

# 2021年12月14~16日山东持续性大雾过程分析

田云菲

山东省淄博市气象局, 山东 淄博

收稿日期: 2024年7月1日; 录用日期: 2024年8月5日; 发布日期: 2024年8月23日

## 摘要

利用常规观测资料、NCEP/NCAR再分析资料, 分析2021年12月14~16日山东一次持续性大雾过程的天气形势、气象要素特征以及生消机制等。结果表明: 本次过程发生在纬向环流背景下, 大雾经历了平流辐射雾-辐射雾-锋面雾的演变阶段。在淄博站大雾维持期间, 地面相对湿度多在90%以上, 风速在1 m/s左右。前期低层西南暖湿气流和16日早晨近地层弱冷空气前沿的水汽辐合为大雾的形成和维持提供了良好的水汽条件。此次过程具有较明显的辐射雾特征, 夜间地面辐射冷却对大雾的形成和加强起了重要作用。逆温强度的增强有利于近地面水汽积聚和大雾加强。两次低层“干性”短波槽活动在大雾形成、发展的不同阶段都起到重要作用。冷空气的影响使低层水汽减少, 近地逆温层被破坏, 大雾消散。

## 关键词

持续性大雾, 平流辐射雾, 水汽输送, 逆温

# Analysis of a Sustained Fog Process in Shandong Province on December 14 to 16, 2021

Yunfei Tian

Zibo Meteorological Bureau, Zibo Shandong

Received: Jul. 1<sup>st</sup>, 2024; accepted: Aug. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 23<sup>rd</sup>, 2024

## Abstract

Based on the conventional observation data and NCEP/NCAR reanalysis data, the weather situation, meteorological element characteristics, and formation and dissipation mechanism of a sustained fog process that occurred in Shandong Province from 14 to 16 December 2021 are analyzed. The results show that the fog occurred under the zonal circulation background, and the fog expe-

rienced the evolution stage of advective radiation fog-radiation fog-frontal fog. During the maintenance of fog at Zibo Station, the surface relative humidity is more than 90%, and the wind speed is about 1 m/s. The southwest warm and wet flow at low layers in the early phase and the water vapor convergence in the front of the weak cold air near the surface in the morning of 16 December 2021 provided good water vapor conditions for the formation and maintenance of the fog. This process has obvious characteristics of radiation fog, and the ground radiation cooling at night plays an important role in the formation and enhancement of fog. The enhancement of the intensity of the temperature inversion is conducive to the accumulation of water vapor near the surface and the enhancement of the intensity of fog. The influence of cold air reduces water vapor at lower layers, destroys the temperature inversion layer near the surface, and dissipates the fog.

## Keywords

Sustained Fog, Advection-Radiation Fog, Water Vapor Transfer, Temperature Inversion

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着社会经济的快速发展,大雾作为一种灾害性天气受到越来越广泛的关注。大雾天气对交通运输、工农业生产、人们的日常生活带来了较大影响。近年来,气象工作者从天气形势、水汽条件、冷却条件、层结条件等方面对连续性大雾进行了诊断分析和预报研究。李江波等[1]通过分析华北平原9次持续性大雾过程,给出不同环流背景下的大雾生消机制和不同地面形势下的雾区分布特点。赵玉广等[2]在对华北平原3次连续性大雾的分析中归纳了华北平原周围的地形环境对大雾的影响。赵玉广等[2]和孙颖等[3]通过对持续性大雾的诊断分析,归纳了高层湿度较小的“干性”短波槽在持续性大雾阶段性变化中的作用。吕博等[4]对山东中西部一次持续性大雾过程在不同演变阶段的湿层和逆温层特征进行了分析归纳。

2021年12月14~16日,山东出现了一次持续性大雾过程。此次过程影响范围广、强度大,山东多个高速入口因大雾天气临时封闭或间隔放行,并且空气质量下降,给社会经济、公众出行和身体健康都带来较大影响。本文利用常规观测资料、NCEP/NCAR水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的6h再分析资料,分析了此次过程的天气形势、气象要素特征以及生消机制,以期今后此类大雾过程的预报提供参考。

