

一种蒸发波导的集合诊断方法 及其数值预报应用

王 石^{1,2}, 高山红¹

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东青岛 266100; 2. 海参指挥保障大队战场环境保障室, 北京 100161)

摘 要: 基于 Babin 模型并分析了海上蒸发波导对气象输入参数的敏感性, 引入数值天气预报中集合预报的思路, 提出了一种新的蒸发波导诊断方法——集合诊断方法 (Babin_Ens 法). 运用它对中国近海 4 个岛屿站点的实测数据进行了波导诊断结果的对比验证, 发现: 与 Babin 模型 (Babin 法) 相比, Babin_Ens 法使波导高度与强度偏差的平均改进率分别达到了 23.49% 与 19.29%. 进一步尝试运用 Babin_Ens 法对 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式的预报信息进行了蒸发波导的数值预报, 波导高度与强度预报偏差的平均改进率分别提高了 14.01% 和 16.92%. 研究表明, 集合诊断可以显著地提高波导信息的诊断准确度, 是一种改进蒸发波导诊断准确度的可行途径.

关键词: 蒸发波导; Babin 模型; 集合诊断; WRF 模式; 数值预报

中图分类号: TN011.3; P406 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)05-1049-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.05.011

An Ensemble Diagnosis Method for Evaporation Duct and Its Application in Numerical Prediction

WANG Shi^{1,2}, GAO Shan-hong¹

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

2. Battlefield Environment Support Room of Command Support Group, PLA Naval Staff, Beijing 100161, China)

Abstract: Based on the Babin model and the sensitivity analysis of Evaporation duct on meteorological input parameters, a new diagnosis method —— ensemble diagnosis (Babin_Ens) method —— is proposed in this paper benefitting from the idea of weather ensemble prediction. By using this method, a comparison and analysis of the diagnosed result from the measurements on four island stations in the Chinese marginal seas is done. It is found that both root-mean-square error and bias of duct height and intensity for the Babin_Ens method are obviously improved compared to the Babin model, and the averaged bias improvements of duct height and intensity are 23.49% and 19.29% respectively. Numerical forecasts of evaporation duct are conducted by the Weather Research and Forecasting (WRF) model with the Babin_Ens method. The averaged bias improvement rates of duct height and intensity get improved respectively by 14.01% and 16.92%. It shows that the ensemble diagnosis method can greatly improve the diagnosis and prediction of evaporation duct.

Key words: evaporation duct; Babin model; ensemble diagnosis; WRF model; numerical prediction

1 引言

蒸发波导是海上发生概率最高、对舰载雷达和通信系统影响最直接、受到关注最多的一类大气波导^[1]. 我国东南沿海近海蒸发波导的发生概率为 80% ~ 90%^[2], 南海与东海发生概率分别为 100% 与 90%^[3], 波斯湾为 80% ~ 90%^[4]. 对近海面大气湿度、温度与气

压进行密集的垂直观测, 是获取蒸发波导信息的最有效手段. 然而, 近海面垂直观测非常困难^[5], 特别是远离海岸且海况较差的开阔海域. 因此, 基于 Monin-Obukhov 相似理论^[6]的蒸发波导模型被广泛应用.

蒸发波导模型根据海表面温度与近海面某一高度的大气温度、湿度、风速和气压等信息计算波导参数. 目前国际上广泛应用的蒸发波导模型有 PJ 模型^[7,8]、MGB

模型^[9]、Babin 模型^[10]和 NPS 模型^[11]。我国学者基于它们进行了改进并提出了几种新模型,如伪折射率模型^[2,12]、UED 模型^[13,14]和 Flux 模型^[15,16]。不同蒸发波导模型间的主要区别有普适函数、稳定度修正函数的选取以及尺度参数的确定等方面,但几乎都不可避免地面临着同一个问题——诊断结果对输入参数的微小变化或误差高度敏感。Paulus^[8]发现即使船舶实测数据变化很小,也会使 PJ 模型诊断出的波导高度的变化很大;刘成国^[2]发现伪折射率模型对气-海温差敏感性很强,指出测量仪器的精度(即观测误差)会强烈影响蒸发波导高度的诊断。

已有研究进一步表明^[10,15,17-19],蒸发波导对输入参数的敏感性与大气层结稳定度有关,不同层结条件下输入变量的变化或误差对波导诊断结果的影响大不相同。余贵水^[19]对 Babin 模型进行了敏感性测试,发现:在不稳定层结条件下,它对相对湿度误差最敏感;在稳定和中性层结条件下,它对海面温度误差最敏感;而气压误差在所有层结下对诊断结果几乎无影响。对敏感性的研究不仅有定性的结论,部分研究还给出了定量的评估结果。然而,在实际使用蒸发波导模型时,如何考虑输入参数误差(即观测误差)以及利用模型对误差的敏感性来减少诊断结果的不确定,尚未见到行之有效的解决办法。

数值天气预报对初始场十分敏感,初始场微小的变化会使预报结果具有很大的不确定性^[20],此外大气模式本身也不够完善(即模式存在误差)。为此,Epstein^[21]和 Leith^[22]提出了集合预报的概念,即利用多初始场与多预报模式进行概率预报。如今,集合预报已经成为天气预报与气候预测的一种趋势。本文拟借鉴集合预报的思路,发展一种蒸发波导的集合诊断方法,并将它与大气中尺度数值预报相结合,尝试进行蒸发波导的数值预报。

