

张曦,沈姣姣,侯柯然,等. G30 连霍高速公路陕西段雾的特征及成因分析[J]. 陕西气象, 2025(1): 25-33.

文章编号: 1006-4354(2025)01-0025-09

# G30 连霍高速公路陕西段雾的特征及成因分析

张曦<sup>1,2</sup>, 沈姣姣<sup>1,2</sup>, 侯柯然<sup>3</sup>, 张宏芳<sup>1,2</sup>, 周冰婵<sup>1</sup>

(1. 陕西省气象服务中心, 西安 710014;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室, 西安 710016;

3. 榆林市气象局, 陕西榆林 719000)

**摘要:** 利用 2019 年 11 月 30 日—2021 年 12 月 31 日 G30 连霍高速公路陕西段沿线交通气象观测站逐时资料、MICAPS 实况资料和 2020 年 1 月 9—11 日欧洲中期天气预报中心 ERA5 逐小时再分析数据, 对高速公路沿线持续时间排名前 5 的典型雾的特征和成因进行了分析。结果表明: 根据影响雾形成的地面系统可把雾分为 3 类: 低压槽型、冷锋型和东路冷空气型。逆温是雾形成的重要背景条件之一。当平均气温  $-0.4 \sim 2.9$  °C、平均风速不超过 1 m/s、盛行风为偏东风以及相对湿度超过 90% 时, 极易发生雾。冬季傍晚和早晨容易起雾, 武功—杨凌—常兴路段、坪头段容易发生强浓雾和特强浓雾, 为重点服务路段。5 次典型雾的最强雾过程中, 来自偏东方向海面源源不断的水汽输送以及整个雾过程的水汽辐合是此次雾生成和长时间维持的重要水汽条件。近地层弱风速有利于雾的形成和发展; 近地层冷平流造成气温和路面温度下降, 配合东南暖湿气流, 有利于雾的生成; 雾区低层弱冷流的入侵, 是雾体迅速增强的一个促进因子。

**关键词:** 连霍高速公路; 雾; 特征; 成因

**中图分类号:** P426

**文献标识码:** A

大雾天气严重影响交通安全。据统计, 近年来在高速公路上出现的重大伤亡交通事故中, 三分之一左右与大雾有关<sup>[1]</sup>。在全球气候变暖的背景下, 极端天气事件的频发导致重特大交通事故呈现上升趋势<sup>[2-3]</sup>。2020 年 11 月 24 日, G65 包茂高速陕西段关庄立交桥面因团雾发生三起交通事故, 造成 4 人死亡、6 人受伤, 对人民群众生命和财产造成了巨大的损失。早在 1996 年, 李子华率先在沪宁高速公路进行雾的观测和研究<sup>[4]</sup>, 此后, 全国陆续有学者开始了高速公路雾的研究, 揭示出雾不仅具有明显的地域差异, 而且具有明显的年、季、日变化特征<sup>[5-6]</sup>。关于雾的宏微观结构特征方面, 朱世珍等<sup>[7]</sup>指出地面和 20 m 两个高度

雾过程均以核化、凝结增长为主, 在地面雾中碰并也起了重要作用。吴兑等<sup>[8]</sup>指出南岭大瑶山高速公路雾是典型的平流雾和上坡雾, 其特点是浓雾持续时间长、能见度极其恶劣、团块结构明显、雾滴尺度大、浓度不高、含水量较大、雾层内的湍流扩散能力比晴空区强。形成雾的天气原因复杂, 往往受到特定的地理条件、特殊的大气背景、水汽输送条件以及大气边界层多种热力和动力因子的综合影响<sup>[9-10]</sup>。在雾生消机理研究的基础上, 赵娜等<sup>[11]</sup>归纳得出高速公路沿线浓雾和强浓雾天气雾生雾消的预报指标。曲晓黎等<sup>[12]</sup>初步建立了高速公路大雾预警模型。

陕西省高速公路发展迅猛, 截至 2022 年底,

**收稿日期:** 2024-01-30

**作者简介:** 张曦(1989—), 女, 汉族, 陕西榆林人, 硕士, 高工, 从事气象服务与应用气象研究。

**通信作者:** 沈姣姣(1986—), 女, 汉族, 山西运城人, 博士, 高工, 从事气象服务与应用气象研究。

**基金项目:** 秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2024Y-12); 陕西省自然科学基金基础研究计划一般项目(2021JQ-964)

全省公路里程突破 18 万 km, 高速公路通车里程突破 6 600 km, 但随之带来的交通安全问题日益凸显。针对陕西省雾的研究已取得诸多成果<sup>[13-15]</sup>, 以往所用分析资料多来自气象台站资料, 由于雾具有强的局地性, 常规台站难以及时捕捉到高速公路沿线雾的发生。2019 年, 陕西省气象局在 G30 连霍高速公路布设了 13 套交通气象观测站, 利用高速公路沿线交通站数据、MICAPS 实况资料、欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料, 分析雾的特征和成因, 旨在为提高陕西省高速公路雾的预报预警提供技术支撑。