## 2. 天气实况

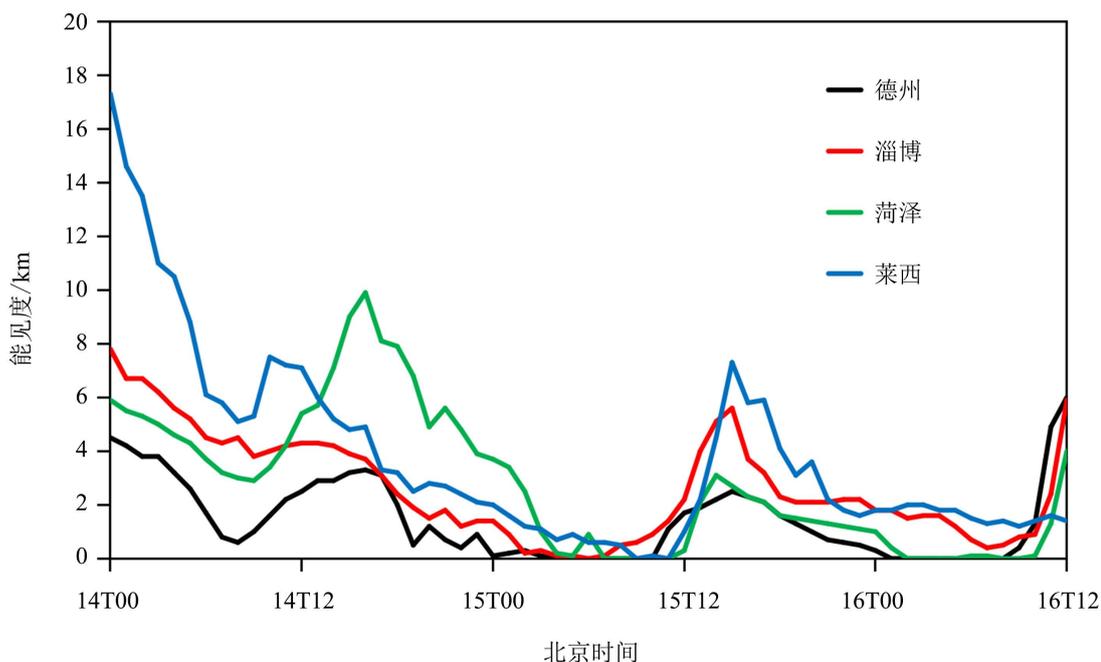
12月13日夜間,山东能见度逐渐下降。到14日08时,山东大部地区出现轻雾,鲁西北局部出现能见度低于1 km的大雾。14日白天,山东大部地区由轻雾转为霾天气,傍晚全省大部地区转为轻雾天气,夜间大雾范围由鲁西北向东南方向推进。15日08时,山东共有75站出现大雾,其中强浓雾45站。15日白天能见度上升,但全省大部地区能见度仍然维持在10 km以下,转为霾或轻雾天气。15日夜间山东大雾自西向东逐渐推进,到16日08时,全省大雾有59站,其中强浓雾26站。16日上午能见度逐渐上升,山东大部地区转为轻雾或霾天气。受冷空气影响,16日中午至下午自鲁西北开始全省大部地区能见度升至10 km以上,本次大雾过程结束。

本次大雾过程期间山东123个大监站不同等级雾的站数如表1所示。此次过程影响到山东大部地区,且大雾强度大,在15日强度最强。

**Table 1.** Number of stations affected by the fog in Shandong Province from 08:00 BST on 14 to 08:00 BST on 16 in December 2021**表 1.** 2021 年 12 月 14 日 08 时至 16 日 08 时山东省大雾站数

时间	轻雾 (1~10 km)	大雾 (<1 km)	浓雾 (<0.5 km)	强浓雾 (<0.2 km)	特强浓雾 (<0.05 km)
14 日 08 时	109	2	1	1	0
15 日 08 时	47	75	47	45	17
16 日 08 时	63	59	32	26	2

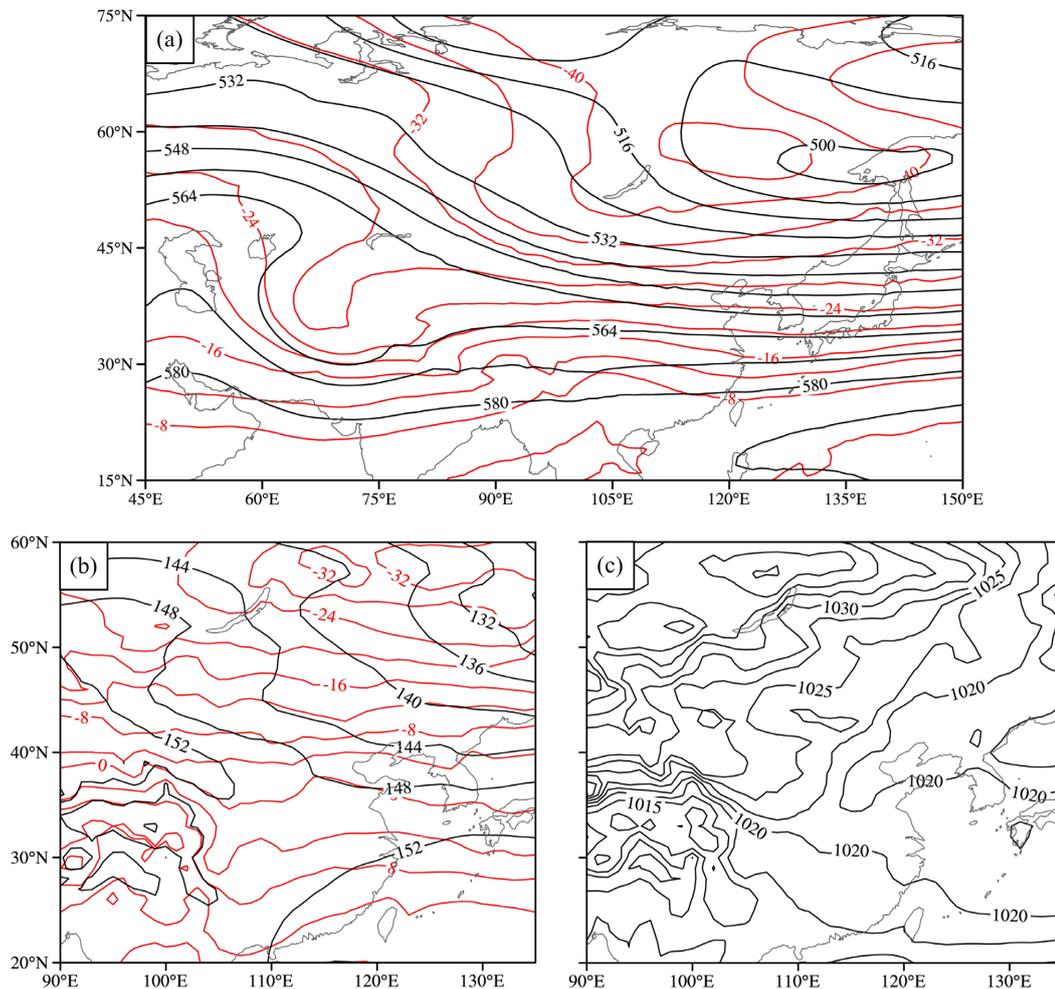
选取德州、淄博、菏泽、莱西分别作为鲁西北、鲁中、鲁南、半岛的代表站，给出大雾过程中 4 个代表站的能见度变化情况(图 1)。可见此次过程能见度日变化明显，尤其是 15~16 日，日出后能见度明显升高，体现出辐射雾的特征。大部分时段德州能见度最低，大雾最强。

