

王静菊,高小雨,高山红.一次黄海海雾的数据同化试验与形成机制研究[J].海洋气象学报,2017,37(1):42-53.
Wang Jingju, Gao Xiaoyu, Gao Shanhong. Data assimilation experiments and formation mechanism study of a Yellow Sea fog event [J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(1): 42-53. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.005. (in Chinese)

一次黄海海雾的数据同化试验与形成机制研究

王静菊^{1,2},高小雨^{1,2},高山红^{1,2}

(中国海洋大学 1. 海洋与大气学院;2. 物理海洋教育部重点实验室,山东 青岛 266100)

摘要: 选取2012年4月14日的一次存在东西2片雾区的黄海春季海雾为研究对象,借助WRF (Weather Research and Forecasting) 模式,采用循环3DVAR (3-Dimensional Variational) 数据同化方案,考虑了湿度控制变量的背景误差协方差CV6,进行了AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 卫星温度与湿度廓线数据的同化试验,并基于同化试验结果探讨了此次海雾的形成机制。同化试验结果表明:同化AIRS卫星温度与湿度廓线数据后,模式能成功再现海雾的形成过程,特别是东西2片雾区之间的晴空区的存在,这归功于AIRS数据的同化能够显著改善海上大气边界层的温湿结构、影响海雾的低层高压的范围与强度;机制分析揭示:东西2片雾均为典型的平流冷却雾,但二者厚薄和气团来源不同;海上高压控制黄海西岸陆地的暖空气入海,受低海温的冷却作用降温先形成逆温层,然后逆温层底部生成了较薄的西侧雾区;来自黄海中部的空气向东北移动至朝鲜半岛西部海域,高压下沉增温形成一个顶部较高的稳定层,从而生成较厚的东侧雾区;高压中心下沉区内,近海面风速小使得机械湍流弱,空气增温与海温暖舌共同作用下使得近海面气海温差小,海雾无法生成导致了晴空区的存在。

关键词: 黄海海雾; WRF 模式; AIRS 温湿数据; 数据同化; 形成机制

中图分类号: P732.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2017)01-0042-12

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2017.01.005

Data assimilation experiments and formation mechanism study of a Yellow Sea fog event

WANG Jingju^{1,2}, GAO Xiaoyu^{1,2}, GAO Shanhong^{1,2}

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences; 2. Key Lab of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract The spring Yellow Sea fog event with 2 large patches on 14 April 2012 is chosen for study. Using the WRF (Weather Research and Forecasting) model and cycling-3DVAR (3-Dimensional Variational) data assimilation (DA) scheme, combining with the background error covariance CV6 of the humidity control variable, DA experiments of AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) air temperature and humidity profile data are carried out. The formation mechanism of the sea fog is investigated based on the results of the DA experiments. The DA experiments indicate that the DA of AIRS data can successfully reproduce the sea fog event, especially the clear sky region between the eastern and western fog areas.

收稿日期:2017-02-13; 修订日期:2017-03-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41276009);海洋公益性行业科研专项(201505007);天津兴海科技项目(KJXH2014-20)

作者简介:王静菊(1993—),女,硕士,主要从事黄海海雾的数值研究, jingjuw@163.com。共同第一作者:高小雨(1988—),男,博士,主要从事海雾的数值模拟与数据同化研究, anthas@126.com。

通信作者:高山红(1972—),男,教授,主要从事海洋灾害天气的演变机理及数值模拟与预报技术的研究, gaosh@ouc.edu.cn。

This result is contributed by the improvements of the structures of temperature and humidity in the marine atmospheric boundary layer, as well as the range and intensity of the low-level high-pressure system. The mechanism analysis reveals that both the eastern and western fog patches belong to typical advection cooling fogs while their thickness and air mass original breeding sources are different. The warm air over the land to the west coast of the Yellow Sea is moved over the sea surface by the high-pressure system, and an inversion layer is formed by the cooling effect of colder sea surface temperature (SST), then at its bottom the thin western fog patch occurs. The air from the central Yellow Sea moves northeastward over the sea region west to the Korean peninsula, then high-pressure subsidence results in a deep stable layer and the thick eastern fog patch occurs. Within the high-pressure region, near the sea surface weak winds make weak mechanical turbulence, air-sea temperature is small due to the joint action by warmer air by subsidence and SST warm tongue. Thus sea fog forming is suppressed and a clear sky region appears over the central Yellow Sea.

Key words the Yellow Sea fog; the WRF model; AIRS temperature and humidity data; data assimilation; formation mechanism

引言

黄海是中国近海海雾发生最为频繁的海域^[1-3],尽管统计预报方法能够对沿岸局地海雾的预报发挥作用^[4-6],但对开阔海域的海雾预报无能为力。利用数值模式预报海雾已经成为一种趋势^[7-9]。随着模式的动力框架、数值计算方案与物理方案的不断完善,海雾的数值模拟随之愈加准确。

前人研究结果^[2,7-8,10-12]表明,海雾的数值模拟对初始场高度敏感,尤其是海上大气边界层的温度场和水汽场。因此,海雾数据同化研究十分必要与重要。利用高山红等^[7-8]构建的循环 3DVAR (3-Dimensional Variational) 同化工具,李冉等^[13]进行了 ATOVS (Advanced Television and Infrared Observation Satellite Operational Vertical Sounder) 辐射数据的同化,发现 ATOVS 数据主要改善的是中高层大气温湿状况,而对海上大气边界层的温湿结构产生的影响很小。Wang 等^[14]采用循环 3DVAR,在海雾的短临近预报中同化了 MTSAT (Multi-functional Transport Satellite) 反演的海雾三维雾体湿度信息,取得了很好的同化效果。然而,Wang 等^[14]工作的一个前提条件是,同化窗之内必须已经有海雾发生;否则,无 MTSAT 反演湿度信息用于同化。如果同化 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 温湿廓线数据,不仅不受这个前提条件的限制,而且还能提供温度信息。在黄海海雾的数值模拟中,还未见到有关 AIRS 数据同化效果的研究工作。

高压是影响与控制黄海海雾的重要天气系统之一^[1]。譬如,黄海海雾大致可以分为入海变性高

压、北太平洋高压脊型和入西太平洋高压型 3 种^[1];其中入海变性高压型可以细分为南高北低型、东高西低型和独立高压型^[15]。张守宝^[16]利用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式,指出高压系统影响下的黄海海雾的形成与发展明显受高空系统及其变化的支配。高压系统往往会影响海雾的空间形态分布,譬如海雾有时一整块,有时分成 2~4 块,有时很零散。高压系统是如何影响海雾的分布形态的? 目前这方面的研究工作很少。徐杰^[17]利用 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) 模式对 2010 年两片独立雾区发展合并为一片雾区的冬季海雾进行了数值模拟,但未分析晴空区存在的原因。王帅等^[18]模拟了一次受高压系统影响且后期消散为东北、西南两片的黄海海雾过程,但此次模拟不能很好地抓住海雾分为两片的形态。

2012 年 4 月 14 日发生了一次受高压影响、雾区分成 2 大块的海雾过程。此文将进行 AIRS 温湿廓线数据与其他多种观测数据的同化对比试验,看它是否能改进海上边界层的温湿分布;在同化试验取得良好模拟结果的基础上,分析此次海雾的形成机制,探讨高压的影响作用。

1 观测事实

1.1 海雾雾区

2012 年 4 月 14 日,黄海海域发生了 1 次大范围的海雾事件。它的演变过程由图 1 的 MTSAT 可见光卫星云图给出,黄海区域呈乳白色、表面纹理均匀且边界与海岸线吻合较好的“云”为海雾(图 1a

