

下垫面对渤海西部雷雨大风影响的数值模拟分析

王亚男¹, 李英华², 孙密娜³

(1. 天津海洋中心气象台, 天津 300074; 2. 天津市气象科学研究所, 天津 300074; 3. 天津市气象台, 天津 300074)

摘 要: 利用天津 WRF 中尺度数值预报业务模式系统, 对 2016 年 6 月 10 日夜间渤海西部的一次强对流大风过程进行控制预报和敏感性试验预报(渤海到海峡修改为陆地)的对比分析。结果表明: 海洋下垫面对渤海前半夜生成的雷雨大风有增强作用, 增幅在 5~6 m/s。海洋下垫面会使冷池出流边界具有更明显的温度梯度和气压梯度, 增幅分别为 3 °C/经度, 2 hPa/经度; 海洋下垫面在雷达回波刚入海时对其强度变化没有明显影响, 当回波持续一段时间(4 h 以上)后, 海洋下垫面对回波强度有减弱作用, 可能是由于下垫面对近地面风速的增幅作用, 使垂直风切变小, 回波倾斜度和垂直速度也相应减小造成。

关键词: 下垫面; 雷雨大风; 数值模拟

中图分类号: P457.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2019)03-0024-09

1 引言

强对流天气是我国海域各种自然灾害中出现次数最多的灾害性天气之一, 其与发生在陆地上的强对流天气一样, 具有突发性强、破坏力大的特点。它的出现往往对海上船只的运行、各种海洋作业带来毁灭性的破坏, 较强的强对流天气系统的危害仅次于进入渤海的台风的“破坏力”, 如 2011 年 9 月 01—07 时(北京时, 下同), 渤海西部、南部出现由强对流引发的大风, 造成黄骅港 5 根直径 30 cm 的缆绳被拉断, 6 艘 800 t 以上船舶发生碰撞, 直接经济损失达 8 000 万人民币以上^[1]。

我国海域的强对流天气易于在海陆边界形成和发展, 这与下垫面的动力和热力作用的影响有很大的关系^[2], 现有的关于渤海的强对流的研究也多集中在海岸带附近, 其中关于雷雨大风的研究, 如郭庆利^[3]、王彦^[4-5]等, 利用 5 a 多普勒天气雷达和自动站资料, 分别对烟台北部沿海和渤海西部沿海的雷雨大风个例进行分析统计, 得出相应近岸海域出现灾害性雷雨大风的雷达回波形态和径向速度类

型及其特征; 于志明^[6]等利用 15 a 曹妃甸浮标自动站以及国家气象站监测数据等, 对曹妃甸附近海域出现雷雨大风的时间、天气型和预报指标进行研究, 孙密娜^[7]等使用渤海西部石油平台站, 对渤海西部十年雷雨大风出现的频次进行了统计; 除了以上的统计研究之外, 也有一些对雷雨大风个例的研究, 如刘彬贤^[8]、李延江^[9]、贺靓^[10]等, 使用多普勒天气雷达和多种观测资料, 对海岸带雷雨大风个例的形成发展进行诊断分析, 宋晓姜^[11]等, 使用数值模拟和观测分析相结合的方式, 对渤海一次强阵性雷雨大风过程进行诊断分析, 而梁钊明^[12]等, 对城市下垫面对渤海湾海风锋特征影响进行了数值模拟试验分析; 相对来说, 对于渤海雷雨大风的数值模拟研究还相对较少, 尤其是下垫面对渤海大风形成的作用, 仅盛春岩^[13]等利用数值模拟的方法, 探讨了海洋下垫面在渤海两次系统性大风形成中的作用, 而使用数值模拟的方法, 探讨海洋下垫面在雷雨大风形成中的作用的研究现在还很少, 在这样的背景下, 本文选择 2016 年 6 月 10 日夜间渤海西部的一次雷雨大风过程, 使用数值模拟的方法, 初步探讨分析,

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-09-31。

基金项目: 环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201604)。

作者简介: 王亚男(1982-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋天气预报技术研究。E-mail: wang_ya_nan05@126.com

海洋下垫面在此次雷雨大风形成过程中的作用。

2 强对流个例及数值模拟试验介绍

2.1 个例介绍和研究目的

在高空冷涡背景下,2016年6月10日14:30分左右,在北京西部出现两个中小尺度对流云团,在东移过程中与东北部对流云带合并,受其影响在北京西南部,出现直径7~15 mm的冰雹和最大22 m/s的西北雷雨大风;16:30分左右,在河北西部出现3个中小尺度对流云团,在东移过程中合并加强,受其影响,在河北保定附近出现直径5~8 mm的冰雹;18:30分左右,西北移动来的对流云团和西移过来的对流云团在天津合并加强之后继续东移,受其影响,在天津东部沿海出现直径4~8 mm的冰雹、最大19 m/s的偏北雷雨大风和短时强降水,如图2 b所示,在渤海西岸降水时段主要集中在19—20时,

最大雨强为55.9 mm/h,同时,从渤海西岸塘沽国家气象站的气温和降水逐时分布情况来看,如图2 a所示,由于渤海西岸产生强降水,在渤海西岸造成明显冷池;在20时之后此云团进入渤海,受其影响在22时左右,渤海西部石油平台站监测到最大29 m/s的西北雷雨大风,此次雷雨大风主要是冷池出流边界的阵风影响。本文主要研究,海洋下垫面对此次过程的影响,即对流云带进入渤海之后,海洋下垫面对雷雨大风的产生,是增强抑或减弱,是有利发生抑或抑制发生。

