

一次弱冷空气对渤海海雾影响的数值模拟研究

王锐, 刘彬贤

(天津市气象局天津海洋中心气象台, 天津 300074)

摘 要: 利用NECP再分析资料、HMW-8卫星红外4-1通道数据、卫星可见光云图和地面常规观测数据,对2020年3月7—8日渤海海域出现的大范围海雾形成的天气背景和低层温度湿度特征进行分析。结果表明:500 hPa浅槽东移至渤海上空,槽前西南气流为海上输送暖湿空气,槽后弱冷空气在东移过程中受山脉阻挡,沿山脉南下,率先为海面带来的东北向弱冷空气强迫下垫面降温,是导致成雾的重要条件。为研究降温强度对雾区模拟结果的影响,利用WRF模式,对背景场下垫面气温进行敏感性试验,当气温下降6℃时的模拟效果较好,模拟结果在1 000 hPa整层降温显著,利于逆温层结形成,同时在相对湿度大值区增加了东北风量,垂直层结降温增湿的位置与观测事实相符,表明此次弱冷空气过程对下垫面温度的降低,有利于低层水汽凝结,使海雾得以发展。

关键词: 冷空气;渤海;海雾;数值模拟;气温敏感性试验

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)06-0082-11

1 引言

海雾发生于海上及沿海地区的低层大气中,是由水汽凝结导致海上水平能见度低于1 km的天气现象^[1-3]。黄渤海是中国近海发生海雾最频繁的海域之一,海雾直接威胁到海上作业的安全。海雾以平流冷却雾最为常见,是指暖湿空气移动至冷海面凝结成雾^[4]。大气的环流形势与边界层内温湿结构对海雾的生成有重要作用^[5-6]。海雾在冷空气活动频繁的春冬季频发,上游的冷空气补充到海面上空,亦能促进暖湿空气冷却凝结成雾^[3]。受北部长白山脉阻挡,渤海海面率先受到回流弱冷空气的影响,利于海上大气边界层低层形成适宜的海气温差,促进海雾的形成与发展^[7]。

由于海雾发生的广阔海域中缺少观测信息,并且形成条件十分复杂,单纯利用观测手段和统计方

法不能实现对海雾的准确预报,为了将这些复杂的因素引入到海雾的研究中,数值模拟逐渐成为海雾研究和预报的主要手段^[8-9]。本文基于天气预报模式(Weather Research and Forecasting model, WRF)和cycling-3DVar同化方案^[10-11],对2020年3月一次受冷空气影响的海雾个例进行研究。此次海雾过程的特点在于,海雾发生前没有足够的湿度条件,海平面气压稳定,上游高空槽东移引导冷空气侵入低层,冷空气前沿受渤海北部陆地山脉阻挡,低层冷空气沿山脉南下,使渤海海面受弱偏北气流控制。弱冷空气使得边界层内的温度降低,高层温度偏高,有利于形成逆温结构,同时冷空气促进水汽冷却凝结。当海雾发生时,低层开始有西南向气流输送水汽,配合低层的降温过程,符合平流冷却雾的生成机制^[12]。此次海雾发生前,影响渤海低层的弱冷空气是导致成雾的重要因素,本工作为冷空气

收稿日期: 2020-11-21; 修回日期: 2021-03-11。

基金项目: 天津市自然科学基金(19JCYBJC23700);天津市气象局科研项目(202130ybxm12);天津市科技计划项目(18ZXQSF00130);中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J021)。

作者简介: 王锐(1993-),男,助理工程师,硕士,主要从事海洋气象预报和海雾数值模拟研究。E-mail: 544340965@qq.com

通讯作者: 刘彬贤(1974-),男,正研级工程师,本科,主要从事海洋气象研究。E-mail: 379356841@qq.com

发生前的海雾预报研究提供参考。

2 天气背景分析

2020年3月7—8日在黄渤海发生了一次大范围海雾过程,夜间海雾的演变是根据Wang等^[13]提出的反演方法,利用HMW-8红外通道数据反演得到。

8日08时(北京时,下同),卫星俯拍到渤海和黄海大部分海区被海雾和高云的结合云体覆盖,云体西侧边界清晰,与海岸线走向吻合,云体形态考虑为海雾;随后南部及北部雾区逐渐消散,主体呈东北西南向带状分布;夜间雾区大面积消散,零散分布于山东半岛附近,21时海上雾区基本消散(见图1a)。

