

郝晓静,李清亮,郭立新,等. 基于MM5V3的大气波导预报可靠性和准确度分析[J]. 电波科学学报, 2017, 32(6): 725-734. DOI: 10.13443/j.cjors.2017072001

HAO X J, LI Q L, GUO L X, et al. Reliability and accuracy to atmospheric duct prediction based on MM5V3 [J]. Chinese journal of radio science, 2017, 32(6): 725-734. (in Chinese). DOI: 10.13443/j.cjors.2017072001

基于 MM5V3 的大气波导预报可靠性和准确度分析

郝晓静^{1,2} 李清亮² 郭立新¹ 韩杰² 郭相明²

(1. 西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071;

2. 中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室, 青岛 266107)

摘要 利用GTS高空探测数据和FNL最终分析数据验证MM5V3中尺度数值天气预报模式预报大气波导的有效性,验证区域为东海关注区、南海关注区和亚丁湾关注区,并分别从可靠性和准确度两个方面进行了分析。1)用GTS高空探测数据对表面、悬空波导预报结果进行了验证,结果表明:对一般强度表面、悬空波导预报可靠度为60%~80%;对强波导预报可靠度为80%以上;对波导顶高预报均方根误差为500~800 m;波导强度预报均方根误差为10~20 M。2)用4天的FNL数据对蒸发波导高发区预报结果进行了验证,结果表明:蒸发波导预报可靠度为90%以上;波导顶高预报均方根误差为2~3 m。总体而言,对于表面、悬空波导,MM5V3对强波导的预报可靠度较高,对一般强度的波导预报可靠度较低,且波导预报准确度很低;对于蒸发波导高发区,MM5V3可以初步实现波导的预报。上述结果为检验中尺度数值天气预报模式预报大气波导的有效性提供了参考,具有现实指导意义。

关键词 大气波导;中尺度数值天气预报模式;GTS;FNL;可靠性;准确度

中图分类号 TN011+.3

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2017)06-0725-10

DOI 10.13443/j.cjors.2017072001

Reliability and accuracy to atmospheric duct prediction based on MM5V3

HAO Xiaojing^{1,2} LI Qingliang² GUO Lixin¹ HAN Jie² Guo Xiangming²

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 266100, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China)

Abstract The effectiveness of using MM5V3 numerical weather model to forecast atmospheric duct was tested by radiosonde data from GTS and final operational analysis(FNL) data in three regions: focused regions of East China Sea, focused regions of South China Sea, and focused regions of Gulf of Aden from two aspects of reliability and accuracy to analyse, we obtain the following results. First, for the weaker surface and elevated duct(SED), the reliability of prediction is 60% to 80%, and the reliability of stronger SED, is more than 80%; root mean square error(RMSE) of prediction for duct top height and strength are 500—800 m and 10—20 M respectively. Second, FNL data of four days are used to test the reliability and accuracy of evaporation duct(ED) prediction in high incidence area. The results show that the reliability of prediction is more than 90% and RMSE of top height prediction is 2—3 m. Generally, reliability of weaker SED prediction is low and it is higher for that of stronger SED. The accuracy of prediction for both SED

收稿日期: 2017-07-20

资助项目: 电波环境特性及模化技术重点实验室专项资金(201600002)

联系人: 郝晓静 E-mail: hoxj22s@163.com

top height and strength are very low. For ED in high incidence area, MM5V3 own the ability to predict it. The above results provide a reference for the prediction of the effectiveness of the mesoscale numerical weather forecast model for the prediction of atmospheric waveguides, which is of practical significance.

Keywords atmospheric duct; mesoscale numerical weather model; GTS; FNL; reliability; accuracy

引言

大气波导是影响电波传播的一种反常大气环境. 大气波导的存在会导致超视距现象和雷达盲区的出现, 对雷达、通信等电子信息系统性能产生重要的影响. 因此, 大气波导的研究, 尤其是大气波导的预报得到了广泛的关注.

利用数值天气预报模式进行低空大气波导模拟和预报研究是近年来大气波导研究领域的一个热点. 国内外多所院校和科研机构都开展了此方面的研究. 在国外, 美国和欧洲从 1996—2011 利用中尺度数值模式对大气折射环境和大气波导进行了模拟和预报研究^[1-5]. 研究结果表明, 数值模式已经能够描述大气波导的存在和位置特征, 但预报的波导参数(高度、强度等)不准确. 在国内, 也有很多院校和科研机构开展了这方面的研究工作^[6-12], 主要集中在初步实现了中尺度模式预报大气波导及在一些典型天气系统影响下大气波导生消变化机理的个例研究. 分析国内外研究进展发现, 利用中尺度数值模式预报大气波导虽然能够描述波导的存在和位置特征, 但对波导高度和强度的预报准确度较差. 虽然基于中尺度数值模式预报大气环境还存在许多问题尚待解决, 但它仍是预报三维对流层大气折射环境和大气波导的有效手段.