2 集合诊断方法

2.1 方法概述

蒸发波导模型选择 Babin 模型^[10],需要 5 个大气输入变量:海面 6m 处的气温(T_a)、相对湿度(RH)、风速(U)、气压(P)与海面温度(T_s)。依据文献^[10]编写了其计算代码,对文献^[23]中所用的 Babin 模型输入参数进行诊断,结果与该文献结果完全一致。

集合诊断方法分为如下 3 步:

(1)对 5 个大气变量分别进行扰动(即考虑误差),如 T_a 扰动为 $T_a^{i(i=1,na)}$, na 为扰动数目,其余变量的扰动数目分别记为 ns, nr, nu 与 np ;将所有变量扰动值组合成 1 个成员数为 me 的集合体 E_{in} ,形式如下:

$$E_{in} = E_{in}(Ta^j, Ts^j, RH^j, U^j, P^j), \quad (1)$$

$$(j = 1, me; me = na \times ns \times nr \times nu \times np)$$

集合体要有足够多的成员,尽可能包含各变量的所有可能误差,即集合体具有较好的离散度。

(2)以集合体 E_{in} 中的每一个成员 E_{in}^j 作为 Babin 模型的输入,诊断得到蒸发波导高度 H^j 与强度 I^j ,形成诊断结果集合体 E_H 与 E_I 。

(3)对集合体 E_H 与 E_I 进行概率统计分析,得到集合诊断的波导高度 H_{Ens} 与强度 I_{Ens} 。

2.2 方法示范

2.2.1 集合体 E_{in} 的生成

为降低计算量,集合体成员数 me 控制在 100 ~ 200 之间。不同变量的扰动个数依据波导诊断结果对其的敏感性(简称敏感度)来决定:敏感度越高,扰动数目越多;相应地,集合体中所占的成员数越多。

以气海温差($T_a - T_s$)的形式来呈现气温(T_a)。针对中国近海可能出现的大气变量值,将 $T_a - T_s, T_s, RH$ 与 U 进行区间划分(见表 1);没有对 P 进行划分,因为气压误差对波导诊断结果几乎无影响^[19]。各变量区间以其中间值为代表,进行各变量的单独扰动试验,统计波导诊断结果来确定它们的扰动数目,从而生成集合体 E_{in} 。

以区间组合 A3-B2-C3-D2 为例,变量代表值分别为: $T_a = 7.5^\circ\text{C}$, $T_s = 7.5^\circ\text{C}$, $RH = 67.5\%$, $U = 8.0\text{m/s}$, $P = 1015.0\text{hPa}$ (该组输入简称为示范数据)。每个变量上叠加 10 个扰动,扰动分布与诊断的大气修正折射率(M_{ref})垂直廓线见图 1。

表 1 大气变量的区间划分

区间 编号	$T_a - T_s(^\circ\text{C})$	$T_s(^\circ\text{C})$	$RH(\%)$	$U(\text{m/s})$
	A	B	C	D
1	-7.5]	[0,5]	[0,30]	{0,4.5}
2	{-7.5, -2.5]	{5,10]	{30,60]	{4.5,12]
3	{-2.5,2.5]	{10,15]	{60,75]	{12}
4	{2.5,7.5]	{15,20]	{75,90]	
5	{7.5}	{20,25]	{90,100]	
6		{25,30]		
7		{30}		

注:“ $\{a$ ”表示 $> a$,” $b]$ ”表示 $\leq b$;区间 $-7.5]$ 、 $\{7.5$ 、 $\{30$ 与 $\{12$ 的中间值分别规定为 -10°C 、 10°C 、 32.5% 与 15m/s 。

图 1 直观显示,波导诊断结果对 RH 与 $T_a - T_s$ 十分敏感,而对 T_s 与 U 敏感性较低。图 1 进一步给出了 $T_a - T_s, T_s, RH$ 与 U 这 4 个变量单独扰动试验所得到的波导

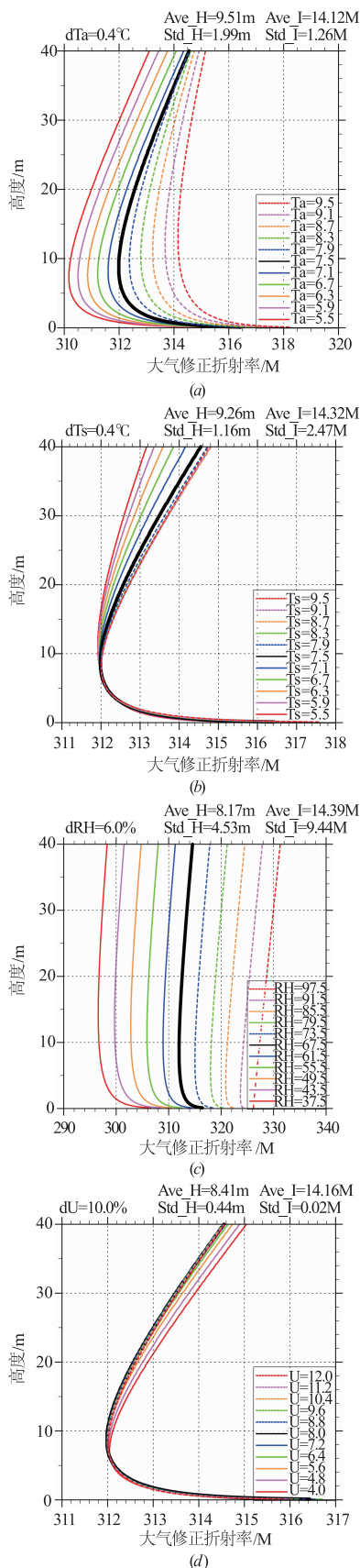


图1 区间组合A3-B2-C3-D2扰动试验结果

高度标准差 (Std_H) 分别为 1.99, 1.16, 4.53 与 0.44 (见图 1(a) ~ (d) 顶部中间), 波导强度标准差 (Std_I) 分别为 1.26, 2.47, 9.44 与 0.02 (见图 1(a) ~ (d) 顶部右边).

