

水汽输送与弱冷空气协同作用下的渤海海雾个例研究

孙雪倩^{1,2}, 王锐¹, 刘彬贤^{1,2}, 田梦^{2,3}, 韩沛沛^{1,2}

(1.天津海洋中心气象台,天津 300074;2.天津市海洋气象重点实验室,天津 300074;3.天津市气象科学研究所,天津 300074)

摘要: 综合利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代再分析资料(ERA5)、葵花-8(Himawari-8)卫星遥感数据及地面自动气象站观测资料,结合天气研究与预报模式(WRF)数值试验,揭示了2019年3月9—10日渤海海雾形成过程中水汽与冷空气的协同作用机制。结果表明:西北太平洋水汽经偏南、偏东气流持续输送至渤海,配合500 hPa高空槽引导弱冷空气南下产生降温作用,促使近海面水汽凝结,并在逆温层作用下形成稳定层结,促进海雾发展。敏感性试验进一步验证了两者的协同作用:当弱化冷空气强度时,逆温层稳定性降低且饱和水汽压上升,导致雾区面积缩减及雾区提前消散;当水汽减少时,难以形成足够的雾滴,导致云水生成减少、雾顶长波辐射冷却减弱,进一步削弱逆温层强度并增强湍流混合,致使雾区减小、雾顶高度降低。

关键词: 渤海海雾;弱冷空气;水汽输送;边界层过程;数值敏感性试验

中图分类号: P426.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)03-0042-14

0 引言

海雾,是一种在海上或沿海地区的低层大气中由水汽凝结形成、能见度低于1 km的天气现象^[1],对海上交通、渔业生产和港口作业等构成严重威胁,可造成与龙卷风和飓风等极端天气事件相当的经济损失与人员伤亡^[2-3]。在我国,黄渤海区域海雾频发^[4-5],其形成机理和预测技术一直是海洋气象学研究的热点与难点。

研究表明,水汽输送是海雾形成的关键因素之一。黄海海雾多为平流冷却雾^[1,5-9],其形成依赖南风持续向冷海面输送暖湿空气,在逆温层作用下,经由冷海面相互作用和雾顶长波辐射冷却,促使空气冷却凝结成雾^[9-11]。同样,环渤海海雾的形成也离不开低层暖湿气流的持续输送,低层急流携带的暖湿空气为海雾维持提供了稳定的逆温层结构和持续水汽供应^[12-14]。

然而,渤海因其独特地理位置,同时受海洋和陆地气流的影响,海雾的形成机制与黄海存在显著

差异。在渤海区域,冷空气作用更加突出,平流蒸发雾更为常见^[15]。曹祥村等^[16]指出,在辐射冷却和弱冷平流的共同作用下,低层大气容易达到饱和状态,有利于大雾维持发展。杨悦等^[17]认为,当陆上冷气团向海上暖气团底部侵入时,形成的上暖下冷逆温结构对雾的形成极为有利。近期的观测分析和数值模拟研究进一步证实,弱冷空气入侵能够增强逆温层结构,使大气温度降至露点以下,进而促使水汽凝结成雾^[17-18]。此外,Tian等^[19]通过个例分析指出,冷回流在温暖的渤海上空的加湿作用是引发西海岸区域性大雾的关键因素。柳龙生等^[20]的研究也揭示,弱冷空气与低空急流的共同作用能够增强边界层大气的湍流动能,进一步促进海雾垂直发展。

上述研究大多关注水汽输送或冷空气降温的单一作用。2019年3月9—10日,渤海及渤海海峡发生一次浓雾过程,多地能见度不足500 m,个别站点出现能见度低于200 m的强浓雾,给海上交通、港口作业造成严重影响。此次海雾过程呈现出典型的水汽和弱冷空气协同作用特征,为研究二者的协

收稿日期: 2025-03-04。

基金项目: 天津市气象局科研项目(202440ybxm27);中国气象局水文气象重点开放实验室项目(24SWQXZ017)。

作者简介: 孙雪倩(1992-),女,工程师,博士,主要从事海雾预报和数值模拟研究。E-mail: 15762274023@163.com

同机制提供了理想个例。本研究基于欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代再分析资料(ECMWF Reanalysis version 5, ERA5)、葵花-8(Himawari-8)卫星遥感及地面观测等多源数据,系统分析海雾发生发展过程中的水汽输送、温度平流以及低层大气层结等特征,阐明水汽输送和弱冷空气入侵在海雾形成和发展中的协同作用机制。同时,利用天气研究与预报模式(Weather Research and Forecasting model, WRF)开展敏感性试验,定量分析温湿条件对雾区演变和雾顶高度的影响,并探讨逆温层强度、混合层高度等边界层特征对海雾形成和维持的作用。研究结果有助于深化对海雾形成机制的认识,对提升海雾预报准确率具有重要意义。

1 数据和试验设计

1.1 数据

本研究采用的数据资料包括:①ERA5再分析资料,涵盖10 m风场、高空风场、比湿、相对湿度、温度和垂直速度等气象要素,时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,研究时段为2019年3月9—11日;②Himawari-8静止气象卫星观测产品,利用其可见光云图识别日间海雾,采用双通道差值法^[21]识别夜间海雾,识别标准为Himawari-8卫星L1级全圆盘14通道和7通道亮温差值 ≥ 2 K^[22];③乐亭(39.43°N, 118.89°E)、大沽灯塔(38.94°N, 117.98°E)、中心一号(38.22°N, 118.81°E)、渤中35号(38.08°N, 119.83°E)及砣矶岛(38.16°N, 120.75°E)自动气象站逐小时观测资料,数据均取自天擎平台,且资料经过质控,数据可用性较好。相关站点地理位置见图1。

1.2 模式设置

利用WRF模式(4.3.3版本)开展敏感性试验。所有试验均采用两层嵌套区域,投影方式为兰伯特投影,区域中心为(35°N, 124°E),两层区域水平分辨率分别为15 km和5 km,格点数分别为 213×186 和 301×241 。模式垂直分为44层,积分时间步长为90 s,以ERA5再分析数据作为初始场和侧边界条件,模拟时间为2019年3月9日08时(北京时,下同)—11日14时。采用的物理参数化方案包括:Lin

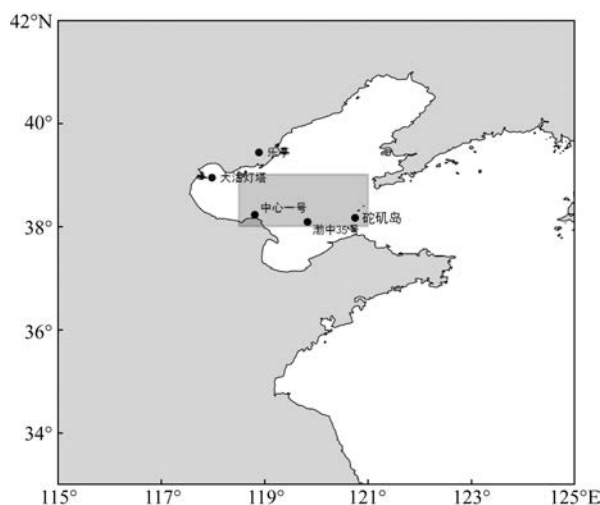


图1 观测站点及海雾重点区域分布图

Fig.1 Spatial distribution of meteorological observation stations and key region of sea fog

微物理方案^[23]、RRTMG长波^[24]、Dudhia短波^[25]辐射方案、Noah陆面方案^[26]、YSU边界层方案^[27]以及Kain-Fritsch积云方案^[28]。

1.3 试验设计

为深入探究前期水汽与后期弱冷空气对海雾形成的影响,本研究设计了一系列敏感性试验。高山红等^[29]和Yang等^[30]的研究均表明,初始场水汽条件对海雾模拟结果具有关键影响,水汽含量变化会显著影响雾滴生成过程。降湿试验中,对WRF初始场文件(wrfinput_d01和wrfinput_d02)中的水汽混合比(QVAPOR)进行调整,在所有垂直层次上将其统一设置为参照试验的0.5倍,该试验命名为“0.5Q”。通过模拟不同水汽条件下的海雾演变过程,揭示水汽条件对海雾生成和维持的影响机制。

此外,设置“T+2”和“T+4”两组试验。在参照试验基础上,于冷空气南下时刻(3月10日00时)分别将模拟区域气温升高2 K和4 K,以削弱冷空气影响强度。此次弱冷空气降温幅度为-3.5~-4.5 K,故增温2 K和4 K分别削弱约50%和90%的冷空气影响。增温试验在地表温度层次开展,可具体修改WRF模式初始场中的地表温度变量(TSK)。Chen等^[26]指出,TSK是模式的关键物理变量,其变化可通过边界层过程直接影响大气温度分布。地表温度升高会增加地表与大气间热量通量,增强边界层湍

