

长江口一次持续性强浓雾过程特征和成因分析

韩苗苗, 高雅文, 钟剑, 杜树浩, 周彤

(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 使用船载观测资料、FNL再分析资料和葵花八号云图资料,对2022年3月11—14日发生于长江口的持续性浓雾过程进行研究分析,并归纳总结了预报的实用性方法。结果表明:本次浓雾过程包含辐射雾和锋面平流雾,持续时间长,影响范围广,雾区在锋面的前后部都相继出现,且锋面移动往往影响着雾的移动。在雾的生消和维持过程中,气温和相对湿度通常呈负相关,温度露点差和能见度呈正相关,当温度露点差大于3℃时,长江口也会有雾生成,但能见度不低于3 km。雾生时段通常盛行偏南风 and 偏北风,偏西风和西北风则会导致相对湿度迅速下降,不利于雾的形成和维持。可见光云图上雾的特征明显,颜色纹理均匀,边界清晰整齐,外围无丝状或纤维状云系扩散,而红外云图上对应处是一片灰暗区,只有边界隐约可见。

关键词: 浓雾;长江口雾;生消过程;水汽输送;预报

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)01-0074-09

0 引言

雾是一种局地性很强的灾害性天气现象^[1]。发生在长江的江面雾往往会导致能见度迅速下降,由于长江口水道狭窄、明沙暗礁星罗棋布,当大雾迷蒙时,船体容易迷失方向,往往会引起搁浅、触礁或与其他船只碰撞的事故^[2-3]。因此,加强对雾的分析研究,提高雾的监测、预报能力,对于船舶在长江口的航行安全具有很强的实际意义。但由于缺乏足够的观测资料,江面雾的预报往往困难重重,尤其是雾的生消时间预报。因此,在监测手段尚未有效改善之前,对江面雾的形成、维持和消散的环流条件进行必要的分析和归纳,不失为改善其预报能力的一种手段。

国外海雾的研究开始于加利福尼亚沿海地区。BYERS^[4]认为冷海面对近海面层的空气冷却是海雾的主要成因;TELFORD等^[5]的研究表明暖水上方湍流加强对海雾的消散起到重要作用。我国对长江

口雾比较系统的研究可以追溯至20世纪六七十年代。国家海洋环境预报中心通过对东海沿海数据进行分析,发现沿海海域上午有雾的情况最多,下午次之,夜间有雾的情况偏少^[6]。王紫竹等^[7]通过分析长江口航道附近的海雾,发现海雾过程受风场的影响较大,南风盛行时水汽充足、湿度较大、容易产生海雾,而西北风主导时,海雾容易消散。锋面雾的研究多集中于内陆地区,很少涉及海上,周福等^[8]通过对宁波地区长江口雾的研究,认为锋面南侧的风速小且水汽含量大,有利于长江口雾的形成。

2022年3月11—14日,在江苏东部、上海、黄海海域及周边地区出现了一次大范围持续性的长江口雾,多个沿岸测站均观测到能见度长时间维持在100 m左右,达到了强浓雾级别,严重影响了长江航道的船舶航行,带来了较大的安全隐患。本文主要从实况要素、云图特征、大气环流等方面探寻长江口雾的生消机理,归纳总结预报的实用性方法,为后续船舶航行保障提供参考。

收稿日期: 2022-10-30。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41605075)。

作者简介: 韩苗苗(1996-),男,助理工程师,本科,主要从事航海气象研究。E-mail: miaoshenhaofei@163.com

1 资料来源及研究方法

1.1 资料来源

本文采用的资料包括:①美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)开发的FNL全球分析资料(Final Operational Global Analysis data),资料时间分辨率为6 h,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,数据格式为Grib2,主要使用海平面气压场和海平面风场两个变量;②船载自动气象站测量的逐5 min数据,包括气温、湿度、气压、风向风速和能见度;③日本“葵花8号”(Himawari-8)卫星云图资料,主要使用红外和可见光云图资料。

1.2 研究方法

温度露点差是空气温度与露点温度的差值,是用来衡量空气湿度的参量。本文计算温度露点差的方法如下:

①由气温计算出饱和水汽压:

$$P = 611.2 \times \left(10^{\left(7.5 \times \frac{T}{237.3 + T} \right)} \right) \quad (1)$$

②通过饱和水汽压计算露点温度和温度露点差:

$$T_d = 237.3 \times \frac{\log_{10} \frac{P \times U \times 0.01}{611.2}}{7.5 - \log_{10} \frac{P \times U \times 0.01}{611.2}} \quad (2)$$

$$T_c = T - T_d \quad (3)$$

式中: T 为传感器所测气温,单位: $^{\circ}\text{C}$; P 为空气的饱和水汽压,单位:hPa; U 为空气的相对湿度,单位:%; T_d 为露点温度,单位: $^{\circ}\text{C}$; T_c 为温度露点差,单位: $^{\circ}\text{C}$ 。