为证实高云覆盖之下低层有海雾生成,利用地

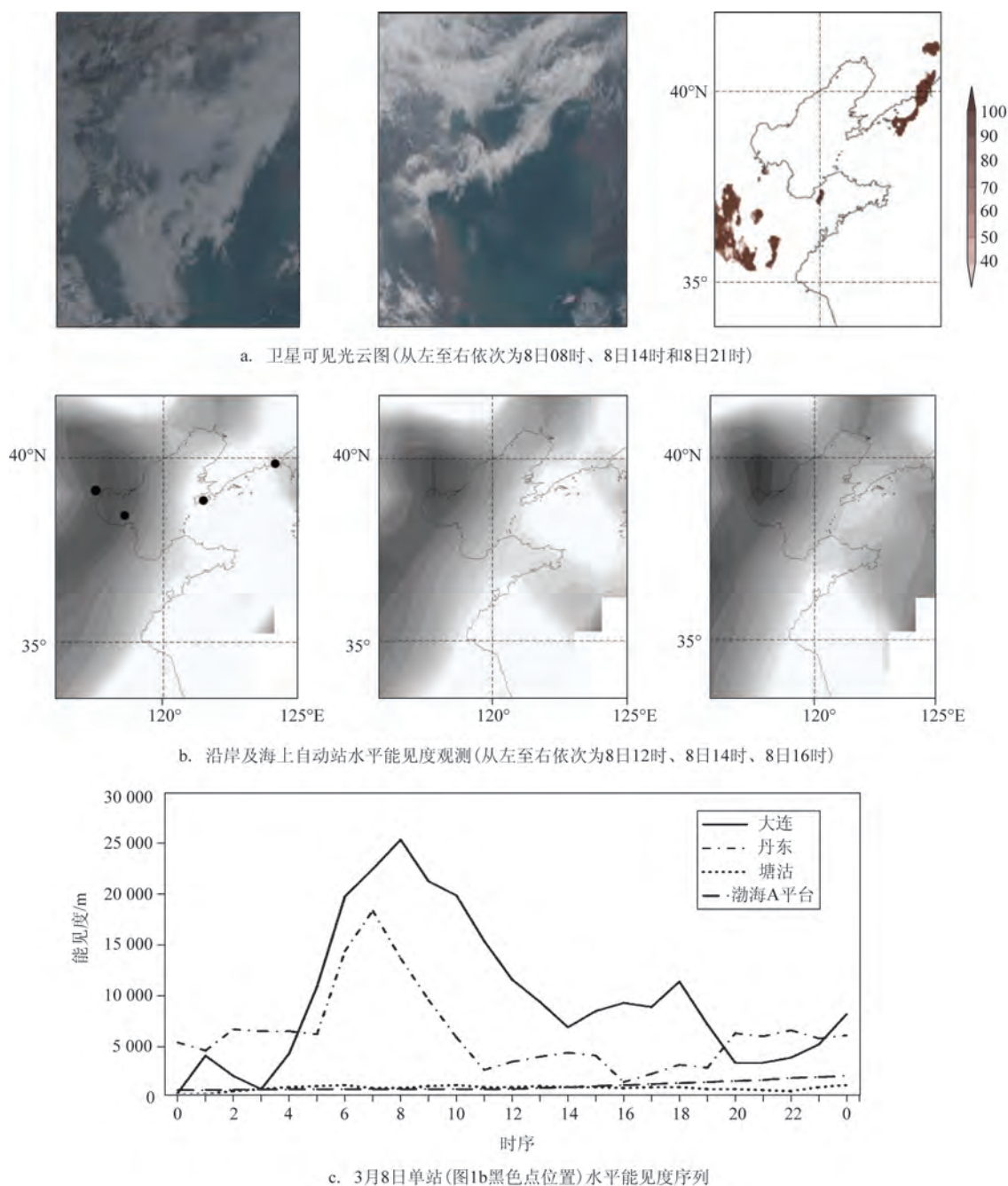


图1 海雾雾区与水平能见度观测

该图基于审图号为GS(2020)4630号的图层制作,底图无修改

面及海上自动站水平能见度观测数据(见图1b),能见度在5 km以下(轻雾和雾)的范围与可见光云图的云体分布吻合。渤海湾云体较厚,渤海A平台及塘沽站全天能见度均在2 km以下,个别时段小于1 km(见图1c),达到了海雾标准;午后雾区向黄海北部扩散,大连与丹东站能见度迅速降至10 km以下,达到轻雾级别。结合卫星和地面能见度观测资料,此次海雾过程覆盖渤海及黄海北部海域,与陆地雾相连呈东北西南走向,海雾在渤海湾浓度较大,雾区自西向东发展扩散。

从天气形势上看(图略),500 hPa高空槽移至贝加尔湖附近,上游偏西气流引导冷空气东移,山东半岛有高空浅槽;700 hPa在渤海上空出现冷舌,环流形势稳定,受上游偏北气流影响,为该层补充弱冷空气;850 hPa渤海上空受反气旋式环流控制,利于低层水汽辐合,在冷舌配合下,渤海—山东半岛的温度露点差 $<3^{\circ}\text{C}$,水汽凝结显著,上游温度梯度密集,海上降温过程将持续,降温增湿过程得到稳定维持,利于海雾发展。

地面形势场中,7日08时地面高压位于渤海西北部,渤海海面位于东西两高压之间的低压带,水汽从黄海向北输送,同时受冷空气回流影响,渤海北部风向转为东北风,低层温度降低;20时海面风力较弱,南部以偏南气流为主输送水汽;8日08时受黄海北部高压控制,海面温度降低,利于逆温结构的形成^[14],东北气流与偏南气流沿高压边缘在山东

半岛南侧汇合,利于水汽凝结,导致海雾在该海域稳定维持。

3 温湿特征分析

3.1 降温增湿

3月气温逐渐回暖,但海表面温度依然低于气温,海温整体呈由南向北梯度递减。当暖空气遇到冷海面,会利于水汽的冷却凝结。宋亚娟^[15]对北太平洋海雾发生频率的气候学特征研究表明,黄海海面温度与大气温度的差值在 $-2\sim-1^{\circ}\text{C}$ 是成雾的海气温差适宜条件,温度差值太大,水汽不易达到饱和凝结成雾。

7日08时是此次海雾过程的初始阶段(见图2a),海面开始受回流冷空气影响,渤海海域海气温差在 -5°C 以上,过低的温差不利于水汽凝结,黄海北部及中部海区海气温差满足 $-2\sim-1^{\circ}\text{C}$ 的条件,此时雾区主体发生于黄海海面;8日08时(见图2b),冷空气使海面温度降低,渤海北部海气温差减小至 -2°C 左右,相比7日更利于水汽凝结,黄海海面仍然保持良好的温差条件,此时海雾雾区覆盖黄海大部及渤海海域,符合观测事实。

8日08—20时,受回流冷空气影响,2 m气温由南向北梯度递减,08时渤海北部温度在 2°C 左右(见图3a),低温利于水汽凝结,同时强迫海温,降低

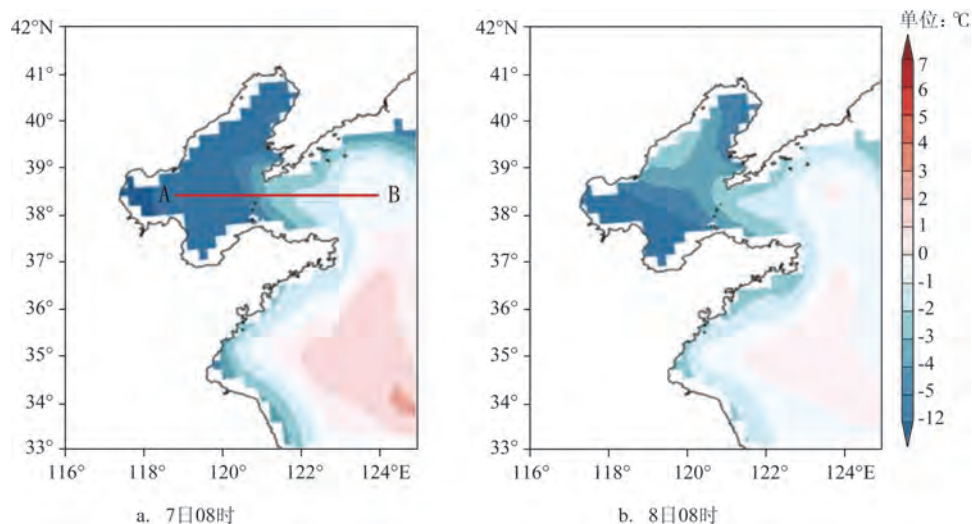


图2 海气温差分布(AB线代表沿纬向做垂直剖面的位置)