## 1 资料来源

所用资料为: (1) 2019 年 11 月 30 日—2021 年 12 月 31 日 (北京时, 下同) G30 连霍高速公路陕西段沿线交通气象观测站逐小时观测数据, 包括最小能见度、相对湿度、气温、路面温度、降水量、风速和风向等。选择资料完整性较好且错误和可疑数据少的 10 个站点的数据作为研究对象, 站点沿高速公路布设, 自东向西途经渭南 (临渭站)、咸阳 (兴平站、秦都站、武功站)、杨凌 (杨凌站)、宝鸡 (常兴站、眉县站、阳平站、陈仓站、坪头站)。(2) 2020 年 1 月 9—11 日的欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) ERA5 再分析资料, 含 1 000~500 hPa 共 16 层的温度场、比湿和风场数据, 时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。(3) 2019 年 11 月 30 日至 2021 年 12 月 31 日 MICAPS 实况资料。

在气象学中水平能见度小于 1 km 定义为雾。当相对湿度小于 90% 时, 雾难以形成<sup>[16]</sup>, 因此, 将 G30 连霍高速公路沿线交通站能见度低于

1 km 且两站及以上出现相对湿度大于 90% 称为典型雾。根据 2012 年 3 月 1 日我国开始实施的《雾的预报等级》, 以  $V$  表示能见度, 雾的等级划分分别为: 大雾 ( $500 \text{ m} \leq V < 1\,000 \text{ m}$ )、浓雾 ( $200 \text{ m} \leq V < 500 \text{ m}$ )、强浓雾 ( $50 \text{ m} \leq V < 200 \text{ m}$ ) 和特强浓雾 ( $V < 50 \text{ m}$ )。

## 2 G30 连霍高速公路典型雾特征分析

### 2.1 天气形势

根据 2019 年 11 月 30 日至 2021 年 12 月 31 日的 G30 连霍高速公路的交通气象站资料, 挑选所有雾个例中持续时间排名前 5 的典型雾进行分析。表 1 为 5 次典型雾的天气影响系统, 通过 MICAPS 实况资料分析, 雾的发生和维持与天气系统 (冷空气、切变线、低涡、高原槽) 关系密切。根据影响雾形成的地面系统, 把雾分为 3 类: 低压倒槽型、冷锋型和东路冷空气型。冷锋型雾过程, 多出现在锋面降雨后的高湿环境中, 地面水汽条件较好, 弱的低层风场使大量水汽积聚在近地面不易扩散, 为雾的形成提供了有利的水汽及层结条件; 低压倒槽型雾过程, 在低层至地面有弱辐合, 偏南气流为雾区提供水汽, 低层弱辐合有利于雾的稳定维持和发展; 东路冷空气型雾过程, 高层多受南支槽影响, 低层配合有切变线或低涡等辐合中心, 低层水汽输送条件较好, 近地面偏东气流带来回流冷空气触发雾的形成。此外, 关中地区南有秦岭, 北有黄土高原且关中平原地势较低, 通常风力较弱, 不利于水汽的扩散, 并且特殊地形易使近地面形成风场辐合, 使水汽充分凝结, 有利于雾的维持与发展。

表 1 2019-11-30—2021-12-31 G30 连霍高速公路典型雾的天气影响系统

日期	天气系统			
	500 hPa	700 hPa	850 hPa	地面
2019-12-21—23	偏西气流	偏南气流	暖式切变线	低压倒槽
2020-01-05—06	高原槽	冷式切变线	低涡北部	低压倒槽
2020-01-09—11	高原槽	暖式切变线	偏东风	冷锋
2020-01-15—18	西北气流	偏北气流	冷式切变线	冷锋
2020-01-24—26	南支槽	低涡	冷式切变线	东路冷空气

### 2.2 天气演变主要特征

表 2 给出了 5 次典型雾的气象特征, 其中起

雾和消散时间是以一次过程中所有交通站点雾最早出现和最晚消散时刻来表示。分析得出, 一天

中雾易形成于傍晚或早晨,日出前后或中午消散。雾的持续时间变化很大,最短 26 h,最长达 68 h。雾的平均能见度低于 1 km,相对湿度大于 90%,其中武功—杨凌—常兴段、坪头段容易出现能见度小于 200 m 的强浓雾,常兴段出现了能见度小于 50 m 的特强浓雾。雾过程中平均气温  $-0.4 \sim 2.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低气温  $-4.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高气温  $6.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;平均风速  $0.8 \sim 1.0 \text{ m/s}$ ,最大风速为  $3.5 \text{ m/s}$ 。除 2019 年 12 月 21—23 日过程盛行风向为西北偏北

风,其余盛行风向为东北偏东或东南偏东风,统计 5 次雾过程中所有风向得出盛行风向为偏东风(图 1)。此外,4 次雾过程中有降水,雨强均在  $0.1 \text{ mm/h}$  以内,如果雨强过大,雨滴会对雾滴产生清除作用<sup>[17]</sup>,弱降水则为雾的发生提供了重要的水汽条件。2019 年 12 月 21—23 日过程无降水,起雾时间发生在夜晚,一方面辐射降温促进水汽饱和,另一方面起雾时地面主要由偏东风或偏南风控制,有利于水汽输送。