2.2 模式配置和数值试验设计

本文使用天津WRF数值预报业务模式对2016年6月10日夜间的强对流过程进行模拟,模式系统由ARPS模式(Advanced Regional Prediction System)的资料分析系统ADAS(ARPS Data Analysis System)和中尺度数值预报模式WRF(Weather Research and Forecasting)两部分组成,应用美国国

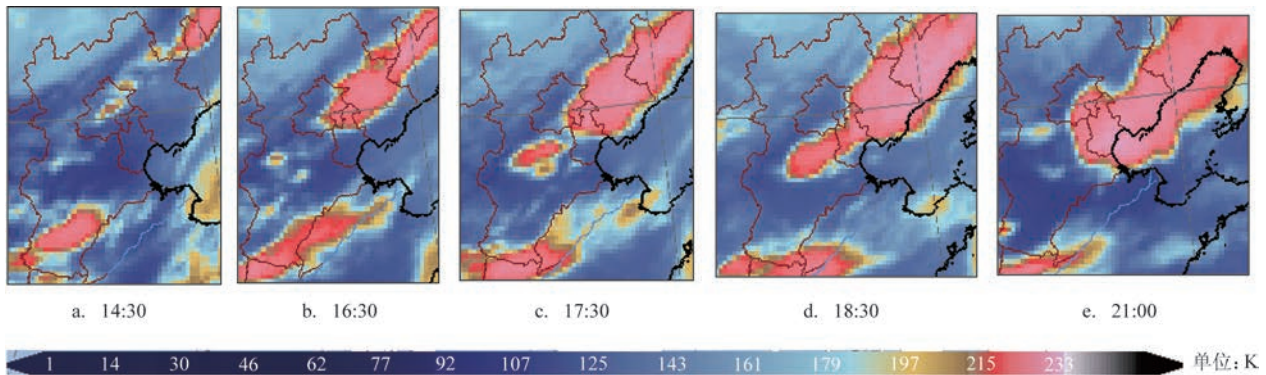


图1 FY-2E 红外云图云顶亮温观测到的强对流发展与演变(色标越靠近右侧,代表云顶发展越高)

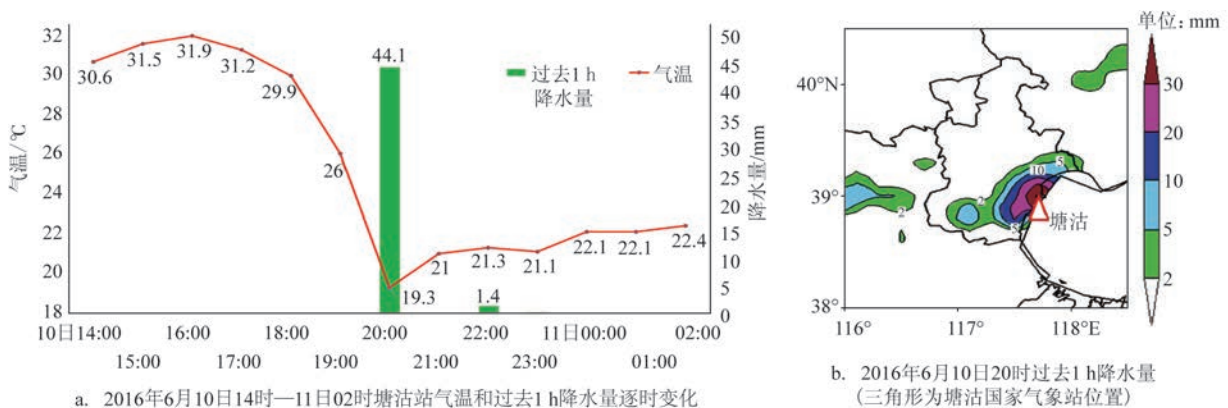


图2 代表站气温和降水分布图

家环境预报中心的全球预报系统(GFS)的预报场作为初始场和侧边界,同化了模拟区域内雷达(S波段)、卫星、地面探空报等实测资料。模式采用两重嵌套方案,模拟区域中心在 40.0°N , 115°E ,两个区域的水平分辨率分别为 5 km 和 1 km ,格点数分别为 441×369 和 150×196 ,模式层顶为 50 hPa ,垂直分层为51层,边界层内大致有11层。物理过程参数化方案分别为:YSU边界层参数化方案,NOAH LSM陆面过程,WSM 6类冰雹方案,RRTMG辐射传输方案, 5 km 和 1 km 区域为积云可分辨尺度不采用积云参数化方案。模拟积分时间为2016年6月10日20时—11日20时。

为了研究海洋下垫面的作用,分别进行控制预报和敏感性预报模拟,其中,敏感性预报将渤海到渤海海峡海洋下垫面修改为陆地下垫面,其他参数不变,控制预报与敏感性预报下垫面对比如图3所示。

2.3 模拟结果可用性分析

通过雷雨大风发生时,渤海西部强对流回波形态和 10 m 风场预报与实况对比,分析模拟结果的可用性。模式模拟的2016年6月10日22时的最强回波由多个对流单体组成、呈线状排列,长宽比大于 $5:1$,最强回波约 60 dBZ ,与实况22时雷达回波组合反射率分布形式、最强回波强度基本一致,只是模拟的回波移动速度比实况略偏慢(见图4 a、b);同时,从模式模拟的 10 m 风向风速可以看出,在强回波前沿,渤海西部有一条出流边界即阵风锋,最大风速预报约 18 m/s ,风向为西北风,对比渤海西部自动监测站数据,在22时,分别在石油A平台和黄骅海事局码头监测到 28.7 m/s 和 29 m/s 的西北风(两侧站位置如图4 c所示)。虽然预报的风速比实况偏小,但具有一定的指示意义。从回波形态和 10 m 风向风速的预报来看,具有较好的可用性。