该图基于审图号为GS(2020)4630号的图层制作,底图无修改

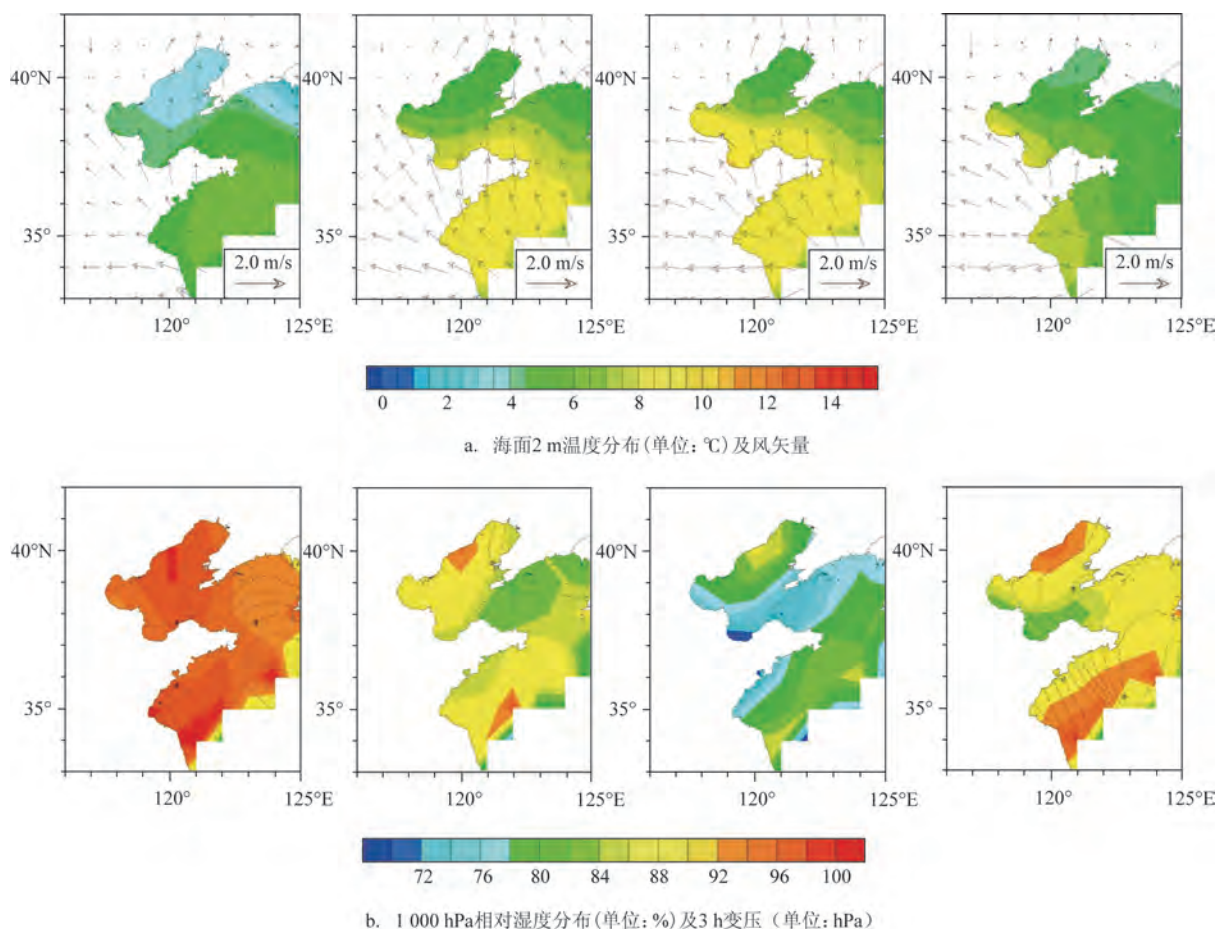


图3 8日08—20时温度、风、湿度和变压(从左到右依次为08时、11时、17时和20时)

下垫面温度,促进偏南暖湿气流输送至低温区冷却,利于海雾的发展。午后,随太阳辐射增强,气温略有升高,海面上空最低温度升至 6°C 左右,仍维持北冷南暖分布,海面蒸发作用增加空气湿度,同时偏南风力增加,水汽输送强烈,使得雾区得以维持。夜间,海面温度整体降低,温度梯度不大,偏南气流输送强度减弱,凝结条件减弱,导致海雾逐渐消散。

8日08时(见图3b),海面受高压控制,偏南风为海面输送暖湿空气,相对湿度整体较高,黄海北部及东南沿海相对湿度达到99%以上,低层大气接近饱和,与观测事实主体雾区位置对应,同时该海区低层出现3h变压正值区,降温作用显著,利于水汽凝结成雾。午后受太阳辐射影响,低层相对湿度降低,3h变压强度减弱,仅黄海北部海区降温作用得以维持,对应观测事实雾区逐渐消散。夜间随着气温降低,3h变压增强,但低层相对湿度最高仅在90%左右,不足以使雾区进一步发展。

3.2 水汽条件

1 000 hPa水汽通量与水汽通量散度表明,8日08时(见图4a),水汽在渤海中部、黄海中部及黄海南部辐合效果明显,与该时刻相对湿度大值区一致;14时(见图4b),水汽辐合区在黄海北部、山东半岛及黄海南部沿岸三点一线,与观测雾区东北西南的带状分布吻合;夜间水汽辐合区整体减小,海面水汽条件减弱,不利于雾区进一步发展。受低层冷空气的影响,低层海面以偏北风为主,整个过程的南向水汽输送表现不佳,结合湿度分析,海面上空水汽含量充沛,输送作用不是主要因素。

