

黄海海雾短时临近预报中云水路径的 EnKF 同化研究*

高小雨 高山红

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

摘要 在海雾的短时临近预报中,初始场的水汽凝结状态扮演着重要角色。为了改进初始场的云水含量,本文提出直接同化雾体云水信息的思路。针对 2011 年 5 月一次大范围的黄海海雾,借助 EnKF (Ensemble Kalman Filter)方法,尝试进行了极轨卫星反演云水路径数据的同化试验。结果表明:(1)通过利用 EnKF 将云水混合比增加到背景场和分析场的控制变量中,构建云水观测数据与背景场之间的关系,实现云水路径数据的直接同化是可行的;(2)同化云水路径可显著改善海面气温与湿度状态,大幅提高海雾预报效果;(3)EnKF 能够基于集合体动态统计流依赖的背景误差协方差是其取得良好同化效果的主要原因。值得指出的是,受集合样本误差的影响,需要特别关注云水含量与风之间的相关关系。

关键词 黄海海雾; 短时临近预报; EnKF(Ensemble Kalman Filter)同化; 云水路径; 海雾雾区

中图分类号 P732.2 **doi:** 10.11693/hyh20181000243

海雾是发生在海上大气边界层内而导致近海面大气水平能见度低于 1km 的天气现象,它严重影响海上作业及沿海地区的交通安全。黄海是我国近海海雾高发区之一(王彬华, 1983; Gao *et al.*, 2007; 张苏平等, 2008),且黄海海雾具有突发性特点。近年来,随着计算能力的迅速提升,数值模拟已成为研究黄海海雾的有力工具(傅刚等, 2016; 史得道等, 2016);海雾数值预报尤其是短时临近预报,需求迫切。

已有研究表明,海雾数值预报对初始场很敏感(Nicholls, 1984; Findlater *et al.*, 1989; Ballard *et al.*, 1991; Koraćin *et al.*, 2001, 2005a, b; Lewis *et al.*, 2003; Fu *et al.*, 2006; Gao *et al.*, 2007; 高山红等, 2010)。因此,利用数据同化手段改进海雾数值预报中的初始场质量是一个关键问题。高山红等(2010)基于 WRF(Weather Research and Forecasting)模式及其 3DVAR(3-Dimensional Variational)模块,设计了一个循环 3DVAR 同化方案,通过扩大同化窗而引入更多的常规观测,显著

改进了海雾模拟效果。在此基础上,李冉等(2012)进行了卫星辐射数据的直接同化,王静菊等(2017)同化 AIRS(Atmospheric Infra-Red Sounder)反演温度廓线数据,改善了海上大气边界层(Marine Atmospheric Boundary Layer, MABL)的温度层结。此外,同化卫星反演海面风(刘宇迪等, 2011)与雷达径向风数据(王永明等, 2016)能够不同程度地改善控制海雾发展的 MABL 风场结构。

相比 MABL 的温度层结与风场结构,初始场的湿度状况对黄海海雾短时临近预报更为重要。针对海上湿度观测严重不足的问题,Wang 等(2014)提出了一种利用静止卫星 MTSAT(Multifunctional Transport Satellite)数据反演湿度的同化方案,将黄海海雾短时临近预报的 ETS(Equitable Threat Score)评分提高了 15%–20%。该方案的思路为:在同化窗(譬如预报前 6h)内海雾已经发生的前提下,利用静止卫星多通道数据反演海雾的三维信息(水平雾区与厚度),假定雾

* 国家重点研发计划项目, 2017YFC1404200 号, 2017YFC1404100 号; 国家自然科学基金项目, 41276009 号; 广州市产学研协同创新重大专项课题, 201704020169 号。高小雨, 博士研究生, E-mail: anthas@126.com

通信作者: 高山红, 教授, E-mail: gaosh@ouc.edu.cn

收稿日期: 2018-10-19, 收修改稿日期: 2018-11-19

体内部相对湿度(Relative Humidity, R_H)为 100%, 借助循环 3DVAR 手段同化 R_H ; 在 3DVAR 更新过程中, R_H 被转变为水汽混合比进行同化。然而, 模式微物理方案本身的不完善, 会使得同化 R_H 后的初始场, 未必能出现准确的海雾雾区。

当初始场存在海雾时, 雾顶的长波辐射将会导致雾顶冷却, 产生自上而下的湍流与加强雾顶卷夹作用(Oliver *et al*, 1978; Findlater *et al*, 1989; 杨悦等, 2016; Yang *et al*, 2019), 这会影响到海雾的后续发展。因此, 直接同化海雾雾体内的云水含量信息, 将观测到的海雾在模拟初始场中尽可能地准确再现出来, 无疑将会改进海雾的短时临近预报。受技术手段限制, 目前尚无法利用静止卫星反演得到海雾内部的云水含量。然而, 星载微波辐射计对在海洋上空大气水含量的观测和反演工作已有近 30 年的历史(Mears *et al*, 2015), 整层大气云水含量(即云水路径, Cloud Water Path)的反演算法已经相当成熟(王颖等, 2016)。

因此, 本文尝试同化云水路径, 试图在初始场中再现已经发生的海雾, 从而改进海雾短时临近预报, 类似的工作还未曾见过。由于云水路径数据来源于极轨卫星, 其时空分布范围有限, 为了将此有限的观测信息合理扩散从而提高同化效果, 拟采用流依赖的同化手段——EnKF(Ensemble Kalman Filter; Evensen *et al*, 1996)。Gao 等(2018)的研究已经表明, EnKF 在海雾预报中的同化效果显著优于 3DVAR。本文将基于 GSI(Gridpoint Statistical Interpolation system)-EnKF 同化系统(Shao *et al*, 2016)和 WRF 模式, 开展云水路径数据同化工作, 探究其对黄海海雾短时临近数值预报的改进效果。

1 数据与海雾个例

1.1 数据

WRF 模式的背景场和时变侧边界条件来源于 FNL(Final Analysis of NCEP, National Centers for Environmental Prediction)全球再分析数据, 水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$, 垂直共有 26 个气压层, 下载网址为 <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>。底边界的海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)来自 NEAR- GOOS(North-East Asian Regional Global Ocean Observing System)发布的逐日融合产品, 分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 下载网址为 <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data>。

用于同化的观测数据包括: 常规地面和探空数

据, 下载网址为 http://222.195.136.24/gts_obs/gts_data; 卫星搭载的 AMSU-A/B(Advanced Microwave Sounding Unit A/B), HIRS-3/4(High Resolution Infrared Radiation Sounder 3/4)和 MHS(Microwave Humidity Sounder)探测仪获取的辐射数据, 下载网址为 <https://rda.ucar.edu/datasets/ds735.0>。

云水路径数据(记为 C_w)来自 DMSP(Defense Meteorological Satellite Program)系列卫星搭载的 SSMI(Special Sensor Microwave Imager)辐射计数据所反演的网格化数据, 分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 下载网址为 <ftp://ftp.ssmi.com/ssmi>。由于 C_w 来自极轨卫星, 黄海海域每天只有 2 次数据。图 1 给出了 2011 年 5 月 16 日 20:48 UTC 黄海上空 C_w 的水平分布。

1.2 海雾个例

2011 年 5 月 16–17 日, 黄海发生了一次大范围的海雾过程。图 2 展示了 16 日 21 UTC–17 日 09 UTC 的海雾分布; 其中, 图 2a 为利用 Wang 等(2014)方法得到夜间海雾反演结果, 图 2b–图 2d 为 MTSAT 可见光图片。可见, 海雾最初形成于黄海中部, 受偏南风影响(见图 4 中的海面风场)而向北发展; 17 日上午, 海雾覆盖了长江入海口以北、成山头以南的大片海域, 且雾区的边缘已接触到山东半岛和江苏省沿岸地区; 17 日下午, 受东移的陆地低压影响, 海上风速增大, 海雾自西向东逐渐消散。对比图 1 和图 2 可知, 在黄海中部的雾区范围内观测到了 C_w , 体现了海雾的云水含量信息; 而黄海南部也存在大片的 C_w 分布, 与高云分布相对应(见图 2b、图 2c 的下部)。