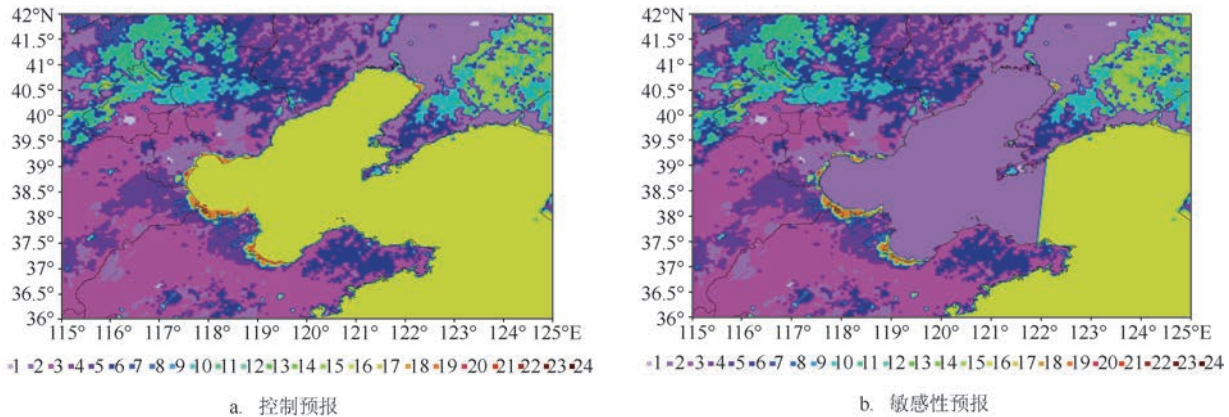


图3 下垫面类型分布图

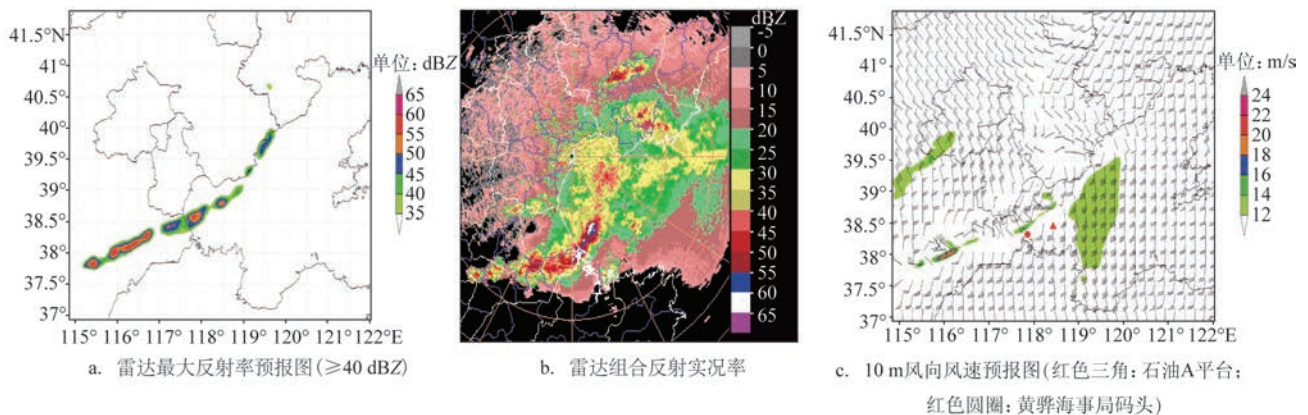


图4 2016年6月10日22时数值模拟和实况对比

3 模拟结果对比分析

3.1 雷达反射率和10 m风向风速

从图5,10日22时和11日01时控制预报和敏感性预报最大雷达回波对比来看,控制预报和敏感性预报预报的雷达最强回波形态变化一致,当回波刚进入渤海西部时,控制预报和敏感性预报预报的最强回波没有明显区别,此时最强回波由多个对流单体组成、呈线状排列,长宽比大于5:1,最强回波约60 dBZ;到11日01时,回波强度明显减弱,预报的最强回波约46~48 dBZ,此时最强回波呈多个强对流单体分布,结构松散,控制预报在渤海近岸预报的对流单体分布范围比敏感性预报略偏小,总的来说,在回波刚进入渤海西部时,海洋下垫面对其强度变化几乎没有明显影响,当回波在渤海西部东移4 h左右之后,仅对回波的强度有极弱的减弱作用;而从10 m风向风速,控制预报和敏感性预报的对比来看,控制预报在10日22时,模拟出有雷雨大风的出流边界产生,预报的最大风速为18 m/s,而敏

感性预报,虽也预报出一条出流边界,但风速明显偏小,最大风速没有达到14 m/s,到11日01时,在回波强度已明显减弱的情况下,10 m风场预报中,已没有出流边界的出现,但对比环境风场的预报来看,虽然控制预报和敏感性预报预报的风向基本一致,以西南风为主,但10 m风速有明显差异,控制预报在渤海中部的10 m风速明显偏大,最大风速达20 m/s,而敏感性预报的最大风速仅为14 m/s,说明海洋下垫面对雷雨大风和环境系统性大风的形成都有明显的正影响。本文主要分析海洋下垫面在回波强度变化和雷雨大风形成中的作用,对环境系统性大风的影响,就不在做分析阐述。下面将此过程分成两个阶段进行分析,阶段一:10日22时(回波强度无明显变化,海洋下垫面对雷雨大风有明显增强作用);阶段二:11日01时(海洋下垫面使回波强度略减小,无雷雨大风)。

3.2 阶段一:10日22时(回波刚入海1~2 h)

3.2.1 层结稳定度对比分析(探空曲线)