4 海温敏感性试验

4.1 模式数据

(1) 利用美国国家环境预报中心(National

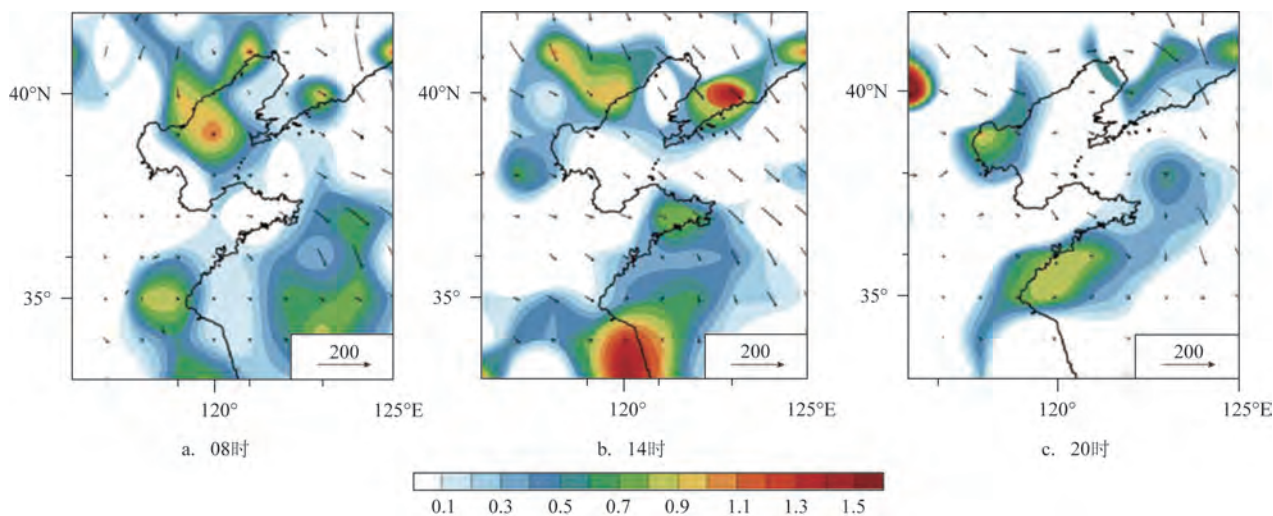


图4 8日1000 hPa水汽通量(箭头矢量,单位: $\text{g}/(\text{hPa}\cdot\text{cm}\cdot\text{s})$)与水汽通量散度(填色,单位: $10^{-5} \text{g}/(\text{hPa}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{s})$)分布

该图基于审图号为GS(2020)4630号的图层制作,底图无修改

Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的FNL(Final Reanalysis Data)再分析数据生成WRF模式的背景场和侧边界条件,模式底边界条件利用 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的日平均海温数据(North-East Asian Regional Global Ocean Observing System, NEAR-GOOS, 网址: <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>)。

(2)将常规地面和探空观测数据用于同化过程。基于HMW-8卫星红外通道数据反演海雾雾区,并进行雾区预报准确率评分(网址: <http://222.195.136.24>)。

4.2 模式设置

模拟过程均采用2层嵌套区域(图略),投影方式为兰伯特投影,区域中心为(37.5°N , 120.5°E),模拟大分辨率分辨率为30 km,嵌套区与分辨率为10 km,格点数分别为 130×151 与 91×91 ,模式垂直分为44层,时间步长为180 s,边界层方案为YSU方案,积云对流方案为Kain-Fritsch方案,微物理方案为PLin方案,辐射方案分别为RRTMG长波辐射方案和Dudhia短波方案,背景误差方案为CV5。

同化过程采用高山红等^[10-11]提出的cycling-3DVar同化方案,为模式提供更高质量的初始场。

4.3 试验设计

基于WRF模式与cycling-3DVar同化方案,利

用FNL再分析数据生成模式背景场,同化常规地面和探空观测数据。将雾区模拟结果(见图5a)与观测事实对比,在模拟初始时刻,雾区形态与观测相似,主体覆盖渤海海区,南部延伸至东南沿海,渤海北部雾顶高度大于400 m;午后雾区范围逐渐减小,雾区北部和东部边界整齐,与观测事实相吻合,北部雾顶高度逐渐降低;夜间雾区主体形态稳定,渤海东北部和山东半岛陆地雾区进一步发展,雾顶高度在400 m以上。

从该模拟效果分析,虽然雾区主体形态与观测接近,且大致模拟出了雾区消散的过程,但在初始时刻沿岸陆地产生了大片的虚假雾区,模拟后期雾区再次发展,与观测事实相悖。为分析回流冷空气强度对雾区模拟效果的影响,将冷空气强度作为海表面气温的影响因子,对模式背景场2 m气温(后简称“气温”)值进行敏感性试验,详见表1。

表1 海温敏感性试验

试验编号	背景场2 m气温调整
Exp-1	不调整气温
Exp-T-2	气温下降2℃
Exp-T-4	气温下降4℃
Exp-T-6	气温下降6℃
Exp-T-8	气温下降8℃

4.4 模拟结果分析

4组敏感性试验的雾区形态(见图5b—e)与Exp-1有显著差别,试验中气温降低的幅度代表冷空气的强弱。Exp-T-2(见图5b)的雾区范围和雾顶高度在整个时段都显著增大,虚假雾区过大且未能模拟出雾区的真实形状;Exp-T-4(见图5c)气温降低4℃后,雾区范围明显缩小,初始时刻雾区分布在渤海湾和黄海中部沿岸地区,随后南部雾区消失,仅有北部雾区维持发展,虽然初始时刻雾区位置与相对湿度大值区和水汽输送区域一致,但后期雾区模拟结果的范围过小,漏报明显;Exp-T-6(见图5d)初始时刻很好地模拟出了雾区的真实形态,且雾顶高度大值区与观测事实较为吻合,随着降温强度的增大,使水汽充足区域的雾体更厚,且并未造成过多的虚假雾区,但后期未模拟出雾区消散的过程;Exp-T-8(见图5e)的降温强度最大,海雾的范围随之显著扩大,其中雾区高度并无显著差异。

进行直观分析后,利用客观统计评分方法,选取本次海雾覆盖区域,将观测与模拟的雾区离散到该区域内的网格点上,对两者进行逐点统计评分,评估雾区模拟效果的优劣。利用HMW-8卫星红外4-1通道数据,根据Wang等^[13]设计的海雾反演方法得到观测雾区,模拟雾区为WRF模拟结果中模式最底层云水含量 ≥ 0.016 g/kg的区域,同时效仿卫星鸟瞰方式,将雾顶高度定义为从高至低云水含量 ≥ 0.016 g/kg^[10]且高度低于400 m的位置^[16]。在雾区统计评分的区域内(与图5雾区模拟结果的范围相同,已将海上及陆地被高云覆盖的区域剔除),将全部模拟时次的观测雾区和模拟雾区插值到相同的网格($0.1^\circ \times 0.1^\circ$)上进行比较,取平均值。