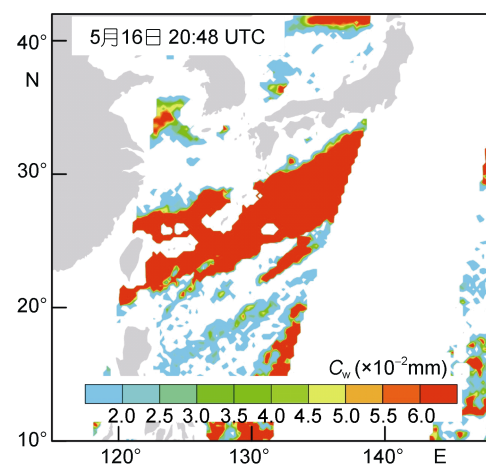


图 1 云水路径 C_w 的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of Cloud Water Path C_w

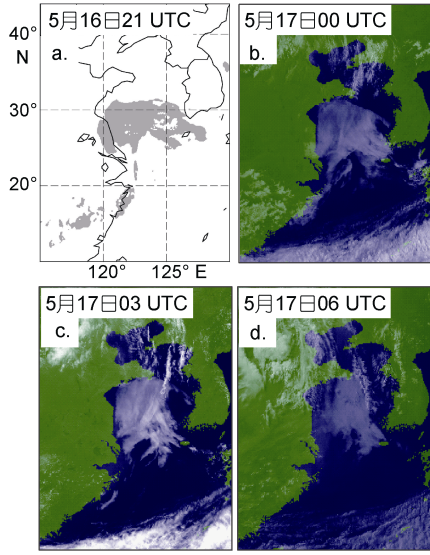


图2 海雾观测事实

Fig.2 Observed facts of the sea fog

注: a 表示 MTSAT 反演的夜间雾区; b-d 表示 MTSAT 可见光云图 (灰白色为海雾)

2 同化方法

2.1 EnKF

背景场、观测数据和同化分析场分别为 x^b , y 和 x^a , 模式空间转换到观测空间由 H 实现, 同化更新过程可以表达为

$$x^a = x^b + K(y - Hx^b), \quad (1)$$

其中, K 为增益矩阵, 它根据观测和背景场误差的大小, 将观测增量 $y - Hx^b$ 转化为分析增量 $x^a - x^b$. 设观测误差为 R , 背景误差为 P^b , K 由公式(2)决定:

$$K = P^b H^T (R + H P^b H^T)^{-1}. \quad (2)$$

在 EnKF 中, 背景场 x^b 随机扰动后, 产生 m 个集合成员: $x_1^b, x_2^b, \dots, x_m^b$. WRF 模式分别将每个成员积分至同化时刻, 统计集合成员预报结果的协方差作为背景误差. 实际计算中, 为了减小计算代价, 集合同化不会直接计算庞大的 P^b 矩阵, 而是计算转换后的 $P^b H^T$ 和 $H P^b H^T$:

$$P^b H^T = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i^b - \overline{x^b})(Hx_i^b - \overline{Hx^b})^T, \quad (3)$$

$$\gamma = \begin{cases} 1 - \frac{5}{3} \left(\frac{z}{L}\right)^2 + \frac{5}{8} \left(\frac{z}{L}\right)^3 + \frac{1}{2} \left(\frac{z}{L}\right)^4 - \frac{1}{4} \left(\frac{z}{L}\right)^5, & 0 \leq z \leq L \\ -\frac{2}{3} \left(\frac{z}{L}\right)^{-1} + 4 - 5 \left(\frac{z}{L}\right) + \frac{5}{3} \left(\frac{z}{L}\right)^2 + \frac{5}{8} \left(\frac{z}{L}\right)^3 - \frac{1}{2} \left(\frac{z}{L}\right)^4 + \frac{1}{12} \left(\frac{z}{L}\right)^5, & L < z \leq 2L \\ 0, & z > 2L \end{cases} \quad (12)$$

$$H P^b H^T = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (Hx_i^b - \overline{Hx^b})(Hx_i^b - \overline{Hx^b})^T, \quad (4)$$

将每个集合成员 x_i^b 分解为集合平均 $\overline{x^b}$ 与扰动 $x_i^{b'}$: $x_i^b = \overline{x^b} + x_i^{b'}$, 则用于同化更新的公式(1)被分解为(Whitaker *et al*, 2002):

$$\overline{x^a} = \overline{x^b} + K(y - \overline{Hx^b}), \quad (5)$$

$$x_i^{a'} = x_i^{b'} - [1 + \sqrt{R/(R + H P^b H^T)}]^{-1} K H x_i^{b'}. \quad (6)$$

受样本误差的影响, 随着预报的进行, 将会出现对背景误差的系统性低估, 使同化结果逼近背景场, 观测信息难以吸收, 导致滤波发散. 样本误差来自有限集合成员统计特征的随机变化, 无法从根本上消除. 为了削弱其影响, 使用 Whitaker 等(2012)提出的集合膨胀技术来增大分析场的离散度:

$$\sigma^b = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i^{b'})^2}, \quad (7)$$

$$\sigma^a = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i^{a'})^2}, \quad (8)$$

$$\left(\beta \frac{\sigma^b - \sigma^a}{\sigma^a} + 1 \right) x_i^{a'} \rightarrow x_i^{a'}. \quad (9)$$

式中, σ^b 和 σ^a 分别为背景场和分析场在每个格点上的标准差. β 参数控制膨胀程度: 若 $\beta = 0$, 则分析场不被膨胀; 若 $\beta = 1$, 则分析场集合成员的离散度被膨胀至与背景场相同.

样本误差还会导致协方差估算中出现虚假的相关性. 为了消除它, 将观测数据的同化限制在一定的空间范围内, 需要对协方差进行局地化处理 (Houtekamer *et al*, 2001). 本文使用 Gaspari 等(1999)提出的五阶多项式函数来实现水平局地化, 将背景误差乘以一个系数 γ :

$$\gamma \circ P^b H^T \rightarrow P^b H^T, \quad (10)$$

$$\gamma \circ H P^b H^T \rightarrow H P^b H^T. \quad (11)$$

\circ 代表对每个元素的舒尔积, γ 是背景场格点与观测点的水平距离 z 与局地化尺度 L 的函数:

2.2 云水路径的同化

2.2.1 云水路径与背景场的相关关系构建

云水路径 C_w 不是模式预报变量, 在被同化之前必须建立它与背景场之间的相关关系。在 WRF 模式中, 云水混合比(记为 q_c)被用于表征云中液态水含量。当控制变量只包括温度 T , 相对湿度 R_H , 表面气压 P_s 和风速 U, V 时, 背景场可以表示为

$$\mathbf{x}^b = \begin{pmatrix} T^b \\ R_H^b \\ P_s^b \\ U^b \\ V^b \end{pmatrix}, \quad (13)$$

以公式(13)为基础, 增加 q_c 的统计和更新, 背景场变为:

$$\mathbf{x}^b = \begin{pmatrix} T^b \\ R_H^b \\ P_s^b \\ U^b \\ V^b \\ q_c^b \end{pmatrix}, \quad (14)$$

将 C_w 的观测值记为 C_w^o , 由背景场得到的 C_w 记为 C_w^b 。某一水平点的 C_w^b 由垂直积分 q_c^b 得到:

$$C_w^b = \frac{1}{\rho_w} \int_{z_1}^{z_n} \rho^b(z) \cdot q_c^b(z) dz, \quad (15)$$