引入权重系数 C 来同时考虑 Std_H 与 Std_I 的敏感度: 敏感度越高, 权重越大, 反之亦然. 变量扰动的相对影响分别用 $\frac{Std_H}{H}$ 、 $\frac{Std_I}{I}$ 表示, C 有如下的表达式:

$$C = \frac{\frac{Std_H}{H}}{\frac{Std_H}{H} + \frac{Std_I}{I}} \times Std_H + \frac{\frac{Std_I}{I}}{\frac{Std_H}{H} + \frac{Std_I}{I}} \times Std_I \quad (2)$$

其中, H 与 I 由示范数据诊断得到. 由式 (2) 计算出, 4 个变量权重系数 Ca, Cs, Cr, Cu 分别为 1.784, 1.906, 7.299 与 0.440; 它们与集合成员数 me 之间满足:

$$(pCa) \times (pCs) \times (pCr) \times (pCu) \times 1 = me \quad (3)$$

其中, p 为待定系数. 对比式 (1), 可知 $pCa = na, pCs = ns, pCr = nr, pCu = nu$; 气压 P 不扰动, 则 $np = 1$. 令式 (3) 中 $me = 150$, 可得 $p = 1.925$, 取整后 pCa, pCs, pCr, pCu 分别为 3, 4, 14 与 1; 各变量扰动幅度分别设为 $\pm 2.0^\circ\text{C}$ 、 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 、 $\pm 15\%$ 、 $\pm 15\%$ 、0hPa, 示范数据中, Ta 的 3 个扰动值为 9.5°C 、 7.5°C 、 5.5°C , 最终得到含有 168 组大气输入变量的集合体 E_m .

重复上述步骤, 确定出表 2 中所有区间组合 (共 $5 \times 7 \times 5 \times 3 = 525$ 组) 中各变量的扰动组合, 保存为一个参数文件 $P\text{-file}$ 以供快速查询. 譬如, 给定文献 [23] 中的输入参数: $Ta = 1.6^\circ\text{C}$, $Ts = 2.2^\circ\text{C}$, $RH = 73.3\%$, $U = 4.6\text{m/s}$ 与 $P = 1024.2\text{hPa}$; 此组输入属于表 1 中的区间组合 A3-B1-C3-D2, 查询参数文件 $P\text{-file}$ 可知: 集合成员数为 $3 \times 3 \times 16 \times 1 \times 1 = 144$.

2.2.2 波导结果的集合诊断

将集合体 E_m 中的每个成员分别输入 Babin 模型, 最终形成诊断结果集合体 E_H 与 E_I .

E_H 中各成员之值限制在 0.5 ~ 40m 之间. 将波导高度在 0 ~ 40m 之间等距划分为 8 个区间, 统计每个区间中成员数在 E_H 中的概率 (百分比); 将区间按概率从高到低排列, 取最前面占 60% 以上区间成员的波导高度、强度平均值为 H_Ens 与 I_Ens . 图 2(a) 给出了示范数据的波导高度区间段所占的比例, 图 2(b) 为按概率排列结果; 可知, 5 ~ 10m 区间所占百分比已超过 60%, 对该区间内的 E_H 与 E_I 进行平均, 得 $H_Ens = 7.44\text{m}$, $I_Ens = 13.98\text{M}$, 而直接将示范数据输入 Babin 模型得到的 $H = 8.80\text{m}$, $I = 14.18\text{M}$.

3 在实测数据诊断中的应用

3.1 数据来源及处理方法

数据分别来自东海、渤海与南海, 共 3 个岛屿的岸

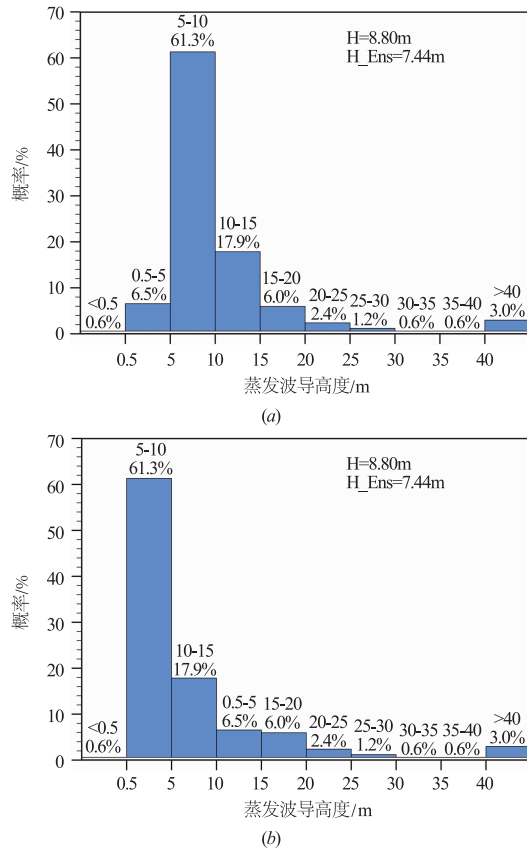


图2 示范数据波导高度的集合诊断示意

基铁塔观测,观测要素包括海表面温度 T_s ,不同高度处的气温 T_a 、相对湿度 RH 、风速 U 和气压 P . 东海站点在不同观测时段的观测垂直层数分别为 4 层^①和 3 层^②(分别简记为东海站-1 与东海站-2),渤海与南海站点观测层数分别为 6 层^③和 3 层^④(分别简记为渤海站与南海站).