表 2 2019-11-30—2021-12-31 G30 连霍高速公路典型雾的气象特征

日期	地面主导 风向	起雾—消散 时间	持续时 间/h	最低能 见度/m	平均 气温	平均 风速	平均相对 湿度/%	过程降水 量/mm
2019-12-21—23	偏北风	20:00—11:00	39	262	-0.4	0.8	90	0.0
2020-01-05—06	偏东风	07:00—09:00	26	159	2.9	1.0	96	0.3
2020-01-09—11	偏东风	07:00—13:00	54	36	1.9	0.8	92	0.4
2020-01-15—18	偏东风	12:00—08:00	68	80	0.8	1.0	90	0.5
2020-01-24—26	偏东风	18:00—09:00	39	108	2.9	0.9	92	1.1

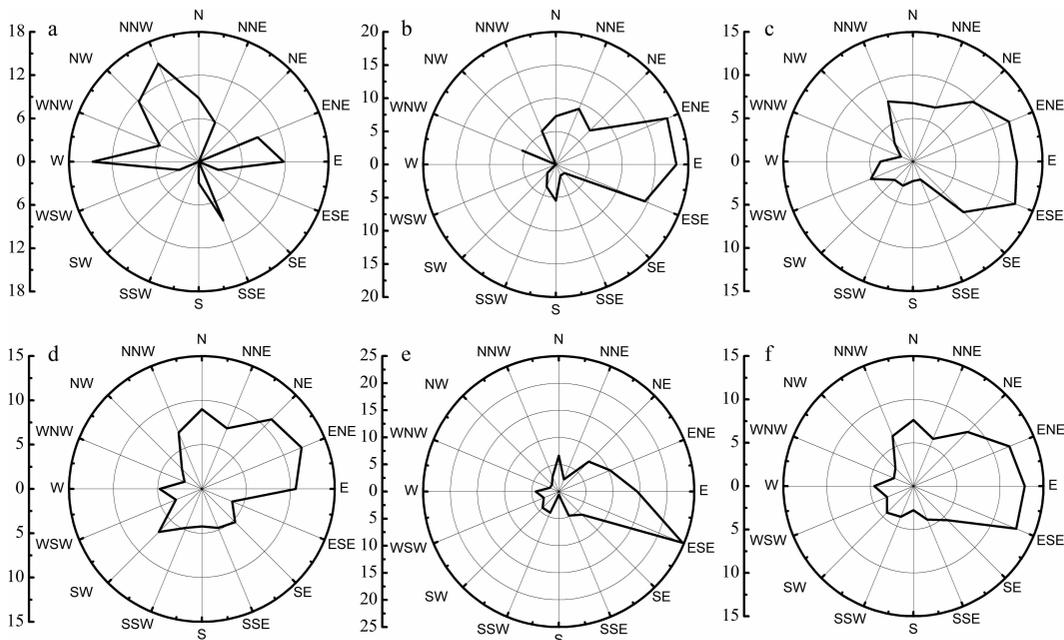


图 1 G30 连霍高速公路 2019-12-21—23(a)、2020-01-05—06(b)、2020-01-09—11(c)、2020-01-15—18(d)、2020-01-24—26(e)、5 次典型雾(f)风向频率(%)

### 2.3 大气层结条件

雾顶高度通常不超过  $1\ 500 \text{ m}$ <sup>[18]</sup>,因此统计分析底高低于  $1\ 500 \text{ m}$ ( $850 \text{ hPa}$ )的逆温。选择西安探空站 5 次雾发生前最近的 08 时资料,从温度廓线变化(图 2)可以看出,雾发生前均有逆温层

出现,除 2019 年 12 月 21 日出现双层逆温外,其余均为单层逆温。在正常情况下,大气中的气温会随着高度的增加而逐渐降低,逆温层结的出现使上层温度高于近地层,形成一个上暖下冷的结构,阻挡大气垂直交换,使近地层的水汽和气溶胶

粒子难以扩散,有利于雾的形成。分析雾前逆温可归为2种类型:一是逆温层底及地的逆温,即逆温从地面开始,如2019年12月21日,2020年1月4日、24日;二是悬浮逆温,即逆温层底不及地,从高空的某层开始,如2020年1月8日、15

日。从逆温层高度、厚度来看,逆温层的初始高度最低976 hPa,最高881 hPa;逆温层结束高度最低919 hPa,最高850 hPa;厚度集中在20~40 hPa,平均厚度为27 hPa。

