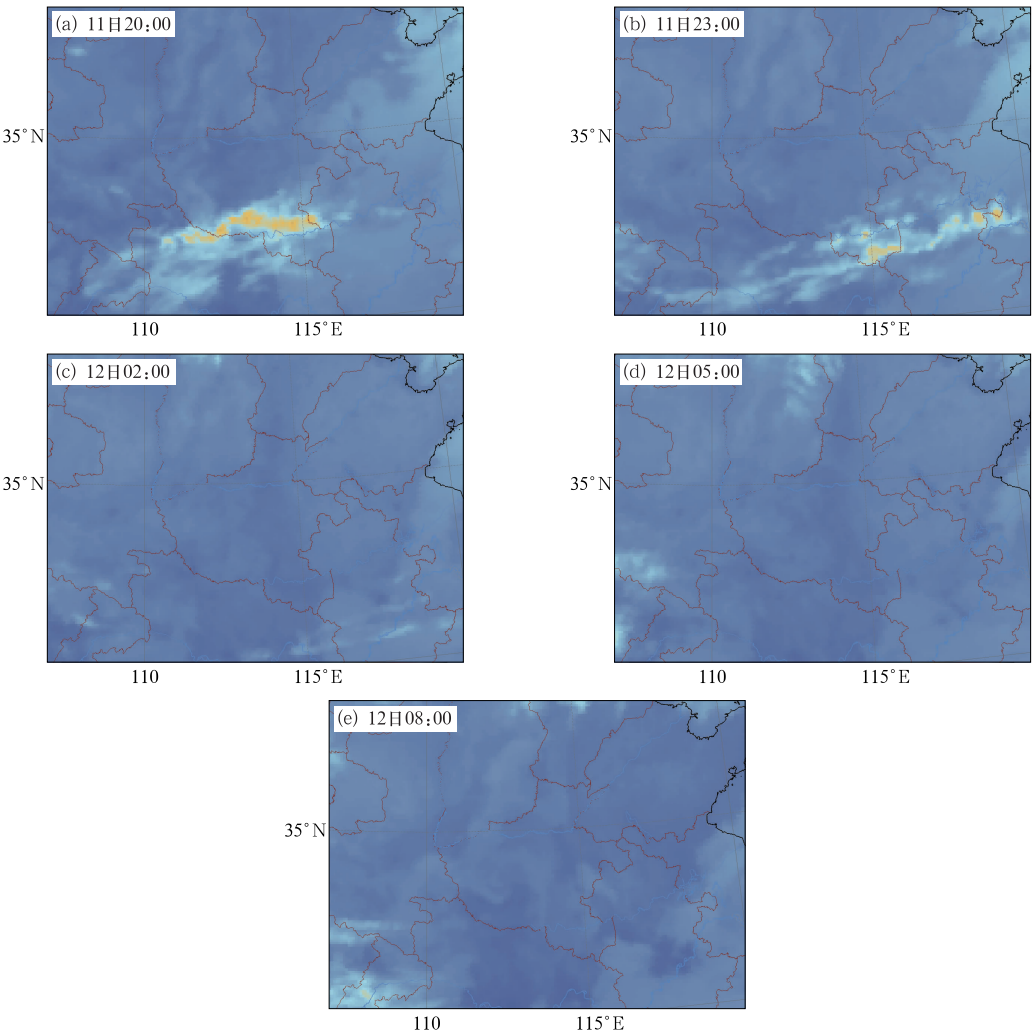


图 8 2021 年 3 月 11 日 20:00 至 12 日 08:00 河南省强浓雾过程红外云图逐 3 h 演变
Fig. 8 3 h-evolution of infrared cloud images during the typical regional heavy fog process
in Henan Province from 20:00 BT 11 to 08:00 BT 12 March 2021

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,23:00 除东南部少部分地区外,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 02:00 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。

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通量演变情况(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)。11 日 16:00 之前净辐射通量为正值,表示该时段以太阳短波净辐射通量为主;18:00 开始净辐射通量转为明显的负值,即该时段

内以地面长波净辐射通量为主。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℃,到 12 日 00:34 气温下降为 4.9℃,降温率达 1.5℃·h⁻¹,促使空气达到饱和成雾,并快速发展为强浓雾。综上所述,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。

3.3 近地面微风(静风)作用

3 月 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 10)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,甚至出现静风,很好地对应了雾的发展区域。贺皓等(2004)、