-c),但图 1d 中黄海西部被高云覆盖。由图 1 可以看到,14 日 08 时(LST;UTC+08,下同),黄海东西两侧各存在独立雾区,中部从南至北为宽约 200 km 的晴空区(图 1a);11 时,西侧雾区覆盖黄海西岸的沿岸海域,东侧雾区占据整个朝鲜半岛西部海域,晴空区范围略微扩大(图 1b)。

14—16 时,西侧雾区不断向东伸展,东侧雾区范围整体向东缩小(图 1c)。随后,中部晴空区开始被海雾填充(图 1d)。此外,发现西侧雾区颜色较暗淡,而东侧白亮,这说明西侧雾区厚度明显小于东侧。

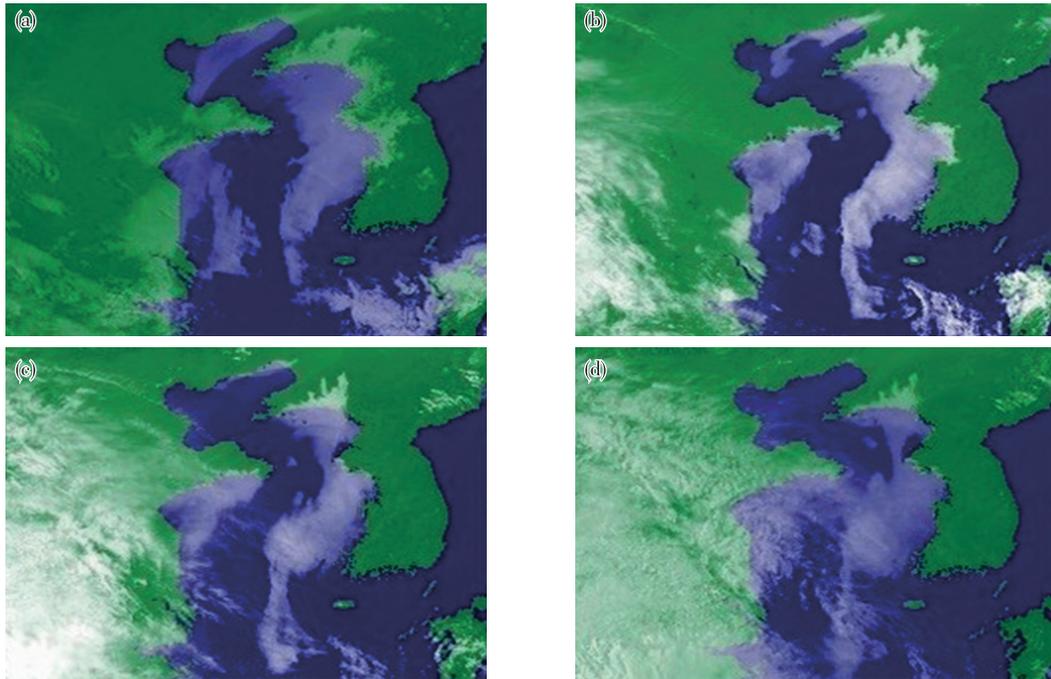


图 1 2012 年 4 月 14 日海雾雾区的演变(a. 08 时,b. 11 时,c. 14 时,d. 16 时)

Fig.1 The evolution of sea fog on 14 April 2012 (a. 08:00 LST, b. 11:00 LST, c. 14:00 LST, d. 16:00 LST)

1.2 站点观测

海雾形成及维持与海上逆温层维持有密切联系^[15,19]。利用图 2 中的白翎岛站(BY)与青岛站(QD)的探空信息来考察图 1 中东西 2 片海雾所在海域的逆温层状态。如图 3 所示,14 日 08—20 时,黄海西部的逆温层底维持在 150 m 左右(图 3a,b);而黄海东部的逆温层底明显高于西部,其值为 280 m~380 m 左右(图 3c,d)。逆温层底一般就是海雾

的顶部^[2],再根据逆温层以下温度与露点温度差的大小,可以诊断黄海西部与东部的相对湿度平均分别为 91.35%与 98.40%。因此,探空信息揭示出黄海东部海雾比西部海雾不仅厚而且浓,这与图 1 中卫星图片的信息吻合。

2 数据同化试验

2.1 同化数据

美国 Aqua 卫星搭载的 AIRS 探测系统由多种遥感仪器组合,融合了多种先进红外遥感技术。文中所同化的是 AIRS 系统经质量控制反演所得到的大气温湿廓线数据(<https://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS>),垂直分辨率分布不均,近海面分辨率可达 200 m。

还同化了其他观测数据,主要包括:常规探空(12 h 间隔)、地面、船舶与岛屿观测数据(3 h 间隔)以及美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)提供的 BUFR 格式数据,包括地面(3 h 间隔)与高空探测数据(6 h 间

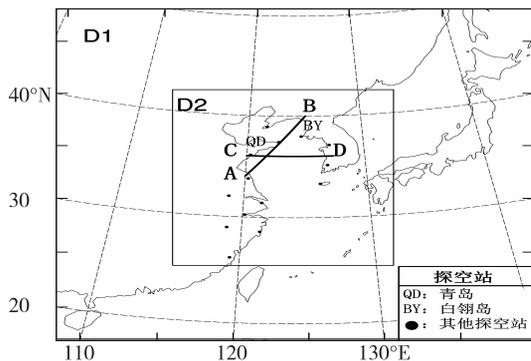


图 2 WRF 模拟区域

Fig.2 WRF modeling domains

隔), 飞机报、卫星云迹风、风廓线雷达等数据。

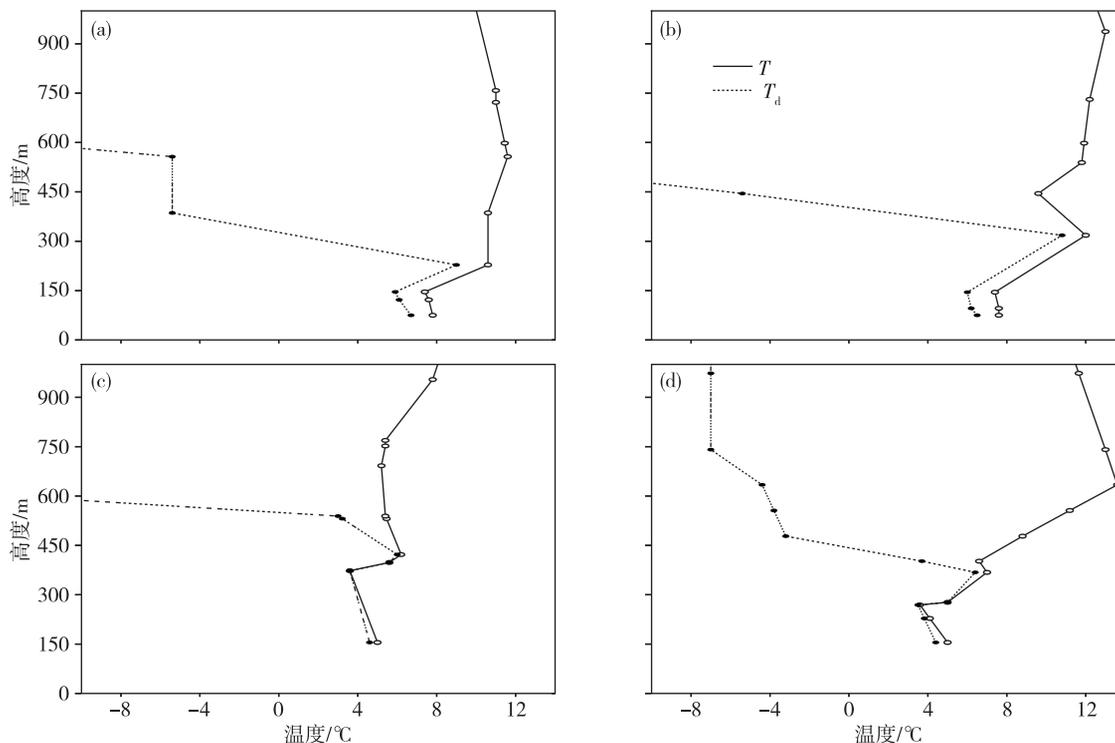


图 3 2012 年 4 月 14 日青岛站(a, b)与白翎岛站(c, d)温度、露点温度探空曲线(a. 08 时, b. 20 时, c. 08 时, d. 20 时)