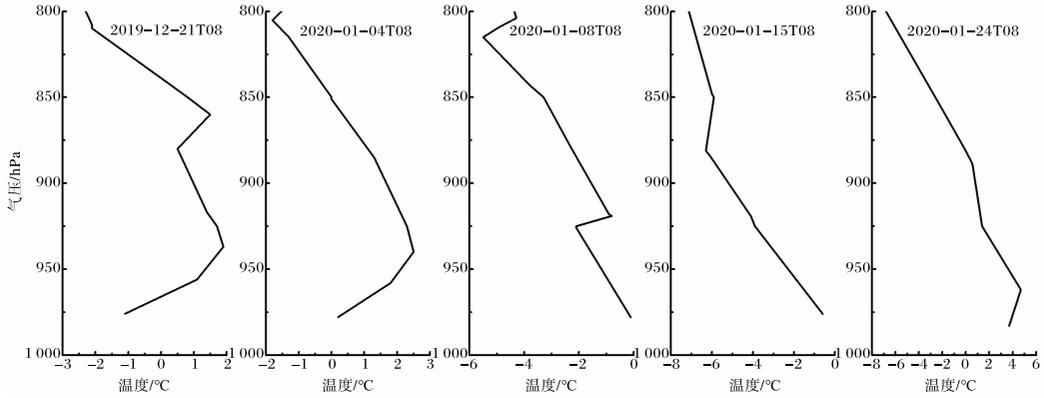


图2 2019-11-30—2021-12-31典型雾发生前西安探空站的温度廓线变化

### 3 一次典型雾的成因分析

#### 3.1 天气概况

挑选5次典型雾中最低能见度最小的一次过程进行个例分析。2020年1月9—11日陕西关中地区出现了大范围雾过程,G30连霍高速公路兴平、武功、杨凌、常兴、眉县、阳平、坪头段等多处

路段出现能见度低于500 m的浓雾天气,其中常兴段出现能见度小于50 m的特强浓雾。

图3为常兴站2020年1月9—11日天气要素演变情况。受低层偏东气流影响,8日夜间关中地区水汽开始增加,能见度降低。9日07时,兴平—武功—杨凌段出现雾,雾区自东向西扩大,

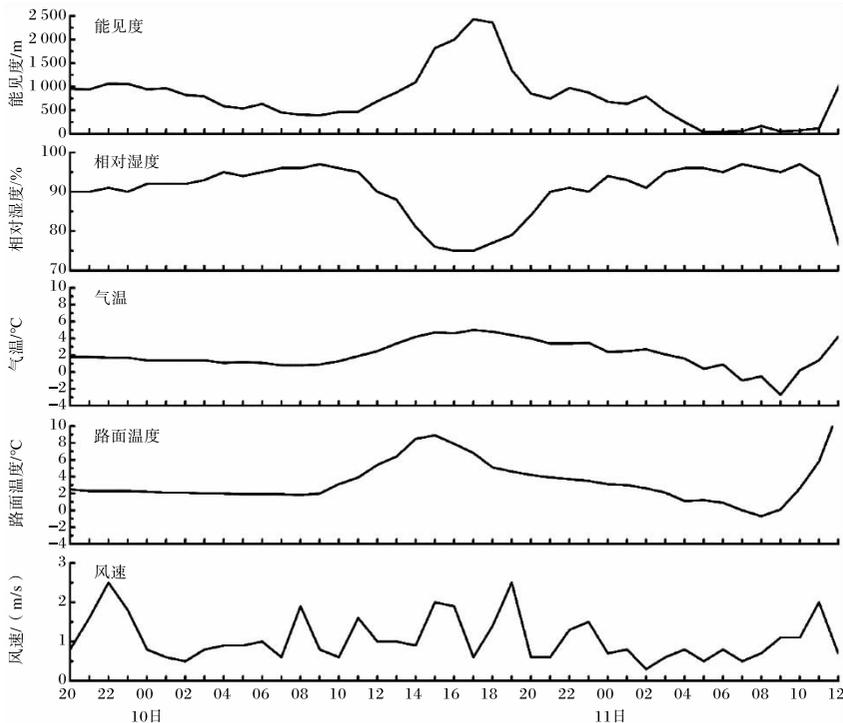


图3 G30连霍高速公路常兴站2020-01-09—11天气要素变化

20 时常兴—眉县—阳平段起雾,10 日 01 时陈仓—坪头段出现雾。9 日 07 时—10 日 12 时,武功—杨凌路段浓雾和强浓雾持续长达 30 h。10 日午后气温和路面温度快速上升,最高气温和路面温度达 4.1、7.6 °C,较前一日分别升高 2.1、3.4 °C,风速增大,相对湿度快速降低,能见度好转。10 日夜间到 11 日早晨为此次雾过程最强盛时段,气温、路面温度和能见度持续下降,相对湿度维持在 90% 以上。常兴段在 10 日 19—20 时能见度从 1 352 m 下降至 854 m;11 日 04—05 时,1 h 能见度从 249 m 下降至 36 m,雾区的雾迅速增强;05—11 时,强浓雾维持 6 h,其中 05—07 时平均能见度不足 50 m。

分析此次雾的天气形势(图略),7 日蒙古有冷空气分裂南下,夜间影响到关中西部,四川盆地受低压控制,关中西部有倒槽,低层有冷平流侵入地面暖区。受锋后冷平流影响,低层转为偏北风,高速公路路面温度迅速降低,常兴站 8 日 14 时地表 24 h 变温为 13 °C,降温有利于空气达到饱和凝结,有利于逆温形成。9 日冷锋南压,地面吹东北偏东和东南偏东风,不仅使雾区近地层温度降低,而且将海域水汽送至雾区,同时偏南风也为关