本文利用全球电信系统(Global Telecommunications System, GTS)探空数据计算的波导参数作为真实值, 验证了第五代大气中尺度模式(Mesoscale Model 5 Version 3, MM5V3)预报表面波导和悬空波导的有效性; 利用美国环境预报中心最终分析(Final Operational Analysis, FNL)数据和美国海军研究生学院(Naval Postgraduate School, NPS)蒸发波导模型(下文简称“NPS 模型”)计算的蒸发波导参数作为真实值, 对 MM5V3 中尺度模式预报的蒸发波导进行验证. 验证所在区域为东海关关注区、南海关注区和亚丁湾关注区. 验证中尺度数值模式在这些关注区预报大气波导的可行性及其存在的问题, 为日后提高数值模式预报大气波导可靠性和准确度的研究工作提供了参考.

1 MM5V3 预报平台建立

MM5V3 中尺度模式是美国宾夕法尼亚州立大学和美国国家大气研究中心从 20 世纪 80 年代以来共同开发的第 5 代区域中尺度数值模式的第三个版本. 本文模式初始场和侧边界条件选用美国环境预报中心得到的全球预报系统(Global Forecasting System, GFS)数据, 实现对大气波导未来 24 小时的预报. 利用 MM5V3 模式进行波导预报的参数化方案如表 1 所示.

表 1 MM5V3 模式设置

MM5V3 参数	设置方案
格点距/km	60
地形分辨率/分	30
σ 层数	44
积分步长/s	120
积云方案	Anthes-Kuo 方案
边界层方案	MRF 方案
水汽方案	简单冰方案
辐射方案	RRTM 方案
侧边界条件	松弛边界条件
嵌套方案	单层嵌套

2 验证数据与方法

2.1 验证数据

用于验证数值模式预报结果的数据有两种. 第一, 2014 年每天 08:00 时、20:00 时两个时次的 GTS 探空数据. GTS 是世界气象组为了迅速、准确地在全世界范围内传递气象观测数据而设立的一个数据通信系统. 本文使用的是由 GTS 提供的全球探空数据(下文简称“GTS 数据”). 用 GTS 数据对预报的表面波导、悬空波导进行验证. 第二, 2014 年每天 08:00 时、20:00 时两个时次的 FNL 最终分析数据. FNL 最终分析数据是由美国环境预报中心提供的全球气象环境格点场数据, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$. 因为 FNL 最终分析数据加入了高空探测等各种水文气象观测数据, 包括卫星数据等, 且已有大量研究证实, 在缺少实测数据的情况下, FNL 最终分析数据可以作为实测数据来使用^[13]. 因此, 在缺

少海洋实测数据的情况下,本文用FNL最终数据(下文简称“FNL数据”)对蒸发波导的预报效果进行验证.预报区域中选择离验证点最近的格点进行验证,验证点和格点的距离 $<0.05^\circ$,大约为5 km左右,波导的水平范围一般在几 km到几百 km,所以,验证点基本能用来对预报结果进行验证.

2.2 诊断和验证方法

2.2.1 GTS数据诊断表面和悬空波导方法

利用GTS数据的温、压、湿参数计算修正折射指数(以下简称 M)剖面,然后通过分析 M 的梯度判断波导及其参数.具体方法和步骤如下.

某高度大气修正折射指数 M 可表示为

$$M = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \times \frac{e}{T^2} + 0.157Z. \quad (1)$$

式中: P 为大气压强; T 为大气温度; e 为水汽压; Z 为该层大气的高度.这些参数都可以直接或间接地从GTS数据中获取.当修正折射率梯度满足条件

$$\frac{dM}{dZ} < 0 \quad (2)$$

时即可判断为波导出现,并把这层大气的底作为波导层底,波导层底的 M 值记为 $M_{\max}$.然后再逐层向上判断,直到出现 $\frac{dM}{dZ} > 0$,则离这层最近的 $\frac{dM}{dZ} < 0$ 的层的顶所在的高度为波导顶高,波导顶的 M 值记为 $M_{\min}$.波导强度 ΔM 由下式求得:

$$\Delta M = M_{\max} - M_{\min}. \quad (3)$$

2.2.2 FNL数据诊断蒸发波导方法

目前,通常基于近海面测量的水文气象参数,利用蒸发波导模型获取蒸发波导高度.国内外存在多个蒸发波导模型,PJ(Paulus-Jeske,)模型^[14]、MGB(Musson Genon Gauthier Bruth)模型^[15]、BYC(Babin-Young-Carton,)模型^[16]、NPS模型^[17]、俄罗斯国家水文气象大学(Russian State Hydrometeorological University, RSHMU)模型^[18]等.虽然所有模型均基于莫宁-奥布霍夫相似理论,但美国的Babin^[17]和乌克兰的V. K. Ivanov^[18]等对不同模型进行了理论分析和试验验证,均推荐了采用NPS模型进行蒸发波导的预测.NPS模型使用海面上一定高度或不同高度上大气温、压、湿、风及海表温度作为输入,基于莫宁-奥布霍夫相似理论,获得大气温、压、湿剖面,然后计算出 M 剖面,把 M 最小值所在的高度确定为波导高度.