探空是分析局地大气环境的重要手段。从图6

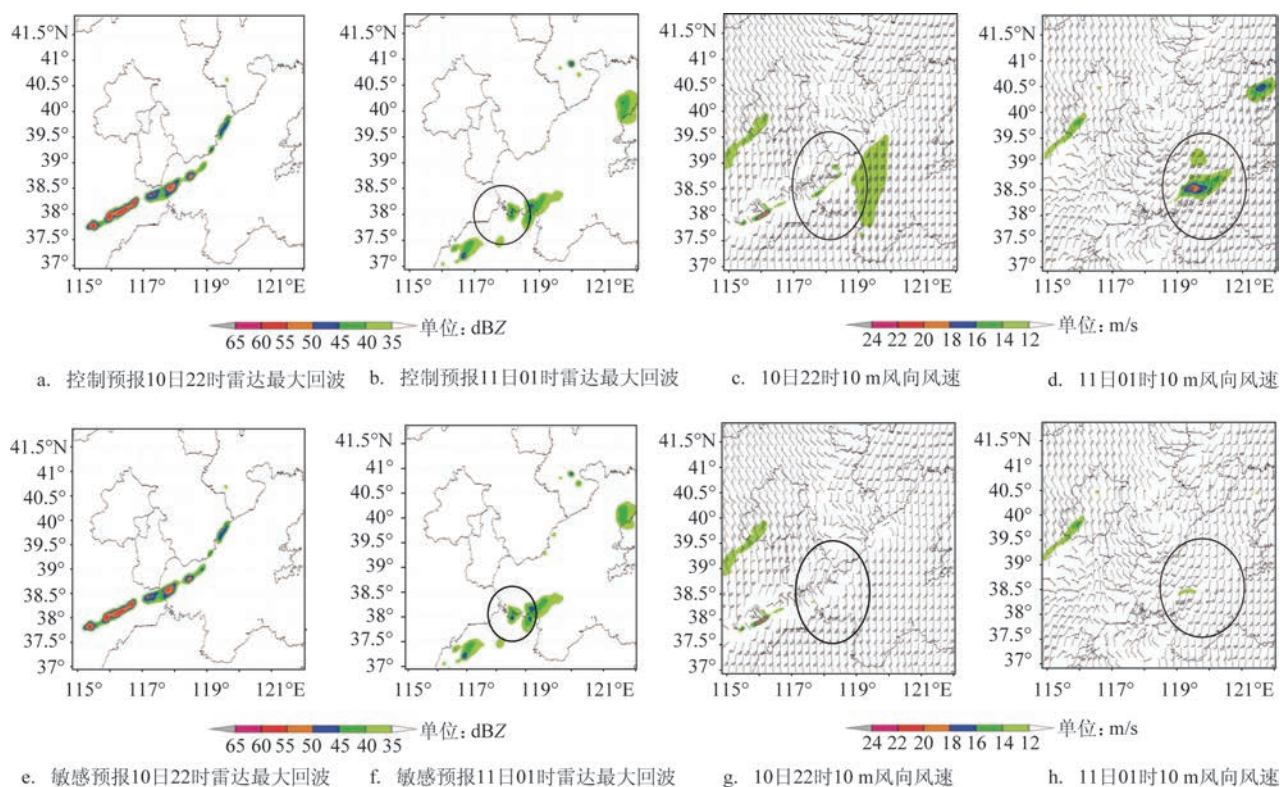


图5 控制预报和敏感预报对比

左图中可以看出,控制预报在10日21时,渤海西部强回波前沿上空,不存在逆温,高空存在相对干的空气层,近地层露点和温度线呈“喇叭口”结构,近地层900 hPa以下,温度变化曲线接近干绝热线,中层有相对湿度大值区,当降水产生拖曳作用,受云内和云底下方的融化和蒸发冷却效应,形成下沉气流,同时环境空气的夹卷作用也会加强下沉气流;此种探空形态的分布,利于雷雨大风的形成;对比控制预报(见图6a)和敏感性预报(图略)来看,探空曲线分布形状无明显变化,对流有效位能分别为1 103 J/kg和1 038 J/kg,自由对流高度(Level of Free Convection, LFC)分别为719.5 hPa和716.6 hPa,平衡高度分别为229.5 hPa和231.3 hPa,变化不是很明显;对比控制预报和敏感性预报各要素预报来看,修改海洋下垫面后,对温度和风速垂直分布有一定影响(见表1),尤其是在950 hPa以下,越接近地面,影响越明显,975 hPa控制预报比敏感性预报风速大1 m/s,温度高0.3 °C;950 hPa控制预报比敏感性预报风速大0.4 m/s,温度高0.2 °C,高度越高,修改海洋下垫面的作用越小。说明,对此次过程,雷达回波刚入海时,海洋下垫面,对近地层有弱的增温作

用,在900 hPa以下,增温在0.1~0.3 °C;对风速有增幅作用,在950 hPa以下,增幅在0.5~1 m/s。

3.2.2 动力维持条件

从探空分析来看,海洋下垫面对近地层风速的增幅作用,会使0~6 km的垂直风切减小,从而使回波倾斜度减小,此种趋势,将不利于强回波的长期维持;从控制预报和敏感性预报各层风场分布来看,在渤海西部,500 hPa环流平直,渤海西部位于低涡底部,从近地面到700 hPa,切变线为前倾结构,由于海洋下垫面在近地层风速有弱的增幅作用,使得敏感性预报,在渤海的偏南急流和渤海湾切变线前后的偏南急流和偏西北气流的预报中,都比控制预报略减小,如图7所示,为6月10日22时925 hPa风场预报,切变线后部的西北气流,敏感性预报比控制预报略偏小,最大幅度在2 m/s左右。总的来说,海洋下垫面对近地层风速的增强作用,使近地层动力条件变好,但同时,会使0~6 km的垂直风切变小,不利于强回波的长期维持。