表1 敏感性试验设计

Tab.1 The design of sensitivity experiments

试验名称	试验设计
Ctrl 试验	不做任何调整
T+2 试验	积分到3月10日00时, 将气温升高2 K
T+4 试验	积分到3月10日00时, 将气温升高4 K
0.5Q 试验	初始场水汽设置为参照试验的0.5倍

流混合,进而影响云和雾的形成。调整TSK可削弱冷空气近地面降温效应,进而检验冷空气强度对海雾的触发作用。

通过对比敏感性试验与参照试验模拟结果,能够系统评估前期水汽输送与后期弱冷空气活动在海雾形成过程中的关键作用,为深入理解海雾形成机制提供有力的数据支持和理论依据。

2 海雾实况

2.1 卫星监测

在海雾形成的初始阶段,黄海北部、渤海海峡、山东半岛及其南部沿岸是海雾生成的主要区域,雾区分布呈东北—西南走向(见图2b和2c)。10日清晨,雾区向西伸展至渤海海域(见图2d)。10日上午,渤海中南部和渤海海峡区域均出现大范围海雾,雾区形态呈楔形,此时海雾发展进入成熟期;在渤海湾和莱州湾一带,海雾边界清晰,与陆地海岸线紧密贴合(见图2e和2f)。由10日17时可见光卫星云图(见图2g)可见,海雾厚度变薄,结构变得松散,覆盖范围也收缩变窄。进入夜间后,海雾范围进一步缩小,至11日清晨雾区接近消散(见图2h和2i)。

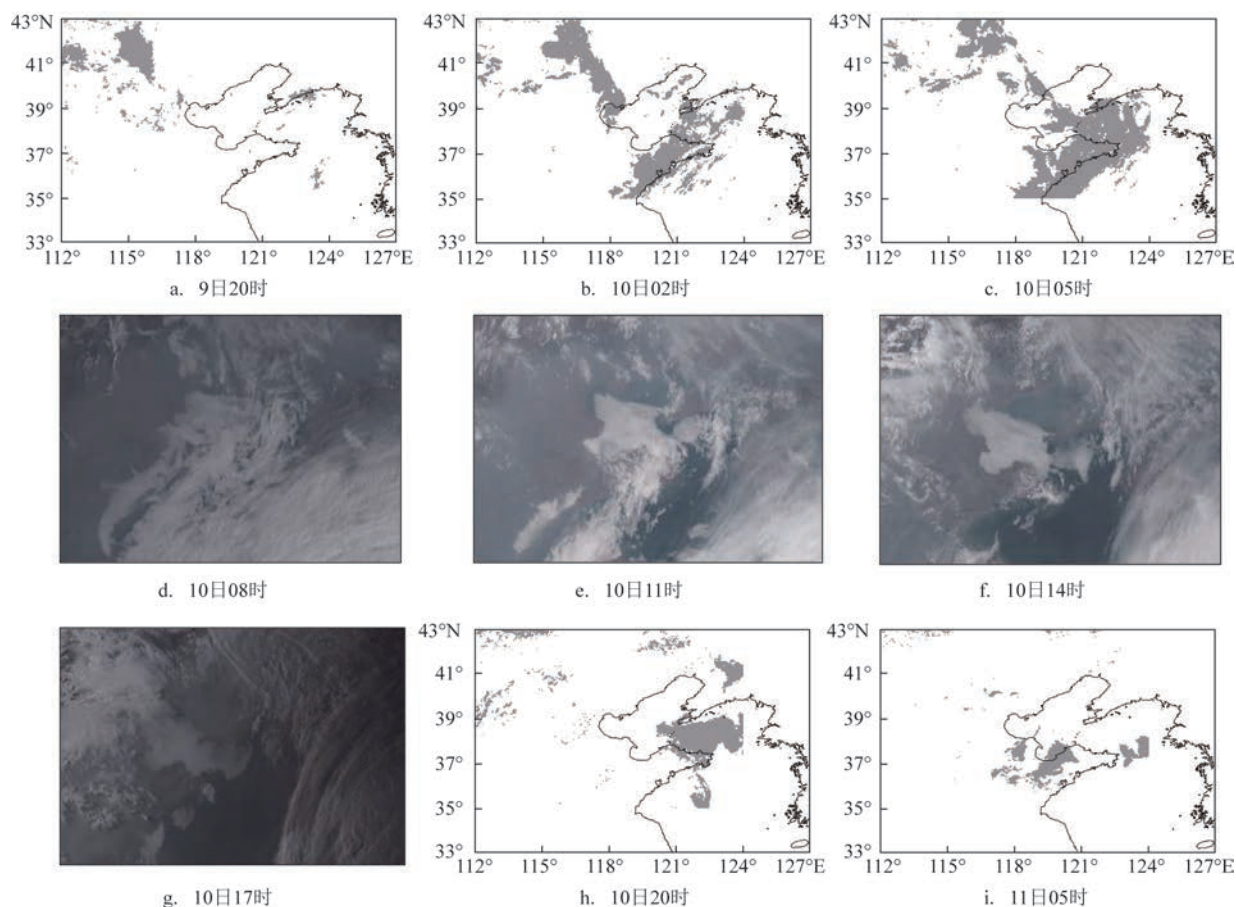


图2 2019年3月9—11日夜间接通道差值法监测(a-c,h-i)和海雾卫星可见光云图监测(d-g)

Fig.2 Monitoring of sea fog events from 9 to 11 March 2019 based on the nighttime dual-channel difference method (a-c, h-i) and visible satellite imagery (d-g)

2.2 自动气象站资料分析

随着雾区自东向西伸展,砣矶岛、渤中35号、中心一号和大沽灯塔4个观测站先后出现能见度低于1 km的天气现象。其中,砣矶岛和渤中35号站出现能见度低于200 m的强浓雾,其余两个站点出现200~500 m的浓雾(见图3)。在低能见度天气的形成、维持和消散阶段,4个站点的气象要素演变特征相似,但也存在一定差异。以大沽灯塔站为例,海雾形成前,该站主要受3~7 m/s的南—东南风影响;9日夜间,风向转为东—东北风,叠加夜间辐射降温作用,气温逐渐下降,促使空气中水汽凝结,露点温度与气温不断趋近,相对湿度逐渐增大;低能见度维持阶段,相对湿度始终保持在95%以上。与之相比,中心一号站海雾形成前主要为1~2 m/s的偏南风或静风,渤中35号站和砣矶岛站在9日下午—傍晚时段已转为东北风,偏北风维持时段较长。各站点风场演变虽存在差异,但均观测到风向转变后,会伴随气温下降、露点温度逐渐接近气温、能见度降低的现象。这表明弱冷空气引起的降温增湿过

程在海雾形成过程中起着重要作用。

3 海雾成因分析

3.1 天气形势

从天气形势上看(图略),2019年3月9日08时,黄渤海位于500 hPa高空槽前部以及海上高压后部,受西南气流显著影响,大气层结处于弱不稳定状态。10日08时,随着高空槽东移,渤海和渤海海峡转受槽后西北气流控制。同时,蒙古高压东移南下,台湾岛附近低压倒槽发展北上,导致渤海和渤海海峡位于地面高压底部和海上低压的西北部,受到弱冷空气的影响。

通过分析渤海24 h变温的气压-时间剖面图(图略)可知,此次海雾过程中,弱冷空气最初出现在900~600 hPa的对流层中低层。自9日夜间起,冷空气向低层渗透,10日00时前后,近地面出现明显负变温并持续至14时左右,最大降温幅度达3.5~4.5 K。值得注意的是,该降温时段与渤海海雾爆发时段高度一致,充分表明地面弱冷空气在维