近地层内温度 T 、比湿 q 的垂直剖面如下式:

$$T(z) = T_{\text{sea}} + \frac{\theta_*}{k} \left(\ln\left(\frac{z}{z_{\text{ot}}}\right) - \psi_0\left(\frac{z}{L}\right) \right) - \Gamma_d z, \quad (4)$$

$$q(z) = q_{\text{sea}} + \frac{q_*}{k} \left(\ln\left(\frac{z}{z_{\text{ot}}}\right) - \psi_0\left(\frac{z}{L}\right) \right). \quad (5)$$

式中: $T(z)$ 、 $q(z)$ 分别为高度 z 处大气温度和比湿; T_{sea} 、 q_{sea} 分别为海表温度和比湿; θ_* 和 q_* 分别为位温 θ 和比湿 q 的特征尺度; k 为卡曼常数; z_{ot} 为温度粗糙度高度; ψ_0 、 Γ_d 分别为温度普适函数和干绝热递减率; L 为相似长度.

在NPS模型中,气压剖面可以通过联立流体静力学方程和理想气体定律得到:

$$p(z_2) = p(z_1) \cdot \exp\left(\frac{1.2 \times (z_1 - z_2)}{T_M}\right). \quad (6)$$

式中: $p(z_1)$ 、 $p(z_2)$ 分别为测量高度 z_1 、 z_2 处的气压; T_M 为高度 z_1 、 z_2 处的虚温平均值.联立式(4)~(6)即可求得 M 剖面,剖面最小值对应的高度为波导高度.

2.2.3 验证方法

为了对预报结果的可靠性进行验证,分别计算一般强度波导(下文简称“一般波导”)预报可靠度、漏报率、虚警率和强波导预报可靠度.这里需要强调,蒸发波导不区分波导强度,只分析波导预报可靠度.为了对预报结果的准确度进行验证,分别计算了波导顶高和波导强度的均方根误差.具体方法步骤为:

1) 对于表面、悬空波导,把GTS数据同预报值都有效的数据选入样本;对于蒸发波导,把FNL数据同预报值都有效的数据选入样本,并都用样本总数 T_s 记录.

2) 把实测值和预报值结果一致(实测值和预报值都存在波导或都不存在波导)的次数记为准确次数 T_A .

3) 统计一般波导预报可靠度 R_A ,用于验证一般强度波导预报有无的可靠性.可靠度 R_A 为准确次数 T_A 与样本总数 T_s 之比,即

$$R_A = \frac{T_A}{T_s}. \quad (7)$$

4) 统计漏报率 R_M .当实测值存在波导,而预报没有波导时,即为漏报.漏报率 R_M 为漏报次数 T_M 与实测存在波导次数 T_{SY} 之比,即

$$R_M = \frac{T_M}{T_{SY}}. \quad (8)$$

5) 统计虚警率 R_F .当预报存在波导,而实测值没有波导时,即为虚警,也称错报.虚警率 R_F 为虚警次数 T_F 与实测没有波导次数 T_{SN} 之比,即

$$R_F = \frac{T_F}{T_{SN}}. \quad (9)$$

6) 统计强波导预报可靠度 R_{AS} . 当波导强度大于 20 M 时, 即为强波导, 强波导预报可靠度 R_{AS} 为强波导次数 T_{AS} 与实测存在强波导次数 T_{SS} 之比, 即

$$R_{AS} = \frac{T_{AS}}{T_{SS}}. \quad (10)$$

7) 统计预报结果的准确度

当实测值与预报值波导都存在时, 通过计算预报值与实测值之间的偏差, 验证预报的准确度. 准确度的统计量为均方根误差, 分别统计波导顶高(用 h 表示)的均方根误差 $E_{RMS}(h)$ 和波导强度(用 s 表示)的均方根误差 $E_{RMS}(s)$, 表达式如下:

$$E_{RMS}(h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{fi} - h_{si})^2}{n}}, \quad (11)$$

$$E_{RMS}(s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (s_{fi} - s_{si})^2}{n}}. \quad (12)$$

式中: h_{fi} 和 h_{si} 分别为波导顶高预报值和实测值; s_{fi}

和 s_{si} 分别为波导强度预报值和实测值; n 为实测结果与预报结果都存在波导的次数.

3 验证结果分析

3.1 表面波导和悬空波导验证

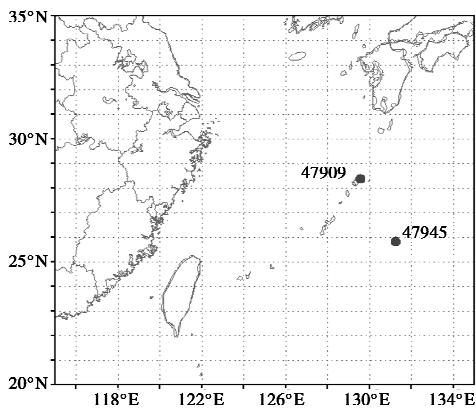
3.1.1 东海关注区验证结果

模式预报区域为图 1(a)所在区域, 分别选取 47909 和 47945 两个站点为代表进行统计验证, 结果见表 2. 由表 2 可知: 两个站点一般波导预报可靠度均大于 70%; 强波导预报可靠度均大于 80%; 漏报率分别为 40% 和 39%; 虚警率分别为 19% 和 26%; 波导顶高的均方根误差约为 500 m; 波导强度均方根误差为 12 M.