中地区源源不断地输送水汽,加之大气层结稳定,有利于雾的生成。10 日,500 hPa 高原槽东移,关中位于槽前西南气流中,低层为一致的偏东气流,并且有明显的切变线配合,有利于水汽的输送与聚集。整个雾过程期间有冷空气持续补充南下,同时偏东方向良好的水汽输送条件配合稳定的层结,有利于大雾的形成和维持。11 日午后,雾过程结束。

### 3.2 水汽条件

采用  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  ERA5 的 925 hPa 再分析资料分析雾的比湿、水汽通量和水汽通量散度的演变情况,从而得出雾过程中水汽含量、输送和聚散特征。从各时刻比湿分布(图 4)来看,9 日 08 时,比湿大值中心出现在 G30 连霍高速公路东部路段,已达到 3.4 g/kg,空气中水汽含量充沛,兴平—武功—杨凌段已起雾。9 日 15 时比湿增长到 3.6 g/kg,雾区维持。9 日 20 时,高比湿范围扩大,全路段保持在 3.4 g/kg,常兴—眉县—阳平段起雾。10 日白天关中出現弱降水,比湿维持在 3.2~3.4 g/kg。11 日日出后比湿下降为 2.8~3 g/kg 左右,低能见度维持。11 日午后气温快速上升,能见度上升,雾过程结束。

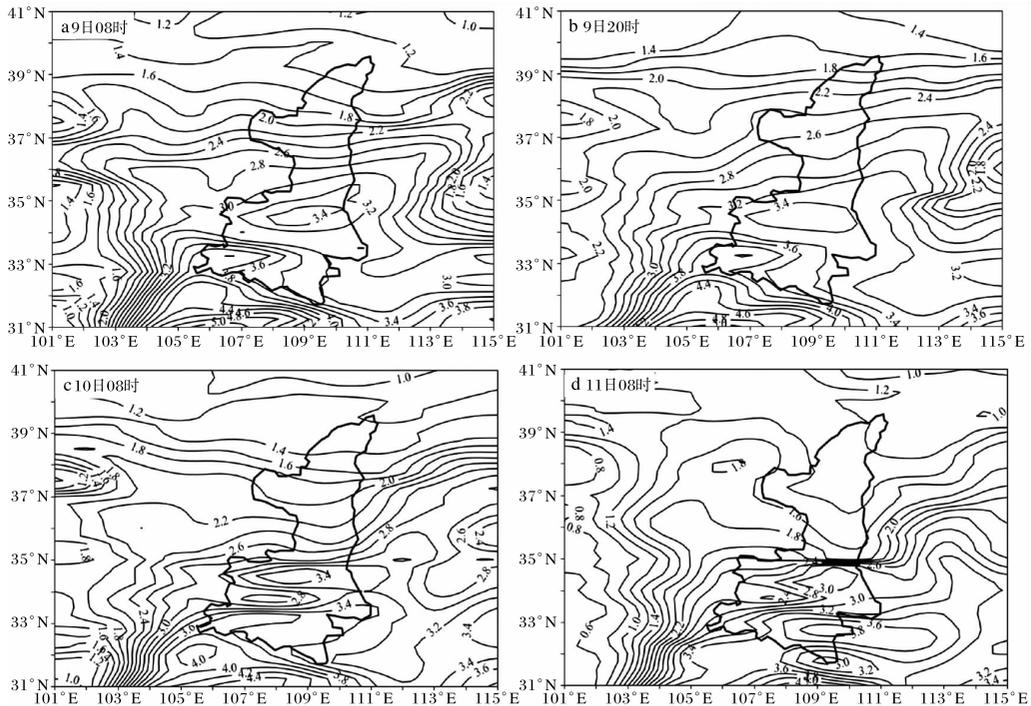


图 4 2020-01-09—11 雾过程 925 hPa 高度各时刻比湿分布(单位为 g/kg;审图号为 GS(2019)1719 号)

从水汽通量和水汽通量散度分布(图5)来看,9日08时,在雾的形成阶段,偏东气流将海域的水汽源源不断地输送至陕西中部,高速公路路段处于水汽通量大值带里,达 $2\text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ ,雾区迅速发展。9日14时,水汽通量值下降为 $1\text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 。9日夜间到10日夜间,路段有来自东面和东南方向源源不断的水汽输送,水汽通量维持在 $0.4\sim 1\text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 。11日14时,水汽通量大值区逐渐向东撤出。从水汽通量散度来看,9日08时,关中 $925\text{ hPa}$ 水汽通量

散度都为 $-4\times 10^{-6}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ ,14—20时高速公路上空出现弱的辐散,最大为 $2\times 10^{-6}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 。9日夜间开始上空水汽辐合逐渐加强,最强出现在10日19时,达 $-10\times 10^{-6}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 。11日14时,高速公路上空水汽呈强辐散,达 $14\times 10^{-6}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ ,雾过程结束。从水汽辐合辐散在雾过程中表现来看,低空水汽辐合促使雾的形成、发展以及长时间的维持,低空水汽辐散则加快了雾的消亡。整个雾过程的水汽辐合是雾长时间维持的重要条件。