计算不同高度处的大气修正折射率 M_{ref} ,用最小二乘法拟合出 M_{ref} 的垂直廓线. 拟合公式^[23]为:

$$M_{ref} = f_0 z - f_1 \ln(z + z_0) + f_2 \quad (4)$$

其中: f_0, f_1, f_2 为待定系数, z 为海拔高度, $z_0 = 0.001$ 是为了防止 $z = 0$ 时 M_{ref} 溢出. 蒸发波导高度与强度可由 M_{ref} 垂直廓线得出,即为高度实测值 (H_{Obs}) 与强度实测值 (I_{Obs}).

3.2 集合诊断结果分析

利用 Babin 模型与基于 Babin 模型的集合诊断方法(分别简称为 Babin 法与 Babin_Ens 法),分别对 4 个观测站点的观测数据进行蒸发波导参数诊断. 渤海站与南海站的结果见图 3,东海站-1 与东海站-2 见图 4.

图 3 与图 4 显示,除南海站的波导高度外, Babin_Ens 法的诊断结果均比 Babin 法更接近实测值,偏差 (Bias) 皆小于后者. 由图 3(b)、3(d) 和图 4(b)、4(d) 可知, Babin 法给出的波导强度明显偏低, Babin_Ens 法可

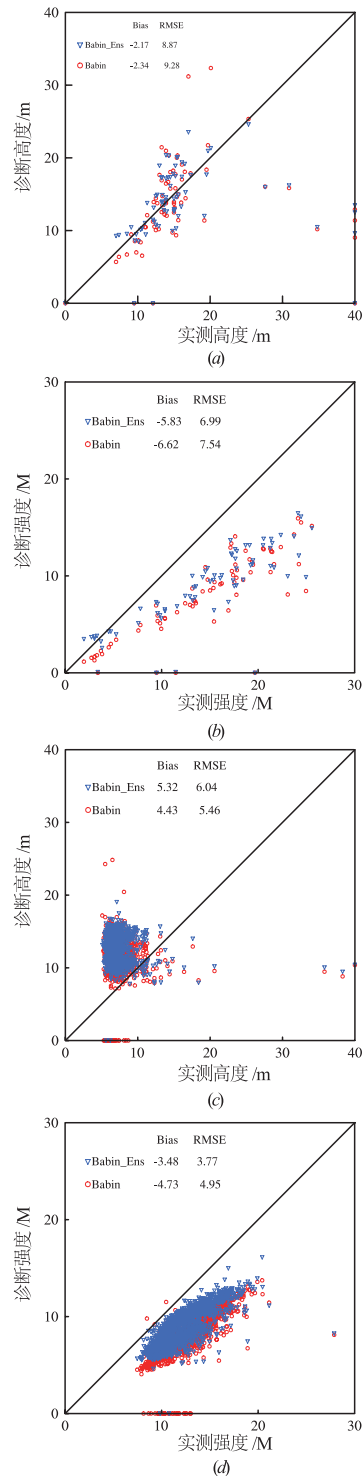


图3 渤海站 (a, b) 与南海站 (c, d) 的 Babin 与 Babin_Ens 诊断结果的对比

- ① 各层高度分别为 12.5, 18, 29, 38 m
- ② 各层高度分别为 12.5, 18, 29 m
- ③ 各层高度分别为 6, 10, 15, 22, 27, 32 m
- ④ 各层高度分别为 11.2, 17.2, 23.2 m

以一定程度地纠正这种偏差.

为进一步定量详细比较 2 种方法的优劣,表 2 列出了波导高度与强度的均方根误差 (RMSE)、Bias 以及 Babin_Ens 法相对于 Babin 法的改进率,表中具体数据显示改进效果显著.

南海站点波导高度改进率为负可能是实际观测层数偏少的缘故. 此站点的观测垂直分层只有 3 层,且紧靠海面一层的高度偏高(11.2m),会导致直接由观测计算出的波导高度实测值有偏差.