同时,垂直雷达回波做垂直速度和水平风场剖面,如图8所示,控制预报和敏感性预报,均表现为强回波前部为倾斜上升气流,后部低层为弱下沉气

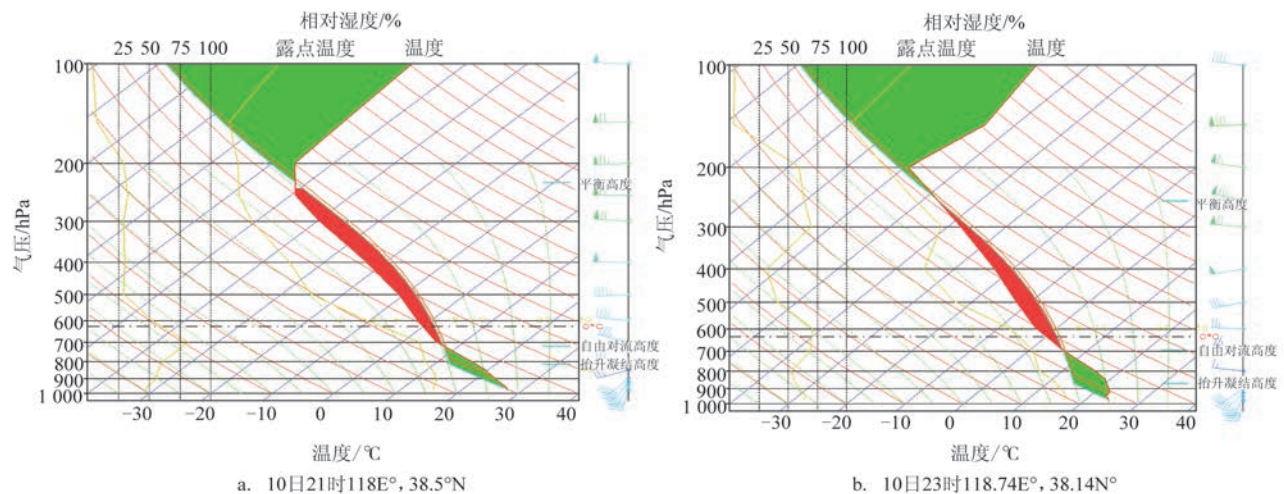


图6 控制预报探空曲线

表1 6月10日21时控制预报和敏感性预报温度和风速对比(118°E, 38.5°N)

高度/hPa	975		950		925		900		850	
21时	控制	敏感性	控制	敏感性	控制	敏感性	控制	敏感性	控制	敏感性
温度/°C	27.7	27.4	26.3	26.1	24.6	24.6	23.0	22.9	19.7	19.7
风速/(m/s)	14.4	13.4	15.6	15.2	14.7	14.8	12.7	12.9	9.8	9.8

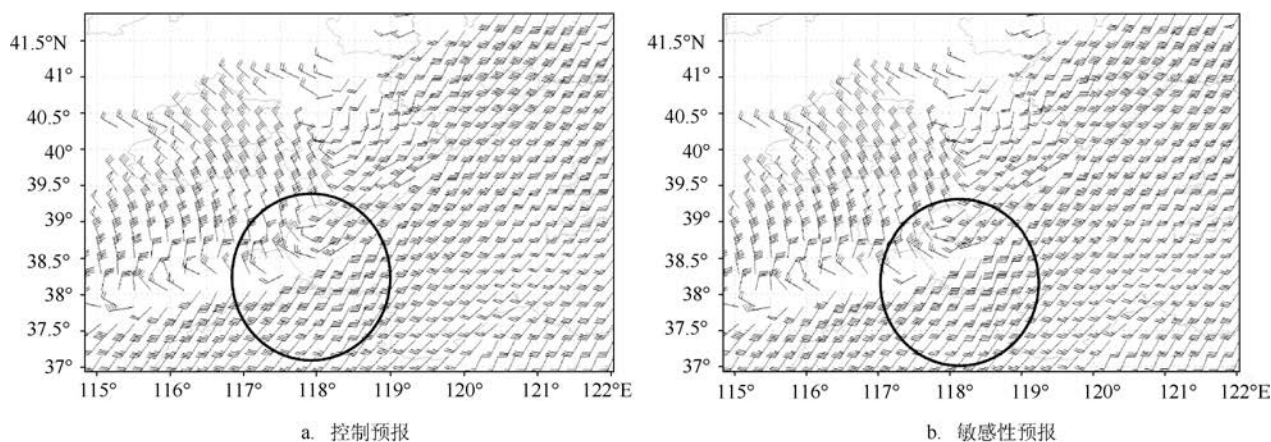


图7 2016年6月10日22时925 hPa风场对比

流,上升气流强度和下沉气流强度和所在高度都相差不大,其中,最大上升气流均为11 m/s左右,位于350 hPa左右,而下沉气流均为1 m/s左右,在850 hPa以下。从垂直速度的分布来看,海洋下垫面对于刚进入渤海的回波还没有造成明显的影响,而控制预报在后侧入流和前侧入流的交汇处发生了瞬时大风,而敏感性预报并未产生,说明垂直动力条件对其影响极小。