2 结果与分析

2.1 长江口雾生消演变过程

根据中国气象局地面观测规范^[9],本文基于能见度(V)将雾划分为:轻雾($1 \text{ km} \leq V < 10 \text{ km}$)、大雾($500 \text{ m} \leq V < 1 \text{ km}$)、浓雾($200 \text{ m} \leq V < 500 \text{ m}$)、强浓雾($50 \text{ m} \leq V < 200 \text{ m}$)、特强浓雾($V < 50 \text{ m}$)。2022年3月11—15日船舶观测的各气象要素结果见图1。

形成阶段:11日01时(北京时,下同),船舶周围

没有雾,能见度超过10 km;05时开始长波辐射作用增强,气温开始迅速下降,风向由偏南风转为偏东风,平均风速降至1 m/s,湿度迅速上升到88%,温度露点差也骤降为1.95 $^{\circ}\text{C}$,能见度逐渐转差至5 km左右,船舶开始受轻雾影响。

首次发展阶段:从11日07时开始,气温以1.4 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率迅速回升,相对湿度迅速下降,但此时江面雾却没有明显消散,能见度甚至略有下降,一直持续到11日13时,相对湿度降至60%,气温回升到21 $^{\circ}\text{C}$,江面雾才趋于消散,能见度转好。11日16时开始,气温开始降低,湿度同步上升,近30 min的能见度从15 km下降至10 km,长江江面又开始出现轻雾,能见度随着气温的不断降低而降低,12日00时后昼夜温差达到最大,最低气温为11.5 $^{\circ}\text{C}$,温度露点差达到0.15 $^{\circ}\text{C}$,整个江面被强浓雾笼罩,能见度最低只有100 m,而风向、风速没有明显变化,始终稳定为偏东风,风速只有2~4 m/s,有利于浓雾的发展加强,整个过程持续了9 h。

好转阶段:12日上午,由于日出后太阳辐射加强,温度迅速上升,低层水汽快速流失,温度露点差从0.15 $^{\circ}\text{C}$ 上升至16 $^{\circ}\text{C}$,盛行风向转为偏南风,风速明显增大至6~8 m/s,大气扩散条件较好,浓雾开始快速消散,能见度转好至20 km。

再次发展阶段:13日凌晨,受锋面过境影响,江苏、上海和东海海域有连续性降雨,低层水汽充沛,温度露点差迅速下降至0.97 $^{\circ}\text{C}$,江面雾迅速生成,仅仅15 min内能见度从10 km急剧下降至2 km,风速减小至2 m/s以下;随后,气温迅速回升,12时前后达到当日最高温度25 $^{\circ}\text{C}$,空气的相对湿度也陡降至62%,能见度略有好转,但江面雾却没有消散。从13日13时开始,风向转为稳定的偏北风,风速始终维持在4 m/s以下,湿度稳步上升至90%以上,江面雾的浓度越来越大,能见度降至200 m以下,达到了强浓雾级别。14日凌晨,长江口再次出现降雨,风向由稳定的偏北风转为东南风,温度和湿度却没有明显变化,强浓雾依然维持。

消散阶段:14日上午,盛行风向由偏南风转为偏北风,风速明显增大至6~8 m/s,温度露点差快速增大,船舶周围能见度明显转好,江面雾开始消散,14日16时,雾完全消散,能见度转好至10 km以上。