**Figure 1.** Evolution of visibility at the 4 representative stations in Shandong Province from 14 to 16 in December 2021**图 1.** 2021 年 12 月 14~16 日山东 4 个代表站能见度的时间变化

### 3. 天气形势

#### 3.1. 环流形势特征

图 2 给出本次过程的平均环流形势场。500 hPa 平均高度场上，亚洲中高纬度为一槽一脊型，乌拉尔山附近为一高压脊，鄂霍次克海以西有一冷涡，冷涡后部有一槽。华北、华东地区为纬向偏西气流，山东附近温度平流较弱。副热带高压脊线位于 18°N 附近，位置较为稳定。850 hPa 平均高度场上，山东附近为西北偏西气流，河北南部到山东有一暖脊，低层暖脊的存在有利于低层逆温的形成。从平均海平面气压场可见，山东位于低压前部，山东附近等压线较稀疏，气压场较弱，在大雾过程期间山东以弱的偏南风为主，有利于近地层湿度的增大。



**Figure 2.** The 500 hPa (a), 850 hPa (b) mean geopotential height fields (black lines, unit: dagpm), mean temperature field (red lines, unit: °C) and mean surface pressure field (c), unit: hPa) from 08:00 BST on 14 to 08:00 BST on 16 in December 2021

**图 2.** 2021 年 12 月 14 日 08 时至 16 日 08 时(北京时,下同) 500 hPa (a)、850 hPa (b)平均位势高度场(黑线,单位:dagpm)和平均温度场(红线,单位: °C)以及平均海平面气压场(c),单位:hPa)

### 3.2. 大雾演变过程

13 日夜间, 500 hPa 上山东上空为纬向偏西气流, 850 hPa 和 925 hPa 上自河南到山东以西南气流为主, 有暖平流, 地面气压场山东附近为东高西低的形势, 山东以较弱的偏南风为主。14 日 08 时(北京时,下同), 850 hPa 和 925 hPa 山东附近均有暖脊, 有利于低层逆温层的形成和维持。13 日夜间山东上空多为无云或少云, 在低层暖湿平流和地面辐射冷却的共同作用下形成平流辐射雾。14 日白天, 随着气温升高, 能见度上升, 但 925 hPa 山东附近仍以西南气流为主, 在低层暖湿平流的作用下山东大部地区能见度维持在 10 km 以下。