3.2.3 近地面要素对比

从下垫面温度对比来看,控制预报在海陆交界附件,由于受海洋下垫面影响,夜间降温相对较慢,且具有一定的梯度;而敏感性预报修改海洋下垫面之后,原过渡地带地表温度降低明显比原来偏大,且比较均匀;从2 m温度和下垫面的温差来看(见图9 a),控制预报在回波刚入海时,2 m温度比下垫面温度偏低1~3 °C,且有一定梯度,利于回波的维持;而敏感性预报修改下垫面之后,原渤海湾2 m温度与下垫面温差负值区域,变为正值,2 m温度比下垫面温度略偏高1 °C左右(见图9 d),不利于回波的维持。

从2016年6月10日22时的小时变温变压的模拟结果来看(见图9 b),渤海西部强回波后部对应着2 hPa左右的正变压和4~6 °C的负变温,强回波前沿变压梯度和变温梯度明显;同时在强回波两侧有明显的温度梯度,最大温度梯度大于20 °C/经度,具有明显的冷暖空气丘结构^[14-16],在强回波后侧为>5~10 hPa/经度的正变压,强回波前侧为>10~15 hPa/经度的负变压(见图9 c、f),气流从高压即冷

空气堆处向外辐散流出,至系统前沿达到最强,即逐渐减弱并与前部暖区的气流相汇合。从小时变压变温来看,控制预报和敏感性预报相差不大,说明小时变温和变压,不是造成敏感性预报没有预报雷雨大风的原因;而位于雷雨大风前沿的气温梯度和气压梯度确有不同,控制预报比敏感性预报气温梯度大3 °C/经度左右和气压梯度大2 hPa/经度左右。说明,海洋下垫面使渤海西部冷池前沿产生的出流边界,具有更明显的温度梯度和气压梯度,利于出流边界风速增大,形成雷雨大风。

3.3 阶段二: 11日01时(回波入海4~5 h, 强度略减弱)

从图6右图中可以看出,控制预报在10日23时,渤海西部强回波前沿上空,在950~925 hPa之间存在近似等温层,近地面层为稳定层结;300 hPa以下的气层相对都比较干,最小的温度露点差也在3 °C左右,水汽条件不好;对比控制预报和敏感性预报来看,探空曲线分布形态无明显变化,对流有效位能分别为781 J/kg和789 J/kg,自由对流高度(LFC)分别为696 hPa和699 hPa,变化不是很明显。总的来说,控制预报比敏感性预报的热力条件基本相当或略偏差,相比21时,水汽条件和热力条件都变差。同时,从图9中11日01时垂直雷达回波的垂直速度和流场中可以看出,控制预报和敏感性预报,均表现为强回波前部为竖直升气流,后部低层300 hPa以下为下沉气流,上升气流强度略有偏差,控制预报最大上升速度为5.5 m/s,位于600~400 hPa之间,而敏感性预报在600~400 hPa中间还

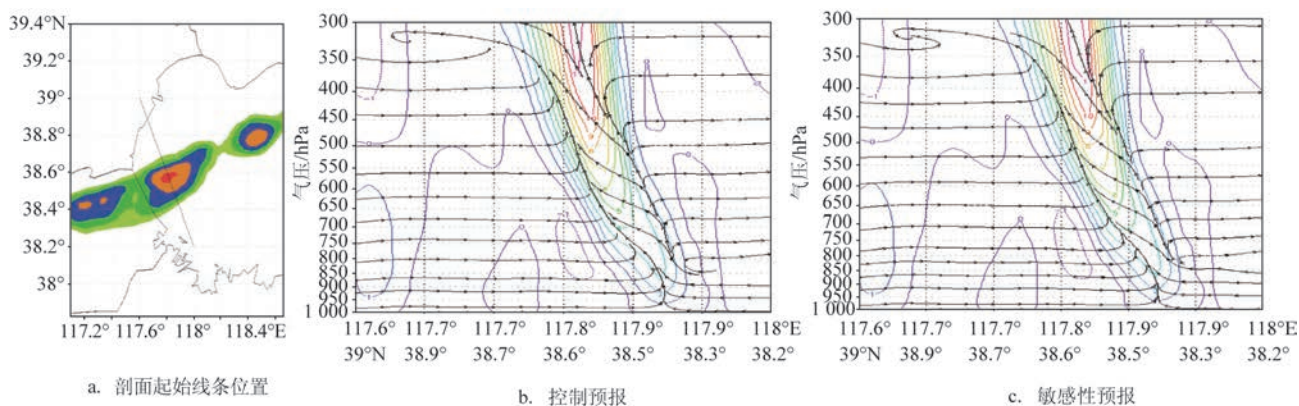
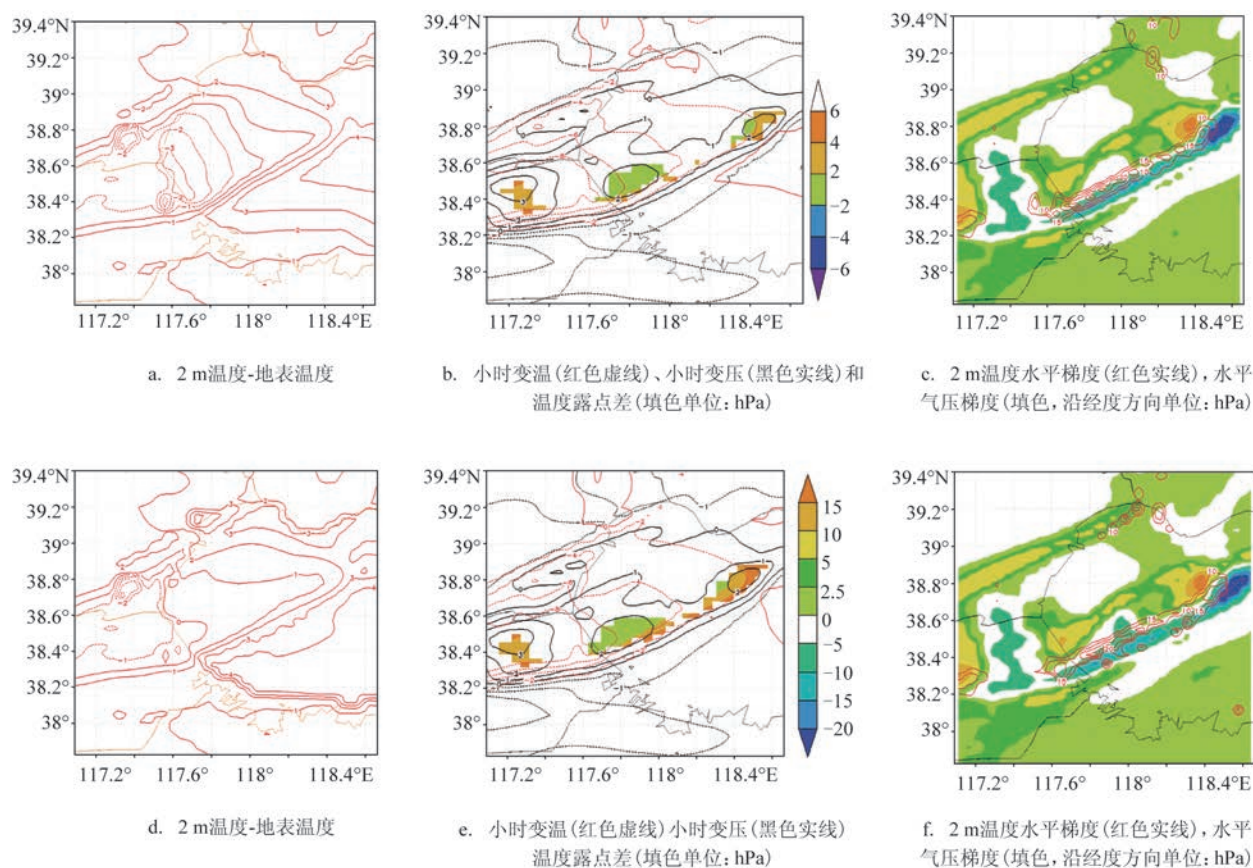
图8 2016年6月10日22时垂直雷达回波 uv 和垂直速度剖面