式中, ρ_w 为液态水密度, z_1 和 z_n 分别为模式底层和顶层的高度, $\rho^b(z)$ 为高度 z 上的空气密度; 根据理想气体状态方程, $\rho^b(z)$ 可以由气压 $P^b(z)$ 和温度 $T^b(z)$ 计算:

$$\rho^b(z) = \frac{P^b(z)}{RT^b(z)}. \quad (16)$$

式中, R 为比气体常数。公式(15)与公式(16)将背景场变量转化为 C_w , 起到了转换矩阵 H 的作用, 记为 H_{cw} 。

2.2.2 云水路径的 EnKF 同化

EnKF 顺序同化每个观测数据, 将同化一个观测产生的分析场作为同化下一观测的背景场。于是, y 只有一个自由度, 矩阵 $P^b H^T$ 和 $H P^b H^T$ 分别退化为矢量和标量。对于某一云水观测 C_w^o , 根据公式(15)与公式(16)计算每个集合成员在观测点的云水路径 C_{wi}^b ($i=1, 2, \dots, m$), 及其平均值 $\overline{C_w^b}$, 观测增量即为 $C_{wi}^b - \overline{C_w^b}$, 而背景误差可以表示为:

$$P^b H_{cw}^T \approx \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i^b - \overline{\mathbf{x}^b})(C_{wi}^b - \overline{C_w^b}), \quad (17)$$

$$H_{cw} P^b H_{cw}^T \approx \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (C_{wi}^b - \overline{C_w^b})^2. \quad (18)$$

值得注意的是, 公式(17)计算了 C_w^b 与所有控制变量之间的协方差。根据 C_w^b 的计算公式, 它无疑与 q_c 关系最为密切, 同化反演云水路径将直接影响背景场的 q_c 分布。另一方面, $P^b H_{cw}^T$ 还包含着水物质相变(例如水汽凝结, 云水蒸发等过程)与天气形势和温湿分布的相关性, 使 C_w^o 对 q_c 以外的其他变量产生影响。

图 3 是某一时刻 C_w^o 的 EnKF 同化示意图, 可具体分为 3 步:

- (1) 初始背景场随机扰动, 生成 m 个集合成员, 并利用 WRF 模式将它们分别积分到同化时刻, 得到背景场集合体: x_i^b ($i=1, 2, \dots, m$)。
- (2) 同化 C_w^o 时, 公式(15)与公式(16)计算 C_{wi}^b ($i=1, 2, \dots, m$), 公式(17)与公式(18)计算背景误差 $P^b H_{cw}^T$ 与 $H_{cw} P^b H_{cw}^T$, 进行局地化, 从而产生增益矩阵 K , 更新集合成员, 进行协方差膨胀, 得到 x_i^a ($i=1, 2, \dots, m$)。
- (3) 同化非 C_w^o 的其他观测时, 利用式(3)与公式(4)计算背景误差, 进行局地化, 计算增益矩阵; 利用公式(5)–公式(9)更新集合成员, 并进行协方差膨胀。

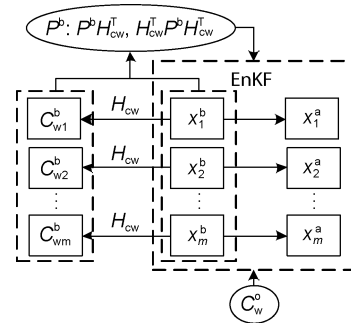


图 3 C_w^o 的 EnKF 同化示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch of EnKF assimilation of C_w^o

3 数值试验

3.1 试验设计

本文采用 WRF 模式(V3.8.1)进行海雾的数值预报, 模式区域为双重嵌套(图 4)。分辨率与物理选项等其它具体设置见表 1。陆雪等(2014)检验了不同边界层方案和云微物理方案模拟海雾的表现, 发现 YSU(Yonsei University)方案与 PLin(Purdue Lin)方案的组合最佳, 本文沿用这一组合。FNL 数据与

NEAR-GOOS SST 为模式提供初边值条件。

借助 GSI(V3.5)及 EnKF(V1.1)模块进行数据同化。图 5 给出了 EnKF 的循环同化过程, 同化窗为 5 月 16 日 18 UTC—17 日 00 UTC, 间隔为 3h, 循环同化 3 次。obs 代表非 C_w^o 的观测数据(常规地面和探空数据, AMSU-A/B、HIRS-3/4 和 MHS 辐射数据); 由于 C_w^o 数据时间为 20:48 UTC, 它仅在第 2 次循环被同化。在同化起点(18 UTC), 利用随机扰动法(Barker *et al*, 2004; Wang

et al, 2008a, b)生成初始背景场集合体 x_i^b ($i=1, 2, \dots, 40$)。EnKF 同化中, 膨胀参数 β 与局地化尺度 L 是 2 个重要参数, 它们会影响海雾的同化效果(Gao *et al*, 2018)。

设计并实施了 2 个数值试验: Exp-A 仅同化常规观测和卫星辐射数据, Exp-B 在 Exp-A 的基础上同化了 C_w^o 。试验的详细设置见表 2。

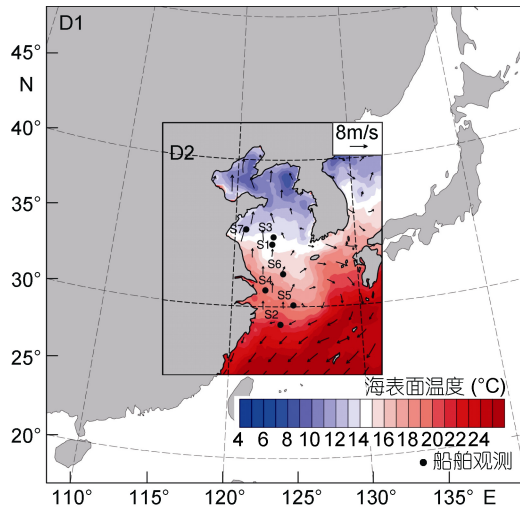


图 4 WRF(Weather Research and Forecasting)模式区域设置

Fig.4 The WRF domains

注: 箭头为 FNL 海面 10m 风场, D1, D2 分别表示模式积分的两个区域

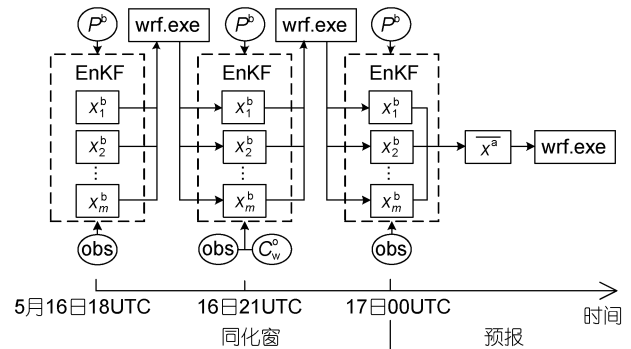


图 5 EnKF 同化流程

Fig.5 Flow chart of EnKF assimilation

3.2 预报效果检验

3.2.1 海雾雾区

雾区是海雾预报主要关注的要素。使用 Wang 等(2014)中所用的方法, 基于 MTSAT 红外和可见光数据反演出海雾观测雾区; 而模拟雾区依据模式预报的云水含量来诊断获取。采用高山红等(2010)提出的