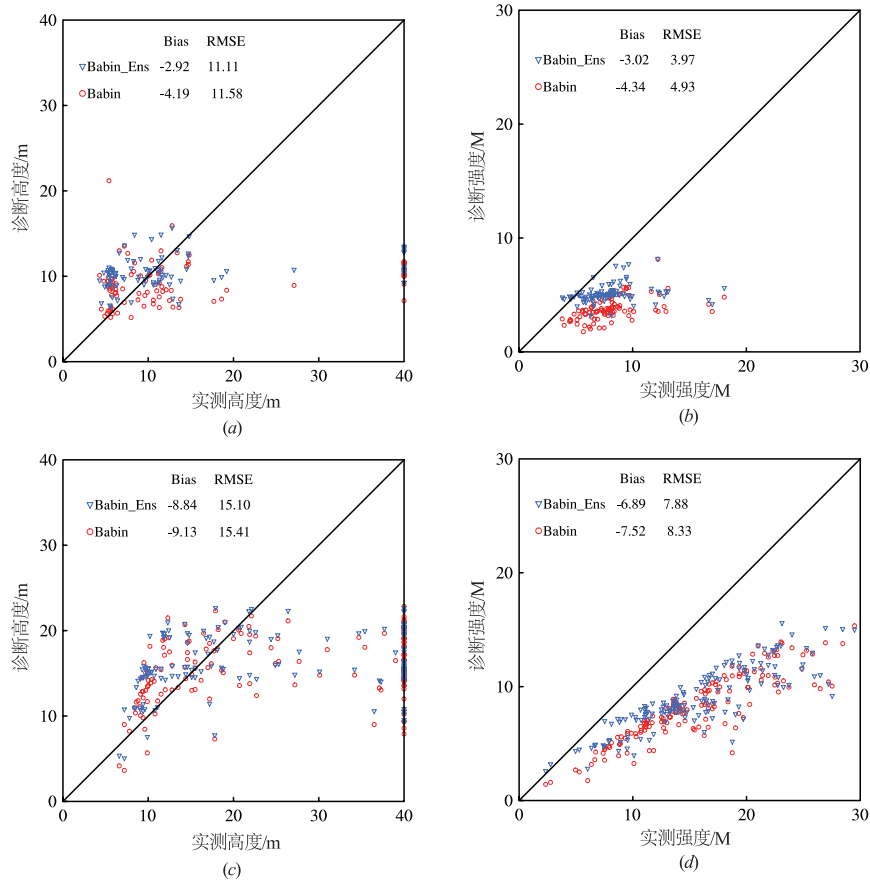


图4 同图3, 但为东海站-1 (a, b) 与东海站-2 (c, d)

表 2 波导诊断误差统计

站点	统计变量	波导高度 H (m)			波导强度 I (M)		
		Babin	Babin_Ens	改进率 (%)	Babin	Babin_Ens	改进率 (%)
渤海	RMSE	9.28	8.87	4.42	7.54	6.99	7.29
	Bias	-2.34	-2.17	7.26	-6.62	-5.83	11.93
南海	RMSE	5.46	6.04	-10.62	4.95	3.77	23.84
	Bias	4.43	5.32	-20.10	-4.73	-3.48	26.43
东海 1	RMSE	11.58	11.11	4.06	4.93	3.97	19.47
	Bias	-4.19	-2.92	30.79	-4.34	-3.02	30.42
东海 2	RMSE	15.41	15.10	2.01	8.33	7.88	5.40
	Bias	-9.13	-8.84	3.28	-7.52	-6.89	8.38
平均	RMSE	10.43	10.28	1.04	6.44	5.65	14.00
	Bias	-2.81	-2.15	23.49	-5.80	-4.81	19.29

4 在数值预报中的应用

陈莉等^[24]尝试了直接使用大气中尺度 MM5 模式 (the Fifth-generation Pennsylvania State University/NCAR Mesoscale Model) 来进行蒸发波导的数值预报,但缺乏实测数据的验证. 本文基于新一代大气中尺度 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式,借助 Babin_Ens 法进行蒸发波导的预报试验.

4.1 波导预报试验

针对渤海站、东海站-1、东海站-2 与南海站,共进行了 4 次预报试验(分别记为 Exp-B、Exp-D1、Exp-D2 与 Exp-N),预报时效均为 72 小时.

WRF 数值预报试验中的初始条件、边界条件均由 FNL 再分析数据^①(Final Analysis Data of Global Forecast System,分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$) 和 NEAR-GOOS 日平均海温数据^②(North-East Asian Regional Global Ocean Observing System,分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) 提供. 运用循环 3DVAR 同化方案^[25,26],同化 GTS^③(Global Telecommunication System) 常规观测,采用双重嵌套区域(D1 与 D2)设计(见图 5),模式设置详见表 3.

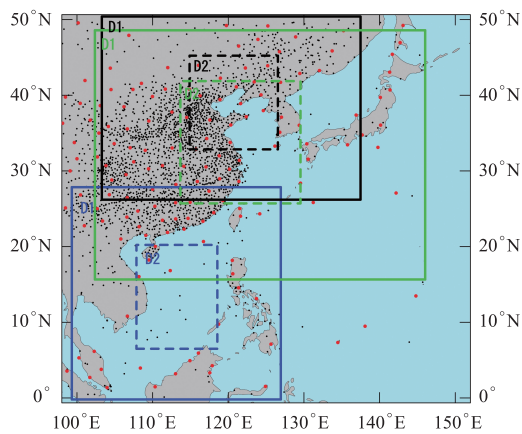


图5 预报试验WRF区域设置

(黑色方框示意了Exp-B的区域,而绿色则为Exp-D1与Exp-D2,蓝色则为Exp-N;黑色与红色圆点分别表示地面与探空站点分布)

表3 WRF 模式设置

选项	具体设置	
	D1	D2
投影与分辨率	双重嵌套,Lambert 投影	
	水平分辨率 30 km	水平分辨率 10 km
	垂直分辨率:44 η 层 ^④	
边界层方案	YSU 方案 ^[27]	
积云参数化方案	Kain-Fritsch 方案 ^[28]	
微物理方案	Lin 方案 ^[29]	
辐射方案	RRTMG 长、短波方案 ^[30]	
陆面模式	Naoh 陆面模式 ^[31]	

4.2 预报结果分析

利用 Babin 法与 Babin_Ens 法,分别对 4 次预报试验进行蒸发波导诊断,并与实测(Obs)比对. 结果见图 6 (渤海站与南海站)与图 7(东海站-1 与东海站-2).