整个过程中湿度和能见度存在负相关关系,当

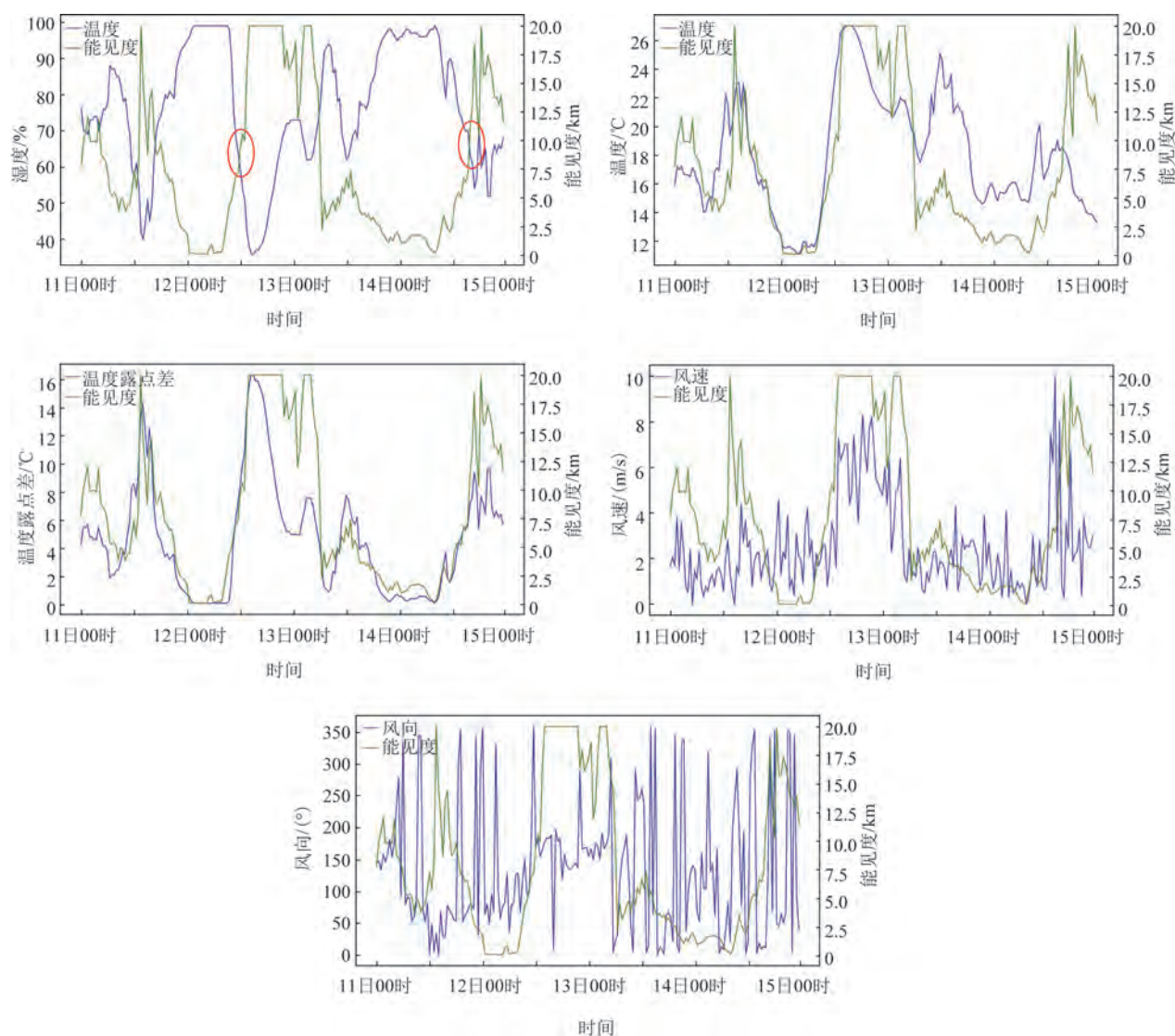


图1 2022年3月11—15日船舶观测要素

Fig.1 Ship observation elements on 11—15 March, 2022

能见度低于2 km时,湿度都大于95%,在浓雾消散过程中,当能见度达到10 km时,湿度为65%左右。温度和温度露点差与能见度存在正相关关系,能见度最差往往发生在凌晨时段温度最低时,当能见度降至2 km以下时,温度露点差小于1℃。

2.2 云图特征分析

本文选取日本“葵花8号”的可见光云图和红外云图(见图2),图中红点为船舶所在位置。3月12日08时,可见光云图上整个黄海海域和江苏北部存在十分均匀的灰白区域,呈现东北—西南向的均匀

带状分布特点,内部纹理光滑,边界整齐清楚,其西北部的白亮云系呈东北—西南向的均匀带状分布,带状中间颜色更白亮^[10],越到边缘颜色越灰暗,边界模糊混乱,外围带有纤维状的云系向外延伸扩展,属于典型的锋面云系。而红外云图上黄海海域和江苏北部没有明显的白色区域,只能隐约看出其边界处存在色差,锋面云系清晰白亮,比可见光上显示的范围更大,颜色更白,内部纹理更柔顺。13日08时该锋面云系影响到朝鲜半岛—长江口一带,而江南地区的灰白区域与其相连呈块状分布,颜色更加灰暗,且分布不均匀,灰白区中间有许多纯黑斑

