

# 广州中尺度模式局地要素预报性能分析\*

闫敬华

(广州热带海洋气象研究所, 广州 510080)

## 提 要

该文简要介绍了华南中尺度模式的地表要素的预报诊断方案, 站点要素时间序列预报情况. 用适合站点要素时间序列预报的检验方法, 检验并分析了各要素时间序列预报的性能. 表明该中尺度模式的地表要素时间序列预报方案是有效的, 预报具有较高的准确性和应用价值.

关键词: 中尺度模式 站点要素预报 检验

## 引 言

传统的数值天气预报主要关注天气形势场的预报, 而现在的中尺度数值预报, 其主要功能是局地天气要素的预报. 华南中尺度模式目前水平分辨率为  $0.5^\circ$  内嵌  $0.25^\circ$ , 垂直分 20 层<sup>[1]</sup>, 经一年的准业务运行后, 于 1998 年 12 月正式业务运行, 针对中尺度模式特点, 在模式中嵌入了一个地表要素预报诊断模块, 直接作出地表要素的预报, 并通过插值给出有关站点的多要素逐小时演变序列, 供预报参考使用. 本文将简要介绍地表要素诊断方案及近一年来站点要素序列业务预报的效果检验分析.

## 1 方案简介

根据德国国家天气局中尺度模式地表参量诊断方案<sup>[2]</sup>, 我们采取如下实施方案:

### 1.1 云量

用参数化方法确定各模式层的云覆盖率(式(1)), 然后与对流云量(式(2))叠加.

$$CL_L = \begin{cases} 1 & Q_w > 0 \\ \text{MAX} \left[ 0, \text{MIN} \left[ 1, \left( \frac{RH - RH_c}{1 - RH_c} \right)^2 \right] \right] & Q_w = 0 \text{ 且 } RH > RH_c \\ 0 & Q_w = 0 \text{ 且 } RH < RH_c \end{cases} \quad (1)$$

其中  $RH_c = 0.95 - 0.8\sigma(1 - \sigma)[1 + 1.73(\sigma - 0.5)]$  为临界相对湿度,  $Q_w$  为网格尺度的云

\* 袁金南参与了部分资料统计工作.

1999-10-18 收到, 2000-02-22 收到修改稿.

水含量,是模式的基本预报量。 $CL_L$ 为网格尺度云量。

$$CL = \text{MIN}[1, CL_L + CL_C \times (1 - CL_L)] \quad (2)$$

其中  $CL_C$  为对流云量,由云模式直接求出。

总云量及高、中、低云量根据各层的云量得出。当两个有云层被一个无云层分隔时,认为各层云是随机覆盖的;当相邻两层都有云,则认为二者完全覆盖。具体分层标准是:400 hPa 以上为高云,400~800 hPa 为中云,800 hPa 以下为低云。总云量则包括整个气柱。

## 1.2 10 m 风和 2 m 温度、露点

地表风温湿在常规天气预报中具有极高的重要性,但它们不是模式的直接预报量,需要从地表面和模式最低层(约距地表 32 m)的预报值诊断得出。近地面的 Prandtl 层为垂直方向的常通量层,并假设要素水平均匀定常,则根据 Monin-Obukhov 理论,有如下关系:

$$\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa(z+z_0)} \mathcal{Q}_V\left(\frac{z+z_0}{L_{Mo}}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = \frac{s_*}{\kappa(z+z_0)} \mathcal{Q}_s\left(\frac{z+z_0}{L_{Mo}}\right) \quad (4)$$

其中  $s = C_p T + gz$  为干静力能,  $L_{Mo} = \frac{C_p T u_*^2}{g \kappa s_*}$  为 Monin-Obukhov 长度。 $\kappa$  为范卡门常数,  $z_0$  为粗糙度,  $z$  为距地高度,  $u_*$  为摩擦速度,  $s_*$  为干静力能的特征振幅。 $\theta_V, \theta_s$  分别为  $V$  和  $s$  的垂直廓线函数。

根据地面和模式最低层(高度为  $h$ ) 两个边条件,可确定  $u_*$  和  $s_*$  :

$$u_*^2 = C_d V_b^2$$

$$s_* = C_h V_b \frac{(S_b - S_s)}{u_*}$$

其中  $C_d$  和  $C_h$  为无量纲摩擦系数,下标“ $b$ ”和“ $s$ ”分别表示模式最低层和地面。

对式(3), (4)在  $z_0 < z < h$  间积分,得到:

$$V(z) = \frac{u_*}{\kappa} \int \mathcal{Q}_V(x) \frac{dx}{x} \quad (5)$$

$$s(z) = s_0 + \frac{s_*}{\kappa} \int \mathcal{Q}_s(x) \frac{dx}{x} \quad (6)$$

其中

$$x = \frac{z+z_0}{L_{Mo}}$$

(1) 稳定情况 廓线函数可取为:

$$\mathcal{Q}(x) = 1 + \alpha x \quad (7)$$

对式(5)从  $z=0$  至  $h$  积分,有:  $V(h) = V_b = \frac{u_*}{\kappa} \left[ \ln\left(\frac{h+z_0}{z_0}\right) + \frac{\alpha}{L_{Mo}} h \right]$

$$\frac{\alpha}{L_{Mo}} = \frac{1}{h} \left[ \frac{\kappa}{C_d} - \ln\left(\frac{h+z_0}{z_0}\right) \right] \quad (8)$$

$$V(z) = V_b \left\{ \frac{z}{h} + \frac{C_d}{\kappa} \left[ \ln\left(\frac{z+z_0}{z_0}\right) - \frac{z}{h} \ln\left(\frac{h+z_0}{z_0}\right) \right] \right\} \quad (9)$$