图9 2016年6月10日20时起报10日22时预报对比(上图控制预报;下图敏感预报)

有一个速度核,最大上升速度为6.0 m/s,相对应600~400 hPa之间,控制预报有0.5 m/s下沉气流,敏感性预报比控制预报略偏大为1 m/s;总的来看,11日01时,敏感性预报的垂直运动比控制预报略偏强,垂直上升速度和下沉速度均偏强0.5 m/s,可能

是敏感性预报比控制预报回波强度略偏大的主要原因。说明,对于此次过程来说,当回波进入渤海一段时间后(4 h以上),海洋下垫面对热力条件和垂直运动都有减弱作用,回波倾斜度也明显减弱,使回波强度逐渐减小。

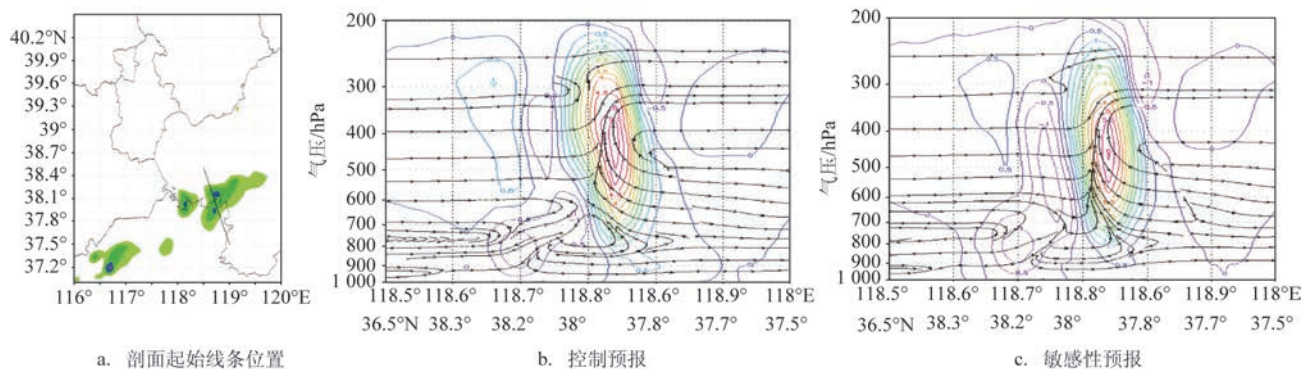


图10 2016年6月11日01时垂直雷达回波 uv 和垂直速度剖面

4 结论

为了分析下垫面对渤海西部雷雨大风的影响,本文使用天津WRF数值预报业务模式(由ARPS模式的资料分析系统ADAS和中尺度数值预报模式WRF组成),对2016年6月10日从陆地移入渤海的一次强对流大风过程进行模拟,通过控制预报和敏感性预报(将渤海到海峡修改为陆地下垫面)的对比分析,得出以下结论:

(1)海洋下垫面在回波刚入海时,对其强度没有明显影响,此时回波由多个对流单体组成、呈线状排列,长宽比大于5:1,最强回波约60 dBZ;当回波入海一段时间后(4 h以上),回波强度明显减弱,预报的最强回波约46~48 dBZ,此时回波呈多个强对流单体分布,结构松散,控制预报在渤海近岸预报的对流单体分布范围比敏感性预报略偏小,海洋下垫面对回波的强度有减弱作用;