表 1 WRF 模式设置
Tab. 1 The WRF configuration

模式参数	具体设置
中心点	(34.2°N, 124.1°E)
格点数	大区 166×190, 小区 120×120
水平分辨率	大区 30km, 小区 10km
垂直层数	44 η 层*
积分步长	自适应步长(大区 60-120s)
边界层方案	YSU 方案(Hong <i>et al</i> , 2006)
积云参数化方案	Kain-Fritsch 方案(Kain and Fritsch, 1990)
微物理方案	PLin 方案(Lin <i>et al</i> , 1983)
长短波辐射方案	RRTMG 方案(Iacono <i>et al</i> , 2008)
陆面模式	Noah(Chen and Dudhia, 2001)

* $\eta = 1.0000, 0.9975, 0.9925, 0.9850, 0.9775, 0.9700, 0.9540, 0.9340, 0.9090, 0.8800, 0.8506, 0.8212, 0.7918, 0.7625, 0.7084, 0.6573, 0.6090, 0.5634, 0.5204, 0.4798, 0.4415, 0.4055, 0.3716, 0.3397, 0.3097, 0.2815, 0.2551, 0.2303, 0.2071, 0.1854, 0.1651, 0.1461, 0.1284, 0.1118, 0.0965, 0.0822, 0.0689, 0.0566, 0.0452, 0.0346, 0.0249, 0.0159, 0.0076, 0.0000$

表 2 同化试验
Tab. 2 The assimilation experiments

试验组别	同化数据	观测误差		局地化尺度 L	膨胀参数 β
		obs	C_w^0		
Exp-A	obs	GSI 系统提供的静态观测误差		200 km	0.9
Exp-B	obs, C_w^0				

“鸟瞰”方式确定模拟雾区, 对于海上的某一水平模拟点, 在其垂直层中自上而下找到 $q_c = 0.016\text{g/kg}$ (此值对应约 1km 的大气水平能见度) 所对应的高度, 作为雾顶; Zhou 等(2010)指出, 海雾的雾顶高度极少超过 400m。因此, 若上述雾顶 $< 400\text{m}$, 则认为该水平点属于雾区。

图 6 给出了几个时刻的观测和模拟雾区的对比。与观测(图 6a—6d)相比, Exp-A 的雾区始终偏小(图 6e—6h): 17 日 01 UTC, 雾区大致呈三角形分布, 其西侧和北侧边缘距离陆地较远, 随后雾区增大, 但始终没有接触山东半岛; 从 17 日 06 UTC 开始, 雾区西侧逐渐消散, 与观测雾区的变化趋势较为一致, 但雾区消散较快。与 Exp-A 相比, Exp-B 的雾区明显改善(图 6i—6l): 17 日 01 UTC, 雾区的西部和北部明显增大,

距离黄海西岸更近; 随后其分别西向与东北向扩展, 06 UTC 时雾区已经到达山东半岛, 雾区整体的形状和大小与此时的观测十分吻合(比较图 6c、图 6g、图 6k; 比较图 6d、图 6h、图 6l)。

为了定量检验预报结果, 利用点对点的比较方法统计模拟雾区的正报率(Probability Of Detection, POD), 误报率(False Alarm Ratio, FAR), 雾区偏差 Bias 和公正预兆评分 ETS (Doswell III *et al*, 1989; Zhou *et al*, 2010; Wang *et al*, 2014), 结果见表 3。Exp-A 的 POD 与 ETS 分别为 0.513 与 0.361, 而它们在 Exp-B 中分别提高到 0.617 和 0.445; 相比于 Exp-A, Exp-B 的综合评分 ETS 改进率超过 20%。另外, Exp-B 的 Bias 和 FAR 的改进率分别为 31.5% 和 0.7%, 说明同化 C_w^0 在增大正报雾区的同时, 并未导致虚假雾区的增长。

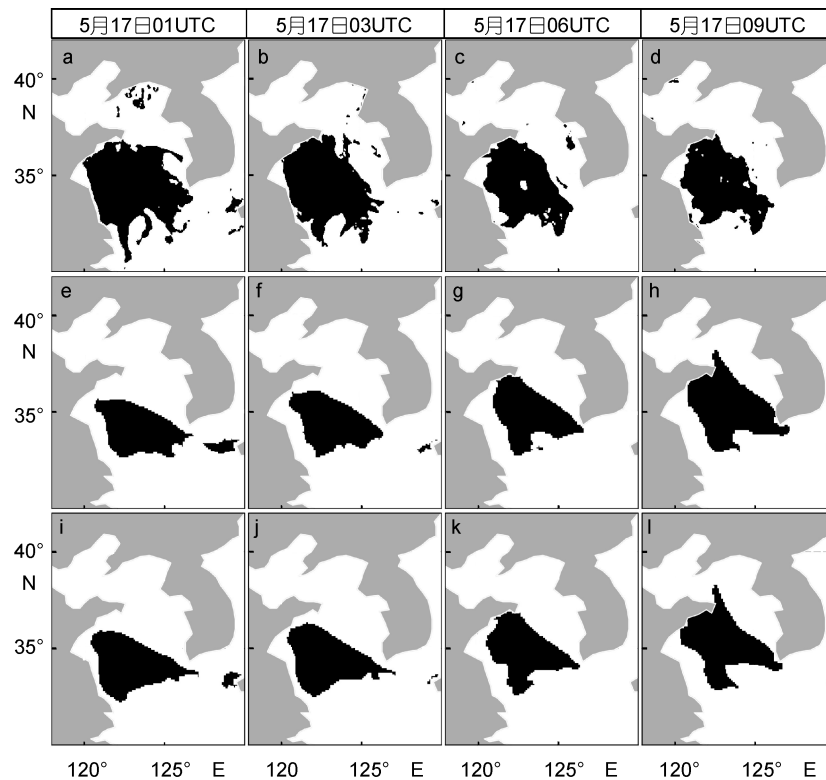


图 6 观测与预报雾区

Fig.6 Observed and forecasted fog areas

注: a-d 为观测雾区, e-h 为 Exp-A 预报雾区, i-l 为 Exp-B 预报雾区

表 3 雾区统计评分
Tab. 3 Statistical scores of forecasted fog area.

试验	POD	FAR	Bias	ETS
Exp-A	0.513	0.171	0.619	0.361
Exp-B	0.617 (20.3%)	0.165 (0.7%)	0.739 (31.5%)	0.445 (23.3%)

注: 括号中粗体代表 Exp-B 较 Exp-A 改进的百分比

3.2.2 船舶观测检验

为了进一步评估海面气温与湿度预报结果, 利用船舶观测(位置如图 4, 分别记为 S1, S2, ..., S7)进行了检验。图 7 给出了偏差 Bias 统计结果。总体上看, 2 个试验所预报的海面气温偏低(图 7 a), 水汽偏少(图 7 b)。在船舶 S2, S5 和 S6, 同化 C_w^0 后的偏差几乎没有改变; 而在船舶 S1, S3 和 S7, Exp-B 较 Exp-A 的偏差明显减小: 气温升高, 水汽增加。其中, 在位于观测雾区中的 S1 站点处(见图 4 的站点位置与图 6 的观测雾区), Exp-A 和 Exp-B 的温度偏差分别为 -1.41°C 和 -1.04°C , 水汽偏差分别为 -0.83g/kg 和 -0.62g/kg ; Exp-B 有了很大改进, 特别是水汽的增加有利于雾区的生长。7 个观测点的检验结果平均而言, Exp-A 和 Exp-B 预报气温的均方根误差(RMSE)分别为 1.38°C 和 1.25°C , 水汽混合比的 RMSE 分别为 0.56g/kg 和 0.47g/kg , Exp-B 的气温与水汽分别改进了