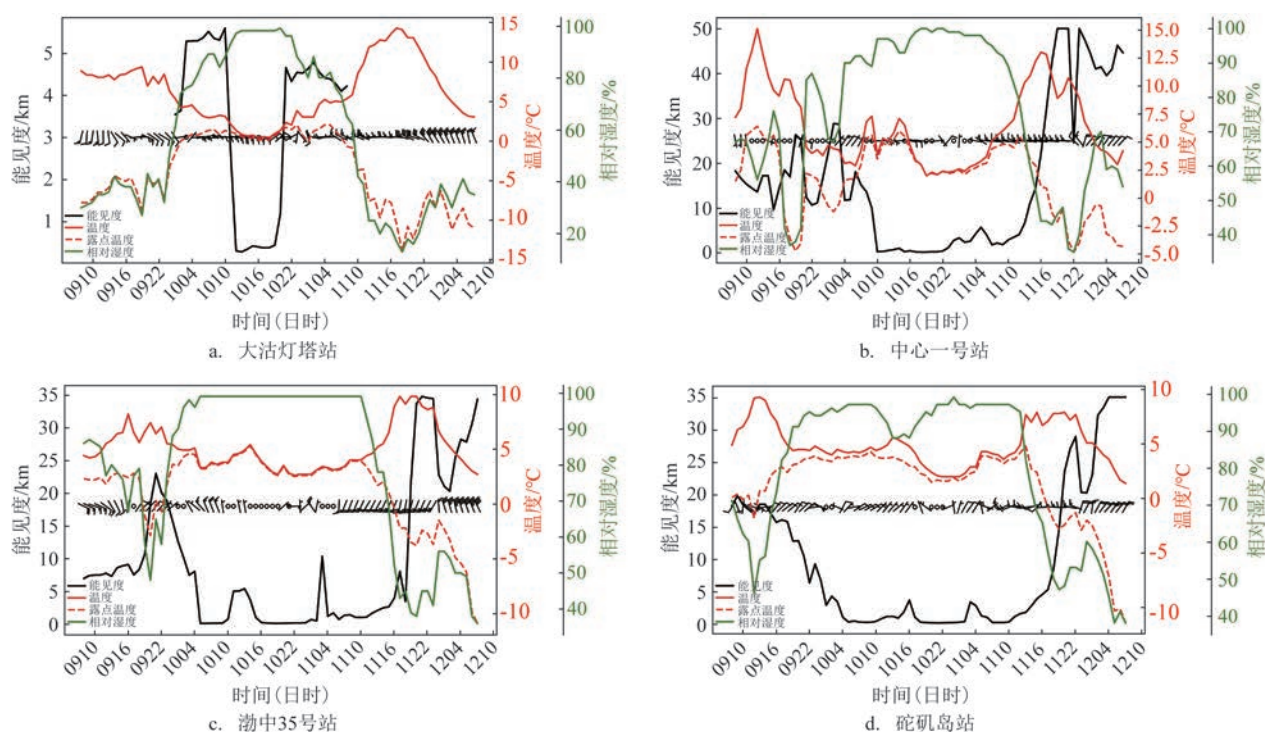


图3 2019年3月9日08时—12日07时能见度、2 m气温、露点温度、相对湿度和10 m风场序列

Fig.3 Time series of visibility, 2-m air temperature, 2-m dew point temperature, relative humidity and 10-m wind fields from 08:00 BJT 9 March to 07:00 BJT 12 March 2019

持雾层稳定和湿度方面发挥着关键作用。

3.2 水汽输送条件

在海雾形成前,黄渤海位于海上高压系统后部,稳定持续的偏南外围气流向渤海输送水汽,为海雾的形成和发展提供了有利的水汽条件。ERA5再分析资料显示,9日白天1 000~850 hPa高度层存在显著的偏南气流,该气流自东海向北输送过程中,首先在中国东部沿海形成明显的水汽辐合区。随着气流持续向北推进,渤海海峡和黄海北部又发展出第二个水汽辐合中心(见图4a),导致上述海域水汽含量显著增加,对应相对湿度场中呈现两个明显的高值区(见图4b)。然而,由于整体相对湿度维持在80%以下,且缺乏明显的下沉运动,9日白天未

形成海雾。10日02时,随着蒙古高压的向南推进,渤海风向转为东北风,西北太平洋暖湿气流与大陆东北气流在渤海交汇,渤海水汽辐合增强(见图4a)。伴随冷空气的降温效应,水汽更容易在较低温度下凝结,区域相对湿度显著上升,原先两个相对湿度高值区数值均超过80%(见图4b)。10日08时,随着弱冷空气的入侵和加强,整个黄渤海受到北—东北气流影响(见图4a),渤海及黄海北部出现显著的下沉运动(见图4b),相对湿度大值区和下沉运动区的分布与10日白天的雾区形态十分吻合。需要说明的是,受观测垂直层次、资料分辨率差异影响,站点观测的局地风场(如9日下午砣矶岛站记录的东北风,见图3d)与再分析资料反映的大尺度环流特征可能存在不一致,但二者并不矛盾。

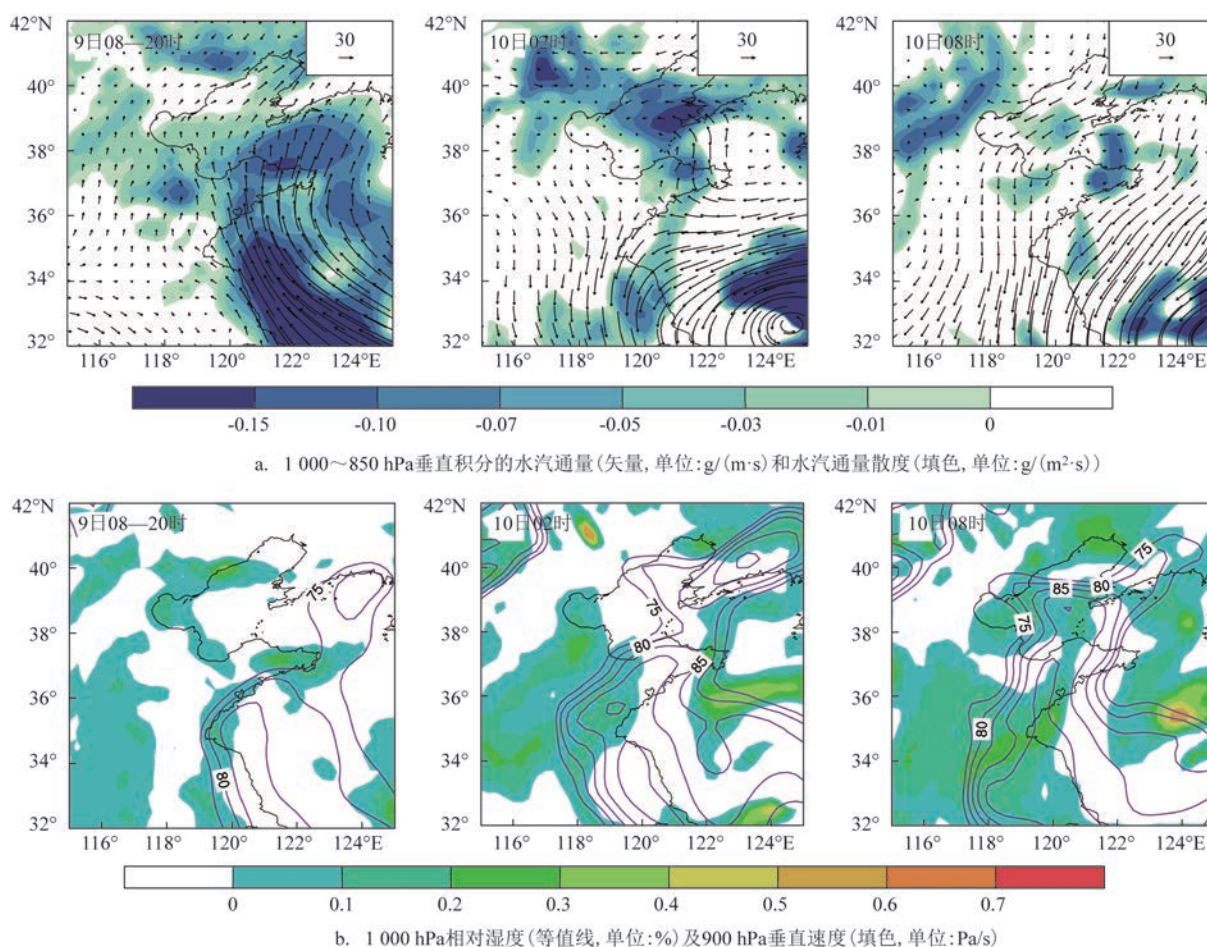


图4 不同时刻的水汽通量和水汽通量散度、相对湿度和垂直速度分布

Fig.4 Spatial distributions of water vapor flux, water vapor flux divergence, relative humidity and vertical velocity at different times

3.3 弱冷空气条件

在海雾形成前期,渤海、渤海海峡和黄海北部以暖平流输送为主;随着弱冷空气南下,9日夜间渤海近海面层出现弱冷平流,10日早晨冷平流有所增强(见图5a)。区域平均空间剖面图显示,2019年3月10日03—21时,对流层低层存在上暖下冷的配置(即上部为暖平流、下部为冷平流,或下部为强冷平流、上部为弱冷平流),同时伴随下沉运动,使得逆温层得以维持(见图5b)。从水汽通量散度和相对湿度垂直剖面来看(见图5c),海雾发生前(9日白天—10日前半夜),850 hPa以下存在明显的水汽通量散度负值,表明近海面层存在水汽辐合,配合弱下沉运动,使水汽集中在近海面层。10日后半夜,受弱冷空气影响,前期积累的水汽发生凝结,相对