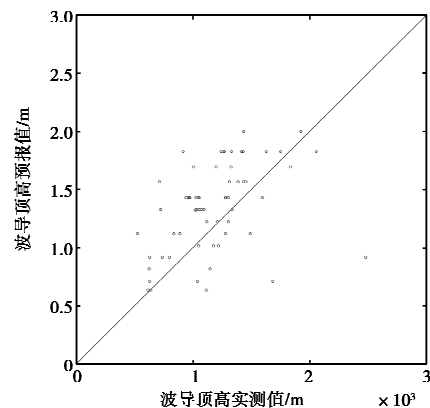
图 1(b)和(c)为波导顶高预报值和实测值的散点图. 图中显示: 47909 预报值高于实测值; 47945 预报值与实测值较接近, 波导顶高所在的高度层较一致.

表 2 东海关注区波导预报可靠性和准确度

站点	样本总数	一般波导预报可靠度/%	漏报率/%	虚警率/%	强波导预报可靠度/%	$E_{RMS}(h)/m$	$E_{RMS}(s)/M$
47909	570	73	40	19	85	501	12
47945	576	71	39	26	88	516	12



(a) 站点分布



(b) 站点 47909

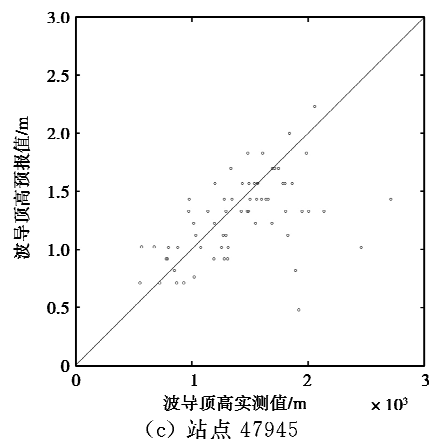
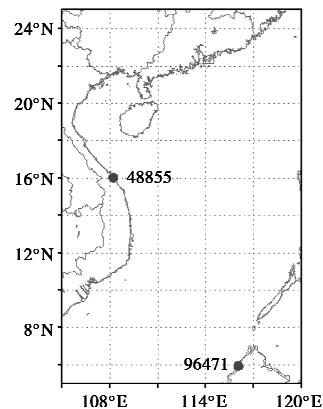


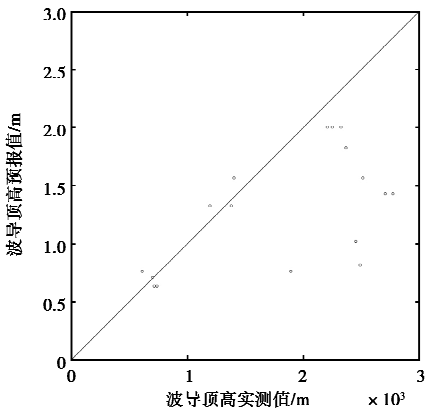
图 1 东海关注区站点分布以及波导顶高预报值与实测值散点图

表 3 南海关注区波导预报可靠性和准确度

站点	样本总数	一般波导预报 可靠度/%	漏报率/%	虚警率/%	强波导预报 可靠度/%	$E_{RMS}(h)/m$	$E_{RMS}(s)/M$
48855	435	81	39	14	83	719	13
96471	527	93	24	7	100	767	9

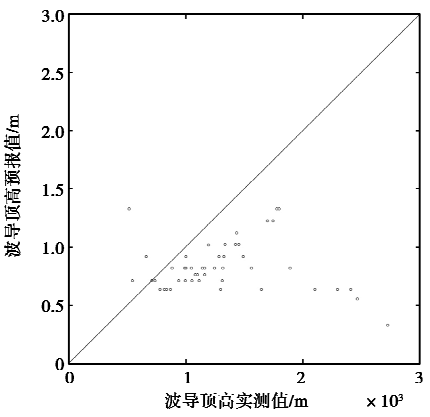


(a) 站点分布



(c) 站点 96471

图 2 南海关注区站点分布以及波导顶高预报值与实测值散点图



(b) 站点 48855

3.1.2 南海关注区验证结果

模式预报区域为图 2(a)所在区域,分别选取 48855 和 96471 两个站点为代表进行统计验证,结果见表 3.由表 3 可知:两个站点一般波导预报可靠度均大于 80%;强波导预报可靠度较一般波导高;漏报率分别为 39%和 24%;虚警率分别为 14%和 7%;波导顶高均方根误差分别为 719 m 和 767m;波导强度均方根误差分别为 13 M 和 9 M.

图 2(b)和(c)为波导顶高预报值和实测值的散点图.图中显示:48855 实测值高于预报值;96471 样本较少.两个站点有一个共同趋势,预报值低于实测值.