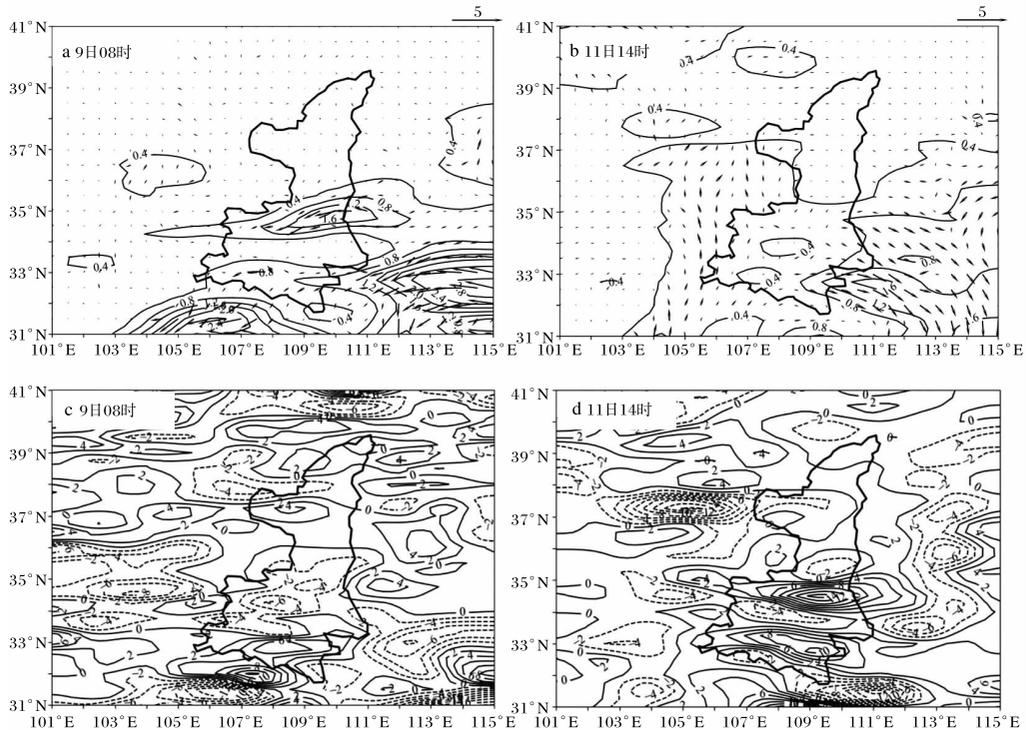


图5 2020-01-09—11雾过程 $925\text{ hPa}$ 高度各时刻水汽通量(a,b;单位为 $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ )和水汽通量散度(c,d;单位为 $10^{-6}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ )分布(审图号为GS(2019)1719号)

图6为2020年1月9—11日 $925\text{ hPa}$ 流线图。从流场图看,9日08时,陕西关中地区 $925\text{ hPa}$ 位于入海高压底部,受偏东气流控制,从海面带来充沛水汽。 $1000\text{ hPa}$ 气流来自山东半岛以南,经黄海海面,在移动的过程中携带大量水汽向西南方向移动,经华北进入陕西关中(图略)。9日20时,有冷空气影响陕西北部地区,关中地区出现明显西南风与西北风的切变。关中地区水汽一部分来自本地水汽的辐合抬升,一部分水汽仍来自偏东方向海域的输送。10日, $925\text{ hPa}$ 关

中受偏西或东南气流影响,近地面维持充足水汽。11日上午 $925\text{ hPa}$ 主要受偏南气流影响,维持地面水汽。来自中国东部沿海方向源源不断输送的水汽保证了这次雾的发生和长时间发展维持。

### 3.3 动力和热力条件

从平均风速廓线来看(图略),整个雾过程期间 $925\text{ hPa}$ 以下平均风速在 $2\text{ m/s}$ 以下,在雾的发展加强阶段平均风速低于 $1\text{ m/s}$ ,说明微风有利于雾的生成和发展。计算逐时近地层风速与能见度的相关系数,结果为 $0.36$ ,通过 $0.05$ 的显著