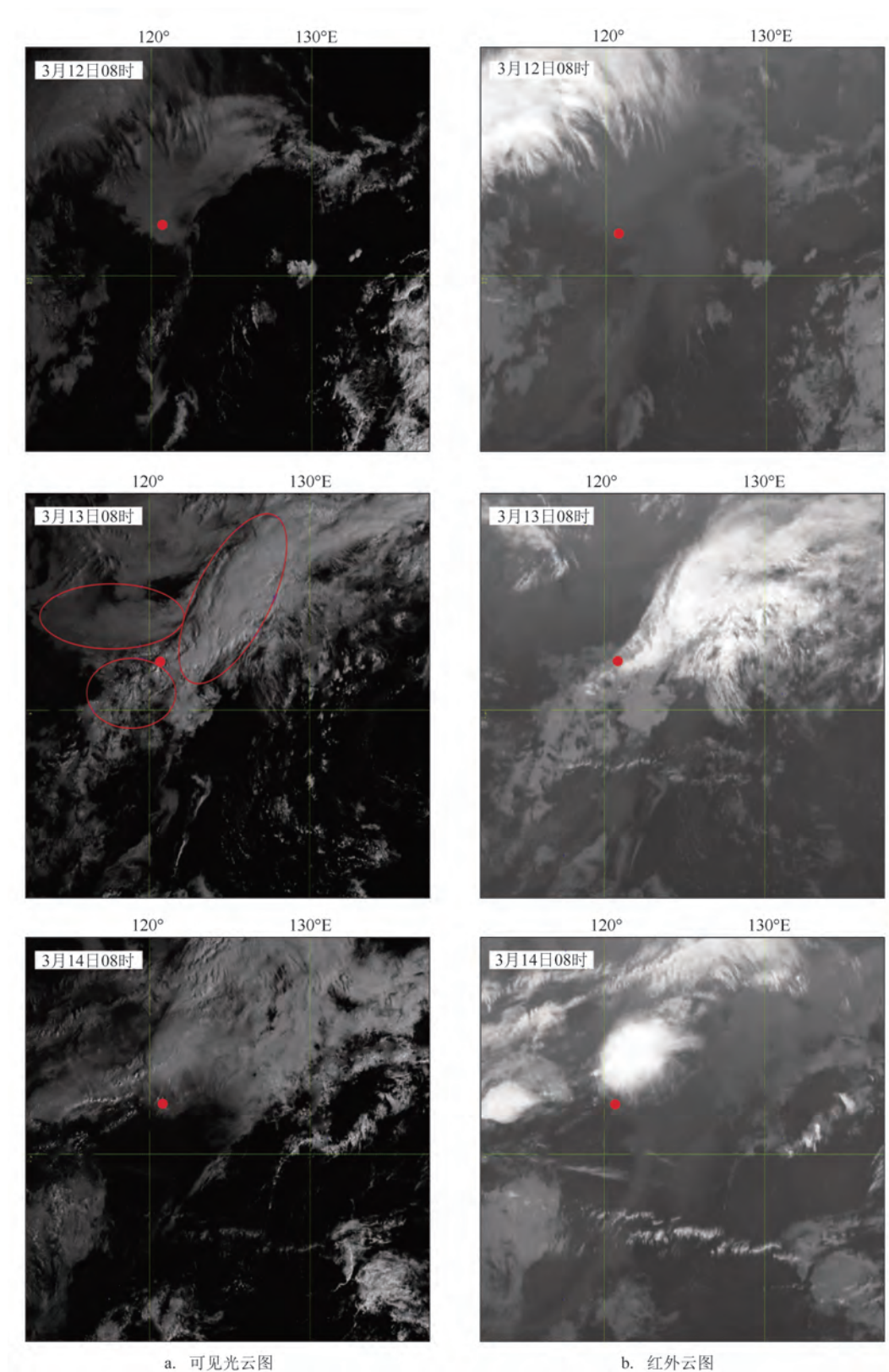


图2 不同时刻卫星云图

Fig.2 Satellite cloud images at different times

点,边界模糊不齐,外围无纤维云系,船舶周围能见度为3.5 km左右,结合观测实况可知覆盖江南地区的灰白区域属于轻雾区,但其特征与12日雾区的纹理均匀特点并不相同,雾区呈局地性的块状分布,维持时间不长,分析可能是地面辐射降温导致了辐射雾;而其北部的云系呈现出东西带状分布、表面均匀光滑的特点,颜色均匀灰白,较锋面云系更暗,但边界清晰整齐,无云系向外延伸扩展,在红外云图上难以分辨,十分符合雾的特征。14日凌晨,灰白云系南移至船舶上空,能见度持续转差至

200 m左右,达到强浓雾级别,随后灰白区域继续南移,雾区缓慢消散,直至当日下午,能见度转好至10 km以上。

2.3 天气形势背景分析

以往研究表明^[11],合理的大气环境配置、稳定的高空层结有助于长江口雾的产生。图3为3月11—14日500 hPa、850 hPa和地面天气形势图,包括位势高度和温度场。