Fig.3 The temperature and dew point temperature sounding sites of Qingdao (a, b) and Baengyeongdo (c, d) on 14 April 2012 (a. 08:00 LST, b. 20:00 LST, c. 08:00 LST, d. 20:00 LST)

2.2 同化试验

采用 WRF 模式(V3.4.1), 设置了双重固定嵌套区域模拟, 如图 2 所示。区域中心为(34.2°N, 124.1°E), 两个区域的水平分辨率分别为 30 km 和 10 km, 格点数分别为 120×120 和 166×190。模式采用 Lin 物理方案^[20], Kain-Fritsch 积云方案^[21], RRTMG 长、短波辐射方案^[22]与 Noah 陆面模式^[23]。模式所用背景场和时变侧边界为 FNL (Final Analysis Data of Global Forecast System)再分析数据; 海温为 NEAR-GOOS (North-East Asian Regional Global Ocean Observing System)日平均数据。为进一步改善模拟效果, 未采用背景误差协方差 CV5, 而是采用 NMC 方法 (National Meteorological Center)^[24]为所研究的个例生成加入了湿度控制变量的独自的特征值空间背景误差协方差 CV6 (WRF-3DVAR 的背景误差协方差有 CV3、CV5、CV6 与 CV7 等 4 种, 具体见 WRF 主页 <http://www.wrf-model.org>)。模拟时段为 2012 年 4 月 14 日 02 时—15 日 02 时, 共 24 h。采用循环 3DVAR 方案^[7-8], 设置了 3 组同化试验(表 1), 来研究同化不同数据的海雾模拟效果。

表 1 资料同化试验

Table 1 Results of data assimilation experiments

试验	同化数据
Exp-A	GTS 常规观测数据
Exp-B	GTS 及 BUFR 格式云迹风、飞机报
Exp-C	GTS 及 AIRS 卫星反演数据

2.3 同化效果

2.3.1 海雾雾区

按照高山红等^[7]的方法, 采用俯瞰方式, 自上而下寻找并确定模式结果中 600 m 以下云水混合比 ≥ 0.016 g/kg 的几何高度, 作为海雾雾顶高度。

图 4a-f 给出了表 1 中 3 组试验的海雾模拟结果。可以看到, 在 Exp-A 的初始时刻, 雾区覆盖了山东半岛及附近海域、黄海北部和朝鲜湾, 雾区随着时间不断增大并略有东移, 在发展过程中东西两侧的海雾始终连在一起。Exp-B 与 Exp-A 的雾区分布与变化情况总体一致, 仅渤海与黄海东南部的雾区面积有微小的差别, 说明在常规观测的基础上增加 BUFR 格式云迹风和飞机报数据的同化对模拟雾区没有明显的影响。而 Exp-C 模拟结果得到明显改

善,体现出了图1中海雾观测事实的特点:黄海西侧和东侧均存在着较为稳定的雾区,东侧雾区雾顶比西侧的高,黄海中部晴空区始终存在。这说明,同

化 AIRS 卫星反演的垂直廓线数据对模拟成败起着决定性的作用。

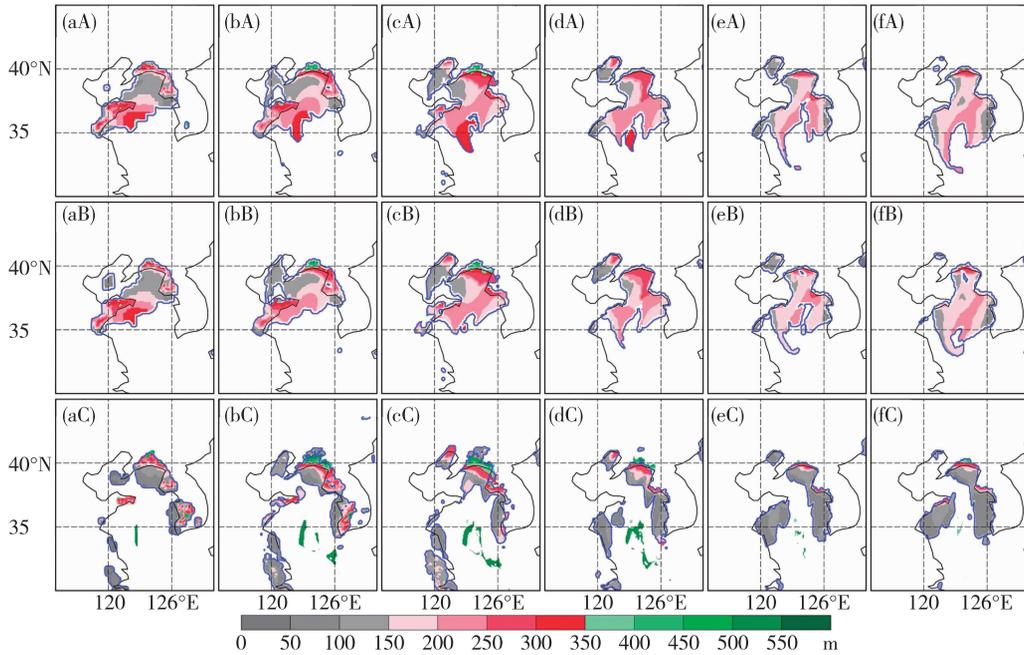


图4 2012年4月14日同化试验 Exp-A(上排)、Exp-B(中排)与 Exp-C(下排)的海雾模拟结果(a. 02时,b. 05时,c. 08时,d. 11时,e. 14时,f. 17时;彩色填充色为雾顶高度,蓝色实线为海面10 m处云水混合比为 $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的等值线)

Fig.4 Results of data assimilation experiments on 14 April 2012 (Upper, middle, and lower panels show the simulated sea fog for the data assimilation experiments Exp-A, Exp-B and Exp-C, respectively. a. 02:00 LST, b. 05:00 LST, c. 08:00 LST, d. 11:00 LST, e. 14:00 LST, f. 17:00 LST; Color shadings are fog top heights (m), blue contours are cloud water ratios with values of $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ at 10 m above sea level)

2.3.2 温湿廓线

同化试验中海雾模拟结果的改善可能归功于边界层温度与湿度状态的改进。挑选模拟时段中能够获得探空观测的时刻:14日20时,利用图1中的探空站点观测,对WRF模式D2区域输出结果进行统计检验。图5a-b给出了850 hPa以下的温度

与湿度站点平均偏差(BIAS)与均方根误差(RMSE)。

由图5可知,Exp-A在1000 hPa高度以下气温偏低,BIAS小于0,在1010 hPa甚至小于 $-2 \text{ }^\circ\text{C}$ (图5a),低层水汽含量的BIAS基本小于0(图5b)。与Exp-A相比,Exp-C的温度有所升高,使得近地面的