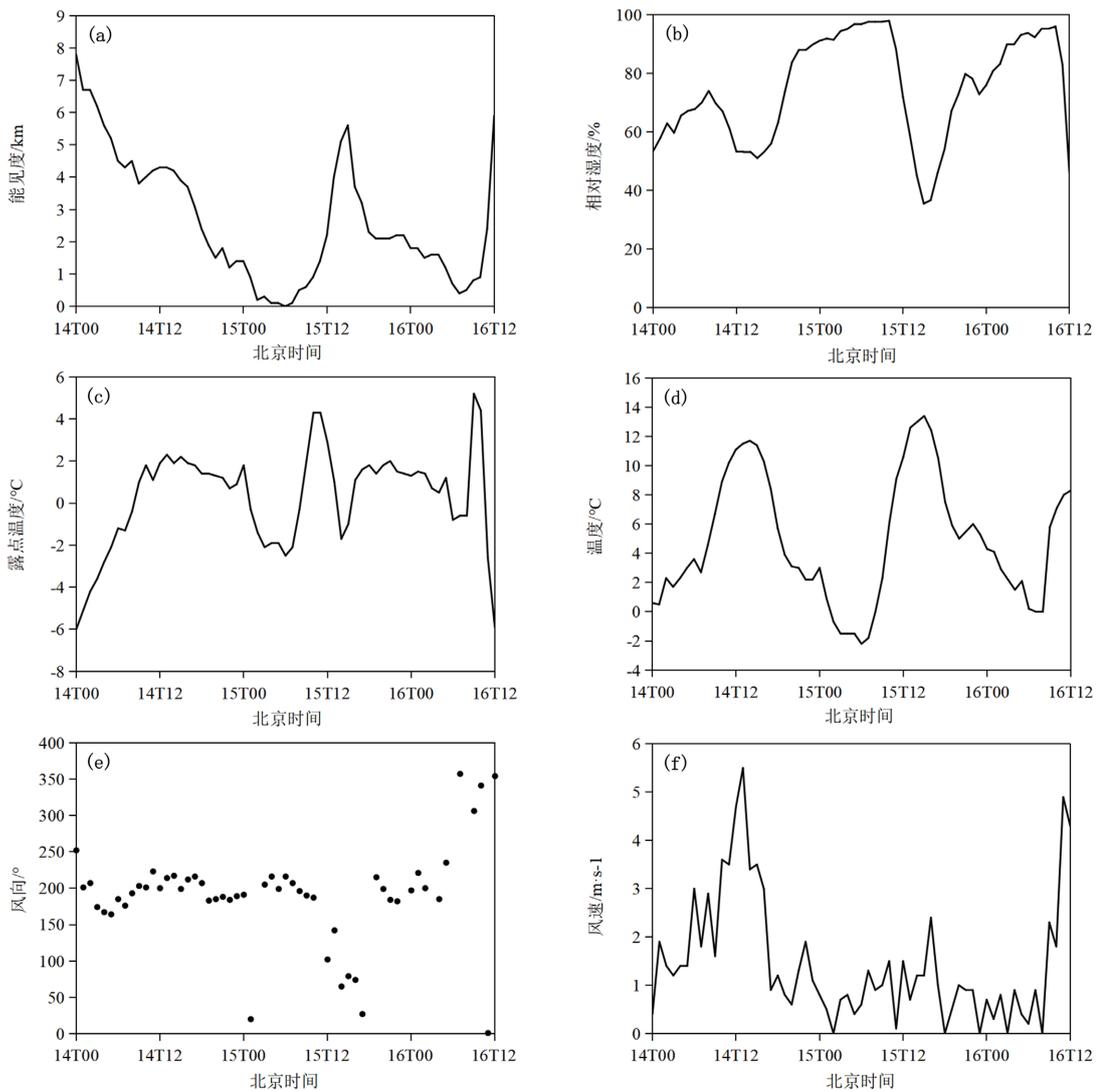
14 日夜间, 500 hPa 山东上空为偏西气流, 850 hPa 和 925 hPa 上山东上空短波槽移过后转为西北偏西气流, 地面上山东附近为鞍形场, 山东处于均压场中, 风向较乱, 大部地区风速在 0~2 m/s。15 日 08 时, 850 hPa 和 925 hPa 上河北南部到山东西部有暖脊, 山东上空 850 hPa 和 925 hPa 上温度平流较弱。14 日夜间山东大部地区无云, 在地面辐射冷却的作用下水汽凝结, 大雾以辐射雾为主。随着 15 日白天气温升高, 能见度上升, 山东大部转为霾或轻雾天气。

15 日夜间, 500 hPa 上冷涡后部横槽下摆, 引导冷空气南下, 冷平流使得地面上蒙古高压加强。15 日夜间山东上空多中高云, 夜间地面辐射冷却作用使水汽凝结, 能见度降低。16 日 08 时, 500 hPa 山东附近为偏西气流, 850 hPa 和 925 hPa 转为西北气流, 有较弱冷平流, 925 hPa 山东上空暖脊维持。地面上蒙古高压中心值达 1062.5 hPa, 冷锋到达河北南部, 山东位于冷锋前部, 等压线稀疏, 以较弱的偏北风为主, 山东中西部大部地区出现大雾天气, 为锋面雾[1]。16 日白天, 受冷空气影响, 山东偏北风风速增大, 大雾逐渐消散。

## 4. 气象要素特征

### 4.1. 地面气象要素特征

由图 1 可见, 淄博的能见度变化趋势与山东整体变化趋势较为接近, 因此以淄博站为代表, 分析本次过程的地面气象要素变化特征。图 3 给出 12 月 14~16 日淄博站地面气象要素的时间变化。



**Figure 3.** Evolution of visibility (a), relative humidity (b), dew point temperature (c), temperature (d), wind direction (e) and wind speed (f) at Zibo Station from 14 to 16 in December 2021

**图 3.** 2021 年 12 月 14~16 日淄博站能见度(a)、相对湿度(b)、露点温度(c)、温度(d)、风向(e)、风速(f)的时间变化

14日凌晨至早晨,淄博为偏南风,风速在2 m/s左右,在近地层暖湿平流的作用下,露点温度持续上升,相对湿度增大,14日早晨淄博能见度下降至4 km左右,出现轻雾。14日白天,随着气温逐渐升高,午后相对湿度降至50%左右,能见度略有上升,但仍然维持在5 km以下。