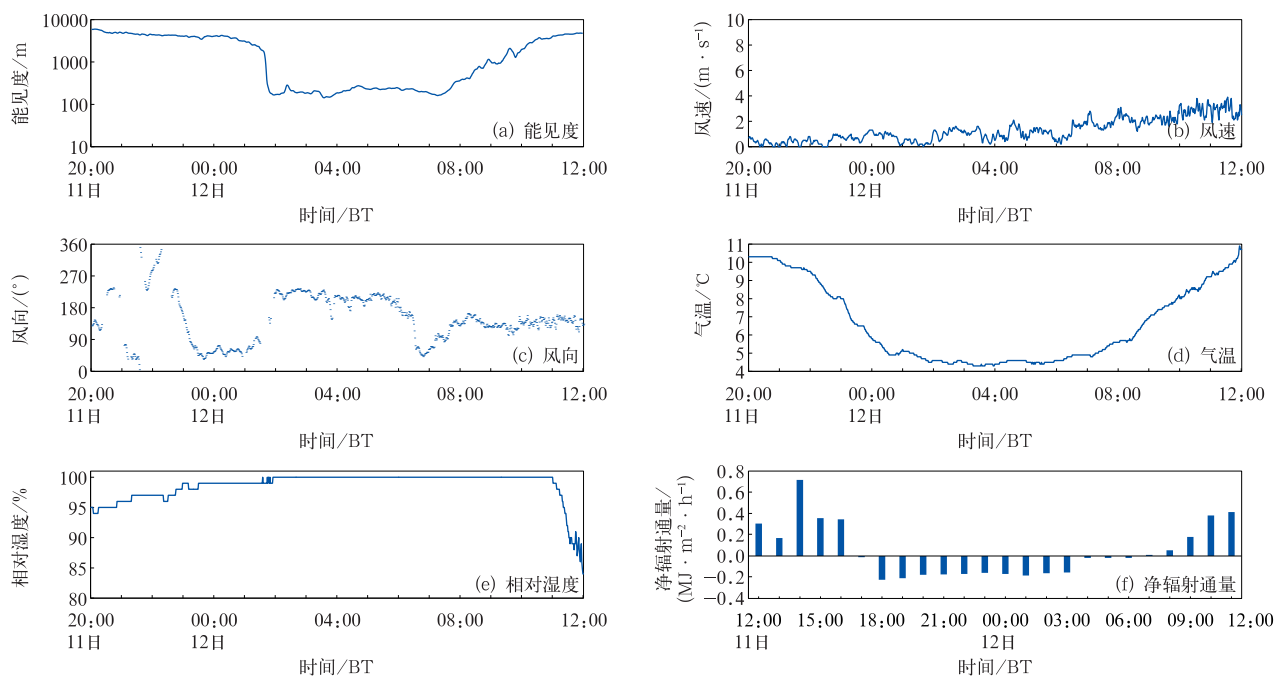
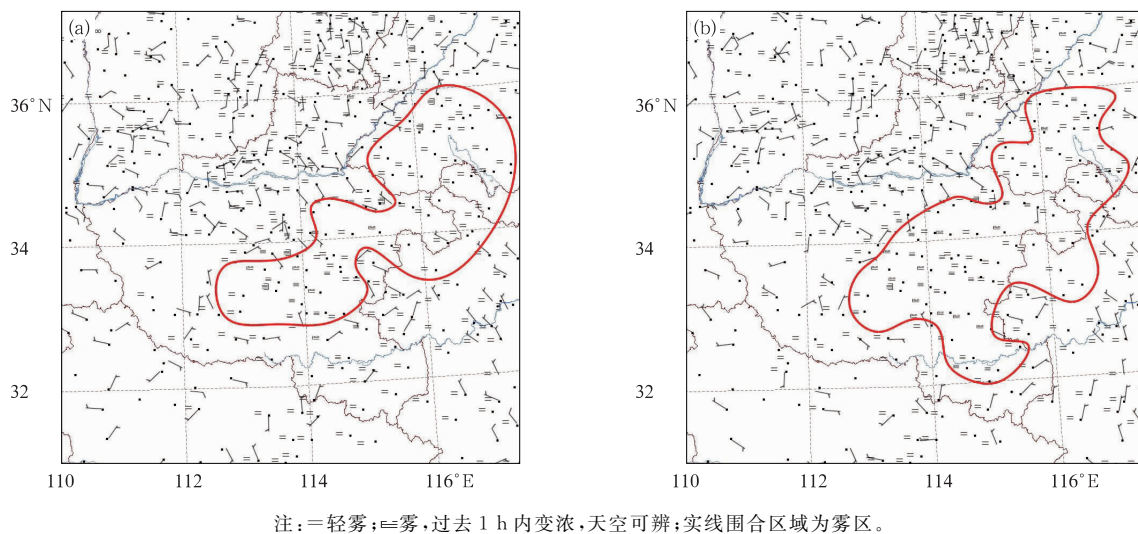