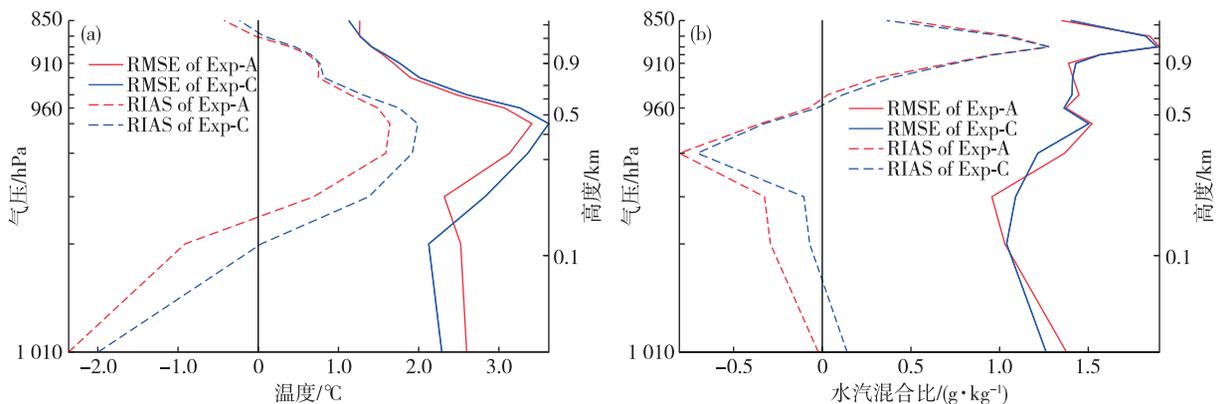


图5 气温(a)和湿度(b)模拟结果与沿岸探空站观测的对比

Fig.5 The simulated temperature (a) and humidity (b) are compared with the sounding data

RMSE 减小 0.4 °C 左右。另一方面, Exp-C 在 960 hPa 以下湿度有所增大, 尤其是 1 000 hPa 高度以下的近地面, 其 BIAS 接近 0。这表明, 同化 AIRS 温湿数据显著改善了海洋边界层 (MBL) 的温湿状态, 从而改进了海雾模拟结果。

2.3.3 同化 AIRS 数据的作用

图 6a-b 展示了 3 组同化试验在初始场时刻的海面温湿度、气压与风场的水平分布, 发现这些变

量分布存在明显的差异。Exp-A 与 Exp-B 中黄渤海大片区域相对湿度超过 90% (图 6aA, aB), 使雾区在模拟时刻就偏离观测事实 (对比图 4 与图 1); 同化 AIRS 温湿数据的 Exp-C 中黄海中的相对湿度减至 90% 以下, 与图 1 中的晴空区吻合。Exp-A 与 Exp-B 初始场中黄海中部海面气温低至 4 °C 左右。然而 Exp-C 中却为 6~8 °C。这是由于同化分布于海上的 AIRS 温湿数据改善了海上的温度场。

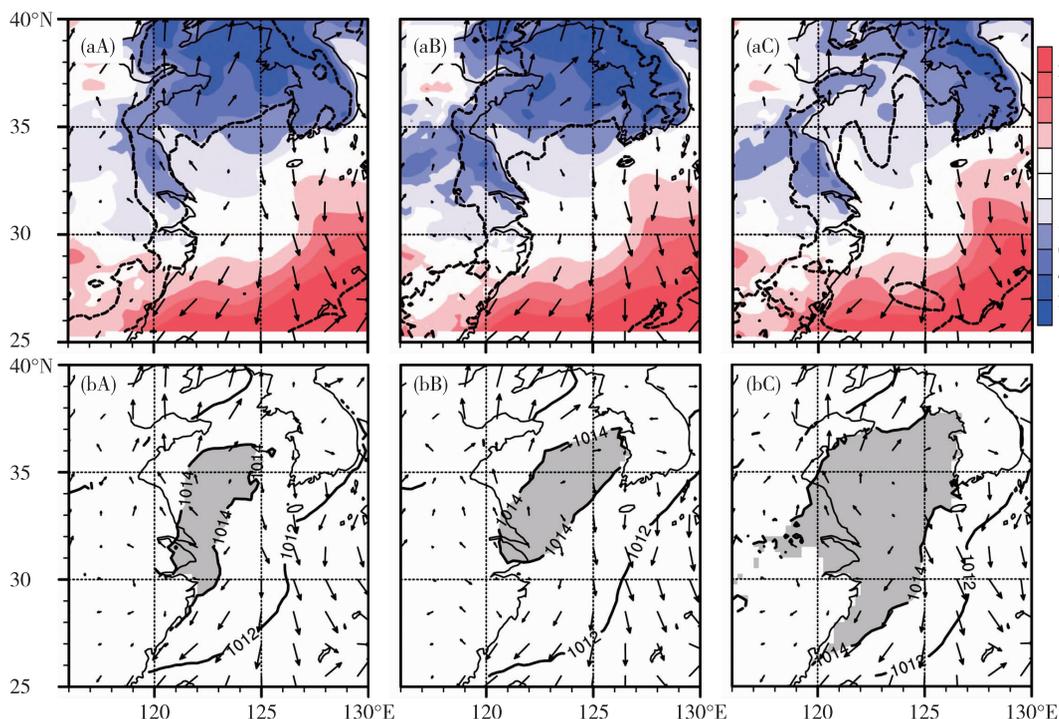


图 6 试验 Exp-A (左列)、Exp-B (中列) 与 Exp-C (右列) 在初始场时刻的海面温湿 (a)、气压与风场的水平分布 (b) (填色代表 2 m 气温, °C; 虚线区域的相对湿度大于 90%; 高于 1 014 hPa 的海面气压区域用灰色表示; 矢量箭头为 10 m 风速)

Fig.6 Sea surface temperature humidity (a) and atmospheric pressure and the horizontal distribution of wind field (b) Simulated by Exp-A (left column), Exp-B (middle column) and Exp-C (right column) in the initial time (Color shadings are 2 m temperature, °C; the relative humidity in the dashed area is greater than 90%; the sea surface pressure region above 1 014 hPa is shown in gray; the vector arrow is 10 m wind speed)

由图 6bA 与图 6bC 可知, 同化 AIRS 温湿数据, 不仅使海上高压区的强度增强, 而且范围也扩大。在初始时刻, 虽然 3 组试验的海面风速差异不大, 但在随后的模拟阶段, Exp-C 较强的海上高压中心附近的风速变得更小。

总体来说, 同化 AIRS 温湿数据之后改进了海上高压的强度与范围。更强的高压会产生强烈的下沉增温, 与此同时中心及其附近区域风速较小, 这皆使得高压中心附近海雾难以发展, 这可能是晴空区存在的一个主要原因。

3 形成机制研究

3.1 机制猜想

同化 AIRS 温湿数据后, 图 1 所展示的海雾特点被成功再现了。此节将基于 Exp-C 的试验结果, 详细讨论晴空区、东西两片雾区以及其厚薄差异的成因。海雾的生成、发展与天气系统的变化密切相关^[1,15,25], 高压从南部带来的暖湿空气可以导致中国沿岸海雾突然发生^[26], 黄海高压形成的相对稳定的大气状况有利于海雾的形成与维持^[16,27-28]。图 7a-d 给出了此次海雾发生时, 海雾与天气系统之间的联系。可以发现: 底层高、低压控制了海雾的演