本文利用4个指标评估雾区模拟效果:命中率(Probability of detection, POD)代表准确模拟雾区占真实雾区的比例,POD = 1代表模拟雾区完全与真实观测吻合;正报率(Success Ratio, SR)表示雾区模拟准确的格点数占全部雾区模拟结果的比例;偏差率(Bias)代表真实雾区与模拟雾区格点数之比,结果越接近1越好;公平预兆得分(Equitable Threat Score, ETS)是将上述3个指标的结果综合起来,是更加客观的定量评分标准,其值越接近1,代表模拟的结果越好。

表2表明,Exp-T-6试验的POD与ETS得分皆有提升,分别为11.8%和2.9%,同时Bias减小了16.3%,其中,ETS是4组试验中唯一提升的成员。评分结果表明Exp-T-6能更好地模拟出雾区的位置,且未造成大量的虚假雾区,模拟结果更加接近观测事实^[17],其改进效果是另外3组试验无法相比的。结合客观统计评分结果,将Exp-T-6作为4组敏感性试验中的最优结果,对其模拟结果初始时刻温度与湿度场相对Exp-1的改进效果进行分析。

海雾发生在海上大气边界层中,初始场在该层结内降温与增湿表现的强弱,对雾区的模拟结果十分关键^[18]。1 000 hPa(见图6a),冷空气造成的降温大值区位于渤海西部和黄海中部沿岸,降温幅度在3℃以上,整层的增湿效果明显,与降温区对应的云水含量普遍增加0.5 g/kg以上,降温与增湿的配合利于水汽凝结成雾;模拟后段两块降温区强度减弱,但云水含量依旧处于增长趋势,不利于海雾的消散。925 hPa(见图6b),在模拟初期表现出2℃以上增温效果,冷空气并未对该层的温度造成影响,这种低层降温、高层升温的温度垂直结构有利于逆温层结形成,利于雾区发展;同时该层结增湿效果显著,垂直层结的水汽条件充足是导致模拟结果雾顶高度增高的原因之一。

稳定的逆温层结对海雾的维持与发展有重要作用。结合水平层结冷空气对低层的降温作用,沿图2中AB线位置做垂直剖面。与观测雾区对比,Exp-T-6比Exp-1的雾顶高度更高,在模拟初始时刻(见图7a),渤海湾附近出现了3℃左右、高度约200 m的降温层,位置与观测主体雾区相吻合,但增湿效果并不明显;随后在渤海西部的降温强度显著增大,利于水汽凝结,是导致该区域模拟结果的雾顶高度增大的主要原因;在模拟中后期增湿层出现在黄海北部,增湿效果到达了0.5 g/kg,虽然该区域没有降温层与之对应,但海表面的偏南风为其输送了暖湿空气,充足的水汽条件造成模拟后期雾区难以消散。

为进一步分析低层降温(冷空气)对雾区的影响,结合Exp-T-6与Exp-1在1 000 hPa(图略)风场和相对湿度增量,Exp-T-6在初始时刻渤海湾受冷空气前沿影响,西北风增量明显,对应相对湿度略有增加;受北部山脉阻挡,冷空气转为东北气流回流,降