湿度增加,进而形成海雾。

3.4 弱冷空气引起的边界层条件和混合层高度变化

3.4.1 逆温层

稳定的大气层结是海雾生成和维持的关键因素之一。本文选取乐亭站、渤中35号站及砣矶岛站,分别代表渤海西部、中部和东部海域,全面分析弱冷空气对大气边界层的影响。由于渤中35号站和砣矶岛站缺少探空资料,且乐亭站每日仅在08时、20时开展探空观测,无法获取9日14时的气象数据,因此统一采用ERA5再分析资料绘制T-logP图。通过对比10日08时乐亭站实测探空图与ERA5数据绘制的探空图(图略),发现两者在边界层逆温、近地面湿层及风场垂直廓线等特征上一致性较好,偏差处于合理范围,表明ERA5数据适用于

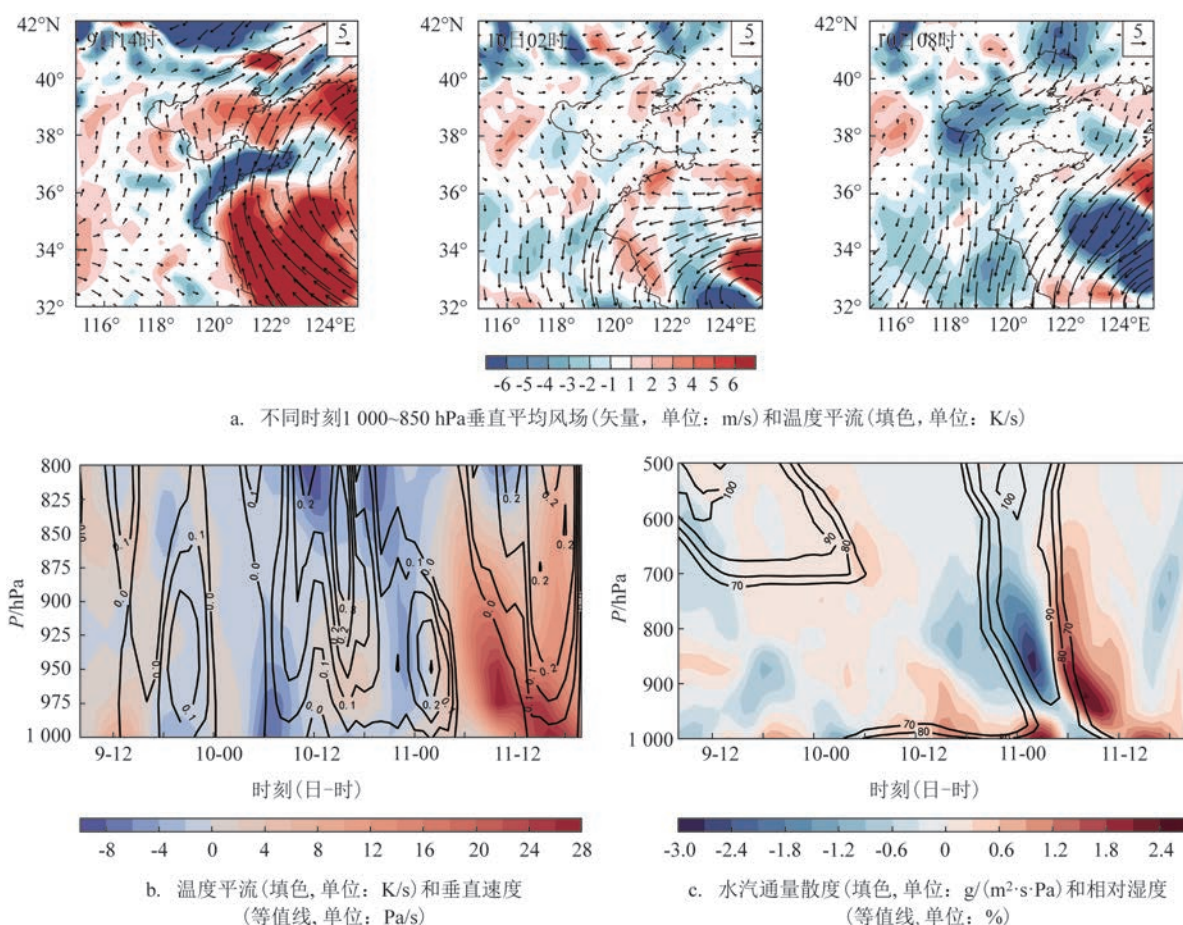


图5 不同时刻的风场和温度平流场及2019年3月9日08时—11日20时海雾重点区域的时间-气压剖面图

Fig.5 Wind fields and temperature advection fields at different times, and time-pressure cross-sections of the key sea fog area from 08:00 BJT 9 March to 20:00 BJT 11 March 2019

本研究。

9日14时,研究区域低层以西南气流为主,温度露点差较大(见图6a、6c、6e)。10日08时,低层风场由西南风转为东北风,渤海受大陆干冷空气影响。值得注意的是,在此弱冷空气影响下,各站点气温普遍下降,露点温度却呈上升趋势(见图6b、6d、6f),温度露点差显著减小。造成这一现象的主要原因是:弱冷空气驱动的东北风与西北太平洋暖湿气流在渤海交汇,水汽辐合显著增强(见图4a),近海面比湿增大;同时,弱冷空气伴随的下沉运动(见图4b)进一步促进近海面水汽积聚。受水汽条件变化影响,逆温层被抬升至约950 hPa高度,形成具有一定厚度的稳定层结。该逆温层上部为干冷空气,近海面层因水汽增加而维持高湿状态。这种“上干下

湿”的层结结构具有双重效应:一是逆温层顶的干冷空气有利于雾顶长波辐射冷却;二是稳定的层结条件和近海面充足的水汽供应,共同为海雾的维持提供了有利保障。

3.4.2 混合层高度

大气混合层高度是评估污染物和水汽在热力与机械湍流共同作用下垂直扩散能力的重要参数^[31-32]。混合层高度降低会限制污染物和水汽的垂直扩散,有利于近地层水汽集聚。本文采用Nozaki^[33]提出的罗氏法,利用地面气象观测资料,估算渤中35号站和砣矶岛站的混合层高度。计算公式为:

$$h = \frac{121}{6} (6 - P)(T - T_d) + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \ln(Z/Z_0)}$$