图 9 2021 年 3 月 11—12 日郑州站(a—e)各气象要素和(f)小时净辐射通量随时间的变化

Fig. 9 Temporal evolution of (a—e) different meteorological elements and (f) hourly net radiation flux at Zhengzhou Station from 11 to 12 March 2021



注: =轻雾; =雾, 过去 1 h 内变浓, 天空可辨; 实线围合区域为雾区。

图 10 2021 年 3 月 12 日(a)00:00 和(b)01:00 河南省地面风场(风羽)

Fig. 10 Surface wind field (barb) of Henan Province at (a) 00:00 BT and (b) 01:00 BT 12 March 2021

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 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近,即低层的水平风很弱时发生雾的频率最大。以汝南站为例(图 11),在雾形成并持续的绝大部分时段风速都小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在爆发初期 11 日 22:00 左右,相对湿度达到 100%,风速基本上都小于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此时能见度三次波动低值区

都很好地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,此时汝南站出现稳定维持能见度低于 100 m 的强浓雾,说明在这次过程前期弱风尤其是静风非常有利于雾的形成,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。

3.4 暖平流作用

以河南西北部的济源站为例分析这次过程中的中

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,3 月 11 日夜间到 12 日早晨河南西北部

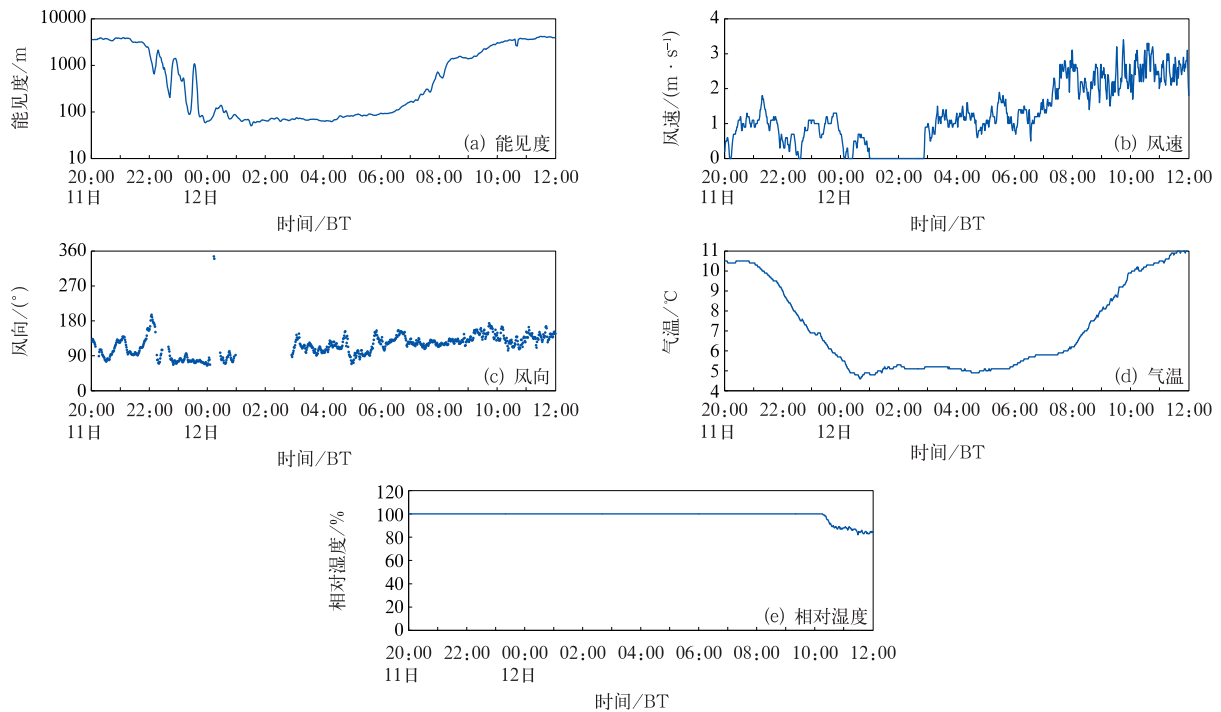


图 11 2021 年 3 月 11—12 日汝南站各气象要素随时间的变化

Fig. 11 Temporal evolution of different meteorological elements at Runan Station from 11 to 12 March 2021