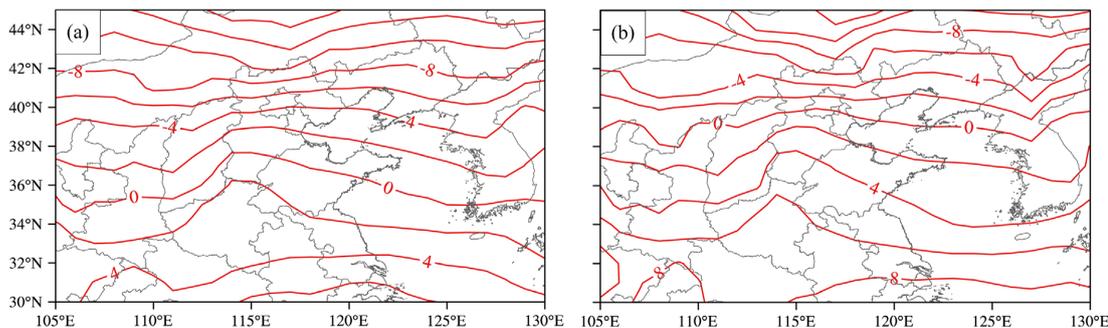
14日夜间,在地面辐射降温的作用下近地面层水汽凝结,相对湿度升高,能见度下降。15日01时淄博能见度降至1 km以下,此时淄博温度降至0.9℃,相对湿度升至91%。15日01时至10时淄博能见度维持在1 km以下,大雾持续约9 h,短时出现能见度在200 m以下的强浓雾。大雾维持期间淄博相对湿度多在90%以上,风速在1 m/s左右。适当的风速既能产生适度的垂直混合,将近地面层的水汽向上输送并且形成相对较厚的冷却层,又不会因垂直湍流混合过强使大雾消散[5]。15日白天,随着气温迅速升高,淄博相对湿度明显下降,到15时降至37%,能见度升至5.6 km,淄博转为霾天气。

16日07时淄博转为较弱的偏北风,15日夜间地面辐射降温与16日早晨弱冷空气扩散的降温作用叠加,淄博相对湿度升高,能见度下降。16日06时淄博能见度降至1 km以下,此时淄博温度降至0.2℃,相对湿度升至92%。16日06时至10时,淄博相对湿度多在90%以上,风速在1 m/s左右,能见度在1 km以下,大雾持续约4 h,大雾强度相比15日较弱。16日白天,受东移南下的干冷空气影响,淄博偏北风风速增大,露点温度和相对湿度下降,能见度上升,到14时升至14 km,大雾消散。

淄博站14~16日早晨最低气温分别为0.1℃、-2.3℃、-0.8℃。以前一日最高气温与当日早晨最低气温之差近似表征辐射降温作用,淄博站14~16日辐射降温分别为8.3℃、14.1℃、14.3℃。相比于14日,15日、16日早晨气温更低,辐射降温作用更强。15日、16日早晨淄博能见度降至1 km以下,说明夜间地面辐射冷却对大雾的形成和加强起了重要作用。

#### 4.2. 高空气象要素特征

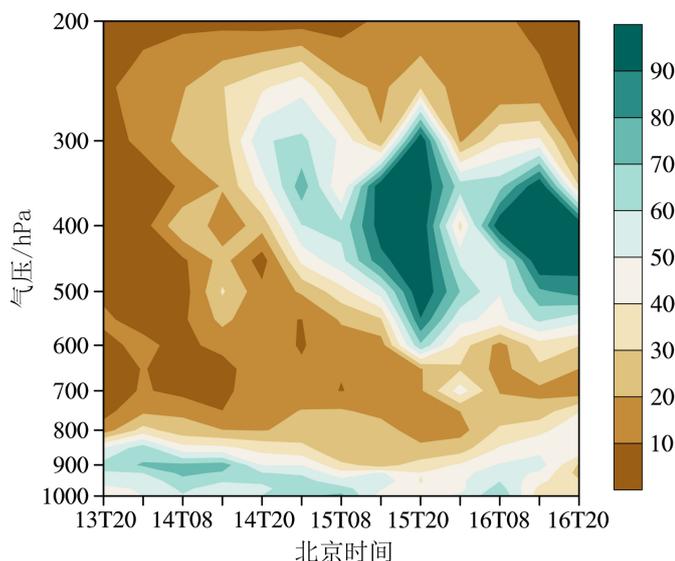
本次大雾过程850 hPa和925 hPa平均温度场上,山东温度分别在-2℃~2℃和2℃~6℃,河北南部到山东有明显的暖脊(图4)。暖脊的稳定存在有利于低层大气逆温层的形成和维持[6],大雾过程期间低层大气层结较为稳定。



**Figure 4.** The 850 hPa (a) and 925 hPa (b) mean temperature field (unit: °C) from 08:00 BST on 14 to 08:00 BST on 16 in December 2021