11日20时,500 hPa和850 hPa均受高压脊控

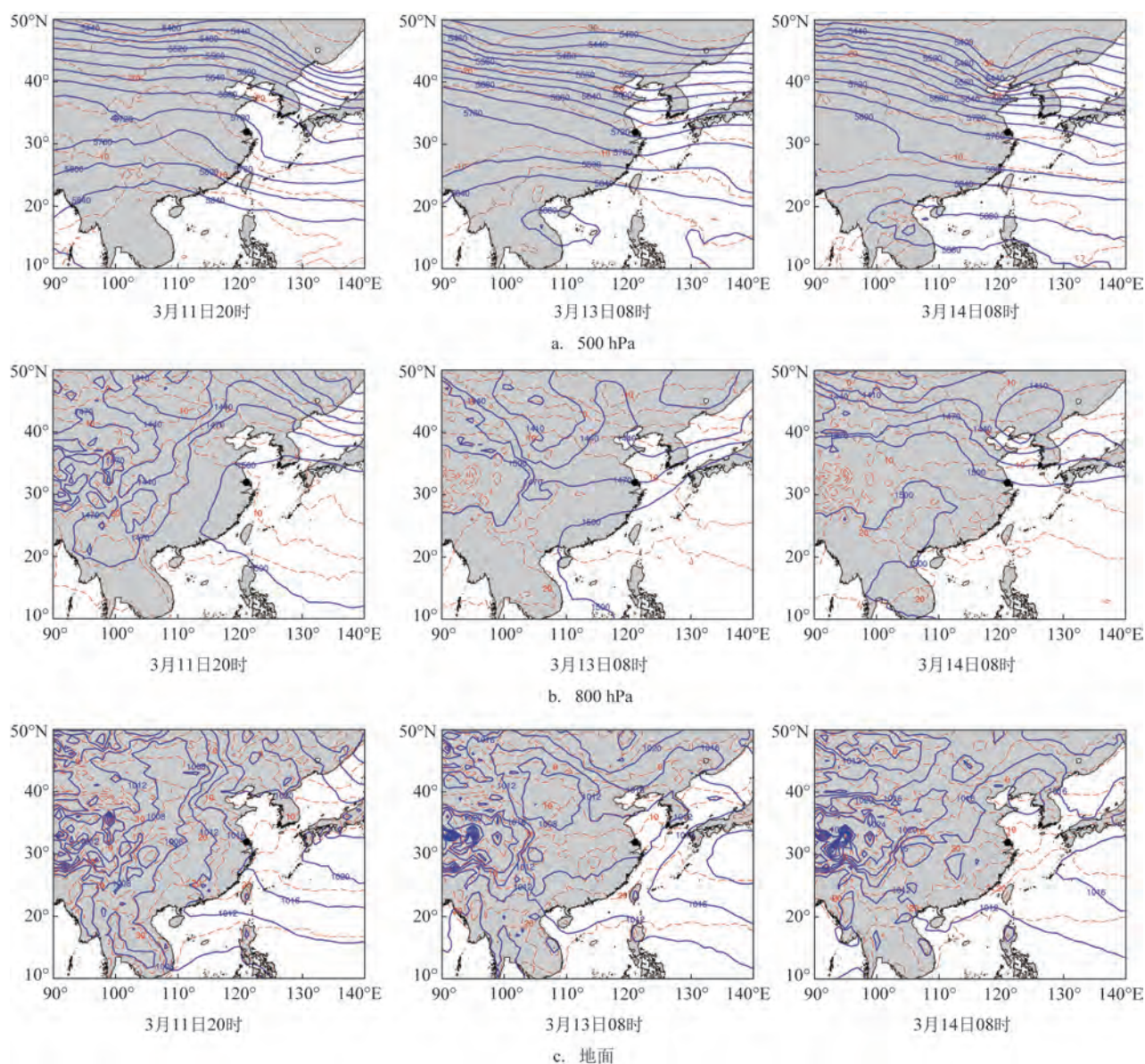


图3 不同时刻形势场

Fig.3 Situation fields at different times

制,有下沉运动,层结稳定,空中云量较少,因此夜间辐射降温明显,并导致了12日凌晨出现了辐射雾。而地面风向在雾生前后没有变化,始终维持偏东风,等压线稀疏,风速小,扩散条件差,有利于雾的维持加强。

13日08时,500 hPa和850 hPa有高空槽过境,江阴经历了一次降雨过程,大气上空逐渐由层结不稳定转为层结稳定,低层相对湿度较大,有利于雾的生成,但中层受较为平直的西风控制,水汽输送不充沛,且地面无稳定风向,导致13日只有长时段的轻雾出现,能见度始终超过2 km。

14日凌晨,受850 hPa东北冷涡外围影响,对流天气产生,西南气流与东北气流在长江口处交汇,并伴随持续性降雨,地面处于均压场,风速较小,盛行偏南风,水汽充沛和扩散条件差导致能见度迅速下降,轻雾加重为强浓雾,08时之后随着东北冷涡东移,850 hPa逐渐受槽后西北气流控制,地面风向也发生突变,从偏南风转为偏北风,湿度随之迅速下降,能见度逐步转好,浓雾开始消散。

2.4 大气层结和水汽特征分析

许多研究表明,雾发生时大气边界层中总伴有逆温或等温现象,稳定的大气层结是长江口雾发生和维持的重要条件^[12]。图4为3月12—14日08时船舶位置的探空 T -lnp 图,通过分析可以发现,大雾期间逆温现象始终存在。12日08时和13日08时700 hPa以下风向稳定一致,垂直风切变小,湍流