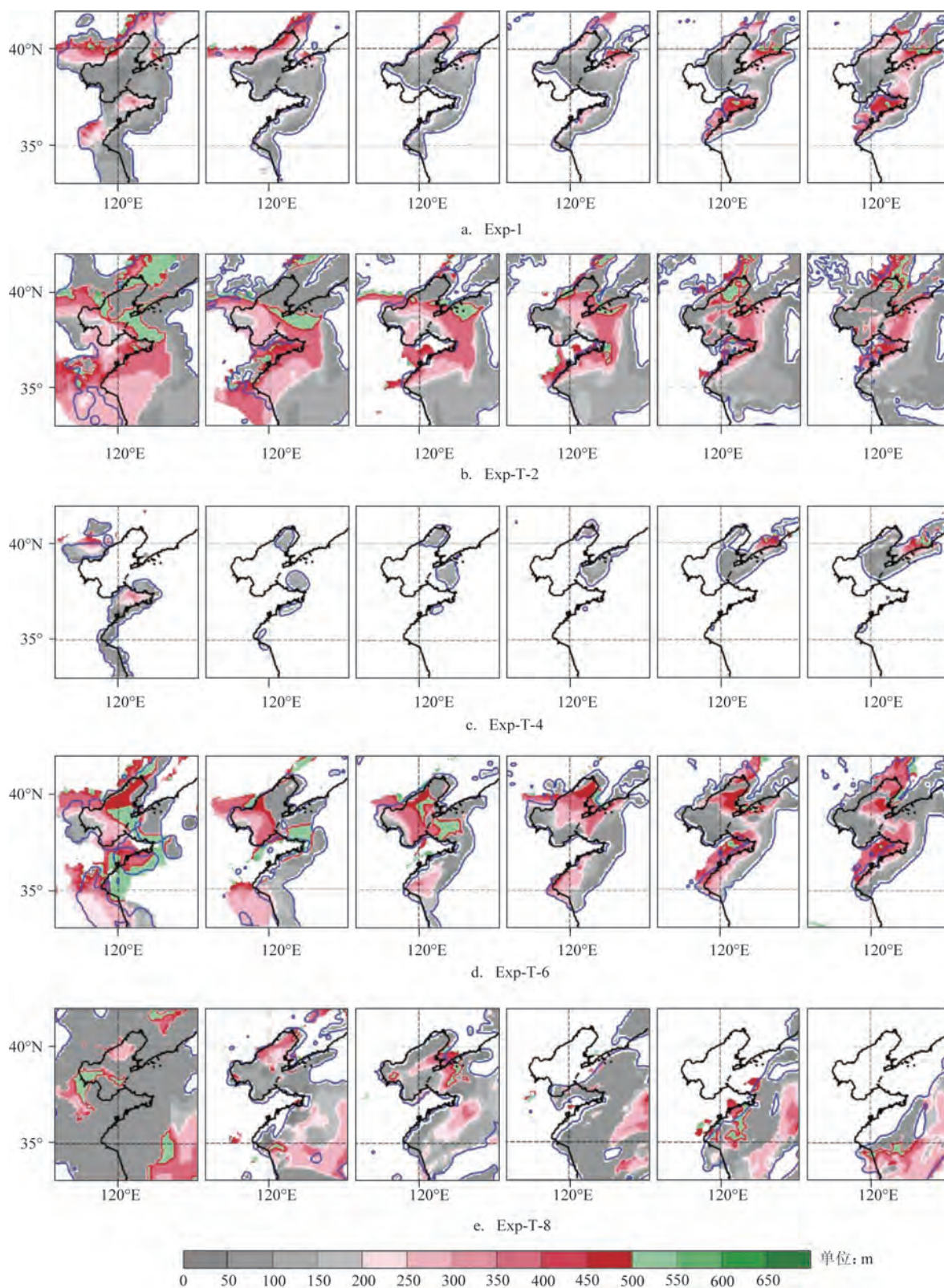


图5 数值试验的海雾雾区模拟结果(从左至右依次为08时、11时、14时、17时、21时和23时;填色为雾顶高度水平分布;
蓝色实线表示10 m高度云水混合比为0.016 g/kg的等值线)
该图基于审图号为GS(2020)4630号的图例制作,底图无修改

表2 4组试验的评分结果(括号中的斜体字表示各项指标相对Exp-1的改进率,单位:%)

试验分组	评分			
	POD	SR	Bias	ETS
Exp-1	0.670	0.466	4.362	0.302
Exp-T-2	0.985(47)	0.216	7.229	0.092(-69.5)
Exp-T-4	0.087(-87)	0.345	1.191	0.036(-88.1)
Exp-T-6	0.749(11.8)	0.383(-17.8)	3.652(-16.3)	0.311(2.9)
Exp-T-8	0.765(14.2)	0.157	4.512	0.015(-95)

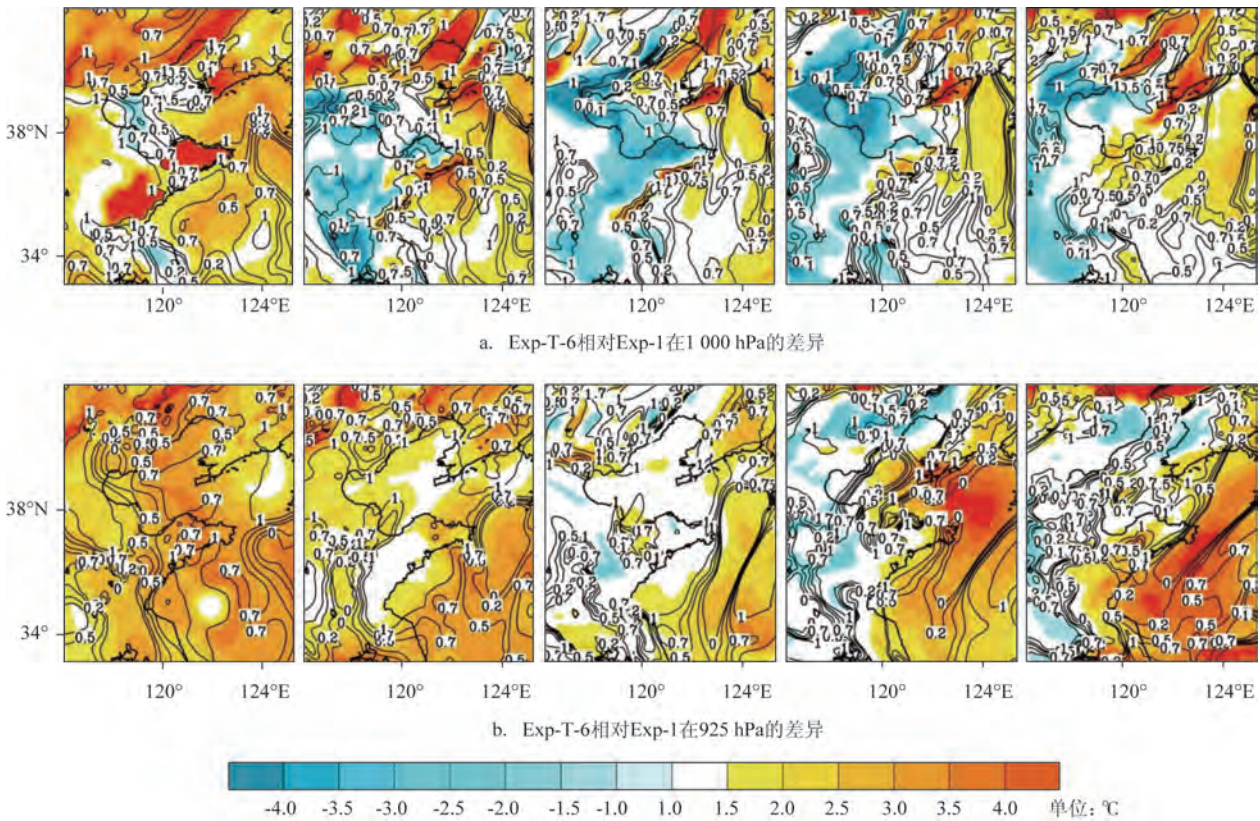


图6 Exp-T-6相对Exp-1在不同高度上的温度与云水含量差异(从左至右依次为08时、11时、14时、17时和20时; 填色代表气温: °C; 黑色实现代表云水含量, 单位: g/kg)

低了背景场低层气温,同时该区域相对湿度显著增加;午后低层东南风增量明显,渤海西部沿岸的暖湿气流输送稳定,水汽条件充足。在模拟中后段冷空气的强度较弱,未能抑制偏南气流,是造成后期雾区未能及时消散的原因之一。

冷空气的强度发生变化会直接影响海气温差,将Exp-1和Exp-T-6模拟结果的海气温差进行比较(见图8), $-2\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是最适合海雾发展的海气温差^[15],模拟初始时刻Exp-1在渤海湾的海气温差为

$-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,此时气温偏高,冷空气降温效果较弱;随后在渤海西部中部海面的海气温差整体增大,冷空气过早地结束不利于海雾维持,而该时段观测中渤海湾仍有海雾稳定维持,显然正常的冷空气强度无法较好模拟出雾区位置。Exp-T-6初始时刻在渤海大部都维持了 $-2\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的海气温差,后期在渤海湾、渤海海峡和黄海北部均保持了适宜的温差条件,且与观测雾区的位置吻合,结合对模式温度和湿度场的改进,显著提升了海雾的模拟效果。