**图 4.** 2021 年 12 月 14 日 08 时~16 日 08 时 850 hPa (a)和 925 hPa (b)平均温度场(单位: °C)

图5给出12月13~16日相对湿度沿(118°E, 37°N)(位于淄博桓台)的时间-高度剖面图。13日夜间至14日白天,受低层暖湿平流的作用,低层60%以上的相对湿度分布范围扩展至900 hPa以上高度;而在14日夜间至16日早晨,低层60%以上的相对湿度仅存在于900 hPa以下高度,1000 hPa~900 hPa相对湿度在40%~70%。大雾过程期间,900 hPa~500 hPa相对湿度较低,多在0%~30%。这种“上干下湿”的湿度场结构使得天空多为无云或中高云,有利于夜间地面辐射降温,从而有利于近地层水汽凝结以及低层逆温层的形成和维持。



**Figure 5.** The time-vertical cross-sections of relative humidity along (118°E, 37°N) from 13 to 16 in December 2021 (unit: %)

**图 5.** 2021 年 12 月 13~16 日相对湿度沿(118°E, 37°N)的时间 - 高度剖面图(单位: %)

## 5. 大雾生消机制

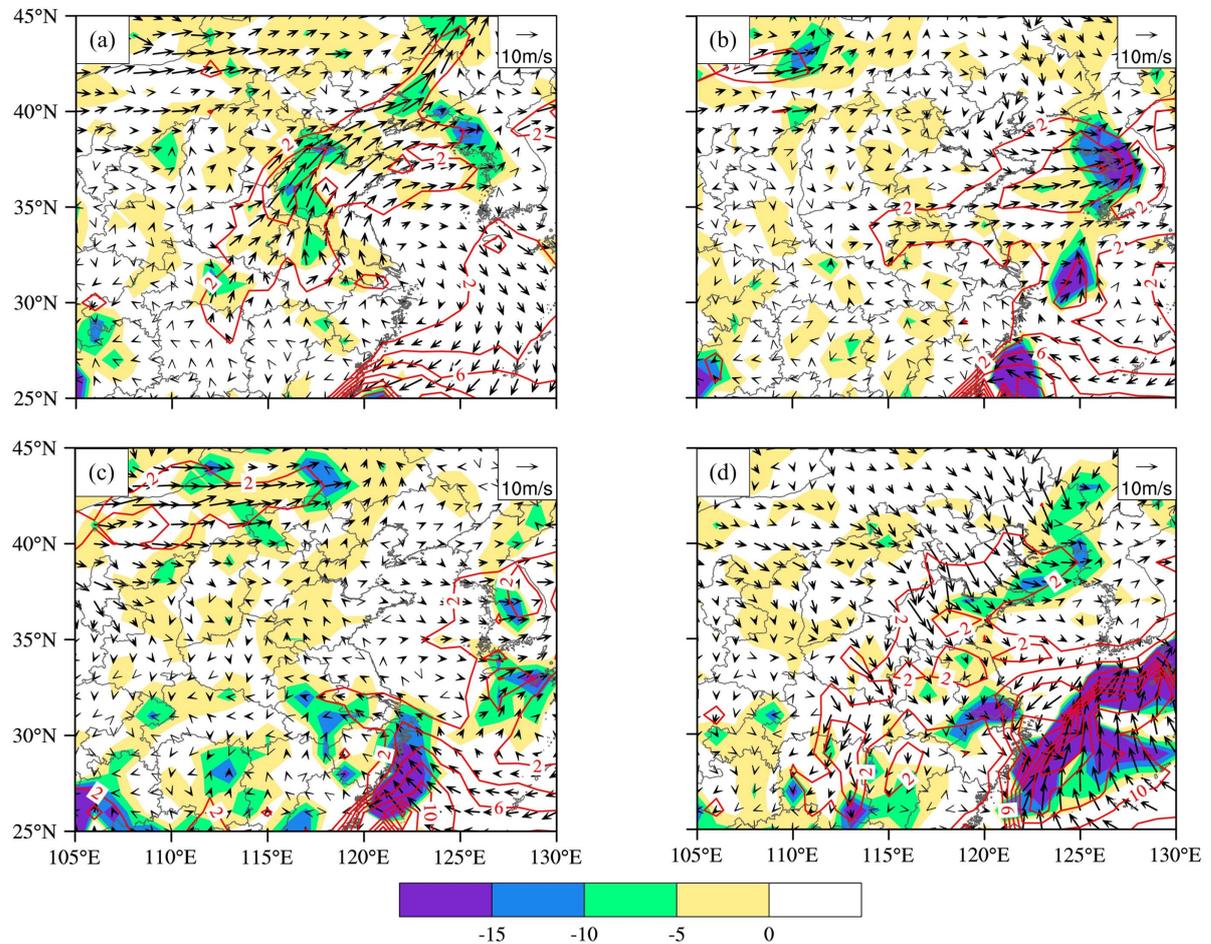
### 5.1. 水汽条件

利用 NCEP 的再分析资料计算了此次大雾过程期间 975 hPa 水汽通量和水汽通量散度(图 6)。14 日 02 时, 自湖北到辽宁为一致的西南气流, 并且是水汽通量大值区。从 13 日白天到 14 日白天, 近地层的西南暖湿气流持续向山东输送水汽, 山东大部地区为水汽辐合区, 为大雾的形成提供了充沛的水汽。根据 14 日 20 时探空资料, 位于鲁中地区的章丘站 975 hPa 附近高度的比湿达 4~5 g/kg, 到 15 日 08 时仍然维持在 3~4 g/kg。在 15 日 02 时, 山东大部为水汽辐散区, 14 日夜间地面辐射冷却对大雾的形成起了主要作用。15 日 14 时, 山东中西部为偏南气流, 为弱的水汽辐合区, 近地层暖湿平流补充了因蒸发失去的水汽。16 日 08 时, 近地层在山东有弱冷空气扩散南下, 鲁中到半岛地区位于弱冷空气前沿的辐合线附近, 为水汽辐合区, 章丘站 975 hPa 附近高度的比湿达 4~5 g/kg。15 日夜间地面辐射降温、16 日早晨近地层弱冷空气扩散以及辐合线附近的弱上升运动产生的绝热冷却均有利于近地层水汽凝结, 15 日夜间大雾范围自西向东扩展至山东中西部大部地区。16 日白天, 受东移南下的干冷空气影响, 近地层水汽减少, 大雾逐渐消散。