作用微弱,逆温层顶抬升到900 hPa,地面都有雾区出现,而14日08时700 hPa以下风向随高度的增加呈顺时针变化,暖平流导致气温迅速回升,逆温层顶高度达950 hPa,较13日逆温层顶高度有所下降,层结稳定性有所减弱,有利于浓雾的消散。

图5为3月12—14日08时的水汽通量和水汽通量散度,箭头表示水汽通量,表现了水汽的输送方向以及大小;水汽通量散度表示水汽的辐合与辐散的情况,当水汽通量散度为正时,水汽辐散,水汽通量散度为负时,水汽辐合。12日08时长江口低层大气受偏南气流的控制,东南向水汽输送至长江口附近,出现水汽辐合区,实况中相对湿度也印证这个结论,船舶附近相对湿度达到95%以上,随后由于东南风逐渐转为西南风,因此水汽辐合区并未继续向北或者内陆发展。13日08时,长江口正处于偏南气流和偏北气流的交汇区,东海和黄海的水汽都往长江口输送,导致出现了水汽辐合区,相对湿度上升至95%,随后风向转为偏西风,内陆水汽不足,相对湿度迅速下降至62%,午后风向又转为稳定的偏北风,此时黄海水汽持续输送至长江口,导致相对湿度再次攀升到95%以上。14日08时长江口水汽输送为西北向,并出现水汽辐散区,水汽得不到补充,长江口雾逐渐消散。

上述分析表明,低层充足的水汽和稳定的层结为长江口雾的形成以及发展维持提供了条件。此次浓雾过程的水汽主要来自于东海和黄海,通过东南气流或偏北气流被输送至长江口,而低层逆温的