3.1.3 亚丁湾关注区验证结果

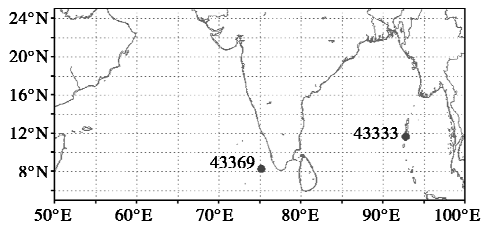
模式预报区域为图 3(a)所在区域,分别选取 43333 和 43369 两个站点为代表进行统计验证.从表 4 可以看出:两个站点一般波导预报可靠度均大于 60%;漏报率分别为 23%和 15%;虚警率分别为 34%和 40%;43333 站没有强波导样本,43369 站的强波导预报可靠度为 100%;波导顶高均方根误差分别为 887 m 和 511 m;波导强度均方根误差分别为 10 M 和 19 M.

图 3(b)和(c)为波导顶高预报值和实测值散点图,图中显示:43333 站样本较少,预报值低于实测

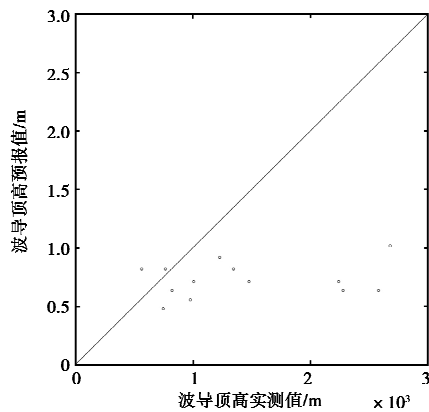
值;43369 站大部分预报值与实测值波导顶高在相同高度层内.

表 4 亚丁湾关注区波导预报可靠性和准确度

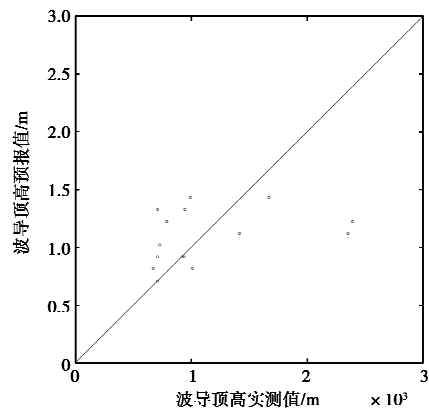
站点	样本总数	一般波导预报 可靠度/%	漏报率/%	虚警率/%	强波导预报 可靠度/%	$E_{\text{RMS}}(h)/\text{m}$	$E_{\text{RMS}}(s)/\text{M}$
43333	72	68	23	34	无强波导	887	10
43369	176	61	15	40	100	511	19



(a) 站点分布



(b) 站点 43333



(c) 站点 43369

图 3 亚丁湾关注区站点分布以及波导顶高预报值与实测值散点图

3.2 蒸发波导验证

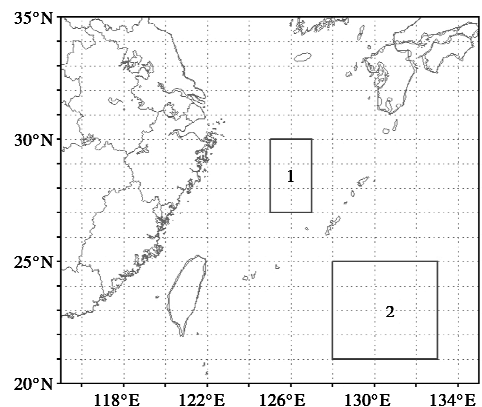
3.2.1 东海关注区验证结果

模式预报区域为图 4(a)所在区域,分别选取两个区域进行统计验证:区域 1 为 $125^{\circ}\text{E}\sim 127^{\circ}\text{E}$, $27^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$;区域 2 为 $128^{\circ}\text{E}\sim 133^{\circ}\text{E}$, $21^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$,结果见表 5.由表 5 可知:两个区域波导预报可靠度均大于 95%;区域 1 的漏报率为 5%,区域 2 无漏报;区域 1 无虚警,区域 2 没有实测数据无波导的情况,没有虚警样本,所以没有得到虚警率;两个区域波导顶高的均方根误差分别为 2 m 和 3 m.

图 4(b)和(c)为波导顶高预报值和实测值的散点图,图中显示,大部分样本预报值和实测值波导顶高值很接近,说明验证期内该海域蒸发波导高度预报效果较好.