综观图 6 与图 7,总体上 Babin_Ens 法与 Babin 法皆较好地预报了波导高度、强度随时间的变化. 由图 6 可知,渤海站的波导预报效果优于南海站,Babin_Ens 法优于 Babin 法,特别是 Babin_Ens 法给出了几个与实测值较一致的“峰值”(见图 6(a),(b),(c)). 图 7(a)中,Babin 法对波导高度的预报偏低,而 Babin_Ens 法大幅地缓和了这种低估,更接近实测值. Babin_Ens 法提高了 4 个站点波导高度预报值与观测值之间的相关系数,尤其是在南海站点,由 0.138 提升为 0.351(图 6(c)). 因此,使用 Babin_Ens 法更好地预报了波导高度与强度随时间的变化. 表 4 详细列举了在数值预报中应用 Babin_Ens 法与 Babin 法的统计结果比较. 从各项改进率来看,显然,Babin_Ens 法优于 Babin 法.

综合图 6 与表 4 可知: Babin_Ens 法在不同站点的表现存在较大的差异. Exp-D1 结果中所有改进率均为正且数值较大,表明 Babin_Ens 法在东海站 1 对波导预报的改进显著. 而 Exp-N 的效果较差,波导高度改进率为负. 存在这种差异性的原因,可能是 WRF 模式本身的预报误差,这一般与预报过程中所同化的数据量有关. 图 5 显示试验 Exp-D1(东海站-1)所同化的数据量远大于试验 Exp-N(南海站),海上差距更明显. 此外,南海站观测数据垂直层只有 3 层且较为稀疏(见 3.1 节),影响了波导观测值的计算准确度,是另一个可能的原因.

值得指出的是,由于大气数值模式初始场中变量在动力与热力上的不匹配,导致预报开始后,需要一段时间进行调整(spun-up),在此时段内,预报结果较差. 对于“热启动”运行方式,WRF 模式一般只需要 3h 左右,而本文采用了“冷启动”运行方式,spin-up 需要的时间较长. 这可能是图 6(a),图 6(b)中预报前期(0~18h)的波导预报值与实测值差距较大而预报后期(18~72h)差距明显变小的一个主要原因.

① <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>

② <http://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/database.html>

③ <http://222.195.136.24>

④ $\eta = 1.0000, 0.9975, 0.9925, 0.9850, 0.9775, 0.9700, 0.9540, 0.9340, 0.9090, 0.8800, 0.8506, 0.8212, 0.7918, 0.7625, 0.7084, 0.6573, 0.6090, 0.5634, 0.5204, 0.4798, 0.4415, 0.4055, 0.3716, 0.3397, 0.3097, 0.2815, 0.2551, 0.2303, 0.2071, 0.1854, 0.1651, 0.1461, 0.1284, 0.1118, 0.0965, 0.0822, 0.0689, 0.0566, 0.0452, 0.0346, 0.0249, 0.0159, 0.0076, 0.0000$. 海上模式最低 10 η 层对应的高度大约为 10, 42, 95, 160, 225, 327, 485, 686, 931, 1200 m.

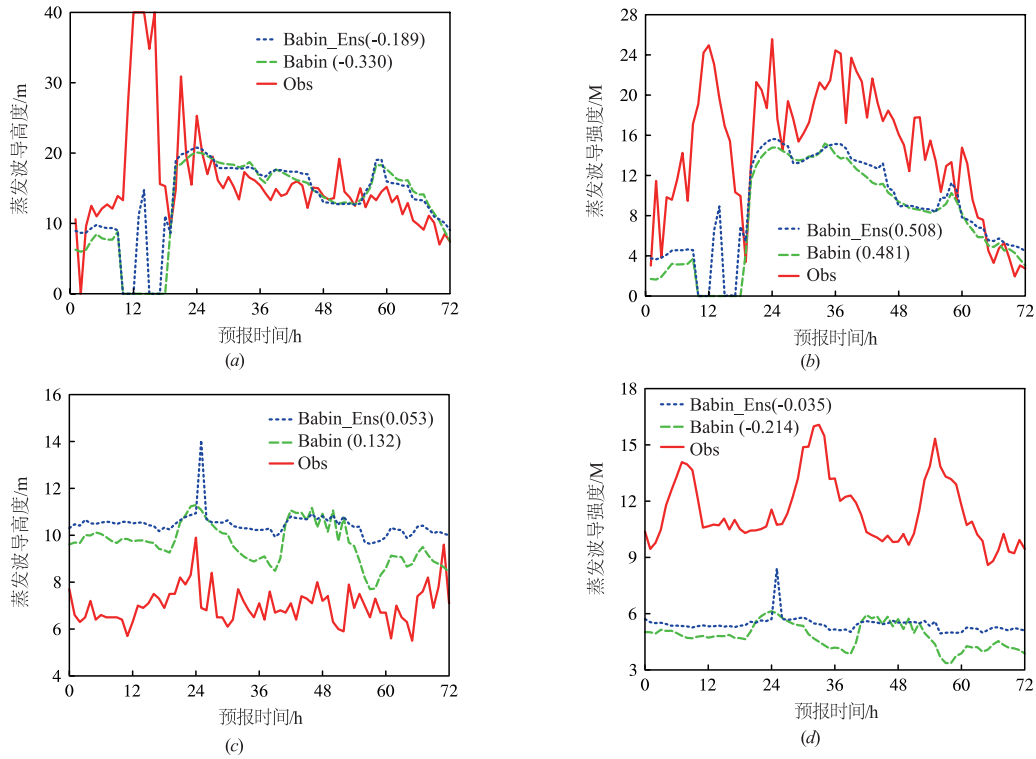


图6 渤海站 (a,b) 与南海站 (c,d) 的波导预报结果与观测对比 (图例括号中的数字表示预报结果与观测结果之间的相关系数)