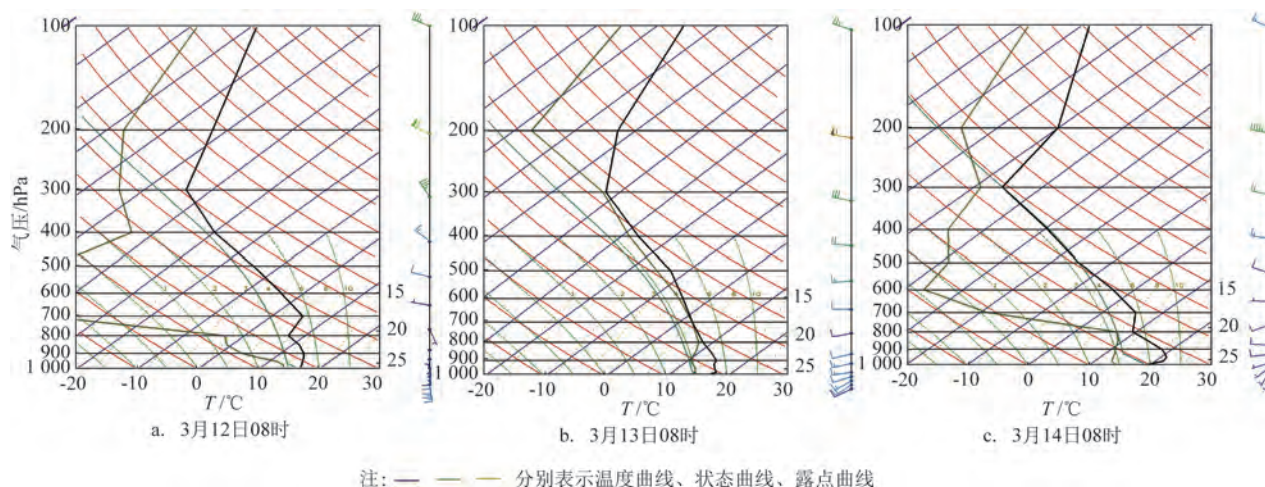


图4 船舶位置 T -lnp 图

Fig.4 T -lnp diagram of ship positions

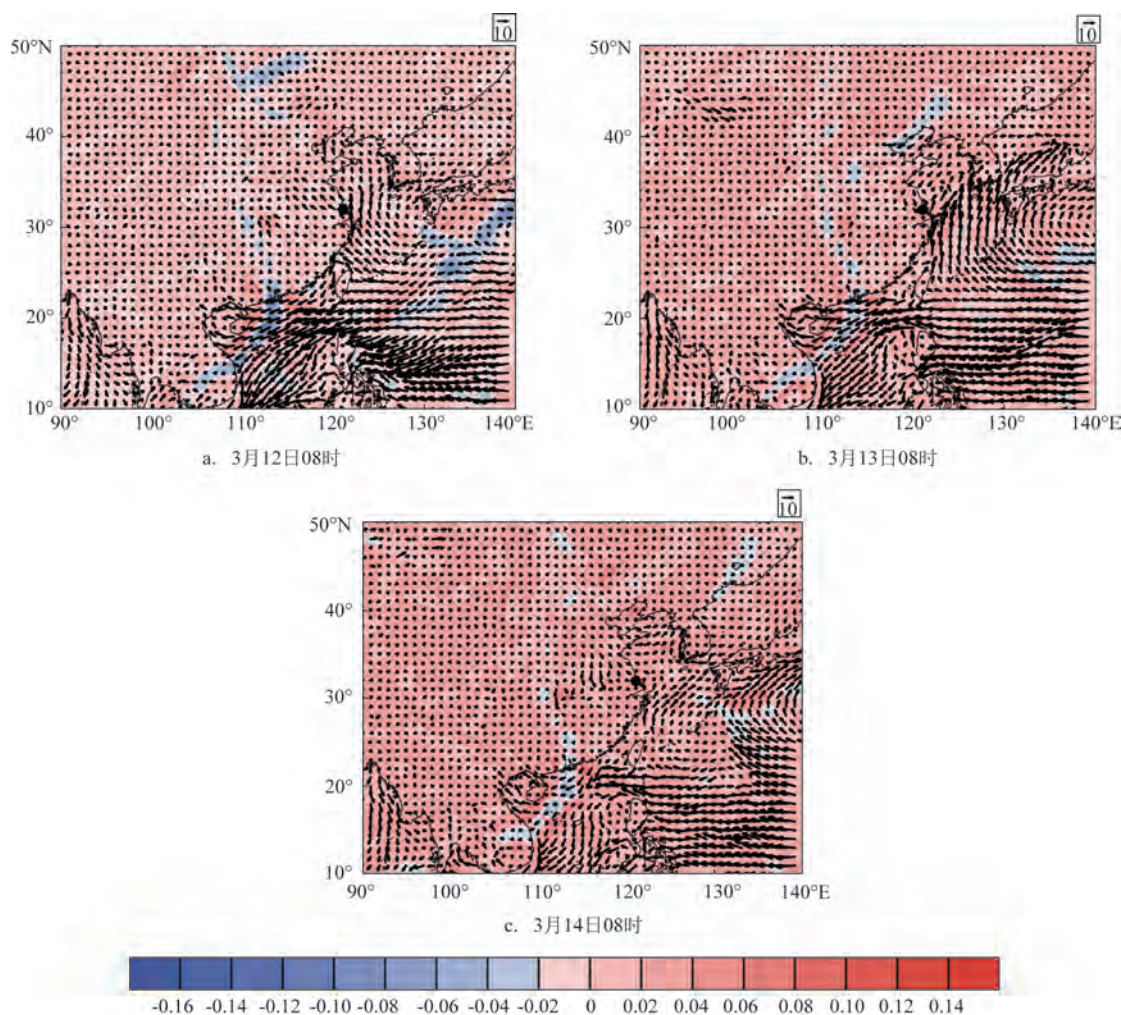


图5 不同时刻1 000 hPa水汽通量(箭头,单位: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$),以及水汽通量散度(填色区域,单位: $\text{g}/(\text{hPa} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

Fig.5 Water vapor flux of 1 000 hPa at different times (arrow, unit: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$) and water vapor flux divergence (shaded area, unit: $\text{g}/(\text{hPa} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

存在大大阻碍了空气的垂直运动,水汽聚积在大气低层,为大雾的持续提供了条件。

3 结论

本文对2022年3月11—14日发生于长江口的浓雾天气过程的实况特征和生消演变进行了分析。结论如下:

① 3月12日凌晨江面辐射雾的生成是由于低空层结稳定,下沉气流盛行,空中云量较少,夜间辐射冷却降温直接导致浓雾形成,而13日之后的浓雾过程发生在锋面过境前后,浓雾形成前的持续性降水提供了充足的水汽,稳定的偏南风或偏北风将水

汽输送至长江口,由于逆温层的存在,水汽一直聚积在大气低层,有利于浓雾的维持加强。

②利用卫星云图可在白天实时监测雾区,长江口雾在可见光云图上的特征较为明显,颜色纹理均匀分布,边界清晰整齐,外围无丝状或纤维状云系扩散,而红外云图上雾区通常是一片灰暗区。通过对比分析能较好地地区分雾区和雾区,但缺陷是雾的维持和加强多发生于气温下降的凌晨时段,无法用可见光云图监测其发展变化。

③本文计算得出的温度露点差能较好地反映浓雾的整个过程,当能见度低于2 km时,温度露点差小于 1°C ,而温度露点差大于 3°C 时也有雾生成,但能见度不低于3 km,可用于长江口能见度精细化

预报。

④风向、风速对长江口雾的形成和消散有至关重要的作用,雾生时段通常盛行南向风,但由于长江口的特殊位置,偏北风也可输送充足的黄海水汽,有利于雾的生成和发展。当出现西北风或者偏西风时,低层水汽输送不足,往往会导致相对湿度迅速下降,且风向变化往往会引起平流雾的生消演变,而对辐射雾的影响不大,风速稳定地维持在1~3 m/s时有利于浓雾的生成和加强,而风速达到6 m/s以上时不利于雾的发展和维持。