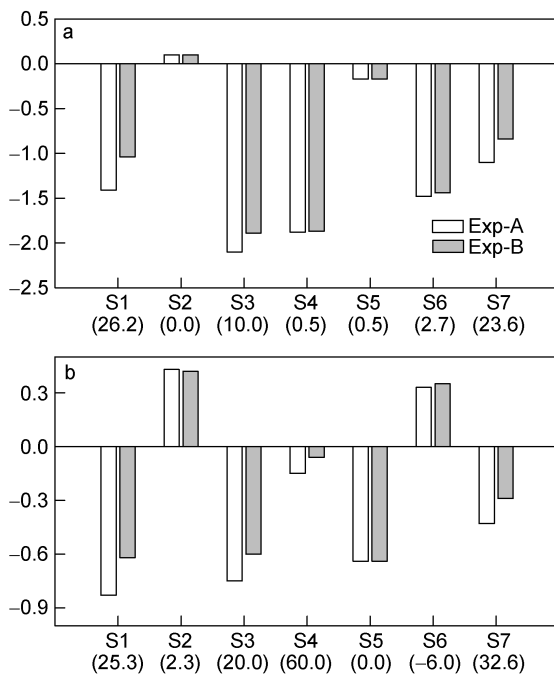


图 7 预报与船舶观测之间的海面气温与水汽的偏差
Fig. 7 Biases between the forecasted and ship-measured sea surface air temperature and mixing ratio
注: 括号内的数字代表 Exp-B 相比 Exp-A 的改进率(%)

7.4%和 16.1%。这说明, 同化 C_w^0 改善了海面气温与水汽的分布, 特别是后者。

4 同化效果分析

4.1 初始场的改进

预报效果检验表明, Exp-B 的海雾雾区明显优于 Exp-A, 这应归功于其初始场的改进。图 8 给出了在 WRF 模式底层, 它们初始场之间差异(Exp-B-Exp-A)的水平分布。图 8 中粗黑线与绿线分别为 Exp-A 与 Exp-B 初始场中雾区轮廓; 可见在预报起点, Exp-B 雾区就已经大于 Exp-A, 其云水含量(图 8a)也清楚显示如此。图 8b 和 8c 中温度与水汽混合比的差异分布可以给出答案: 与 Exp-A 相比, Exp-B 在雾区周围温度显著降低(最大降幅接近 1K), 水汽混合比总体偏大(雾区北侧增大了 $0.2\text{—}0.3\text{g/kg}$); 温度降低促使水汽凝结, 使 Exp-B 雾区在初始时刻就生成范围较大的雾区(对比图 8a—8c 中黑、绿粗线所示的范围)。图 8d 显示, 相比于 Exp-A 的海面风场, Exp-B 存在一个雾区附近呈辐散特征的风场增量(最大风速增量近 1m/s), 这个增量是造成 Exp-B 中海雾逐渐向西和东北方向扩展的主要动力因素(对比图 6 中 Exp-A 与 Exp-B 的预报雾区)。

4.2 同化 C_w^0 产生的分析增量

Exp-A 与 Exp-B 的初始场差异是由同化过程所导致的, 而同化结果具体体现在分析增量上。下面通过分析增量来解释 Exp-A 与 Exp-B 的初始场差异。

Exp-B 仅比 Exp-A 多同化了 C_w^0 (表 2), 而 C_w^0 只在 EnKF 循环同化的第 2 步被同化(图 5)。图 9 为第 3 步同化之前, Exp-B - Exp-A 的模式底层结果, 差异主要集中在海上的雾区所在海域。图 10a、图 10b 为同化第 2 步 (5 月 16 日 21 UTC) 的在模式底层的分析增量。分别对比图 9 为第 3 步同化之前, Exp-B-Exp-A 的模式底层结果, 差异主要集中在海上的雾区所在海域。图 10a 和图 10b 为同化第 2 步 (5 月 16 日 21 UTC) 的在模式底层的分析增量。分别对比图 9a 和图 9b 与图 10a 和图 10b, 发现变量(风、

温度、 q_c 与水汽混合比)的空间分布十分相似。在初始场时刻(即 EnKF 循环同化的第 3 步)仅同化了 obs(探空、地面观测和卫星辐射数据); 第 3 步同化之前, Exp-B 与 Exp-A 的差异是第 2 步同化造成的。所以, 第 2 步中 C_w^o (图 10c)的同化是造成 Exp-B 初始场明显优于 Exp-A 的关键原因。另外, 图 8 和图 9 的变量分布形势大致相同, 说明在第 3 步同化过程中, obs 未对 2 个试验的差异产生影响, Exp-B 相对于 Exp-A 的变化主要来源于 C_w^o 。

如图 10c, 黄海中部的 C_w^o 超过了 0.06mm, 由于没有中高云覆盖(根据 MTSAT 红外数据判断, 图略),

C_w^o 所表征的是海雾中的云水含量的垂直累积。虽然集合成员预报的 $\overline{C_w^b}$ 也在黄海中部显现(图 10d), 但它却呈东西条状分布, 其值为 0.04mm 左右。 C_w^o 与 C_w^b 空间分布的差异, 造成了较大的观测增量 $C_w^o - \overline{C_w^b}$, 使 EnKF 同化 C_w^o 后产生了较显著的分析增量(图 10a、图 10b)。导致在模式底层, q_c 明显增加, 高达 0.32g/kg(图 10a); 雾区北部出现 1—2m/s 的西北风增量, 南部出现 1m/s 的西南风增量。而且, 还导致了温度的降低和水汽的增大(图 10b): 温度降低了 1—1.4K, 水汽增大了 1—1.5g/kg。

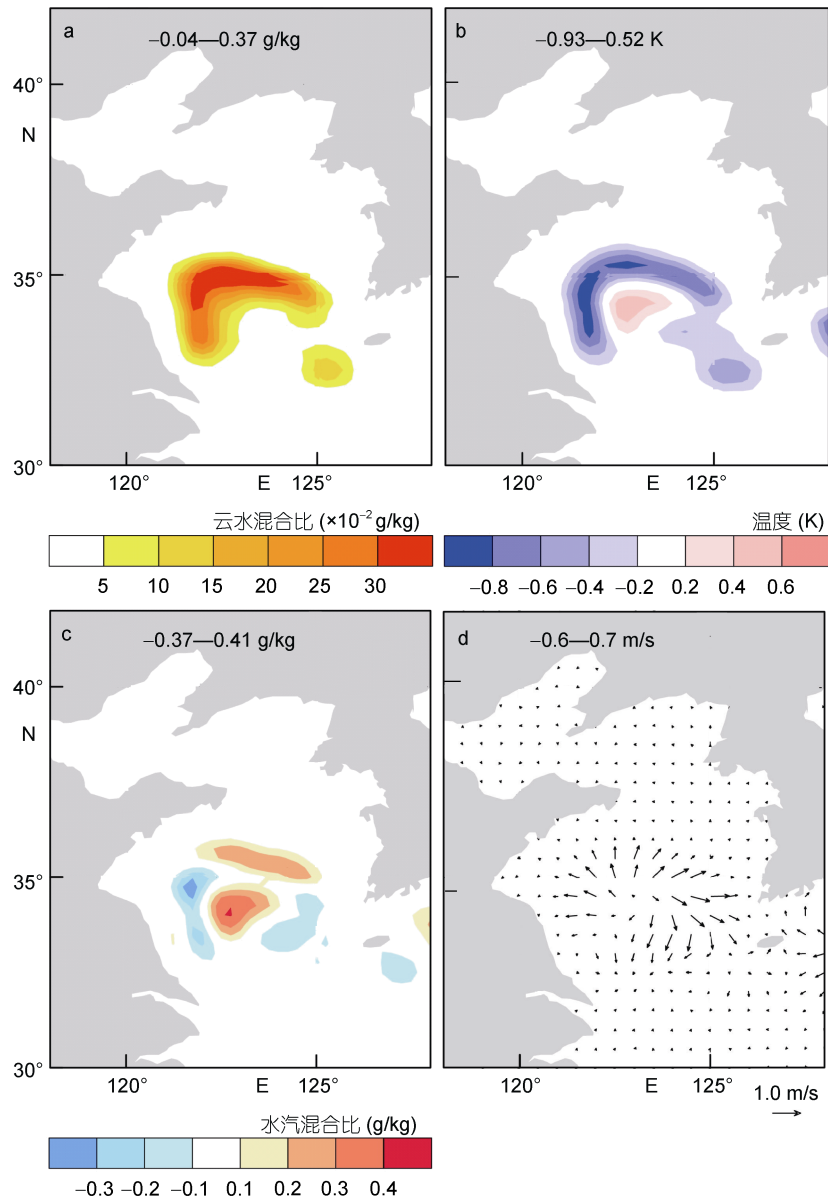


图 8 Exp-B 与 Exp-A 初始场在模式底层上的差异(Exp-B-Exp-A)