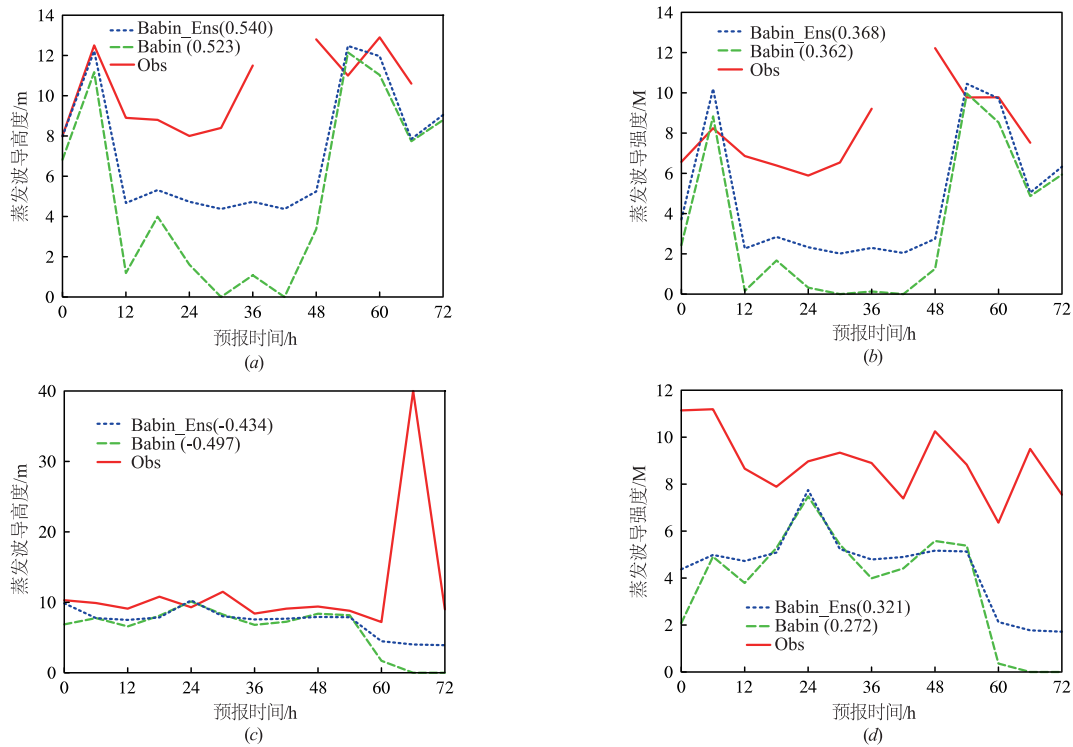


图7 同图6, 但为东海站-1 (a,b) 与东海站-2 (c,d)

表 4 波导预报误差统计

个例	统计变量	波导高度			波导强度		
		Babin	Babin_Ens	改进率(%)	Babin	Babin_Ens	改进率(%)
Exp-B	RMSE (m)	11.65	10.37	9.64	8.90	8.02	9.89
	Bias	-3.14	-2.36	24.84	-6.65	-5.67	14.74
Exp-N	RMSE (m)	2.86	3.55	-24.13	6.98	6.35	9.03
	Bias	2.65	3.43	-29.43	-6.68	-6.07	9.13
Exp-D1	RMSE (m)	6.09	3.94	35.30	5.80	4.50	22.41
	Bias	-4.84	-2.89	40.29	-4.62	-3.22	30.30
Exp-D2	RMSE (m)	11.63	10.24	11.95	5.68	4.81	15.32
	Bias	-5.60	-4.47	20.32	-5.18	-4.48	13.51
平均	RMSE	8.06	7.03	8.19	6.84	5.92	14.16
	Bias	-2.73	-1.57	14.01	-5.78	-4.86	16.92

5 小结与展望

PJ 模型、MGB 模型、Babin 模型和 NPS 模型等是国际上流行的蒸发波导模型,国内学者们不仅对它们进行了改进,还提出了新的模型.这说明,建立在海-气界面参数化基础之上的众多蒸发波导模型没有一种是足够完善的,原因是决定近海面大气温湿压垂直分布的大气与海洋状态以及海-气相互作用过程非常复杂.

蒸发波导模型的诊断误差来源于两方面:(1)大气输入参数误差;(2)波导模型误差.本文聚焦于前者,基于 Babin 模型提出了一种考虑大气输入参数误差的集合诊断方法,发现它有明显的优势.由于波导模型误差始终存在,将来可以尝试使用不同的蒸发波导模型,如 PJ 模型与 NPS 模型,以降低单一模型所导致的模型误差.利用蒸发波导模型进行波导的预报依赖于大气输入参数的预报.因此,为了使中尺度大气数值预报模式更准确地预报近海面大气温度、湿度、气压的垂直廓线,模式近海面的垂直分层设置、数据同化与大气边界层参数化方案的选取等问题都值得进一步深入研究.此外,本文所提出的集合诊断方法不仅适用于蒸发波导,也可推广到其他类型波导(如表面与悬空波导)的诊断与预报中去.

参考文献

- [1] 刘成国,潘中伟.中国低空大气波导的极限频率和穿透角[J].通信学报,1998,19(10):91-96.
Liu C G, PAN Z W. The cut-off frequencies and critical angles of tropospheric ducts in China [J]. Journal of Institute of Communication, 1998, 19(10): 91-96. (in Chinese)
- [2] 刘成国.蒸发波导环境特性和传播特性及其应用研究[D].西安:西安电子科技大学,2003.
Liu C G. Research on evaporation duct propagation and its applications [D]. Xian: Xidian University, 2003. (in Chinese)
- [3] 丁菊丽,等.南海、东海蒸发波导出现规律的对比分析[J].电波科学学报,2009,24(06):1018-1023.