变, 低压不断增强并逼近渤海, 高压不断收缩但其中心一直占据着黄海中部; 海雾与高压之间的联系

更为紧密, 海雾主要发生在远离高压中心的外围西侧与东侧区域。

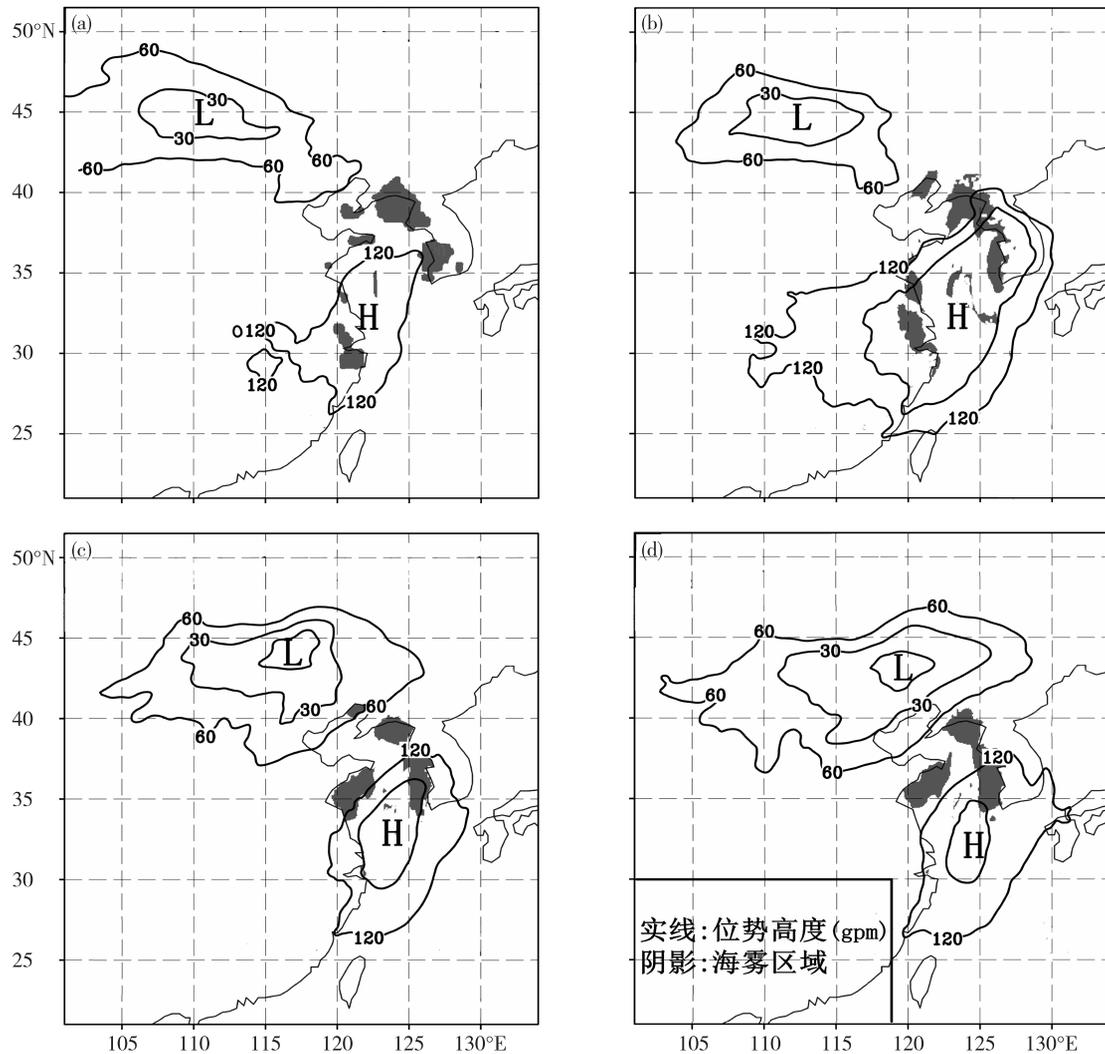


图7 2012年4月14日海雾与高低压系统(1 000 hPa位势高度)之间的关系(a. 02时, b. 08时, c. 14时, d. 18时)

Fig.7 Relationship between the sea fog and high/low-pressure systems (geopotential heights at 1 000 hPa) on 14 April 2012 (a. 02:00 LST, b. 08:00 LST, c. 14:00 LST, d. 18:00 LST)

将海雾发生区域与海温分布(图8)进行对比, 发现东西两侧雾区对应的海温分别约为9℃和6℃, 而晴空区明显存在一个海温接近10℃的暖舌。因此, 晴空区的存在可能与过高的海温、近海面湍流混合较弱有关; 而高压外围顺时针流动的气流将黄海以西的陆地上空暖空气带到海温较低的海面上, 先形成逆温层然后逐渐降温成雾。

3.2 晴空区存在原因

3.2.1 黄海高压的作用

为刻画高压下沉运动导致的增温效果, 定量确定影响温度局地变化的各项因子, 借助了温度控制方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla T - \omega (\gamma_d - \gamma) + \frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

其中, T 为温度, t 为时间, \mathbf{V} 为水平风速, ω 为垂直风速, γ_d 为干绝热直减率, γ 为温度递减率, c_p 为干空气比定压热容, Q 为外源对每单位质量空气的加热率。 $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为温度的局地变化项, $-\mathbf{V} \cdot \nabla T$ 为温度平流项, $-\omega(\gamma_d - \gamma)$ 为垂直运动引起的输送项, $\frac{1}{c_p} \frac{dQ}{dt}$ 为非绝热加热项。

根据公式(1), 利用 WRF 输出的每小时温度、垂直速度等模拟结果, 定量估计 14 日 14—15 时温度的局地变化项与垂直运动引起的输送项。观察

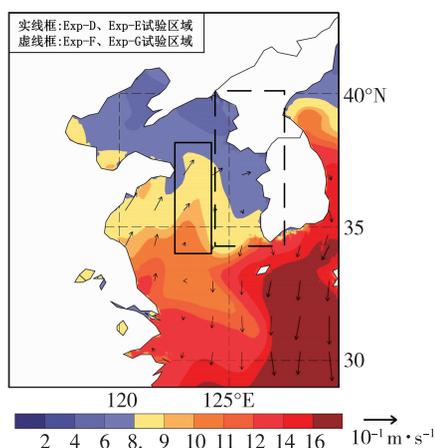


图 8 2012 年 4 月 14 日黄渤海 NEAR-GOOS 日平均海温 (填色区)以及 10 m~1 000 hPa 垂直风切变(箭头, 14 时)

Fig.8 NEAR-GOOS daily sea surface temperature (shaded) in the Yellow sea and Bohai sea on 14 April 2012 and 10 m—1 000 hPa vertical wind shear (vectors, 14:00 LST)

垂直速度与垂直运动引起的输送项发现:14 日 08 时,黄海中部的 0~1 km 高度范围内,下沉运动不足 0.5 m/s(图略);随着高压中心逐渐向黄海中部移动(图 7b-c),黄海中部下沉运动增强,14 时下沉运动可高达 0.8 m/s(图 9);此时黄海中部温度的局地变化项为 0.5~2 °C(图略),而根据公式(1)计算的垂直运动引起的输送项显示,高压下沉运动使得黄海中部 0~1 km 高度范围内,增温 0.5~2.5 °C(图 9)。垂直运动引起的输送项略大于温度的局地变化项,即高压下沉运动是黄海中部温度升高的主要原因。由近海面的垂直风切变可知(图 8),被黄海高压控制的晴空区近海面垂直风切变小于黄海西侧和东侧,导致晴空区的机械切变湍流弱于两侧。此时空气下沉增温,负的浮力通量项将进一步抑制湍流的发展,近海面空气的热量不能从上而下传到海洋,从而水汽无法冷却成雾。