由式(9)求出  $z=10$  m 处的风速  $V(10$  m)。

式(9)第一项表示风速随高度的线性增长,第二项表示动量垂直湍流输送造成的风速

随高度增长.

同样有:

$$s(z) = s_s + (s_b - s_s) \left\{ \frac{z}{h} + \frac{C_h}{\kappa C_d} \left[ \ln \left( \frac{z + z_0}{z_0} \right) - \frac{z}{h} \ln \left( \frac{h + z_0}{z_0} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

上式极端稳定情况下,  $\frac{C_h}{C_d} \rightarrow 0$ , 有:

$$s(2\text{m}) - s_s = \frac{2}{32} (s_b - s_s) < 7\% (s_b - s_s), \text{ 即 } s(2\text{m}) \text{ 非常接近于 } s_s. \text{ 这与观测不符, 会明显}$$

低估 2 m 温度. 因此, 采用如下经验近似:

$$s(2\text{m}) = s_s + (s_b - s_s) \times 0.25 \frac{h + a}{h - b} \quad (11)$$

其中  $a = 4\text{ m}$ ,  $b = 0.5\text{ m}$

由式(11)给出的 2 m 温度与实况更加吻合.

(2) 不稳定情况 廓线函数取为:

$$Q(x) = \frac{1}{1 - \alpha x} \quad (12)$$

$z = 0 \rightarrow h$  积分得:

$$V(h) = V_b = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left[ \frac{h + z_0}{z_0} \frac{1 - \frac{\alpha}{L_{Mo}} z_0}{1 - \frac{\alpha}{L_{Mo}} (h + z_0)} \right]$$

$$\frac{\alpha}{L_{Mo}} = \frac{1}{e^\delta - 1} \left( \frac{e^\delta}{h + z_0} - \frac{1}{z_0} \right)$$

其中  $\delta = \frac{\kappa}{C_d}$

$$V(z) = V_b \left\{ 1 - \frac{C_d}{\kappa} \ln \left[ 1 + (e^\delta - 1) \frac{z_0(h - z)}{h(z + z_0)} \right] \right\} \quad (13)$$

从而得出  $V(z = 10\text{ m})$ . 可见, 此时  $V(10\text{ m})$  很接近于  $V_b$ .

同理有:

$$s(z) = s_s + (s_b - s_s) \left\{ 1 - \frac{C_h}{\kappa C_d} \ln \left[ 1 + \left( e^{\frac{\kappa C_d}{C_h}} - 1 \right) \frac{z_0(h - z)}{h(z + z_0)} \right] \right\} \quad (14)$$

2 m 温度则由下式给出:

$$T(z) = \frac{s(z) - z g}{C_p} \quad z = 2\text{ m} \quad (15)$$

(3) 露点温度 根据定义有:

$$q_D(z) = Q_s[T_d(z), p(z)] \quad (16)$$

取 Prandtl 层相对湿度为常数, 则

$$q_D(2) = (q_D)_b \frac{Q_s[T(z), p(z)]}{Q_s(T_b, p_b)} \quad z = 2\text{ m}$$

将上式代入式(16), 并利用  $Q_s$  的计算公式得:

$$T_d(2m) = \frac{B2W \cdot B3 - A \cdot B4W}{B2W - A} \tag{17}$$

其中  $A = \ln\left[\frac{1}{B1} \frac{q_D(2m)p(2m)}{\frac{R}{R_D} + (1 - \frac{R}{R_D})q_D(2m)}\right]$ ,  $B1 = 610.78 \text{ Pa}$      $B2W = 17.26939$ ,

$B3 = 273.16 \text{ K}$ ,     $B4W = 35.86 \text{ K}$

最后, 通过水平插值得出各站点的要素预报值.

(4) 检验方法 以往大尺度预报效果检验采用距平相关系数等场相关方法, 即“CBS”标准. 而中尺度模式范围较小, CBS 方法基本上已不适合中尺度预报的检验. 中尺度模式的要素预报检验应主要对局地要素的时间演变序列进行, 而不是用场相关方法, 因为局地要素预报是对不规则离散点进行的, 局地要素在空间上具有很强的不连续性, 很难用“场”的方式描述. 据了解, 国外一些预报中心也采用站点要素方式来检验中尺度模式预报, 而不是用“CBS”方法. 本文所进行的各种检验分析均以站点要素时间序列预报为出发点, 对站点进行的.