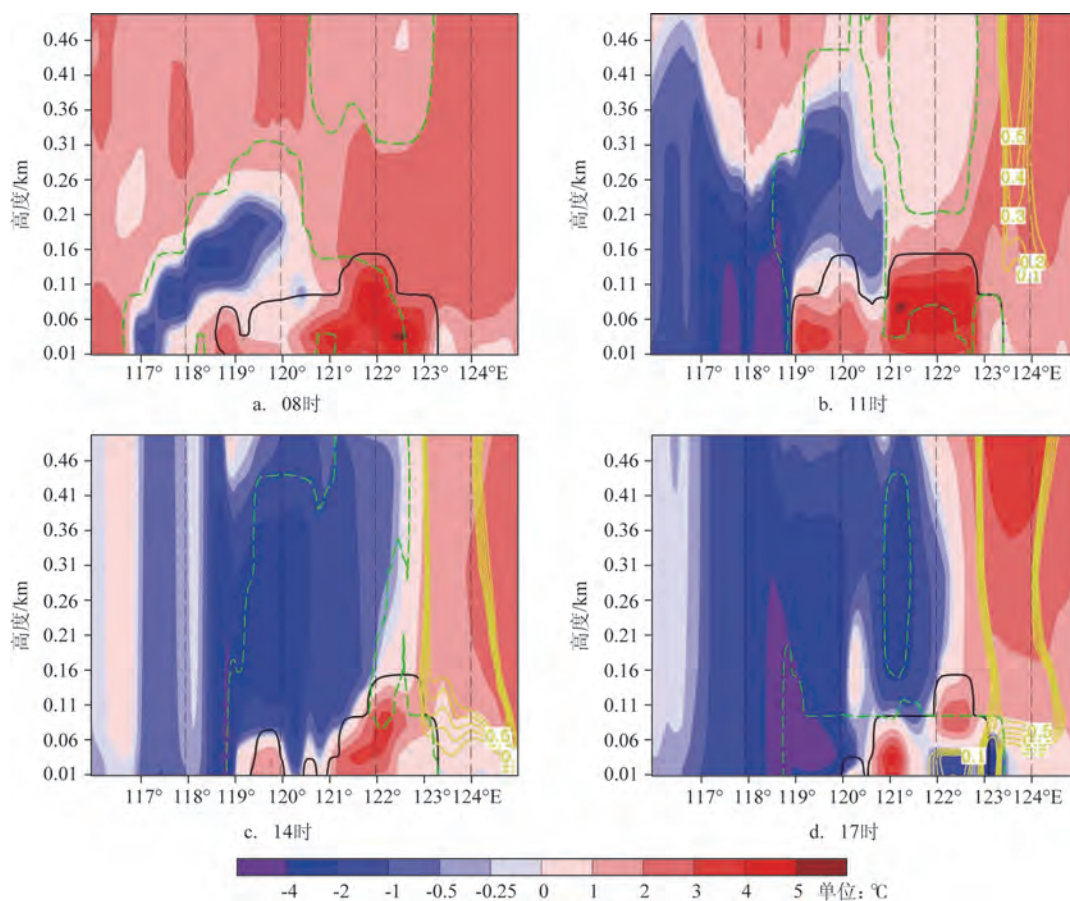


图7 Exp-T-6与Exp-1沿图2中AB线温度和湿度差异的垂直剖面(黄色实线均为云水混合比,单位:g/kg;填色代表温度,单位:℃;黑色实线和绿色实线分别表示Exp-1与Exp-T-6的雾顶高度,单位:km)

5 结论与展望

本文对2020年3月7—8日黄渤海一次大范围海雾过程进行数值模拟研究,得到以下结论:

(1)高空环流稳定,在黄渤海上空形成稳定的环流条件;高空槽引导冷空气东移过程受山脉阻挡,回流南下,为海面上空带来干冷空气;地面受高压控制,成雾区域在高压西侧,是暖气流的交汇区,利于水汽凝结成雾。

(2)冷空气南下强迫低层气温降低,模式背景场下垫面气温的敏感性试验表明,降温强度对雾区模拟结果的改进明显,同时对温度湿度结构影响显著。当气温降低6℃时,雾区客观统计评分结果最佳,在1 000 hPa降温幅度达3℃,水汽混合比增加0.5 g/kg,相对湿度增大,同时增加了偏北风,有利

于成雾区域水汽凝结。

(3)在垂直方向,冷空气仅对1 000 hPa造成显著降温,925 hPa增温明显,利于逆温层结构的形成,降温区配合云水混合比的增加,利于水汽凝结,且降温增湿区与观测主体雾区相符。

得到预期结论之余,我们仍发现工作中存在不足之处,对未来工作展望如下:(1)本次海雾个例受高云覆盖影响,在反演与统计评分中,对低层海雾的识别效果不佳。(2)在背景场气温敏感性试验中,气温调整的数值比较粗糙,应结合本文得到的结论,对气温下降6℃上下继续进行敏感性试验,找到最佳值。(3)下垫面温度降低只是回流冷空气对雾区模拟结果影响的因子之一,后需针对气温降低的整体影响做进一步研究。(4)数值模拟结果虽对温湿结构改进显著,但对雾区范围的模拟效果不佳,将进一步探究冷空气在模拟过程