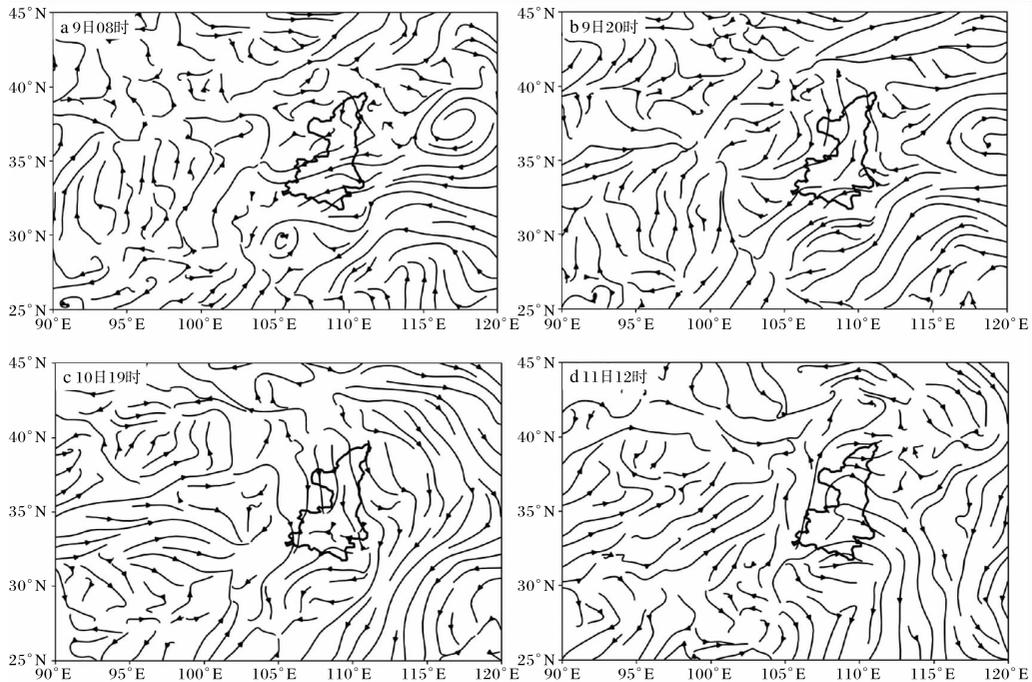


图6 2020-01-09—11 雾过程 925 hPa 流线图(审图号为GS(2019)1719号)

性检验,表明雾区内的风速可以通过水平输送对雾天气产生影响。当雾区内的风速偏大时,雾向区域外的输送偏强,不利于雾的维持和发展,导致能见度变大;反之,偏小的风速有利于雾的持续和发展,使得能见度变小。

图7为温度平流沿 $34.25^{\circ}\text{N}$ 的垂直剖面。雾初期,9日08—11时从地面到高空975 hPa,在眉县以东路段存在冷平流。9日18时,从地面到高空有冷平流贯穿整个路段,西安上空975 hPa附近有强度为 $-0.06 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的冷平流中心。10日凌晨,冷平流自西向东减弱消失,10日夜间开始冷平流不断自西向东发展加强。11日03时,宝鸡渭滨区近地面出现强度 $-0.48 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 冷平流,05时中心移至西安上空975 hPa,强度为 $-0.56 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ,地面杨凌—常兴段降温幅度较大,24 h变温达 $-3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最低气温降至 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。值得注意的是,05时开始950~925 hPa出现逆温层,逆温层一直持续到09时,此阶段正好对应着此次雾过程的最强盛时期,常兴段最低能见度仅36 m。因此,雾过程中近地层弱冷空气的入侵,利于逆温层出现,使得水汽抑制在低层不易向上扩散,加之日出后湍流混合作用加强,促进凝结核化、凝结和碰并过程加快发生,雾体迅速

增长。

#### 4 结论

(1)雾的发生和维持与冷空气、切变线、低涡、高原槽等天气系统相联系,影响G30连霍高速公路雾形成的地面系统主要为低压倒槽、冷锋和东路冷空气。逆温层是雾形成的重要条件之一,雾过程中平均气温 $-0.4 \sim 2.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均风速小于 $1 \text{ m/s}$ 、盛行风为偏东风以及相对湿度超过90%,对高速公路沿线的大雾预报具有较好的指示意义。冬季的傍晚和早晨容易起雾,为交通气象服务中的重点关注时段,武功—杨凌—常兴段、坪头段容易发生浓雾和强浓雾,为重点服务路段。

(2)来自中国东部沿海源源不断输送的水汽保证了2020年1月9—11日雾过程雾的发生和长时间发展维持,低空水汽辐合对应着雾的形成、维持和发展,低空水汽辐散则加快了雾的消亡。近地层弱风速有利于层结稳定,有利于雾的发生和发展。冷平流对雾的发生、维持、发展起到重要作用,在雾发生前,锋后冷平流造成气温的急剧下降,有利于近地层水汽饱和及逆温生成;雾区弱冷空气入侵加之日出后湍流混合作用,可使雾区水汽过饱和,促进凝结核化、凝结和碰并过程。