Fig.8 Differences of initial conditions between Exp-B and Exp-A at the bottom level (Exp-B-Exp-A)

注: 黑色和绿色实线分别代表 Exp-A 和 Exp-B 在初始时刻的海雾边界

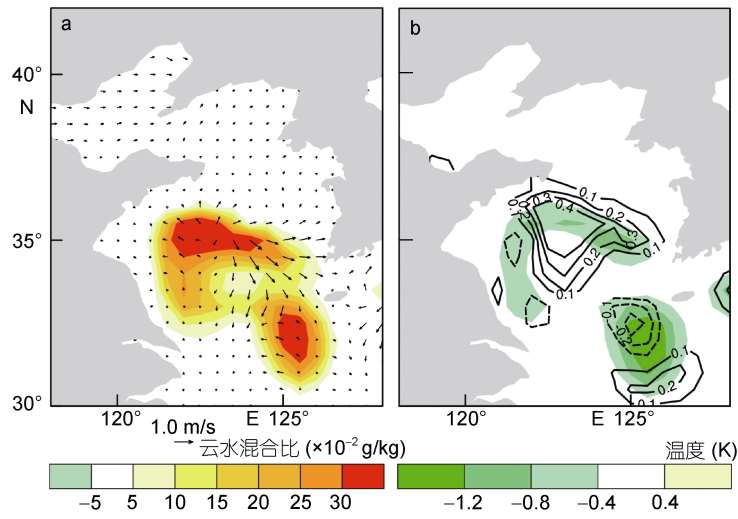


图 9 初始场时刻模式底层上的背景场差异(Exp-B-Exp-A)

Fig.9 Differences between the backgrounds of Exp-B and Exp-A at the bottom level (Exp-B-Exp-A) at 00 UTC, May 17th
注: 箭头表示风场, 等值线表示水汽混合比(单位: g/kg)

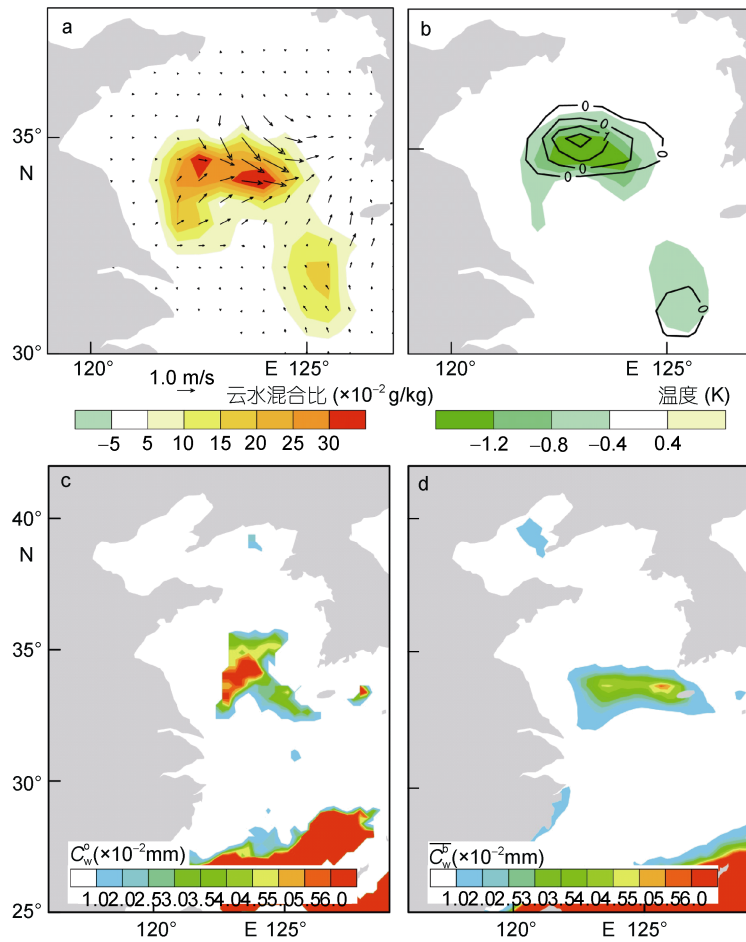


图 10 同化 C_w^0 所产生的模式底层分析增量及 C_w^0 与 C_w^b 的空间分布

Fig.10 Analysis increments at the bottom level by assimilating C_w^0 and distributions of C_w^0 and C_w^b
注: 箭头表示风场, 等值线表示水汽混合比(单位: g/kg)

图 10 的分析增量展示: 虽然同化的是 C_w^o , 但模式中的风、温度与湿度皆有反应, 而且它们增量的空间分布十分相近。这应归功于 EnKF 同化过程中的流依赖背景误差。

4.3 流依赖背景误差的作用

4.3.1 背景误差协方差

EnKF 背景误差的“流依赖”主要体现在 2 个方面: 分析增量的空间分布, 控制变量之间的相关性。为了清晰地看到这种“流依赖”特征, 设计了一个单点同化试验: 以 Exp-B 为基础, 在黄海中部某一点(图 11 中的黑点 P), 将其所同化的 C_w^o 替换成一个较 $\overline{C_w^b}$ 大 0.01mm 的观测值 C_w^p 。

点 P 处的 $\overline{C_w^b}$ 约为 0.031mm, 因此 C_w^p 被设为 0.041mm。在 5 月 16 日 21 UTC, 同化分析增量如图 11 所示。围绕点 P, 温度与湿度增量呈椭圆形分布, 前者最大降低约 0.3K, 后者增加达到了 0.2g/kg; 点 P 以北区域存在 0.1—0.2m/s 的西北风增量, 以南区域呈现较弱的偏西风增量。这种椭圆形分布而不是圆形分布, 是流依赖的一个主要特点; 控制变量之间的相关性, 使得一点的 C_w^p 的同化就激发了关联变量(温度、湿度与风)的改变。

根据 EnKF 的增益矩阵(公式(2))和更新算法(公式(5)), 增量的分布形势取决于协方差矩阵 $P^b H^T$ 的结构。基于集合成员的背景场, 统计了点 P 处的 C_w^b 与其它变量的协方差分布(图 12)。

在图 12 中, C_w^b 与温度呈负相关, 与湿度呈正相

关, 且点 P 以西和以北区域的协方差较大, 以南的却较小; C_w^b 与纬向风呈正相关, 与点 P 附近和以北的经向风呈负相关, 而与以南的经向风呈正相关。若不进行局地化处理, 单点试验中增量的分布将与图 12 几乎保持一致(图略)。