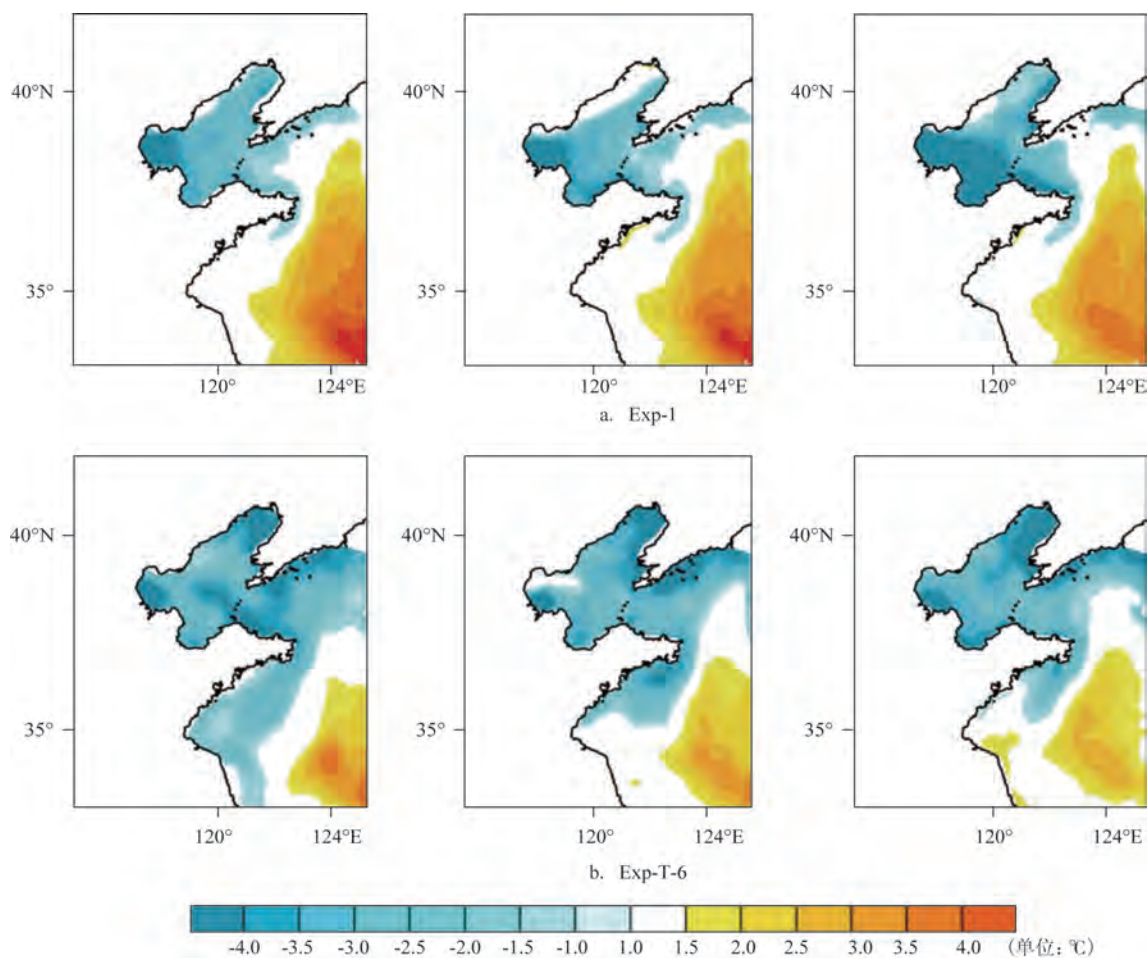


图8 Exp-1与Exp-T-6的海气温差分布(时间从左至右依次为08时、11时和14时)

该图基于审图号为GS(2020)4630号的图层制作,底图无修改

中对雾区模拟结果的影响因素。

致谢:感谢中国海洋大学高山红教授对海雾数值研究工作的传授与教导。本文同化所使用的常规观测资料由高山红教授的“区域大气与海洋短期实时预报系统”中获得。

参考文献:

- [1] Byers H. Summer sea fogs of the central California coast[M]. Berkeley: University of California Press, 1930: 291-338.
- [2] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [3] 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.
- [4] 吴彬贵, 张宏升, 汪靖, 等. 一次持续性浓雾天气过程的水汽输送及逆温特征分析[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 258-267.
- [5] 宋润田. 平流雾和辐射雾时边界层温度场及风场结构特征的对比分析[J]. 海洋预报, 2000, 17(3): 11-20.
- [6] 吴彬贵, 张宏升, 王兆宇, 等. 一次平流雾过程中湍流及能量输送

特征研究[C]//第27届中国气象学会年会大气物理学与大气环境分会论文文集. 北京: 中国气象学会, 2010.

- [7] 王亚男, 李永平. 冷空气影响下的黄东海海雾特征分析[J]. 热带气象学报, 2009, 25(2): 216-221.
- [8] 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.
- [9] 史得道, 吴振玲, 高山红, 等. 海雾预报研究综述[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 49-55.
- [10] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 利用循环3DVar改进黄海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.
- [11] 高山红, 张守宝, 齐伊玲, 等. 利用循环3DVar改进黄海海雾数值模拟初始场 II: RAMS数值试验[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(11): 1-10, 18.
- [12] 陈志昆, 魏立新, 李志强, 等. 2017年夏季北冰洋浮冰区海雾特征分析[J]. 海洋预报, 2019, 36(2): 77-87.
- [13] Wang Y M, Gao S H, Fu G, et al. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow sea[J]. Weather

- and Forecasting, 2014, 29(2): 205-225.
- [14] 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.
- [15] 宋亚娟. 北太平洋海雾发生频率的气候学特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [16] Zhou B B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system[J]. Weather and Forecasting, 2010, 25(1): 303-322.
- [17] 杨悦, 高山红. 黄渤海雾 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.
- [18] 马翠平, 吴彬贵, 李江波, 等. 一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析[J]. 气象, 2014, 40(6): 715-722.

Numerical simulation study of the influence of cold air on sea fog in the Bohai

WANG Rui, LIU Bin-xian

(Tianjin Ocean Center Meteorological Observatory, Tianjin 300074 China)

Abstract: Using NECP reanalysis data, HMW-8 infrared 4-1 channel data, satellite visible cloud image and ground conventional observation data, the characteristics of the weather background and low-level temperature and humidity that causes large-scale sea fog process in the Bohai Sea from March 7 to 8, 2020. are analyzed. When the 500 hPa shallow trough moves eastward to the Bohai Sea, the southwest airflow in front of the trough transports warm and humid air to the sea. The weak cold air behind the trough is blocked by the mountains in the process of eastward migration, and moves southward along the mountain range, which first brings the northeast weak cold air to the sea surface. The cold air forces the underlying surface to cool down, which is an important condition for the formation of sea fog. In order to study the influence of cooling intensity on the simulation results of fog area, sensitivity test of the underlying surface temperature of background field is carried out by using WRF model. The simulation effect is reasonably well when air temperature drops by 6 °C with significant temperature decreasing in the level of 1000 hPa, which favors the formation of inverse temperature stratification. Meanwhile, the northeast wind volume is increased in the high relative humidity area and the location of the cooling and humidification of vertical stratification is consistent with observation, indicating that the cold air process reduces the temperature of underlying surface, which is conducive to the condensation of low-level water vapor and the development of sea fog.

Key words: cold air; Bohai Sea; sea fog; numerical simulation; temperature sensitivity test