3.2.2 黄海暖舌的作用

为了进一步研究海温暖舌的作用,在试验 Exp-C 的基础上,设计了两个海温敏感性试验 Exp-D 与 Exp-E(表 2),它们与 Exp-C 的设置一样,只是改变了黄海中部(图 8 中的实线方框区域)的海温。

试验 Exp-D 给出的模拟结果与 Exp-C 的相比,雾区范围与高度和区域变化不大(图略)。然而,试验 Exp-E 的结果却明显不同(图 10)。当黄海中部海区海温降低 1.0 °C 后,原晴空区位置开始有低云生成(图 10a),东侧海雾从成山头附近向晴空区蔓

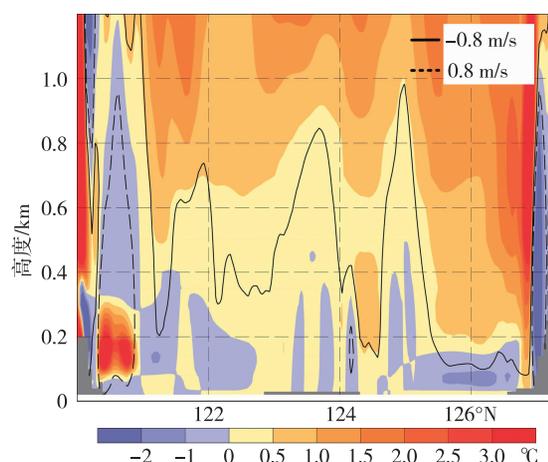


图 9 沿图 2 中 C-D 线的垂直速度(等值线,14 日 14 时,单位:m/s)与垂直项导致的温度变化(填充色,14 日 14—15 时,单位:°C)

Fig.9 The vertical velocity along the C-D line in Fig. 2 (contour line, 14:00 BST, 14th, unit:m/s) and the temperature change caused by vertical speed (filled color, 14:00—15:00 BST, 14th, unit: °C)

延并不断填充晴空区(图 10b-d),晴空区逐渐被低云和海雾覆盖。这表明黄海中部的暖舌对此次海雾过程晴空区的存在有一定作用。

表 2 黄海中部海温敏感性试验设置

Table 2 Sensitivity experiments of the central Yellow Sea SST

试验	设置
Exp-D	SST 增加 1.0 °C
Exp-E	SST 减小 1.0 °C

3.3 东西雾区成因

3.3.1 逆温层结对雾区厚薄的影响

为了同时分析东西海雾中逆温层结作用的垂直结构,沿图 2 中 A-B 线给出温度、风与云水混合的垂直剖面(图 11)。图 11 显示,黄海西侧陆地气温高于海温,热空气通过西南气流的平流输送作用,不断输送至黄海西部,在黄海西侧形成逆温(图 11a)。14 日 03 时,在黄海西侧,逆温层底部的暖湿空气开始降温成雾。逆温层在西南风的作用下不断向东北方向延伸,西侧海雾紧贴逆温层底部发展,雾区高度不超过 200 m(图 11b-d)。由此可以看出,西侧雾区是典型的平流冷却雾。

由于地形的影响,东侧逆温中心明显高于西侧,东侧海雾随逆温层不断沿地形向上发展,最高可达 600 m(图 11a-b)。随着高压不断向东北方向延伸(图 7b-c),暖空气不断在朝鲜半岛西侧堆积,逆温中心温度不断加强并下移,此时东侧雾区高度

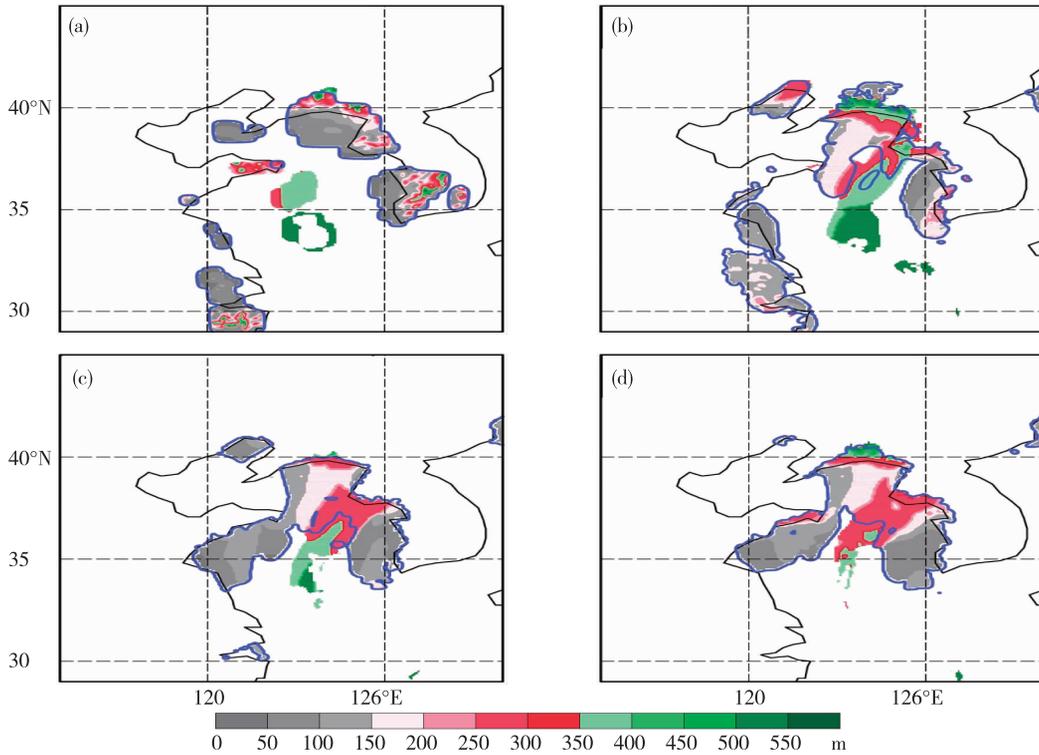


图 10 试验 Exp-E 的海雾模拟结果(a. 02 时,b. 08 时,c. 14 时,d. 18 时)(彩色填充色为雾顶高度,蓝色实线为海面 10 m 处云水混合比为 $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的等值线)

Fig.10 Simulated sea fog of Exp-E (a. 02:00 LST, b. 08:00 LST, c. 14:00 LST, d. 18:00 LST) (color shadings are fog top heights (m), blue contours are cloud water ratios with values of $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ at 10 m above sea level)