### 5.2. 层结条件

选取位于鲁中地区的章丘站作为代表站, 分析此次过程中的大气层结条件。表 2 给出 14 日 08 时至 16 日 08 时章丘站近地逆温层特征。

14 日 08 时, 972.1 hPa 至 935.9 hPa 之间为逆温层, 由于低层暖湿平流的作用, 逆温层层顶高度达到 701 m, 14 日早晨山东大部地区出现轻雾。由于夜间地面向上长波辐射产生的冷却作用, 15 日 08 时和 16 日 08 时, 章丘站近地层逆温分别增强至 0.383°C/hPa 和 0.714°C/hPa, 并且逆温层厚度相比前一日 20 时均有增加。较强的逆温阻碍了近地层水汽向空中输送, 15 日早晨和 16 日早晨山东中西部大部地区能见度降至 1 km 以下, 出现大雾天气。可见, 相比于 14 日 08 时, 15 日 08 时和 16 日 08 时逆温强度更强, 从而更有利于近地面水汽积聚和大雾加强。



**Figure 6.** The vapor flux (red lines, unit:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ), divergence of vapor flux (shaded, unit:  $10^{-8}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and wind vector of 975 hPa at 02:00 BST on 14 (a), 02:00 BST on 15 (b), 14:00 BST on 15 (c) and 08:00 BST on 16 (d) in December 2021

**图 6.** 2021 年 12 月 14 日 02 时(a)、15 日 02 时(b)、15 日 14 时(c)、16 日 08 时(d) 975 hPa 水汽通量(红色等值线, 单位:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )、水汽通量散度(填色, 单位:  $10^{-8}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )及风矢量

**Table 2.** The characteristics of the temperature inversion layer near the surface at Zhangqiu Station from 08:00 BST on 14 to 08:00 BST on 16 in December 2021

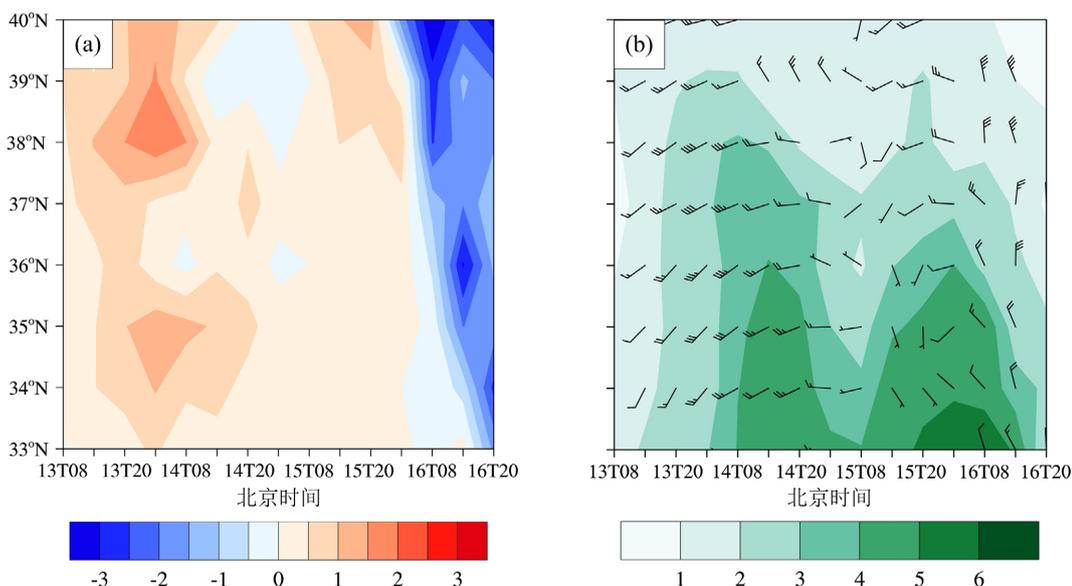
**表 2.** 2021 年 12 月 14 日 08 时至 16 日 08 时章丘站近地逆温层特征