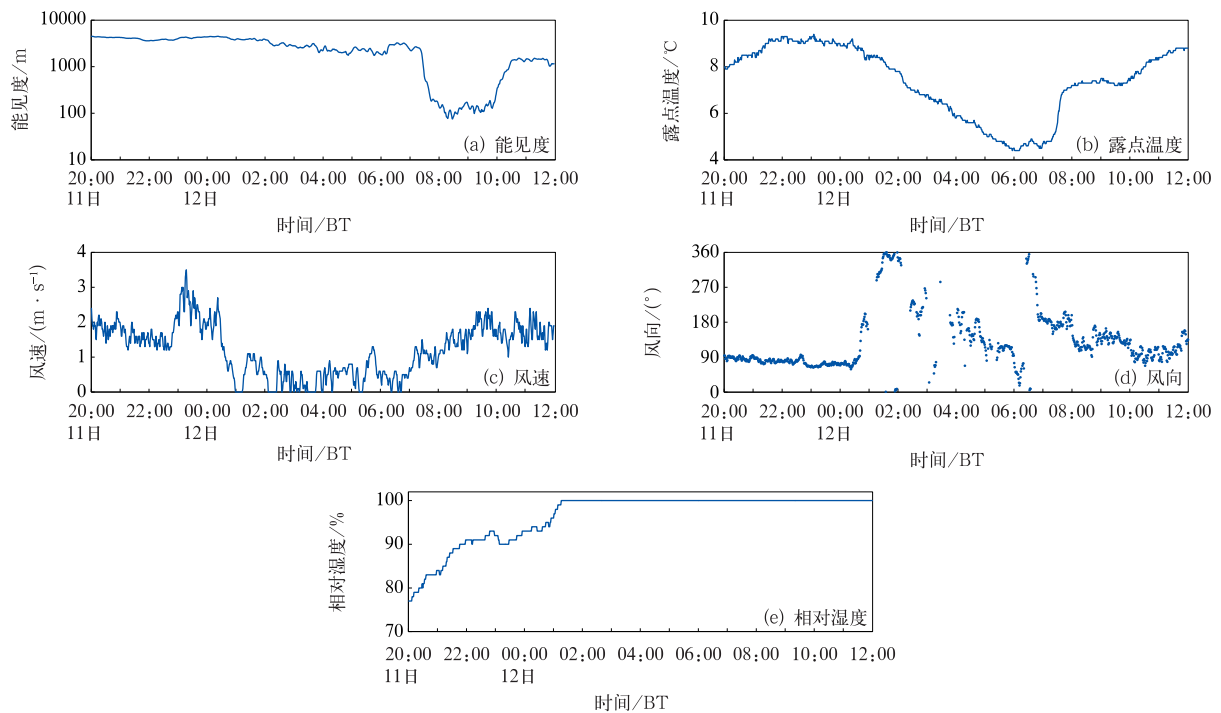


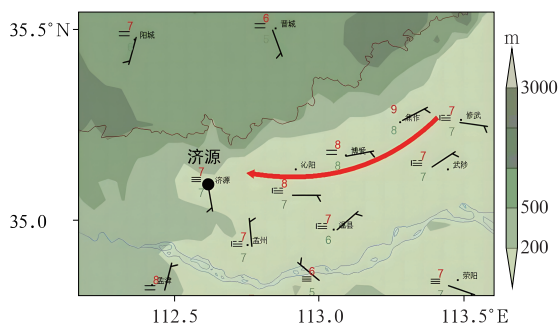
图 12 2021 年 3 月 11—12 日济源站各气象要素随时间的变化

Fig. 12 Temporal evolution of different meteorological elements at Jiyuan Station from 11 to 12 March 2021

以东北风为主。12 日 06:00—07:00, 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 1400 m 下降至 100 m, 在东北风的作用下暖湿平流向济源站输送, 07:00—07:44 济源站露点温度从 4.7°C 迅速上升到 7.0°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。

3.5 两类爆发型站点的成因分析

由上可见, 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 3 月 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(图 13), 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, 这与黄继雄等(2011)的研究成果是一致的。



注: 红色数字: 气温, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 绿色数字: 露点温度, 单位: $^{\circ}\text{C}$; 风羽: 风场; = 轻雾; == 雾, 过去 1 小时内变浓, 天空可辨; === 雾, 过去 1 小时内无变化, 天空不可辨; 绿色阴影: 海拔; 红色长箭头: 流线。

图 13 2021 年 3 月 12 日 08:00

济源站地面天气图

Fig. 13 Surface synoptic chart at Jiyuan Station at 08:00 BT 12 March 2021

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, 这次强浓雾过程是在高空 500 hPa 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约为 3.2 h, 最长约为 7.7 h; 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, 被称为跳跃爆发型; 第二类是直接迅速爆发形成强浓雾并维持, 被称为直接爆发型。

(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: 在跳跃爆发型中, 风会造成一定的湍流扩散, 使得能见度剧烈波动; 而在直接爆发型中, 在风的作用下暖平流输送, 有利于强浓雾的发展和维持。

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, 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, Zhang L, 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 年末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, Jiang 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, 45(4):427-443(in Chinese).
- 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, 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).
- 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).
- 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 D 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:China Meteorological Press (in Chinese).
- 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.
- 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.

(本文责编:王蕾 何晓欢)