表 5 东海关注区蒸发波导预报可靠性和准确度

区域号	样本 总数	预报可 靠度/%	漏报率/ %	虚警率/ %	$E_{\text{RMS}}(h)/\text{m}$
1	96	95	5	0	2
2	240	100	0	无虚警样本	3



(a) 站点分布

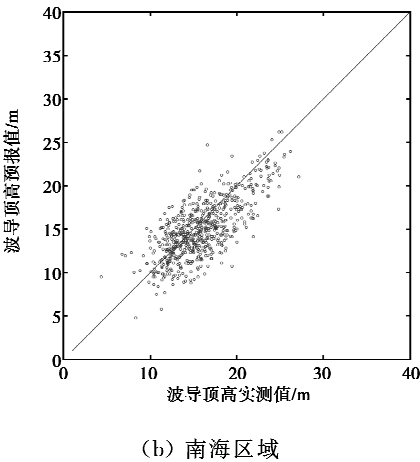
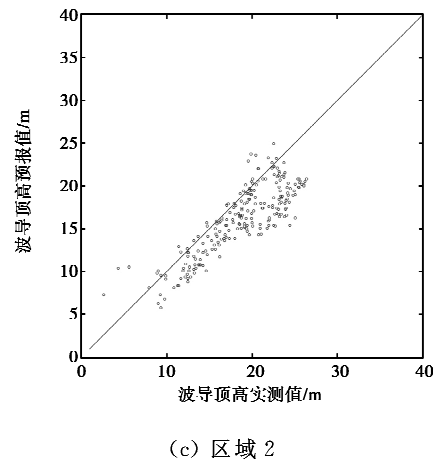
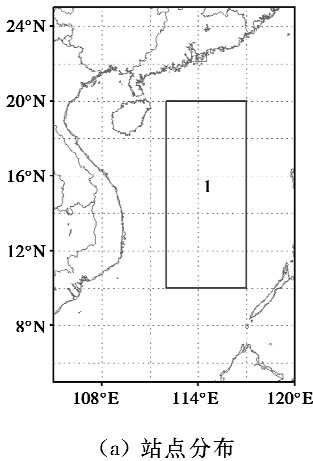
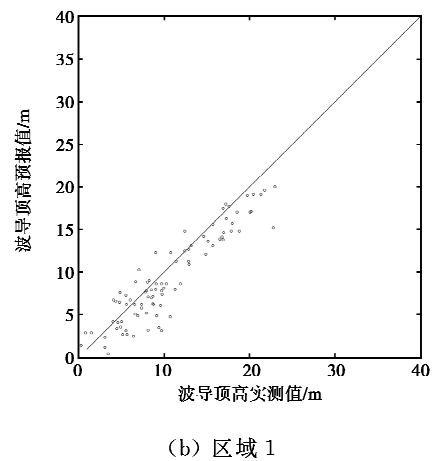


图 4 东海关关注区站点分布以及波导顶高预报值与实测值散点图

图 5 南海关注区站点分布以及预报值与实测值散点图

3.2.2 南海关注区验证结果

模式预报区域为图 5(a)所在区域,选取经纬度范围为 112°E~117°E,10°N~20°N 的区域进行统计验证,结果见表 6。由表 6 可知:预报可靠度为 100%;无漏报;没有虚警样本;波导顶高的均方根误差为 2 m。

图 5(b)为波导顶高预报值和实测值散点图。图中显示:大部分样本预报值和实测值波导顶高值很接近,说明验证期内南海关注区蒸发波导预报效果较好。

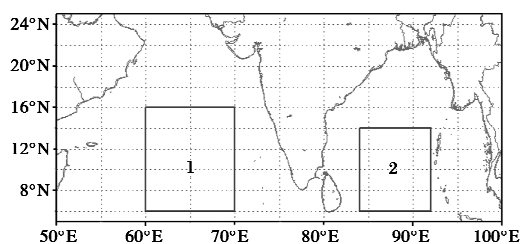
表 6 南海关注区蒸发波导预报可靠性和准确度					
区域号	样本总数	预报可靠度/%	漏报率/%	虚警率/%	$E_{RMS}(h)/m$
1	660	100	0	无虚警样本	2

3.2.3 亚丁湾关注区验证结果

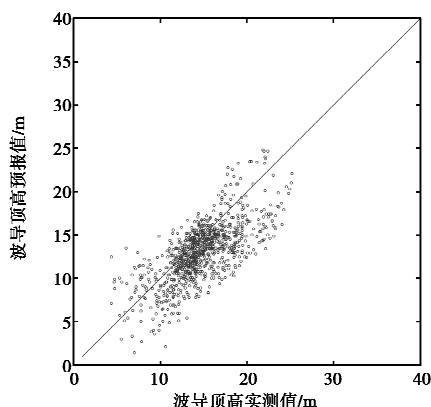
模式预报区域为图 6(a)所在区域,分别选取两个区域进行统计验证:区域 1 为 60°E~70°E,6°N~16°N;区域 2 为 84°E~92°E,6°N~14°N,结果见表 7。由表 7 可知:波导预报可靠度均为 100%;且均无漏报;没有虚警样本,所以没有得到虚警率;波导顶高的均方根误差分别为 3 m 和 2 m。

波导预报值和实测值散点图(图 6(b)和(c))显示,验证期内,亚丁湾关注区波导预报效果较好。

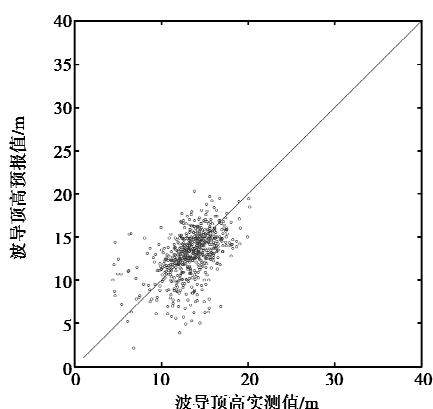
表 7 亚丁湾关注区蒸发波导预报可靠性和准确度					
区域号	样本总数	预报可靠度/%	漏报率/%	虚警率/%	$E_{RMS}(h)/m$
1	968	100	0	无虚警样本	3
2	648	100	0	无虚警样本	2