值得注意的是, 由于不同集合成员的 C_w^b 差异较大, 当统计某一点上的协方差时, 往往有部分成员的 C_w^b 为 0, 使得实际统计中起作用的样本数减少, C_w^b 非 0 的成员影响力增大, 样本误差增大。云水对温湿变量的影响由较强的物理关系来约束, 不易受样本误差影响, 如气温越低, 空气越容易达到饱和。但是, 云水与风的关系较为复杂, 样本误差可能导致云水观测产生不合理的风速增量。譬如, 对本次海雾个例, 偏南风应更有利于雾区向北发展; 但在点 P 以北, C_w^b 却与经向风呈负相关(图 12d), 同化 C_w^b 虽然增大了雾区但却导致了不利于雾区发展的北风增量(图 11c)。

4.3.2 控制变量的敏感性

为了分析风场变化对雾区预报的影响, 进行一个敏感性同化试验: 与 Exp-B 一样, 但控制变量中去除了风速, 即公式(14)变为

$$\mathbf{x}^b = \begin{pmatrix} T^b \\ R_H^b \\ P_s^b \\ q_c^b \end{pmatrix}, \quad (19)$$

该试验记为 Exp-S。

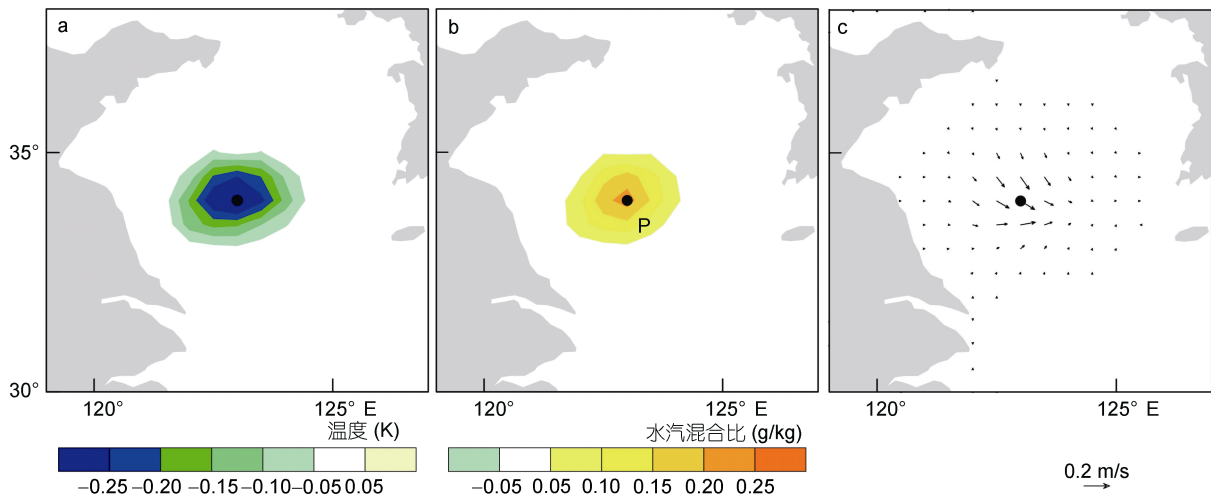


图 11 单点同化试验模式底层分析增量

Fig. 11 Analysis increments at the bottom level for the single observation test

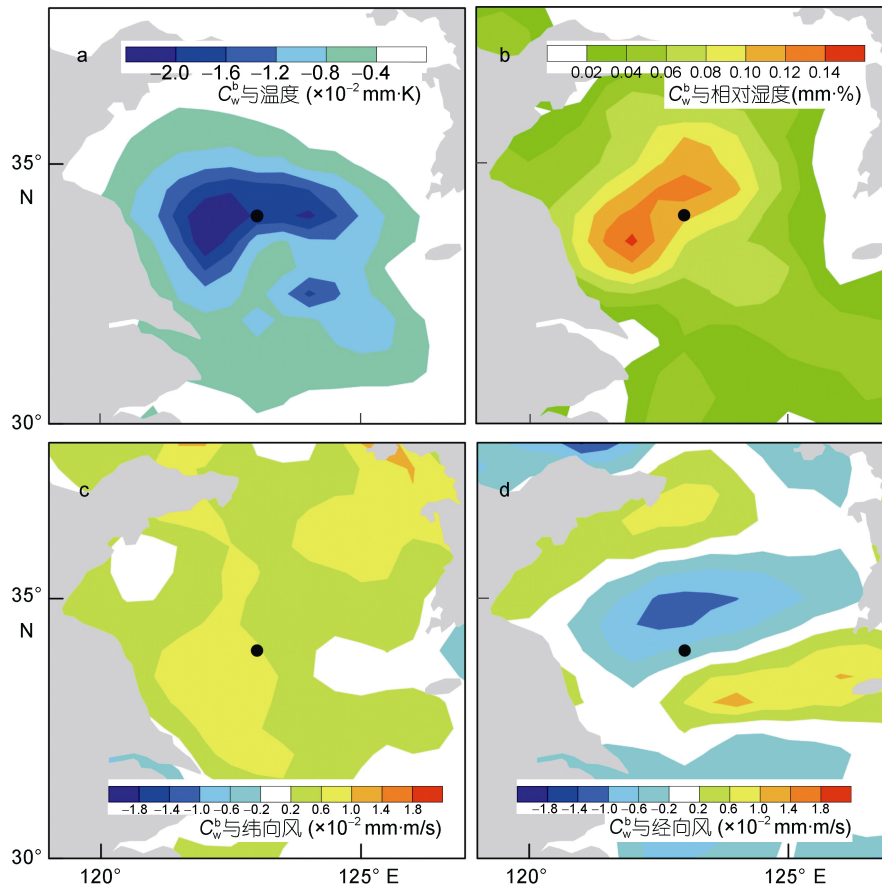


图 12 点 P 处 C_w^b 与其他变量在模式底层上的协方差

Fig.12 Covariances between C_w^b and other variables at the bottom level

注: a 表示 C_w^b 与温度, b 表示 C_w^b 与相对湿度, c 表示 C_w^b 与纬向风速, d 表示 C_w^b 与经向风速

与 Exp-B 相比, Exp-S 预报的海雾雾区向北扩展的更符合观测(图略)。对 Exp-S 预报雾区评分的统计结果表明, Exp-S 的 POD、FAR、Bias 与 ETS 评分分别为 0.650、0.124、0.743 与 0.497。与表 3 给出的 Exp-B 评分相比, Exp-S 的 POD、FAR、Bias 与 ETS 评分分别提高了 5.3%、24.8%、5.4%与 11.7%。这表明, 如果控制变量不包含风, 即不考虑云水与风的关系, 那么同化效果会更好。这同时也暗示, 如果 EnKF 中无法统计出云水含量与风之间的准确关系, 则要谨慎利用云水含量来改变风场。

5 结论

在黄海海雾短时临近预报中, 利用数据同化手段改进数值模拟的初始场质量至关重要。Wang 等 (2014) 提出了一种海雾信息的间接同化方法: 基于 MTSAT 静止卫星多通道数据反演出海雾雾体, 认为其内部相对湿度为 100% 并加以同化。与此方法不同,

本文借助 EnKF 方法, 提出直接同化海雾雾体云水信息的思路。由于目前尚无法通过静止卫星数据获取海雾雾体内的云水信息, 本文基于极轨卫星反演的云水路径数据进行了 EnKF 同化试验。针对 2011 年 5 月一次大范围的海雾展开同化研究, 结论如下:

(1) EnKF 中将云水混合比增加到背景场和分析场的控制变量中, 构建云水观测数据与背景场之间的关系, 实现云水路径数据的直接同化, 是一条可行的途径。

(2) EnKF 同化云水路径数据, 可使预报雾区的 POD 评分提高 20.3%, 公正预兆评分 ETS 提高 23.3%。船舶观测的检验结果表明, 海面气温与湿度状态均得到显著改善。