式中: h 为混合层高度; $T - T_d$ 为温度露点差; U_z 为 Z

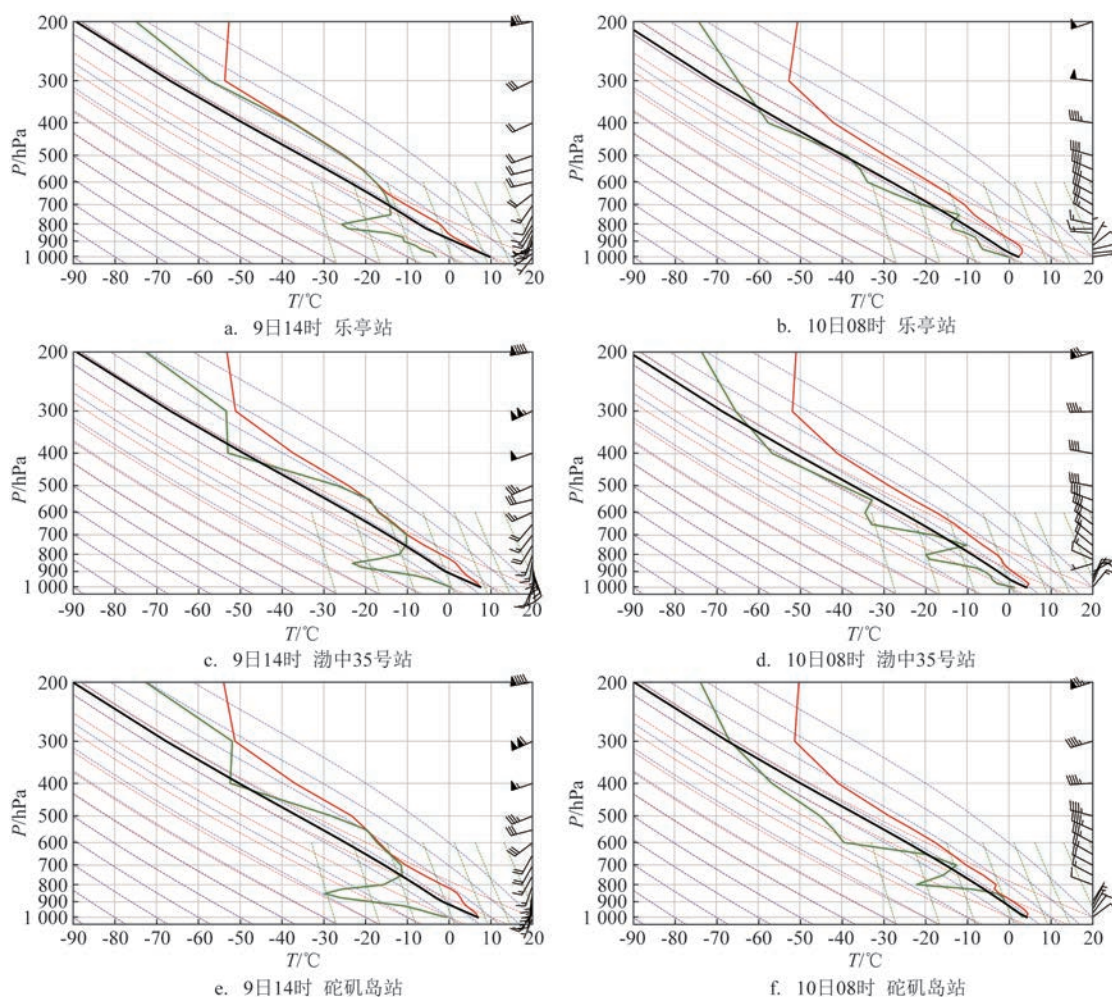


图6 不同站点和时刻的T-logP图

Fig.6 T-logP diagrams for different stations at different times

高度处的风速,本文 Z 取10 m; Z_0 为地表粗糙度,本文取值 $0.000\ 2\ \text{m}^{[34]}$; P 为帕斯奎尔稳定度级别,由太阳高度角、总云量、低云量和地面风速决定,大气稳定度A~F级依次对应取值1~6;由于站点云量数据缺测较多,本文选用ERA5资料代替; f 为地转参数。

从渤中35号站(见图7a)和砣矶岛站(见图7b)混合层高度与能见度的时间序列来看,二者存在一定的相关性。当混合层高度降低,能见度随之下降。渤中35号站3月10日08时—11日00时混合层高度持续低于200 m,与低能见度及大雾天气的持续时段相吻合。砣矶岛站混合层高度自9日12时起至10日前半夜持续显著下降,能见度也逐渐降低,尤其是10日00时—11日00时混合层高度降至300 m以下,与低能见度天气相对应;11—12日,混合层高度有所抬升,能见度也随之提高。

混合层高度变化是多种气象因素综合作用的结果,其中10 m风速是重要的动力因素。风速的变化会显著影响大气的湍流混合程度。一般而言,风速增大可加剧大气湍流混合,垂直方向上的空气交换更加活跃,促使混合层高度升高;风速减弱时则

效果相反。由图7c、7d可见,在弱冷空气活动阶段,混合层高度变化与10 m风速波动具有较高一致性。3月10日00时后,风速有所增强,混合层高度在部分时段上升。然而,弱冷空气具有冷性下沉的特点,入侵时近地面空气密度增大,在一定程度上抵消了风速增强的促进效果,抑制混合层高度进一步升高。因此,尽管风速间歇性增强使混合层高度短时上升,但弱冷空气影响时段的混合层高度整体低于冷空气影响前期。

此外,感热通量(通量向下为正)与混合层高度变化也表现出一定关联。弱冷空气活动阶段,感热通量由正值转为负值,表明热量输送方向由大气向海表输送转变为海表向大气输送。这一转变与近地面气温下降密切相关,海气温差(海温-气温)由负值转为正值(图略)。冷空气入侵后,低层大气温度低于上层大气,形成逆温层(见图6d、6f),抑制湍流垂直发展,导致混合层高度降低^[35]。逆温层限制了热量和水汽的垂直扩散,使水汽、热量聚集于浅层内,进而引起近地层温度增加、相对湿度升高、能见度显著下降^[36]。

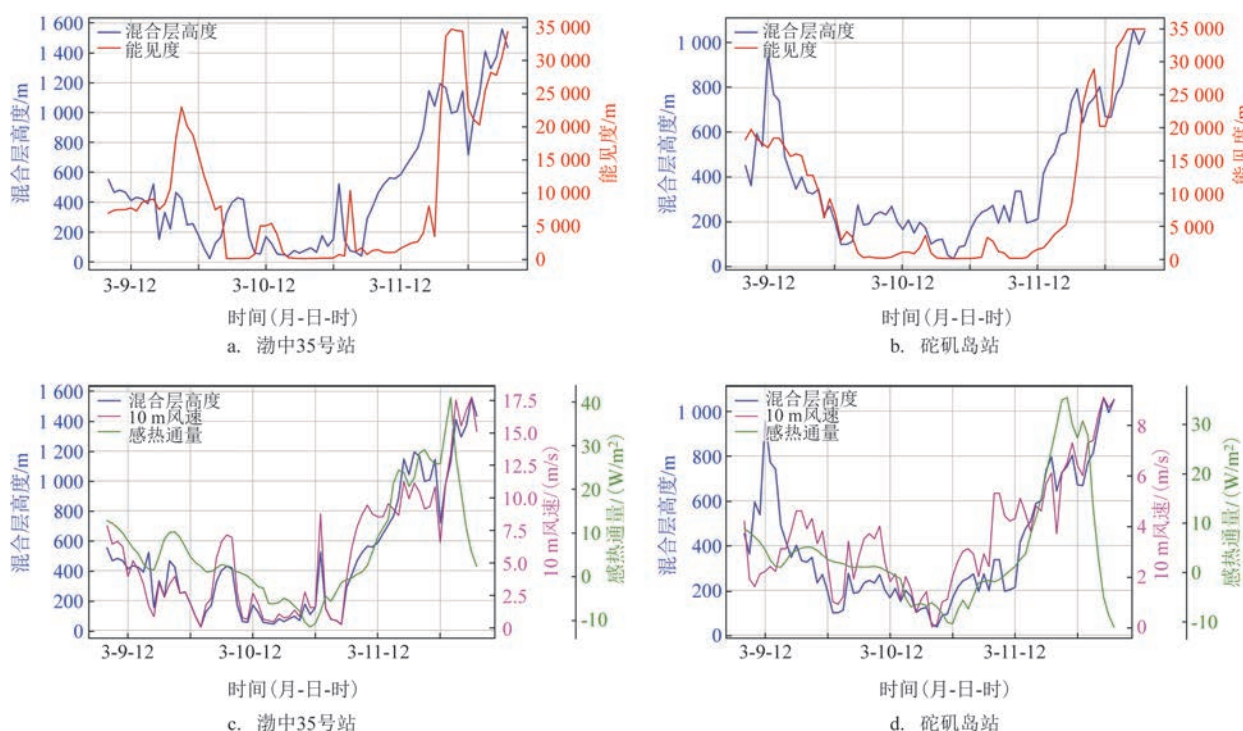


图7 2019年3月9日08时—12日08时能见度、混合层高度、10 m风速及海表感热通量时间序列

Fig.7 Time series of visibility, mixed-layer height, 10-m wind speed and sea surface sensible heat flux from 08:00 BJT 9 March to 08:00 BJT 12 March 2019

综上所述,弱冷空气活动不仅能通过影响10 m风速来调控混合层高度,还能通过改变感热通量以及逆温层结进行调节。多重作用机制表明,弱冷空气在此次海雾过程中扮演着至关重要的角色,会对混合层高度和能见度产生显著影响。

4 敏感性试验

为深入分析水汽和弱冷空气在本次海雾个例

中的作用,本文对比分析了不同试验下海雾各发展阶段的水平雾区(见图8)及雾顶高度(见图9)特征。依据已有研究,本文将WRF模式最底层云水含量(Cloud Liquid Water, CLW) ≥ 0.016 g/kg的区域定义为雾区^[30];同时采用卫星鸟瞰的方式,自上而下将首个CLW ≥ 0.016 g/kg的高度定义为雾顶高度^[29]。