(a) 站点分布



(b) 区域 1



(c) 区域 2

图 6 亚丁湾关注区站点分布以及预报值与实测值 45°散点图

3.3 验证结果总结

通过利用 GTS 数据对 MM5V3 模式预报的表面和悬空波导结果进行了验证. 验证结果表明:

1) 一般波导预报可靠度在东海关注区和南海关注区约为 70%~95%; 而在亚丁湾关注区稍低, 为 60%~70%. 说明 MM5V3 模式在东海、南海关注区的预报可靠度较亚丁湾好.

2) 强波导预报可靠度在上述三个关注区都为 80% 以上, 说明 MM5V3 模式在强波导的预报上可靠度较高.

3) 东海、南海关注区的预报效果比较结果为: 南海关注区漏报率和虚警率较东海关注区低; 南海关注区和东海关注区的虚警率都较漏报率低. 说明从虚警率和漏报率的角度来看, MM5V3 模式在南海的预报可靠性较东海高, 且两个关注区对无波导预报可靠性较有波导存在时预报可靠性高.

4) 预报表面、悬空波导高度均方根误差为 500~800 m, 强度均方根误差为 10~20 M, 预报波导高度和强度的均方根误差较大, 说明 MM5V3 模式对波导参数预报准确度较差.

通过利用 4 天的 FNL 数据对 MM5V3 模式预报的蒸发波导结果进行了验证. 验证结果表明: 因为选用的区域为蒸发波导高发区, 且根据历史统计数据, 验证时间段验证区域蒸发波导出现概率都为 80% 以上, 所以模式预报和 FNL 数据基本都出现了蒸发波导, 因此, 初步得出 MM5V3 对蒸发波导高发区内的波导能够实现预报.

4 结 论

通过以上结果分析可得出以下结论: MM5V3 数值模式能够对强度强的表面和悬空波导做出预报, 但对强度较弱的波导预报效果较差; 预报虚警率低说明当预报出现波导时, 实际存在波导的概率较高; 但在预报准确度方面效果不好, 有待提高; 亚丁湾关注区因为选取的站点在陆地上, 而东海关注区和南海关注区站点在岛屿上, 相对岛屿上陆地的下垫面不均匀性增强, 进而通过背景场进一步影响预报结果, 是可能导致亚丁湾关注区预报可靠度相对较低的原因. 而且, 对于不同的区域, 适用的模式也不一样, 以上是可能导致亚丁湾关注区预报可靠度和准确度低的原因. 对于蒸发波导, MM5V3 对蒸发波导高发区波导能够实现预报, 但因使用的数据有限, 因此 MM5V3 对蒸发波导的预报性能还需要进一步详细验证.

目前, 中尺度数值预报模式是国内外实现大气波导预报行之有效的方法途径. 但是通过上述分析, 模式对大气波导预报可靠性和准确度上还需要很大的改进. 主要考虑以下几方面:

1) 优化初始场. 中尺度气象模式的初始场是使用全球预报模式场和观测数据同化形成的, 而全球模式网格粗, 海上观测数据少, 不能很好地描述海上大气边界层和中尺度模式的初始温度场与湿度场, 可通过同化更多的海上观测数据和卫星数据改进海上初始场. 尤其在目前海上观测数据严重缺乏的情

况下,同化卫星遥感数据到海上初始场,是改进海上初始场最可行的途径。

2) 中尺度模式的物理机制和参数化方案有待改进。中尺度模式海洋大气边界层参数化方案需要准确地描述真实海洋大气边界层结构并预报大气折射条件。

3) 选用合适的数值模式。目前发展了多种数值模式,如MM5、WRF、Polar-WRF、HWRF、GRAPES、T639、T213、JMA、Germany等。另外,考虑到海上大气波导受海气相互作用的影响,洋面低层大气温湿度和风场受海气界面通量的影响^[19]。因此,对于不同的区域,应该尝试使用多种预报模式,尤其可考虑区域海气耦合模式,并对比分析预报结果,从中选择适用的模式来实现不同区域大气波导的有效预报。