(3) 同化云水路径数据使海雾预报效果大幅改进的原因是, EnKF 能动态提供基于集合体所统计的流依赖背景误差协方差。但受集合样本误差的影响, 云水含

量与风之间的相关关系的准确性值得特别关注。

参 考 文 献

- 王 颖, 李国春, 高阳华等, 2016. AMSR-E 数据参数化法反演液态云水路径研究. 气象与环境学报, 32(2): 59—65
- 王永明, 高山红, 2016. 黄海海雾数值模拟中多普勒雷达径向风数据同化试验. 中国海洋大学学报, 46(8): 1—12
- 王彬华, 1983. 海雾. 北京: 海洋出版社, 352
- 王静菊, 高小雨, 高山红, 2017. 一次黄海海雾的数据同化试验与形成机制研究. 海洋气象学报, 37(1): 42—53
- 史得道, 吴振玲, 高山红等, 2016. 海雾预报研究综述. 气象科技进展, 6(2): 49—55
- 刘宇迪, 任景鹏, 周 鑫, 2011. 散射计风场的三维变分对海雾数值模拟的影响. 应用气象学报, 22(4): 472—481
- 李 冉, 高山红, 王永明, 2012. 直接同化卫星辐射数据的黄海海雾数值试验研究. 中国海洋大学学报, 42(3): 10—20
- 杨 悦, 高山红, 2016. 黄海海雾 WRF 数值模拟中垂直分辨率的敏感性研究. 气象学报, 74(6): 974—988
- 张苏平, 鲍献文, 2008. 近十年中国海雾研究进展. 中国海洋大学学报, 38(3): 359—366
- 陆 雪, 高山红, 饶莉娟等, 2014. 春季黄海海雾 WRF 参数化方案敏感性研究. 应用气象学报, 25(3): 312—320
- 高山红, 齐伊玲, 张守宝等, 2010. 利用循环 3DVAR 改进黄海海雾数值模拟初始场: WRF 数值试验. 中国海洋大学学报, 40(10): 1—9
- 傅 刚, 李鹏远, 张苏平等, 2016. 中国海雾研究简要回顾. 气象科技进展, 6(2): 20—28
- Ballard S P, Golding B W, Smith R N B, 1991. Mesoscale model experimental forecasts of the Haar of northeast Scotland. Monthly Weather Review, 119(9): 2107—2123
- Barker D M, Huang W, Guo Y R *et al*, 2004. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results. Monthly Weather Review, 132(4): 897—914
- Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity. Monthly Weather Review, 129(4): 569—585
- Doswell III C A, Flueck J A, 1989. Forecasting and verifying in a field research project: DOPLIGHT '87. Weather and Forecasting, 4(2): 97—109
- Evensen G, van Leeuwen P J, 1996. Assimilation of geosat altimeter data for the Agulhas Current using the ensemble Kalman Filter with a quasigeostrophic model. Monthly Weather Review, 124(1): 85—96
- Findlater J, Roach W T, McHugh B C, 1989. The haar of North-East Scotland. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 115(487): 581—608
- Fu G, Guo J T, Xie S P *et al*, 2006. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea. Atmospheric Research, 81(4): 292—303
- Gao X Y, Gao S H, Yang Y, 2018. A comparison between 3DVAR and EnKF for data assimilation effects on the Yellow Sea fog forecast. Atmosphere, 9(9): 346
- Gao S H, Lin H, Shen B *et al*, 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling. Advances in Atmospheric Sciences, 24(1): 65—81
- Gaspari G, Cohn S E, 1999. Construction of correlation functions in two and three dimensions. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 125(554): 723—757
- Hong S Y, Lim J O J, 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). Journal of the Korean Meteorological Society, 42(2): 129—151
- Houtekamer P L, Mitchell H L, 2001. A sequential ensemble Kalman filter for atmospheric data assimilation. Monthly Weather Review, 129(1): 123—137
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J *et al*, 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. Journal of Geophysical Research, 113(D13): D13103
- Kain J S, Fritsch J M, 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. Journal of the Atmospheric Sciences, 47(23): 2784—2802
- Koračin D, Businger J A, Dorman C E *et al*, 2005a. Formation, evolution, and dissipation of coastal sea fog. Boundary-Layer Meteorology, 117(3): 447—478
- Koračin D, Leipper D F, Lewis J M, 2005b. Modeling sea fog on the U.S. California coast during a hot spell event. Geofizika, 22: 59—82
- Koračin D, Lewis J, Thompson W T *et al*, 2001. Transition of stratus into fog along the California coast: observations and modeling. Journal of the Atmospheric Sciences, 58(13): 1714—1731
- Lewis J, Koračin D, Rabin R *et al*, 2003. Sea fog off the California coast: viewed in the context of transient weather systems. Journal of Geophysical Research, 108(D15): 4457
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D, 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. Journal of Climate and Applied Meteorology, 22(6): 1065—1092
- Mears C A, Wang J H, Smith D *et al*, 2015. Intercomparison of total precipitable water measurements made by satellite-borne microwave radiometers and ground-based GPS instruments. Journal of Geophysical Research, 120(6): 2492—2504
- Nicholls S, 1984. The dynamics of stratocumulus: aircraft observations and comparisons with a mixed layer model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 110(466): 783—820
- Oliver D A, Lewellen W S, Williamson G G, 1978. The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus. Journal of the Atmospheric Sciences, 35(2): 301—316
- Shao H, Derber J, Huang X Y *et al*, 2016. Bridging research to operations transitions: status and plans of community GSI. Bulletin of the American Meteorological Society, 97(8): 1427—1440
- Wang X G, Barker D M, Snyder C *et al*, 2008a. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: observing system simulation experiment. Monthly Weather Review, 136(12): 5116—5131

- Wang X G, Barker D M, Snyder C *et al*, 2008b. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part II: real observation experiments. *Monthly Weather Review*, 136(12): 5132–5147
- Wang Y M, Gao S H, Fu G *et al*, 2014. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea. *Weather and Forecasting*, 29(2): 205–225
- Whitaker J S, Hamill T M, 2002. Ensemble data assimilation without perturbed observations. *Monthly Weather Review*, 130(7): 1913–1924
- Whitaker J S, Hamill T M, 2012. Evaluating methods to account for system errors in ensemble data assimilation. *Monthly Weather Review*, 140(9): 3078–3089
- Yang Y, Hu X M, Gao S H *et al*, 2019. Sensitivity of WRF simulations with the YSU PBL scheme to the lowest model level height for a sea fog event over the Yellow Sea. *Atmospheric Research*, 215: 253–267
- Zhou B B, Du J, 2010. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. *Weather and Forecasting*, 25(1): 303–322

ENKF ASSIMILATION OF CLOUD WATER PATH IN NOWCASTING SEA FOG OVER THE YELLOW SEA

GAO Xiao-Yu, GAO Shan-Hong

(*Key Laboratory of Physical Oceanography, College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract The condensation state of water vapor in the initial condition plays an important role in sea fog nowcasting. In order to improve the cloud water structure in the initial condition, we proposed an idea to assimilate directly the cloud water information within a fog body. Based on the EnKF (Ensemble Kalman Filter) method and focused on a sea fog event that occurred widely over the Yellow Sea in May 2011, we conducted assimilation experiments on the retrieved cloud water path (C_w) from polar satellites. The results show that it is possible to assimilate C_w in the EnKF by adding mixing ratio of cloud water into the control variables in both background and observation data fields, and constructing the correlations between observations and background field. The assimilation of C_w can significantly enhance the status of temperature and moisture and improve the sea fog forecasting considerably. The positive assimilation effect is contributed from the flow-dependent background error covariance calculated dynamically in the EnKF. At last, we shall pay special attention to the correlation between cloud water content and wind.

Key words the Yellow Sea fog; nowcasting forecast; EnKF assimilation; cloud water path; sea fog area