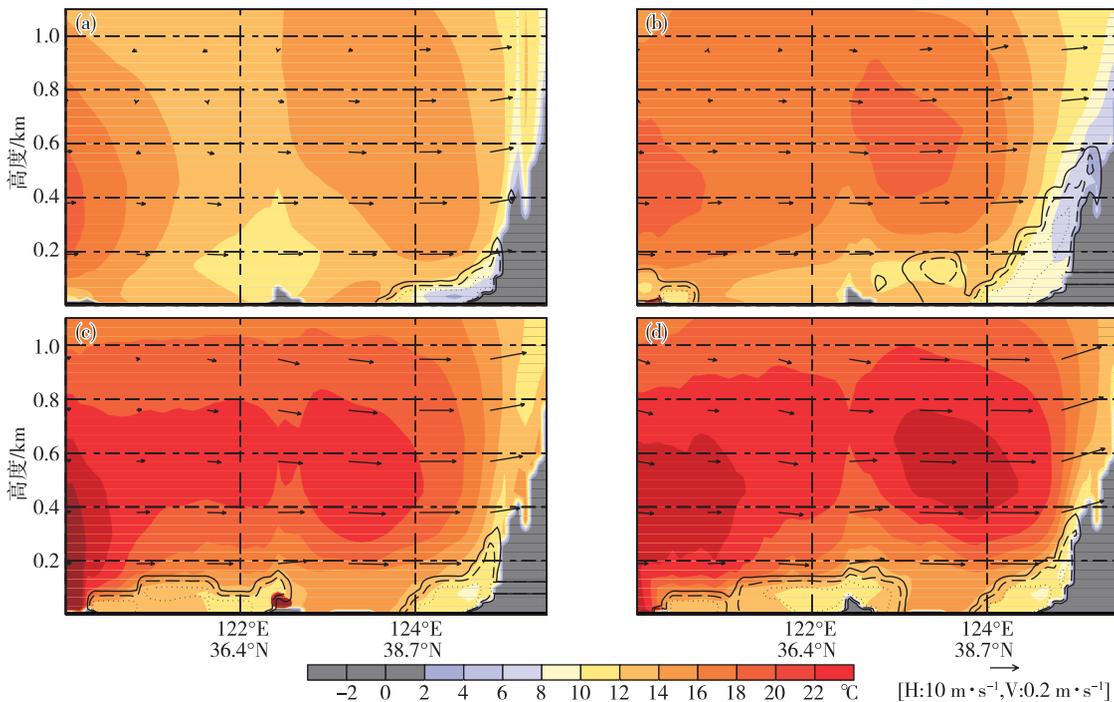


图 11 沿图 2 中 A-B 线的温度、风与云水混合比的垂直剖面(a. 02 时,b. 08 时,c. 14 时,d. 18 时)(图中彩色填充色为温度,黑色线为云水含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),实线为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,虚线为 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,点线为 $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,箭头为风矢量)

Fig.11 Vertical sections of temperature, wind and cloud water mixing ratios along A-B line of Fig.4 (a. 02:00 LST, b. 08:00 LST, c. 14:00 LST, d. 18:00 LST) (colorful shadings are temperatures, black contours are cloud water mixing ratios ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), solid lines are $0.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, long dashed lines are $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, dashed lines are $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and arrows represent flow field)

随之有所下降(图 11c-d)。

3.3.2 黄海东部海温对东侧雾区的影响

由于黄海东部海温明显低于西部(图 8),黄海东部低海温可能对东侧海雾的形成有重要影响。因此又增加了两个海温敏感性试验 Exp-F 与 Exp-G(表 3)。它们的设置与 Exp-C 相同,但改变黄海东部(图 8 中的虚线方框区域)的海温。

表 3 黄海东部海温敏感性试验设置

Table 3 Sensitivity experiments of the eastern Yellow Sea SST

试验	设置
Exp-F	SST 增加 1.0 °C
Exp-G	SST 减小 1.0 °C

试验 Exp-G 给出的模拟结果与 Exp-C 的相比,雾区范围与高度和区域变化较小(图略)。然而,试验 Exp-F 的结果却明显不同(图 12a-d)。当黄海东

部海温升高 1.0 °C 后,14 日 02 时,黄海东侧的南部雾区变为零散团状(图 12a),随后其范围不断减小,至 14 日 14 时,韩国西海岸的海雾已完全消失(图 12c)。这表明黄海东侧较低的海温分布对此次海雾过程东部雾区的发展有重要作用。

3.3.3 高压移动对海雾的影响

从对天气形势(图 7)的分析中发现,海上高压系统及其流场对此次海雾的生成与发展有重要影响。在此进行气团轨迹追踪来说明这种影响,结果见图 13。图 13 中分别追踪了 14 日 23 时向后 21 h 的黄海西侧和东侧 50 m 与 250 m 之间不同高度气团的后向轨迹(图 13a)。结果发现:在高压外围顺时针气流的作用下,西侧雾区的气块来自于陆地;东侧雾区南部的气块来自黄海中部,北部的气块来自山东半岛。

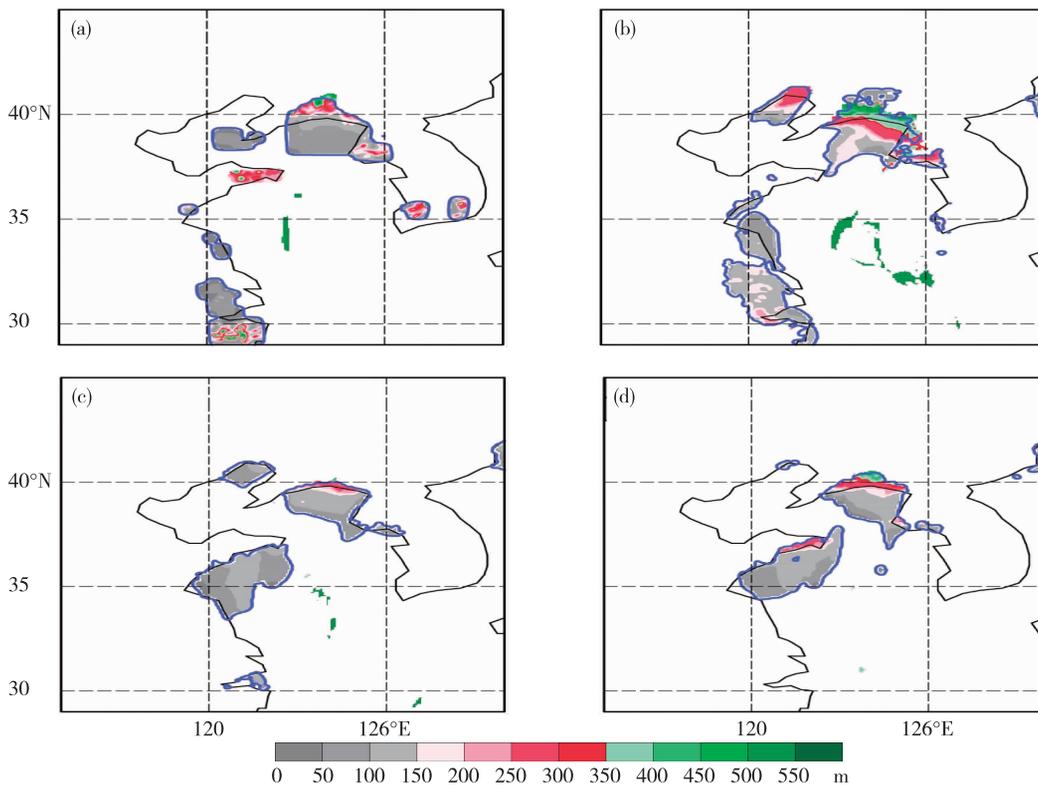


图 12 试验 Exp-F(a. 02 时,b. 08 时,c. 14 时,d. 18 时)的海雾模拟结果(彩色填充色为雾顶高度,蓝色实线为海面 10 m 处云水混合比为 $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的等值线)

Fig.12 Simulated sea fog of Exp-F(a. 02:00 LST, b. 08:00 LST, c. 14:00 LST, d. 18:00 LST) (color shadings are fog top heights (m), blue contours are cloud water ratios with values of $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ at 10 m above sea level)

为进一步阐明东侧雾区形成原因,分析了气团 A 运动时的高度与温度的变化(图 13b, c)。图 13b 显示,气团 A 东北向移动过程中,高度逐渐降低,这是高压下沉作用所导致的(图 7);图 13c 揭示,气团