参考文献

- [1] MARTIN O J, SEAMAN N L, STAUFFER D R, et al. A mesoscale model for EM ducting in the marine boundary layer[R]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1996.
- [2] BURK S D, THOMPSON W. Mesoscale modeling of summertime refractive conditions in the southern California bight [J]. Journal of applied meteorology, 1997, 36: 522-31.
- [3] ATKINSON B W, LI J G, PLANT R S. Numerical modeling of the propagation environment in the atmospheric boundary layer over the Persian Gulf[J]. Journal of applied meteorology, 2001, 40(3): 586-603.
- [4] KUCAS M E. Forecasting the nighttime evolution of radiowave ducting in complex terrain using the MM5 numerical weather model[D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 2003.
- [5] HAACK T, WANG C G, GARRETT S, et al. Mesoscale modeling of boundary layer refractivity and atmospheric ducting[J]. Journal of applied meteorology and climatology, 2010, 49: 2437-2457.
- [6] 胡晓华, 费建芳, 张翔, 等. 一次大气波导过程的数值模拟[J]. 气象科学, 2008, 28(3): 294-300.
HU X H, FEI J F, ZHANG X, et al. Numerical simulation of an atmospheric duct[J]. Scientia meteorologica sinica, 2008, 28(3): 294-300. (in Chinese)
- [7] 焦林, 张永刚. 基于中尺度模式MM5下的海洋蒸发波导预报研究[J]. 气象学报, 2009, 67(3): 382-386.
JIAO L, ZHANG Y G. An evaporation duct prediction model coupled with the MM5[J]. Scientia meteorologica sinica, 2008, 67(3): 382-386. (in Chinese)
- [8] 成印河, 赵振维, 何宜军, 等. 大气波导过程数值模拟研究[J]. 电波科学学报, 2009, 24(2): 260-263.
CHENG Y H, ZHAO Z W, HE Y J, et al. Numerical simulation of atmospheric duct process[J]. Chinese journal of radio science, 2009, 24(2): 260-263. (in Chinese)
- [9] 王振会, 王喆, 康士峰, 等. 利用WRF模式对大气波导的数值模拟研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(5): 913-919.
WANG Z H, WANG Z, KANG S F, et al. Numerical simulation of atmospheric duct process with WRF model[J]. Chinese journal of radio science, 2010, 25(5): 913-919. (in Chinese)
- [10] 陈莉, 高山红, 康士峰, 等. 中国近海蒸发波导的数值模拟与预报研究[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(1/2): 1-8.
CHEN L, GAO S H, KANG S F, et al. Numerical modeling and forecasting of evaporation ducts over China Seas[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(1/2): 1-8. (in Chinese)
- [11] 张玉生, 韩杰, 郭相明, 等. 基于湿位涡场的悬空波导预报研究[J]. 电波科学学报, 2011, 26(3): 610-614.
ZHANG Y S, HAN J, GUO X M, et al. Elevated duct forecast based on moist potential vorticity fields [J]. Chinese journal of radio science, 2011, 26(3): 610-614. (in Chinese)
- [12] 袁夏玉, 高山红, 王永明, 等. 一次海雾过程大气波导形成机理的数值研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(1): 17-26.
YUAN X Y, GAO S H, WANG Y M, et al. Numerical modeling study on the formation mechanism of an atmospheric duct during a sea fog event[J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(1): 17-26. (in Chinese)
- [13] 张蕾, 邱崇践. 利用卫星红外遥感资料反演大气温湿廓线的三维物理统计方法[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(2): 109-113.
ZHANG L, QIU C J. Three-dimensional statistical-physical method of atmospheric parameters retrievals from satellite infrared measurements[J]. Journal of infrared and millimeter waves, 2008, 27(2): 109-113. (in Chinese)
- [14] PAULUS R A. Practical application of an evaporation duct model[J]. Radio science, 1985, 20(4): 887-896.
- [15] MUSSON-GENON L. A simple method to determine evaporation duct height in the sea surface boundary layer[J]. Radio science, 1992, 27(5): 635-644.

- [16] BABIN S M. A new model of the oceanic evaporation duct[J]. Journal of applied meteorology, 1997, 36: 193-204.
- [17] BABIN S M. LKB-Based evaporation duct model comparison with buoy data [J]. Applied meteorology, 2002, 41: 434-446.
- [18] IVANOV V K. Determination of the evaporation duct height from standard meteorological data[J]. Atmospheric and oceanic physics, 2007, 43(1): 36-44.
- [19] 邹立维, 周天军. 区域海气耦合模式研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(8): 857-864.
- ZOU L W, ZHOU T J. A review of development and application of regional ocean-atmosphere coupled model[J]. Advances in Earth sciences, 2012, 27(8): 857-864. (in Chinese)

作者简介



郝晓静 (1983—), 女, 内蒙古人, 中国电波传播研究所工程师, 西安电子科技大学在读博士, 主要研究方向为电波环境的数值模拟及遥感反演研究。

李清亮 (1963—), 男, 河南人, 中国电波传播研究所研究员, 博士. 中国电子科技集团公司首席专家, 中国电子学会高级会员, 总装目标及环境特性专业组专家成员, 目标及环境特性军标委委员, 国防科工委环境试验与观测专业专家组成员. 主要研究方向为目标及环境特性、电离层扰动与传播特性等。

郭立新 (1968—), 男, 陕西人, 西安电子科技大学研究员, 博士. IEEE 会员, 美国纽约科学研究院会员, 中国电子学会高级会员, 陕西省物理学会常务理事, 中国电波传播委员会委员, 教育部“长江学者”特聘教授. 主要研究方向为无线电物理、电磁场与微波技术、等离子体物理。