从各试验不同时刻的雾区模拟结果(见图8)来看,3组敏感性试验与参照试验Ctrl的雾区模拟效果存在显著差异。海雾初生阶段(10日00时),T+2、T+

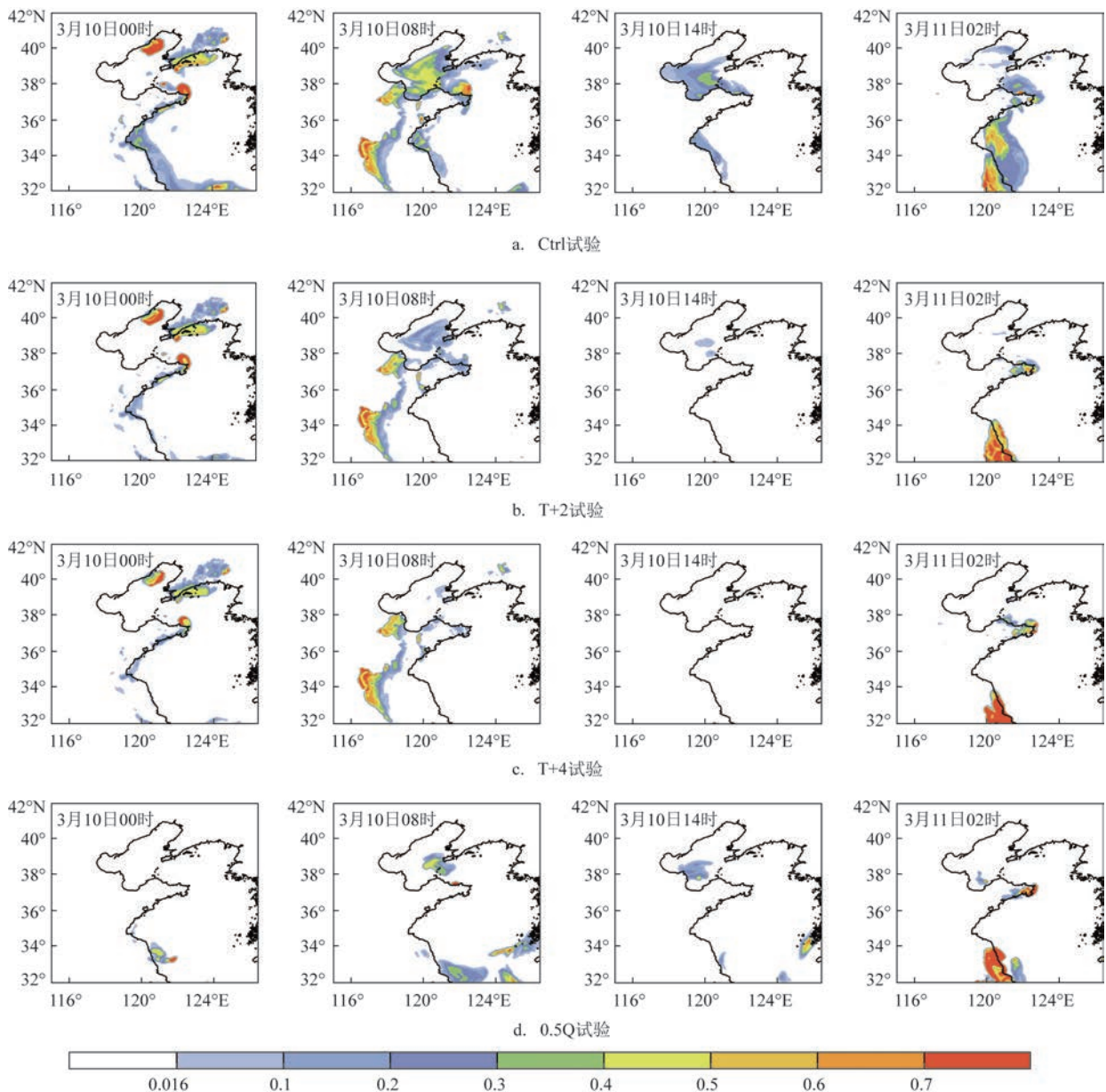


图8 WRF不同试验模拟的雾区分布(单位:g/kg)

Fig.8 WRF-simulated fog area (units: g/kg) for different experiments

4 试验模拟的雾区与 Ctrl 试验相近,但在海雾发展阶段(10 日 08 时),两组试验模拟的雾区范围相对 Ctrl 试验明显缩减(见图 8a—c)。具体而言,T+2 试验中雾区提前消散,而 T+4 试验的雾区在 3 月 10 日 08—14 时基本消失。这表明,减弱或消除弱冷空气的降温效应,海雾将难以形成和发展。0.5Q 试验结果则揭示了水汽在海雾生成中的关键作用:当初始场水汽减半,初始时刻(10 日 00 时)研究海域无海雾生成,且发展阶段的雾区范围也显著小于 Ctrl 试验(见图 8a,8d)。

从雾顶高度的模拟结果(见图 9)来看,温度敏感性试验虽然可改变雾区范围,但对雾顶高度的影响相对较小,模拟雾区的雾顶高度极大值与 Ctrl 试验基本一致(见图 9a、9b)。而水汽敏感性试验模拟的雾顶高度却明显降低,如 Ctrl 试验中渤海海峡雾顶高度极大值介于 300~400 m,而 0.5Q 试验的雾顶高度仅为 100~200 m(见图 9a、9d)。

进一步分析表明,弱冷空气强度和水汽条件对渤海大气边界层结构具有显著影响。图 10 为渤海

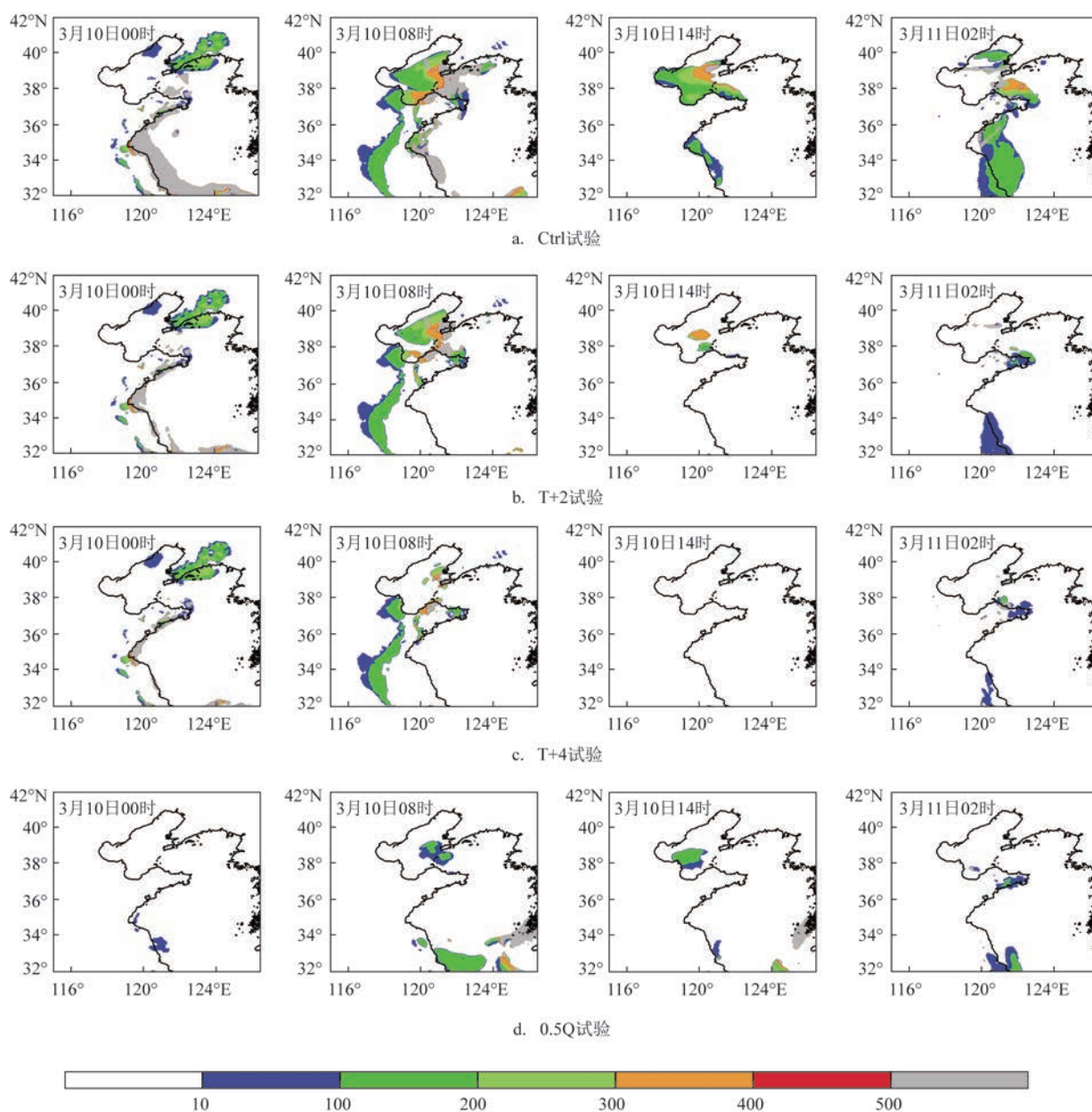


图9 WRF不同试验模拟的雾顶高度(单位:m)