A 的低层气块温度迅速降温到 4.8 °C ,与海温大体相同(图 8)。由此推断东侧海雾的发生机制也是平流冷却作用。

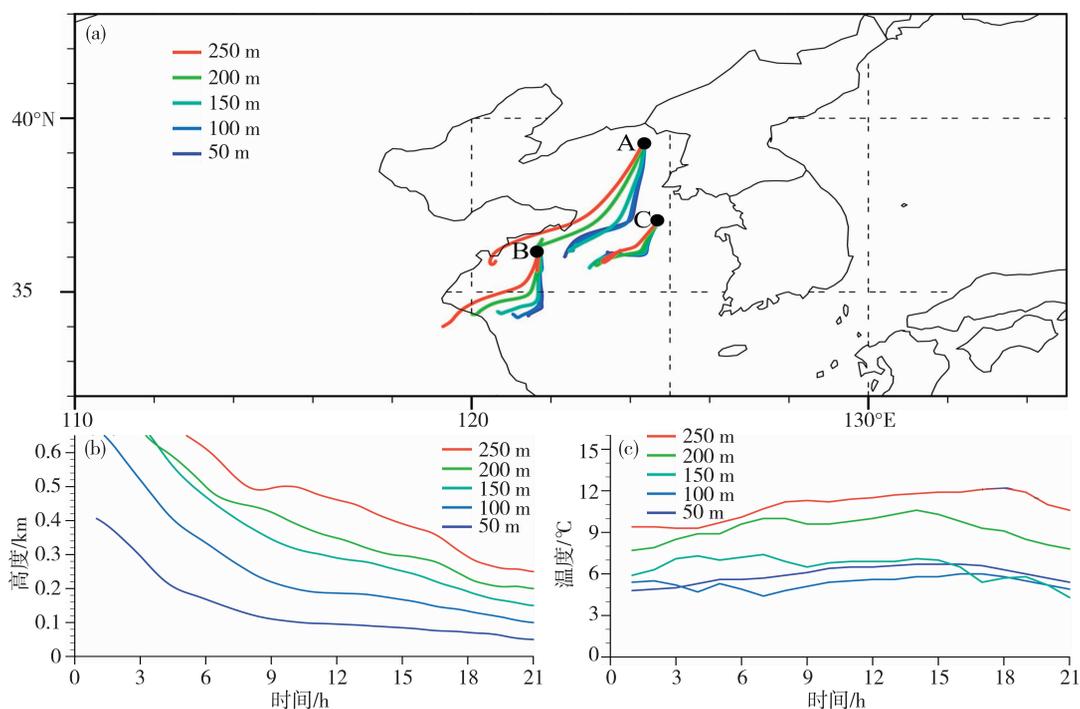


图 13 气团后向轨迹追踪结果(a. 后向轨迹追踪的气团位置,b. 气团高度随时间的变化,c. 气团温度随时间的变化)(黑色圆点:气团起始位置,线条:后向追踪气团的轨迹位置)

Fig.13 Backward trajectory trace of air mass (a. the positions of air mass from backward trajectories, b. the changes of air mass heights, c. the changes of air mass temperatures) (black dots: air mass starting locations, lines: the trajectories of the air)

4 结论

基于高分辨率的中尺度气象模式 WRF, 运用 Cycling-3DVAR 同化方案并采用背景误差协方差 CV6, 同化了 AIRS 卫星温度与湿度廓线数据, 对 2012 年 4 月 14 日发生在黄海的一次春季海雾个例进行了同化试验与形成机制研究。得到如下主要结论:

1) 同化 AIRS 卫星温度与湿度数据在成功模拟此次海雾过程中起了关键作用, 因为该温湿数据的同化能够显著改善海上边界层的温度和湿度以及控制此次海雾的海上高压强度与范围。

2) 尽管此次海雾雾区分为东西 2 片雾区, 但它们皆属于典型平流冷却雾类型。然而二者在厚薄和气团来源方面存在明显差异。受海上高压控制, 黄海西岸陆地的暖空气通过平流作用输送至海温较低的黄海西部, 入海降温形成较低的逆温层, 在逆温层底部生成较薄的西侧雾区。来自黄海中部的空气在高压外围顺时针风场的作用下, 向东北移动至朝鲜半岛西部海域, 然后沿高空气流下沉增温形成较高逆温层底部, 形成较厚的东侧雾区。

3) 高压中心较强的下沉增温与黄海中部的海

温暖舌使近海面气温温差较小, 海面小风速造成近海面微弱的机械湍流, 无法满足海雾生成条件, 导致了黄海中部晴空区的存在。

参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 北京:海洋出版社,1983:352.
- [2] 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]. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24(1): 65-81.
- [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] 胡基福, 常美桂. 鲁南海区海雾天气型的客观划分及其天气分析[J]. *海洋湖沼通报*, 1981(3): 7-13.
- [5] 梁卫芳, 侯忠新. 青岛大雾的特征与预报[J]. *山东气象*, 2001, 21(2): 12.
- [6] 江敦双, 张苏平, 陆惟松. 青岛海雾的气候特征和预测研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2008(3): 7-12.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] 高山红,王永明,傅刚. 一次黄海海雾的集合预报试验[J]. 中国海洋大学学报,2014,44(12):1-11.
- [10] Findlater J, Roach W T, McHugh B C. The haar of north-east Scotland[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1989, 115(487): 581-608.
- [11] Koracin D, Lewis J, Thompson W T, et al. Transition of stratus into fog along the California coast: observations and modeling [J]. J Atmos Sci, 2001, 58 (13): 1714-1731.
- [12] Lewis J, Koracin D, Rabin R, et al. Sea fog off the California coast: Viewed in the context of transient weather systems[J]. J Geophys Res,2003,108 (D15): 1147-1164.
- [13] 李冉,高山红,王永明. 直接同化卫星辐射数据的黄海海雾数值试验研究[J]. 中国海洋大学学报,2012,42(3):10-20.
- [14] Wang Y, Gao S, Fu G, et al. Assimilating MTSAT-derived humidity in now casting sea fog over the Yellow Sea[J]. Wea Forecasting,2014,29(2): 205-225.
- [15] 杨悦,高山红. 黄海海雾天气特征与逆温层成因分析[J].中国海洋大学学报,2015,45(6):19-30.
- [16] 张守宝. 高压系统影响下黄海海雾的形成机制研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
- [17] 徐杰. 冬春季黄渤海海雾的观测分析与数值模拟研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.
- [18] 王帅,傅聃,陈德林,等. 2009年春季一次黄海海雾的观测分析及数值模拟[J]. 大气科学学报,2012,35(3):282-294.
- [19] 周发琇,刘龙太. 海雾[J]. 山东海洋学院学报,1986(S1):114-127.
- [20] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. J Climate Appl Meteor,1983,22(6): 1065-1092.
- [21] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. J Atmos Sci, 1990, 47 (23): 2784-2802.
- [22] 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]. J Geophys Res Atmos, 2008,113(D13): 1395-1400.
- [23] 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]. Mon Wea Rev, 2001,129(4): 569-585.
- [24] Parrish D F, Derber J C. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system [J]. Mon Wea Rev,1992, 120(8): 1747-1763.
- [25] 赵永平,陈永利,王丕浩. 黄、东海海雾过程及其大气和海洋环境背景场的分析[J]. 海洋科学集刊,1997,1:73-82.
- [26] Zhang S P, Xie S P, Liu Q Y, et al. Seasonal variations of Yellow Sea fog: observations and mechanisms [J]. J Climate, 2009, 22(24):6758-6772.
- [27] 傅刚,张涛,周文琇. 一次黄海海雾的三维数值模拟研究[J]. 青岛海洋大学学报,2002, 32(6):859-867.
- [28] 齐伊玲. 典型黄海平流海雾形成机制的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.