时间	逆温层层底高度	逆温层层顶高度	逆温幅度(°C)	逆温强度(°C/hPa)	逆温层厚度(m)
14 日 08 时	972.1 hPa (419 m)	935.9 hPa (701 m)	0.9	0.025	282
14 日 20 时	986.1 hPa (264 m)	980.3 hPa (307 m)	0.6	0.103	43
15 日 08 时	988 hPa (264 m)	982 hPa (329 m)	2.3	0.383	65
15 日 20 时	987.8 hPa (264 m)	985.4 hPa (280 m)	0.6	0.250	16
16 日 08 时	989.8 hPa (275 m)	986.3 hPa (309 m)	2.5	0.714	34

16日20时,受冷空气影响,章丘站近地逆温层已被破坏,此时大雾已消散。

### 5.3. “干性”短波槽的作用

本次过程发生在纬向环流背景下,有两次低层短波槽影响。短波槽移经山东时,大气不满足产生降水天气的湿度条件,尤其在850 hPa以上相对湿度多在0%~40%(图略),这种“干性”短波槽在大雾形成、发展的不同阶段均可起到重要作用[2][3]。在短波槽过后,15日08时和16日08时山东大雾站数分别达75站和59站(表1)。图7给出此次过程前后925 hPa沿118°E(山东陆域范围:北纬34°23'~38°17'、东经114°48'~122°42')温度平流和比湿、风场的时间变化。13日白天至14日白天、15日白天山东中西部处于短波槽前,受西南气流影响,低层明显的暖平流使逆温增强增厚,为大雾的形成和维持提供了稳定的层结条件。同时,暖湿平流使低层比湿增大,尤其是14日08时前后,自河南北部到山东925 hPa风速都在12 m/s左右(图略),较强的西南气流持续向山东输送水汽,为大雾的形成和维持提供了良好的水汽条件。14日白天和15日白天,在低层西南暖湿气流的影响下,山东中西部大部地区能见度维持在10 km以下。14日夜间、15日夜间山东逐渐转为槽后,低层主要受西北气流影响,夜间有较强的地面辐射降温,有利于雾区范围扩大和大雾强度增强。



**Figure 7.** Evolution of temperature advection ((a); shaded, unit:  $10^{-4}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ), specific humidity (shaded, unit: g/kg) and wind field (b) at 925 hPa along  $118^{\circ}\text{E}$  from 13 to 16 in December 2021

**图7.** 2021年12月13~16日925 hPa沿 $118^{\circ}\text{E}$ 的温度平流((a); 填色, 单位:  $10^{-4}\text{C}\cdot\text{s}^{-2}$ )和比湿(填色, 单位: g/kg)、风场(b)

16日白天,受槽后冷空气影响,低层冷平流增强,水汽减少,近地逆温层被破坏,大雾过程结束。

## 6. 结论

1) 纬向环流背景、低层暖温度脊和地面弱气压场为此次持续性大雾过程提供了有利的天气背景条件。本次过程经历了平流辐射雾-辐射雾-锋面雾的演变阶段。

2) 淄博站大雾在15日和16日分别持续约9 h、4 h,期间淄博站地面相对湿度多在90%以上,风速在1 m/s左右。此次过程具有较明显的辐射雾特征,夜间地面辐射冷却对大雾的形成和加强起了重要作用。本次过程期间高空相对湿度场空间结构为“上干下湿”,有利于夜间地面辐射降温。

3) 前期低层西南暖湿气流和 16 日早晨近地层弱冷空气前沿的水汽辐合为大雾的形成和维持提供了良好的水汽条件。逆温强度的增强有利于近地面水汽积聚和大雾加强。两次低层“干性”短波槽活动在大雾形成、发展的不同阶段都起到了重要作用,槽前西南暖湿气流有利于雾霾天气的维持,槽后西北气流有利于夜间地面辐射降温和大雾强度增强。受冷空气的影响,低层水汽减少,近地逆温层被破坏,大雾消散。

## 基金项目

山东省气象局预报员专项项目(SDYBY2020-05)。

## 参考文献

- [1] 李江波, 赵玉广, 孔凡超, 何丽华, 张艳刚. 华北平原连续性大雾的特征分析[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(7): 15-23.
- [2] 赵玉广, 李江波, 李青春. 华北平原 3 次持续性大雾过程的特征及成因分析[J]. 气象, 2015, 41(4): 427-437.
- [3] 孙颖, 马艳, 高荣珍, 薛允传, 江敦双, 凌艺. 山东一次持续性平流辐射雾过程特征及成因分析[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(4): 128-135.
- [4] 吕博, 贾斌, 韩风军, 徐娟, 王健. 山东中西部一次持续性大雾的形成及维持机制[J]. 干旱气象, 2014, 32(5): 830-836.
- [5] 毛冬艳, 杨贵明. 华北平原雾发生的气象条件[J]. 气象, 2006, 32(1): 78-83.
- [6] 何立富, 李峰, 李泽椿. 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, 2006, 17(2): 160-168.