参考文献:

- [1] 张璐,刘鹏,张文君,等.中国不同区域气候条件对冬季雾日形成的差异性分析[J].气候与环境研究,2019,24(5):585-596.
ZHANG L, LIU P, ZHANG W J, et al. Analysis of variations of winter fog days formation across different regional climatic conditions in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2019, 24(5): 585-596.
- [2] 史得道,黄彬,吴振玲.2016年春季一次黄渤海明显海雾过程的大气海洋特征分析[J].海洋预报,2018,35(5):85-92.
SHI D D, HUANG B, WU Z L. Analysis of atmosphere and sea characteristics under an obvious sea fog process over the Bohai and Yellow Sea in spring 2016[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(5): 85-92.
- [3] 傅刚,李鹏远,张苏平,等.中国海雾研究简要回顾[J].气象科技进展,2016,6(2):20-28.
FU G, LI P Y, ZHANG S P, et al. A brief overview of the sea fog study in China[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(2): 20-28.
- [4] BYERS H R. General meteorology[M]. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [5] TELFORD J W, CHAI S K. Marine fog and its dissipation over warm water[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1993, 50(19): 3336-3349.
- [6] 马静,于芸,魏立新.东海近海海雾日变化特征及生成的水文气象条件分析[J].海洋预报,2012,29(6):58-65.
MA J, YU Y, WEI L X. Analysis of the daily variation of sea fog in the East China Sea and the weather condition to the sea fog formation[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(6): 58-65.
- [7] 王紫竹,胡松,刘旺.上海近海一次低压控制下春季海雾空间差异分析[J].海洋预报,2020,37(1):33-42.
WANG Z Z, HU S, LIU W. Analysis of spatial difference of a spring sea fog event offshore Shanghai under the effect of a low pressure system[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(1): 33-42.
- [8] 周福,钱燕珍,金靓,等.宁波海雾特征和预报着眼点[J].气象,2015,41(4):438-446.
ZHOU F, QIAN Y Z, JIN L, et al. Characteristics and forecasting focus of sea fog in Ningbo[J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(4): 438-446.
- [9] 刘小宁,张洪政,李庆祥,等.我国大雾的气候特征及变化初步解释[J].应用气象学报,2005,16(2):220-230.
LIU X N, ZHANG H Z, LI Q X, et al. Preliminary research on the climatic characteristics and change of fog in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16(2): 220-230.
- [10] 李秀镇,刘飞,曹宗元,等.日本以南海域一次锋面雾过程分析[J].海洋预报,2017,34(3):62-70.
LI X Z, LIU F, CAO Z Y, et al. An observation of a frontal fog event over the south Japanese sea[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(3): 62-70.
- [11] 汪靖,郭玲,吴振玲,等.渤海湾一次罕见持续性海雾过程的成因分析[J].环境科学与技术,2017,40(4):112-118.
WANG J, GUO L, WU Z L, et al. Causality analysis of a rare sustained sea fog event over the Bohai Gulf[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(4): 112-118.
- [12] 黄彬,许健民,史得道,等.黄渤海一次持续性海雾过程形变特征及其成因分析[J].气象,2018,44(10):1342-1351.
HUANG B, XU J M, SHI D D, et al. Deformation feature of a continuous sea fog process over the Yellow Sea and Bohai Sea and its genesis analysis[J]. Meteorological Monthly, 2018, 44(10): 1342-1351.

Characteristics and causes of a persistent strong dense fog process in the Yangtze River estuary

HAN Miaomiao, GAO Yawen, ZHONG Jian, DU Shuhao, ZHOU Tong
(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: This paper uses shipborne observation data, FNL reanalysis data and Sunflower-8 cloud map data to study a persistent strong dense fog process that occurred at the mouth of the Yangtze River estuary from March 11

to 14, 2022, and to summarize the practical methods for fog forecasting. The conclusions are as follows: This dense fog process includes radiation fog and frontal advection fog, which has a long duration and a wide range of influence. The fog area appears in the front and rear parts, and the front movement affects the movement of fog. During the lifetime of the dense fog, air temperature and relative humidity are usually negatively correlated, air temperature-dew point difference is positively correlated with the visibility. When air temperature-dew point difference is greater than 3 °C, fog also occurs at the mouth of the Yangtze River estuary but the visibility is normally not less than 3 km. The prevailing wind during the dense fog process is usually southerly and northerly. The westerly and northwesterly winds cause the rapid drop of relative humidity, resisting the formation and maintenance of the fog. The visible light cloud map has obvious characteristics of the fog including uniform color texture, clear and neat boundaries, no filamentous or fibrous cloud diffusion on the periphery, while the characteristics of the fog on the infrared cloud map is a gray dark area, only the boundary is faintly visible.

Key words: dense fog; fog at the mouth of the Yangtze River estuary; fog lifetime; water vapor transport; forecasting