Ding J L, et al. Contrast on occurrence of evaporation ducts in the south china sea and east china sea area [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(06): 1018-1023. (in Chinese)

- [4] Brooks I M, Goroch A K, Rogers D P. Observations of strong surface radar ducts over the persian gulf [J]. Journal of Applied Meteorology, 1999, 38(9): 1293-1310.
- [5] Cook J. A sensitivity study of weather data inaccuracies on evaporation duct height algorithms [J]. Radio Science, 1991, 26(3): 731-746.
- [6] Monin A S, Obukhov A M. Basic law of turbulent mixing in the atmosphere near ground [J]. Tr Akad Nauk SSSR Geophys Inst, 1954, 24(151): 163-187.
- [7] Jeske H. State and Limits of Prediction Methods of Radar Wave Propagation Conditions Over Sea [M]. Netherlands Springer, 1973.
- [8] Paulus R A. Practical application of an evaporation duct model [J]. Radio Science, 1985, 20(4): 887-896.
- [9] Musson-Genon L, Gauthier S, Bruth E. A simple method to determine evaporation duct height in the sea surface boundary layer [J]. Radio Science, 1992, 27(5): 635-644.
- [10] Babin S M. A new model of the oceanic evaporation duct and its comparison with current models [D]. Maryland: University of Maryland, 1996.
- [11] Zhang N, et al. Study on NPS evaporation duct model [A]. The 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM) [C]. Chengdu: IEEE, 2010. 1-4.
- [12] 刘成国,等.用伪折射率和相似理论计算海上蒸发波导剖面[J].电子学报,2001,29(7):970-972.
Liu C G, et al. Modeling evaporation duct over sea with pseudo-refractivity and similarity theory [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7): 970-972. (in Chinese)
- [13] Ding J L, et al. Development and validation of an evaporation duct model. Part I: model establishment and sensitivity experiments [J]. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(3): 467-481.

- [14] Ding J L, et al. Development and validation of an evaporation duct model. Part II: evaluation and improvement of stability functions [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 29(3):482-95.
- [15] 李云波,等. 海气通量算法在海上蒸发波导诊断中的应用[J]. *海洋技术*, 2008, 27(01):106-110.
Li Y B, et al. Application of air-sea flux algorithm in oceanic evaporation duct diagnosis [J]. *Ocean Technology*, 2008, 27(01):106-110. (in Chinese)
- [16] 李云波,等. 基于海气通量算法的蒸发波导诊断模型[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(05):628-633.
Li Y B, et al. Oceanic evaporation duct diagnosis model based on air-sea flux algorithm [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2009, 20(05):628-633. (in Chinese)
- [17] Babin S M, Dockery G D. LKB-based evaporation duct model comparison with buoy data [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, 41(4):434-446.
- [18] 郭相明,等. 蒸发波导模型特征及其适用性研究[J]. *海洋预报*, 2013, 30(05):75-83.
Guo Xiang-ming, et al. Study on the characteristics of evaporation duct models and their applicability [J]. *Marine Forecasts*, 2013, 30(05):75-83. (in Chinese)
- [19] 余贵水,刘爱国,杨永生. 蒸发波导诊断的 Babin 模型及其敏感性分析[J]. *宇航计测技术*, 2015, 35(02):53-56.
Yu G S, Liu A G, Yang Y S. Babin model of evaporation waveguide diagnosis and its sensitivity analysis [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2015, 35(02):53-56. (in Chinese)
- [20] Lorenz E N. A Study of the Predictability of a 28-Variable Atmospheric Model [M]. UK:Oxford University Press, 1965.
- [21] Epstein E S. Stochastic dynamic prediction I [J]. *Tellus*, 1969, 21(6):739-759.
- [22] Leith C E. Theoretical skill of monte carlo forecasts [J]. *Monthly Weather Review*, 1974, 102(6):409-418.
- [23] Babin S M, Young G S, Carton J A. A new model of the oceanic evaporation duct [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1997, 36(3):193-204.
- [24] 陈莉. 中国近海大气波导的统计特征分析及演变机理的数值研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
Chen L. Statistical characteristics analysis of atmospheric ducts over china seas and numerical modeling study on their evolution mechanism [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese)
- [25] 高山红,等. 利用循环 3DVAR 改进黄海水雾数值模拟初始场 I: WRF 数值试验[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(10):1-9.
Gao S H, 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. (in Chinese)
- [26] 高山红,等. 利用循环 3DVAR 改进黄海水雾数值模拟初始场 II: RAMS 数值试验[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(11):1-10, 18.
Gao S H, et al. Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the yellow sea by using cycling 3DVAR-part II: RAMS numerical experiments [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(11):1-10, 18. (in Chinese)
- [27] Hong S Y. 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, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. *Jatmossci*, 1990, 47(23):2784-2802.
- [29] Lin Y L. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1983, 22(6):1065-1092.
- [30] Iacono M 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(D13103):1-8.
- [31] 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.

作者简介



王 石 男, 1989 年生, 黑龙江哈尔滨人。2017 年于中国海洋大学获理学硕士学位。现为海参指挥保障大队战场环境保护室助理工程师。主要研究方向为大气波导及其数值预报研究。

E-mail: robin_ouc@163.com



高山红(通信作者) 男, 1972 年生, 湖北汉川人, 教授。2001 年于中国海洋大学获理学博士学位, 同年在该校物理海洋教育部重点实验室从事科研与教学工作。主要从事海洋灾害性天气的演变机理研究及其数值模拟与预报技术研发。

E-mail: gaosh@ouc.edu.cn