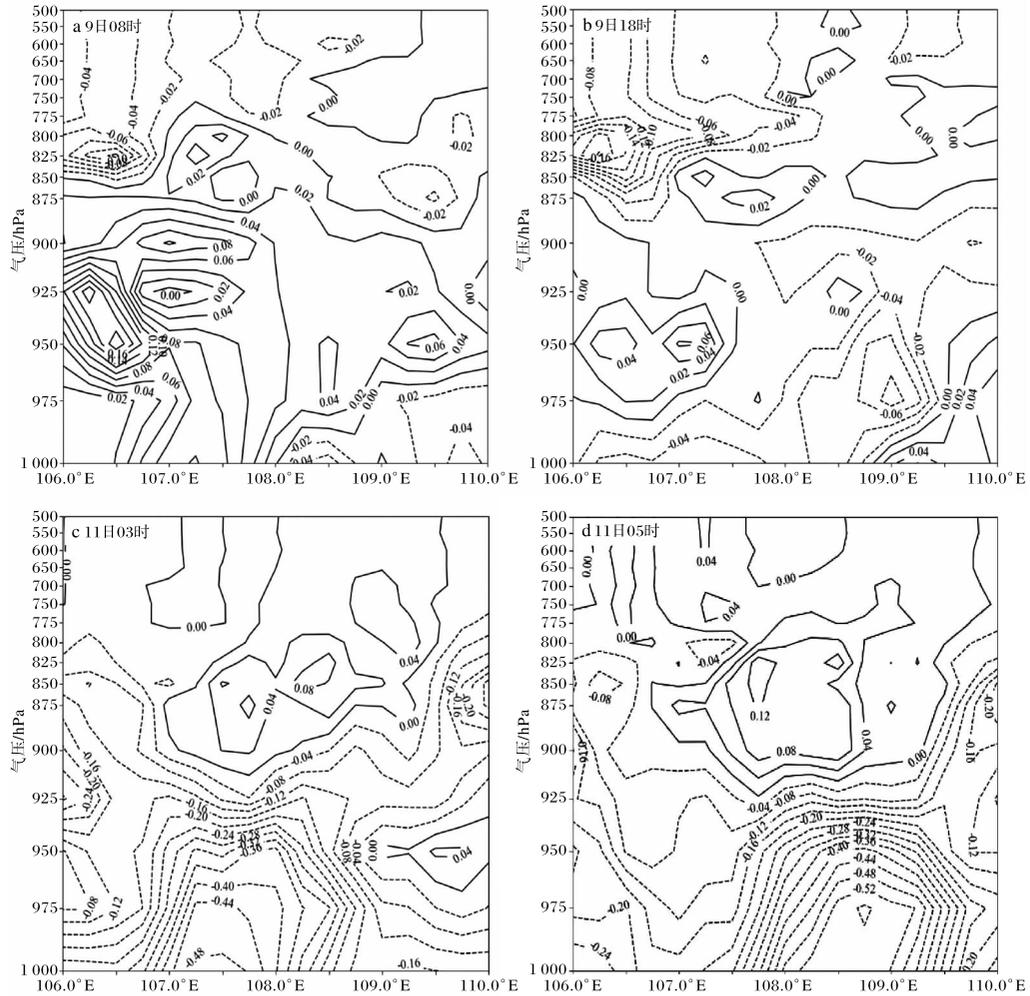


图7 2020-01-09—11 温度平流剖面图

#### 参考文献:

- [1] 田华, 郜婧婧, 李嵩恂, 等. 江苏高速公路局地团雾气象特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(6): 39-46.
- [2] 张宏芳, 梁佳, 沈姣姣, 等. 西安市气象条件对交通事故的影响分析[J]. 陕西气象, 2021(6): 47-54.
- [3] 宋建洋, 李怡, 张恒通, 等. 恶劣天气对高速公路交通阻断影响分析[J]. 公路, 2021, 66(6): 248-256.
- [4] 李子华. 中国近40年来雾的研究[J]. 气象学报, 2001, 59(5): 616-624.
- [5] 何金梅, 王冬梅, 李晓霞. 甘肃省高等级公路沿线大雾天气气候特征及其预报服务[J]. 干旱气象, 2006, 24(1): 48-52.
- [6] 周慧, 解以扬, 高鹰. 京津塘高速公路大雾天气气候特征及其对交通的影响[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 48-53.
- [7] 朱世珍, 张昭艺, 吴诗晓, 等. 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, 2023, 49(3): 327-339.
- [8] 吴兑, 邓雪娇, 毛节泰, 等. 南岭大瑶山高速公路浓雾的宏观结构及能见度研究[J]. 气象学报, 2007, 65(3): 406-415.
- [9] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(1): 27-36.
- [10] 焦圣明, 朱承瑛, 朱毓颖, 等. 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, 2016, 74(2): 200-212.
- [11] 赵娜, 孟宪罗, 马翠平, 等. 基于高速公路气象监测数据分析的浓雾预报指标[J]. 气象科技, 2015, 43(1): 145-150.
- [12] 曲晓黎, 孟凯, 赵娜, 等. 恶劣天气对河北高速公路

- 路通行影响分析[J]. 气象科技, 2016, 44(3): 447-452.
- [13] 张宏芳,张科翔,潘留杰,等. 近 51 年陕西雾时空变化及大气环流特征[J]. 气象科技, 2013, 41(4): 703-712.
- [14] 蒋伊蓉. 榆林市辐射型浓雾天气成因及维持机制个例分析[J]. 陕西气象, 2021(3):15-20.
- [15] 蒋伊蓉,黄少妮,郭云云,等. 榆林市雾的变化特征及地面气象条件分析[J]. 陕西气象, 2024(2): 16-22.
- [16] 吴兑,吴晓京,李菲,等. 1951—2005 年中国大陆霾的时空变化[J]. 气象学报, 2010, 68(5): 680-688.
- [17] 李子华,杨军,石春娥,等. 地区性浓雾物理[M], 北京:气象出版社, 2008:45-47.
- [18] 郭丽君,郭学良. 北京 2009—2013 年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J]. 大气科学, 2016, 40(2):296-310.