Fig.9 WRF-simulated fog-top height (units: m) for different experiments

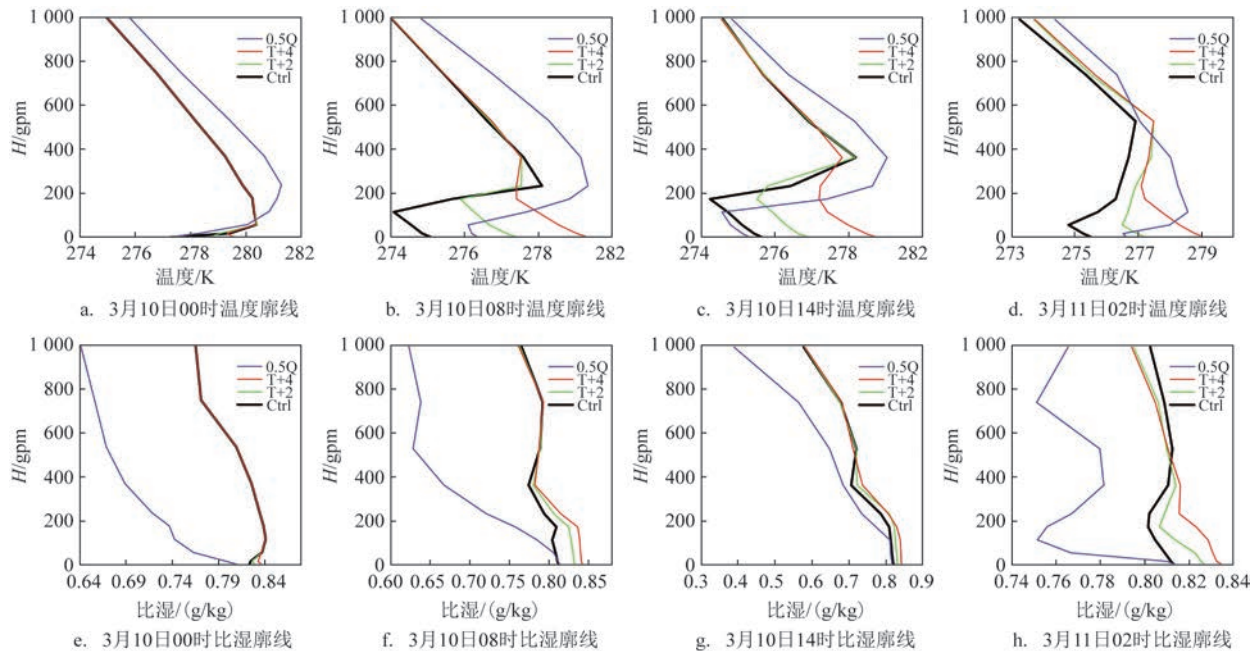


图10 WRF模拟的渤中35号站温度和比湿廓线图

Fig.10 WRF-simulated temperature and specific humidity vertical profiles at Bozhong35 Station

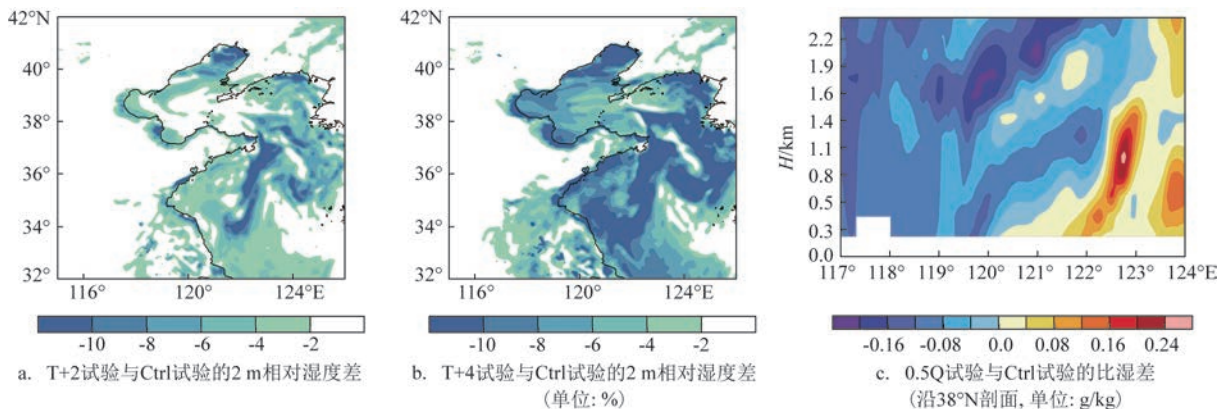


图11 10日14时T+2、T+4、0.5Q试验与Ctrl试验2 m相对湿度差及比湿差垂直剖面图

Fig.11 Spatial distributions of 2-meter relative humidity difference and vertical cross-section of specific humidity difference between the T+2, T+4, 0.5Q experiments and the Ctrl experiment at 14:00 BJT 10 March

35号站(38.08°N, 119.83°E)在不同时刻、不同试验下的温度和比湿垂直分布特征。增温试验(T+2、T+4)中,弱冷空气强度下降,导致逆温层强度较Ctrl试验明显减弱(见图10b—d),层结稳定性下降,湍流混合作用增强。尽管逆温层顶高度与Ctrl试验同步抬升(见图10a—c),但偏弱的逆温结构无法有效抑制雾滴扩散。同时,气温升高使饱和水汽压增大,近海面比湿虽有所增加(见图10f—g),但相对湿度值却降低(见图11a—b),雾滴蒸发加快。上述效应

共同导致T+2和T+4试验的雾区范围缩小、雾过程提前消散。在0.5Q试验中,比湿值明显小于其他3组试验,且比湿随高度增加显著减小(见图10e—h、图11c)。水汽减少导致雾滴凝结所需水量不足,云水生成减少、雾顶长波辐射冷却效应减弱,进一步削弱逆温层强度、增强湍流混合,最终限制雾顶的发展。综上,气温和水汽条件在渤海海雾生消演变过程中发挥关键作用:弱冷空气减弱会破坏逆温层稳定性,通过增强湍流作用加速雾滴的扩散与蒸

发;水汽条件不足则抑制雾滴生成与雾顶发展。两者协同作用导致雾区减小、消散加快,为弱冷空气背景下渤海海雾的预报提供了关键物理机制支撑。

5 结论与讨论

本文基于 Himawari-8 可见光云图和红外通道数据、ERA5 再分析数据以及地面气象站观测资料,对2019年3月9—10日渤海一次海雾过程进行深入分析,探究水汽输送与弱冷空气在此次海雾过程中的协同作用。主要结论如下:

①此次海雾过程的水汽主要来源于西北太平洋。海雾形成前期,黄渤海处于海上高压后部,偏南外围气流持续稳定地向研究区域输送水汽。黄海南部率先形成水汽辐合区,在南—东南风驱动下,暖湿气流向北推进被输送至渤海海峡和黄海北部。随后,偏东风引导暖湿气流越过渤海海峡向渤海输送,为海雾的生成与维持提供了丰富的水汽补给。

②弱冷空气的降温作用是激发海雾形成的关键因素。高空槽东移引导冷空气南下,其降温效应有助于夜间辐射冷却,进一步使大气温度降至露点温度,促使水汽凝结成雾,进而触发海雾生成。

③弱冷空气产生的稳定大气层结对海雾的维持起重要作用。弱冷空气入侵使海面上空的低层大气形成逆温层,稳定的大气层结使大气混合层高度下降,近海面暖湿空气得以积聚,为海雾的发展与维持创造了有利条件。同时,相对湿度大值区与下沉运动区的空间分布与海雾形态高度吻合,下沉运动进一步增强了近海面暖湿空气积聚,促进海雾的持续存在。

④基于 WRF 模式的气温和水汽敏感性试验结果表明,弱冷空气强度减弱时,逆温层稳定性降低,湍流混合增强,较弱的逆温结构无法有效抑制雾滴扩散;同时,气温升高使饱和水汽压增大,近海面比湿增加但相对湿度显著降低,二者共同加速雾滴蒸发,导致雾区范围缩小,海雾持续时间缩短。当水汽供应不足时,低层大气湿度较低,直接限制雾滴生成,导致云水含量减少、雾顶长波辐射冷却效应减弱,最终限制雾顶的发展。

⑤本研究结合观测数据分析与数值模拟试验,

深入探讨了水汽和弱冷空气在渤海海雾形成过程中的协同作用机制,研究仍存在一定的局限性,如仅基于单次海雾个例进行分析,结果的普适性有限;同时,观测数据和再分析资料存在不确定性,可能影响模拟结果的精确度。此外,敏感性试验仅定性分析了弱冷空气强度和水汽变化在海雾过程中的影响,尚未建立弱冷空气影响程度与比湿阈值之间的定量关系,导致本研究成果对相似天气形势下渤海海雾的实际预报指导作用有限。因此,未来的研究应开展多案例分析,以增强结论的普适性;同时结合更高精度的观测资料,建立弱冷空气强度与比湿阈值的定量关系模型,建立可直接应用于业务预报的海雾发生“水汽—冷空气”临界判据。这将有助于进一步提升渤海海雾的预报准确性,为相关领域的研究和实践提供更为坚实的科学依据。