(2)海洋下垫面对雷雨大风和环境系统性大风的形成都有明显的正影响。模式模拟出有冷池出流边界产生,控制预报预报的最大风速比敏感性预报大5~6 m/s;同时注意到,当回波进入渤海一段时间,回波强度已明显减弱,已没有雷雨大风时,控制预报对环境10 m风场最大风速的预报来看,仍比敏感性预报大6 m/s;

(3)当回波刚进入渤海时,海洋下垫面对层结曲线分布形状没有明显影响,但对近地层有弱的增温作用,在900 hPa以下,增温在0.1~0.3 °C;对风速有增幅作用,在950 hPa以下,增幅在0.5~1 m/s。

越接近地面,影响越明显,高度越高,海洋下垫面的影响越小。海洋下垫面对近地层风速的增幅作用,使近地层动力条件变好,但同时,会使0~6 km的垂直风切变小,不利于强回波的长期维持;

(4)海洋下垫面使夜间降温相对较慢,使2 m温度比下垫面温度偏低1~3 °C,利于回波维持;强回波前沿变压梯度和变温梯度明显;同时在强回波两侧有明显的温度梯度,最大温度梯度大于20 °C/经度,具有明显的冷暖空气丘结构,在强回波后侧为>5~10 hPa/经度的正变压,强回波前侧为>10~15 hPa/经度的负变压,气流从高压即冷空气堆处向外辐散流出,至系统前沿达到最强。海洋下垫面会使冷池出流边界具有更明显的温度梯度和气压梯度,增幅分别为3 °C/经度,2 hPa/经度;

(5)当回波进入渤海一段时间后(4 h以上),海洋下垫面对热力条件和垂直运动都有减弱作用,控制预报预报最大垂直速度比敏感性预报小0.5 m/s,此时回波基本呈竖直状态,回波倾斜度明显减弱,使回波强度逐渐减小。

参考文献:

- [1] 李延江, 陈小雷, 卢宪梅. 渤海气象灾害与海洋灾害预报技术[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [2] 许小峰, 顾建峰, 李永平. 海洋气象灾害[M]. 北京: 气象出版社, 2009.
- [3] 郭庆利, 薛龔波, 党英娜. 渤海海峡雷雨大风的多普勒雷达回波特征[J]. 海洋预报, 2011, 28(1): 13-18.
- [4] 王彦, 唐熠, 赵金霞, 等. 天津地区雷暴大风天气雷达产品特征分析[J]. 气象, 2009, 35(5): 91-96, 135.
- [5] 王彦, 于莉莉, 朱男男, 等. 渤海湾海风锋与雷暴天气[J]. 高原气

- 象, 2011, 30(1): 245-251.
- [6] 于志明, 王骊鹂, 马东亮. 渤海海洋气象灾害天气分型与预报指标研究[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(1): 106-111.
- [7] 孙密娜, 朱男男, 王亚男, 等. 近10年渤海近海A平台大风特征分析[J]. 海洋通报, 2016, 35(4): 367-379.
- [8] 刘彬贤, 王彦, 刘一玮. 渤海湾海风锋与阵风锋碰撞形成雷暴天气的诊断特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(1): 132-136.
- [9] 李延江, 景华, 李江波, 等. 一次渤海强对流天气系统监测与大风成因探讨[J]. 海洋预报, 2013, 30(1): 25-35.
- [10] 贺靓, 于超, 吕新民, 等. 渤海中南部海区一次雷暴大风过程分析[J]. 海洋预报, 2011, 28(1): 19-24.
- [11] 宋晓姜, 邢建勇, 王彰贵. 渤海一次强阵性雷雨大风过程的诊断分析[J]. 海洋预报, 2013, 30(2): 22-29.
- [12] 梁钊明, 高守亭, 王东海, 等. 城市下垫面对渤海湾海风锋特征影响的一次数值试验[J]. 大气科学, 2013, 37(5): 1013-1024.
- [13] 盛春岩, 李建华, 范苏丹. 地形及下垫面对渤海大风影响的数值研究[J]. 气象, 2014, 40(11): 1338-1344.
- [14] 孙继松, 戴建华, 何立富, 等. 强对流天气预报的基本原理与技术方法[M]. 北京: 气象出版社, 2014.
- [15] 王焱, 潘益农, 潘玉洁. 一次飚线过程的数值模拟及诊断分析[J]. 南京大学学报(自然科学), 2008, 44(6): 583-597.
- [16] 刘春娥, 郭学良. 灾害性大风发生机理与飚线结构特征的个例分析模拟研究[J]. 大气科学, 2012, 36(6): 1150-1164.

Numerical simulation study of the effect of underlying sea surface on thunderstorm wind in the western Bohai Sea

WANG Ya-nan, LI Ying-hua, SUN Mi-na

(1. Tianjin Marine Meteorological Centre, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Institute of Meteorology, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074, China)

Abstract: Using the Tianjin Weather Research and Forecasting (TJWRF) numerical prediction system, a sensitivity experiment is conducted for a severe convective storm over the western Bohai Sea on 10 June 2016. The results show that the underlying sea surface intensifies the thunderstorm generated in early night in the Bohai Sea by 5-6 m/s. The underlying sea surface enlarges the pressure and temperature gradient of cloud pool outflow boundary by 3 °C/Lon and 2 hPa/Lon, respectively. Furthermore, the underlying sea surface shows no significant influence on the intensity of radar echo when it first enters the sea. Nevertheless, the underlying sea surface weakens the intensity of radar echo when it lasts 4 hours or longer, which may due to the decrease of vertical wind shear and the degree of inclination and vertical speed of the radar echo caused by the enhancement of underlying sea surface on near surface wind speed.

Key words: underlying sea surface; thunderstorm wind; numerical simulation