致谢:感谢中国海洋大学高山红教授搭建的海雾预报网站提供卫星云图下载支持。

参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983: 352.
WANG B H. Sea fog[M]. Beijing: China Ocean Press, 1983: 352.
- [2] GULTEPE I, TARDIF R, MICHAELIDES S C, et al. Fog research: a review of past achievements and future perspectives[M]// GULTEPE I. Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting. Basel: Birkhäuser, 2007: 1121-1159.
- [3] SHIN D, KIM J H. A new application of unsupervised learning to nighttime sea fog detection[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 54(4): 527-544.
- [4] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(3): 359-366.
ZHANG S P, BAO X W. The main advances in sea fog research in China[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(3): 359-366.
- [5] FU G, ZHANG S P, GAO S H, et al. Understanding of sea fog over the China seas[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 224.
- [6] HUANG J, ZHOU F X. The cooling and moistening effect on the formation of sea fog in the Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 25(2): 49-62.
- [7] ZHANG S P, XIE S P, LIU Q Y, et al. Seasonal variations of Yellow Sea fog: observations and mechanisms[J]. Journal of Climate, 2009, 22(24): 6758-6772.
- [8] 黄彬, 高山红, 宋煜, 等. 黄海平流海雾的观测分析[J]. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 16-23.
HUANG B, GAO S H, SONG Y, et al. Analysis and observations

- for advective fog over the Yellow Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(1): 16-23.
- [9] 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.
- [10] GAO S H, LIN H, SHEN B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1): 65-81.
- [11] 杨悦, 高山红. 黄前海雾 WRF 数值模拟中垂直分辨率的敏感性研究[J]. *气象学报*, 2016, 74(6): 974-988.
- YANG Y, GAO S H. Sensitivity study of vertical resolution in WRF numerical simulation for sea fog over the Yellow Sea[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, 74(6): 974-988.
- [12] 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.
- [13] TIAN M, WU B G, HUANG H, et al. Impact of water vapor transfer on a Circum-Bohai-Sea heavy fog: observation and numerical simulation[J]. *Atmospheric Research*, 2019, 229: 1-22.
- [14] 田梦, 吴彬贵, 黄鹤, 等. 环渤海近海岸雾产生的天气条件及边界层特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2020, 25(2): 199-210.
- TIAN M, WU B G, HUANG H, et al. The synoptic condition and boundary layer characteristics of coastal fog around the Bohai Sea [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2020, 25(2): 199-210.
- [15] 曲平, 解以扬, 刘丽丽, 等. 1988—2010 年渤海湾海雾特征分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(1): 285-293.
- QU P, XIE Y Y, LIU L L, et al. Character analysis of sea fog in Bohai Bay from 1988 to 2010[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(1): 285-293.
- [16] 曹祥村, 邵利民, 李晓东. 黄渤海一次持续性大雾过程特征和成因分析[J]. *气象科技*, 2012, 40(1): 92-99.
- CAO X C, SHAO L M, LI X D. Analysis of characteristics and causes for a sustained heavy fog over Yellow Sea and Bohai Sea [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2012, 40(1): 92-99.
- [17] 王锐, 刘彬贤. 一次弱冷空气对渤海海雾影响的数值模拟研究[J]. *海洋预报*, 2021, 38(6): 82-92.
- WANG R, LIU B X. Numerical simulation study of the influence of cold air on sea fog in the Bohai[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(6): 82-92.
- [18] ZHU Y Y, LI Z H, ZU F, et al. The propagation of fog and its related pollutants in the central and eastern China in winter[J]. *Atmospheric Research*, 2022, 265: 105914.
- [19] TIAN M, WU B G, WANG J, et al. Impact of the sea effect on sudden fog on the western coast of the Bohai Sea: a case study[J]. *Atmosphere*, 2024, 15(3): 326.
- [20] 柳龙生, 刘莲, 黄彬. 一次入海温带气旋背景下的海雾观测分析和数值模拟[J]. *大气科学*, 2024, 48(4): 1627-1639.
- LIU L S, LIU L, HUANG B. Observation and numerical simulation on a sea fog event during an extratropical cyclone entering the sea[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2024, 48(4): 1627-1639.
- [21] KIM S H, SUH M S, HAN J H. Development of fog detection algorithm during nighttime using Himawari-8/AHI satellite and ground observation data[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2019, 55(3): 337-350.
- [22] 许健民, 张文建, 杨军, 等. 风云二号卫星业务产品与卫星数据格式实用手册[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 60-63.
- XU J M, ZHANG W J, YANG J, et al. Practical manual for FY-2 satellite operational products and satellite data format[M]. Beijing: Meteorological Press, 2008: 60-63.
- [23] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [24] IACONO M J, DELAMERE J S, MLAWER E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D13): D13103.
- [25] DUDHIA J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(20): 3077-3107.
- [26] CHEN F, DUDHIA J. Coupling an advanced land surface hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(4): 569-585.
- [27] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [28] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(1): 170-181.
- [29] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环 3DVAR 改进黄前海雾数值模拟初始场 I: WRF 数值试验[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(10): 1-9.
- GAO S H, QI Y L, ZHANG S B, et al. Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the Yellow Sea by using cycling 3DVAR Part I: WRF numerical experiments[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(10): 1-9.
- [30] YANG Y, GAO S H. The impact of turbulent diffusion driven by fog-top cooling on sea fog development[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(4): e2019JD031562.
- [31] 李梦, 唐贵谦, 黄俊, 等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. *环境科学*, 2015, 36(6): 1935-1943.
- LI M, TANG G Q, HUANG J, et al. Characteristics of winter

- atmospheric mixing layer height in Beijing-Tianjin-Hebei region and their relationship with the atmospheric pollution[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(6): 1935-1943.
- [32] 雷正翠, 郑媛媛, 刘银峰, 等. 2018年常州一次罕见持续性雾-霾天气分析[J]. *气象*, 2019, 45(8): 1123-1134.
- LEI Z C, ZHENG Y Y, LIU Y F, et al. Causes analyses of a severe continuous fog-haze weather process in Changzhou in 2018[J]. *Meteorological Monthly*, 2019, 45(8): 1123-1134.
- [33] NOZAKI K Y. Mixing depth model using hourly surface observation[R]. USAF Environment Technical Application Center, 1973, Report 7053.
- [34] 彭秀芳, 王秀杰, 辜晋德. 海上风电场风能计算中关于海面粗糙度问题的探讨[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(2): 226-229.
- PENG X F, WANG X J, GU J D. Discuss on the sea surface roughness of the wind energy assessment in the offshore wind farm[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2012, 32(2): 226-229.
- [35] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [36] LIU L L, WANG X L, LI Y H, et al. The effect of sea surface temperature on relative humidity and atmospheric visibility of a winter sea fog event over the Yellow-Bohai sea[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(10): 1718.

A case study of Bohai Sea fog driven by the synergistic effects of water vapor transport and weak cold air

SUN Xueqian^{1,2}, WANG Rui¹, LIU Binxian^{1,2}, TIAN Meng^{2,3}, HAN Peipei^{1,2}

(1. Tianjin Central Observatory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Institute of Meteorological Sciences, Tianjin 300074, China)

Abstract: Using the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 5th reanalysis dataset (ERA5), Himawari-8 satellite remote sensing data, ground meteorological observations, and the Weather Research and Forecasting (WRF) model, this study investigates the synergistic mechanism of moisture transport and weak cold air during a sea fog event over the Bohai Sea on 9-10 March 2019. The results show that persistent southeasterly/easterly airflow transported moisture from the northwestern Pacific to the Bohai Sea. Concurrently, weak cold air intrusion guided by a 500-hPa trough induced near-surface cooling, triggering moisture condensation. A temperature inversion layer subsequently developed, promoting fog formation through stable stratification. Sensitivity experiments further confirmed their cooperative roles: weakened cold air destabilized the inversion layer and elevated saturation vapor pressure, accelerating fog dissipation and reducing spatial coverage, whereas reduced moisture supply suppressed fog droplet formation, limiting cloud water production and weakening longwave radiative cooling at the fog top, thereby further destabilizing the inversion layer while enhancing turbulent mixing.

Key words: sea fog over the Bohai Sea; weak cold air; water vapor transport; boundary layer processes; numerical sensitivity experiments