## 2 检验结果分析

本文检验的预报量包括站点的温、压、湿、风、云量及降水等要素, 业务工作中提供了上述要素的逐小时演变序列, 限于资料等原因, 这里只分析每 6 h 预报的情况. 表 1, 2 给出了冬、夏两季广州站的要素预报检验统计结果, 其他站的情况类似(表略). 由表可见:

表 1 1998 年 11 月~ 1999 年 2 月广州站要素预报\* 检验结果

要素	预报时效/h									
	0	6	12	18	24	30	36	42	48	
温度 (K)	平均误差	- 0.01	- 1.97	- 1.58	1.94	- 0.18	- 0.25	- 0.47	1.68	- 0.08
	均方根差	1.91	2.64	2.37	3.06	1.97	1.96	2.00	3.44	2.35
	均方根差*	1.91	1.75	1.76	2.37	1.96	1.95	1.94	2.99	2.35
湿度 (%)	平均误差	1.9	- 4.5	- 3.7	2.5	- 12.4	- 9.1	- 5.0	2.6	- 12.7
	均方根差	8.7	15.1	14.2	9.9	16.9	17.8	14.5	13.6	19.2
	均方根差*	8.5	14.4	13.7	9.6	11.4	15.3	13.6	13.3	14.4
总云量	平均误差	- 0.35	- 0.30	- 0.26	- 0.11	- 0.09	- 0.21	- 0.25	- 0.09	- 0.01
	均方根差	0.51	0.46	0.46	0.37	0.42	0.47	0.46	0.43	0.47
	均方根差*	0.37	0.35	0.38	0.35	0.41	0.42	0.38	0.42	0.47
风速 (m/s)	平均误差	- 0.06	0.88	0.82	- 0.58	0.04	0.91	0.80	- 0.31	0.16
	均方根差	0.78	1.37	1.30	1.09	0.89	1.35	1.43	1.08	0.99
	均方根差*	0.78	1.05	1.00	0.92	0.89	1.01	1.19	1.04	0.97
气压 (hPa)	平均误差	0.0	- 0.10	- 0.22	1.49	0.61	0.30	- 0.25	2.04	1.77
	均方根差	0.0	0.82	1.00	1.96	1.49	1.22	1.27	2.55	2.43
	均方根差*	0.0	0.82	0.98	1.29	1.36	1.18	1.24	1.54	1.66

\* 表示经平均误差订正后的结果, \*\* 12:00UTC 起报.

表 2 1999 年 6~8 月广州站要素预报\*\* 检验结果

要素	预报时效/h									
	0	6	12	18	24	30	36	42	48	
温度 (K)	平均误差	-1.58	1.30	-0.56	-0.84	-0.45	1.05	-0.22	-0.92	-0.28
	均方根差	1.88	2.82	1.52	1.44	1.15	3.63	1.87	1.85	1.60
	均方根差*	1.01	2.50	1.41	1.16	1.05	3.47	1.86	1.61	1.57
湿度 (%)	平均误差	-1.9	-5.1	-9.9	-5.9	-0.7	-1.0	-11.5	-6.7	-2.0
	均方根差	4.9	11.2	15.5	10.6	7.0	15.7	17.3	10.7	7.1
	均方根差*	4.5	9.9	11.9	8.8	6.9	15.7	13.0	8.4	6.8
总云量	平均误差	-0.60	-0.28	-0.19	-0.15	-0.07	-0.29	-0.34	-0.23	-0.15
	均方根差	0.65	0.40	0.36	0.37	0.26	0.43	0.45	0.42	0.36
	均方根差*	0.24	0.28	0.30	0.34	0.25	0.32	0.30	0.35	0.32
风速 (m/s)	平均误差	-0.43	-0.96	-0.15	0.05	-0.45	-0.89	-0.16	0.16	-0.49
	均方根差	0.95	1.38	1.27	1.21	1.25	1.46	1.36	1.29	1.32
	均方根差*	0.85	0.98	1.26	1.21	1.17	1.15	1.35	1.28	1.22
气压 (hPa)	平均误差	0.0	0.17	-0.28	-0.04	-0.41	-0.51	-0.85	-0.59	-0.21
	均方根差	0.0	0.78	1.00	1.33	1.70	1.94	1.88	2.05	2.48
	均方根差*	0.0	0.75	0.96	1.33	1.65	1.87	1.68	1.96	2.47

\* 表示经平均误差订正后的结果, \*\* 00:00UTC 起报.

(1) 温度 ① 无论冬夏, 平均误差大部分时次为负, 只有对应最高温度的时次 06:00 UTC 为正, 而与最低温度对应的时次往往有极大的负值, 说明本模式有最高(最低)温度预报偏高(偏低)趋势的系统性误差; ② 均方根差也是在最高温度时次最大(约 3 K), 最低温度时次次之(约 2K), 其它时次误差明显地小; ③ 冬季误差总体看大于夏季, 这与冬季气温变幅大有关; ④ 经平均误差订正后, 一些时次误差明显下降, 表明释用订正和提高初值质量的重要性.

(2) 湿度 ① 平均误差大部分时次为负, 数值一般小于 10%; ② 均方根差约为 10%, 最大 19.2%; ③ 冬季误差明显小于夏季; ④ 对平均误差进行订正后, 均方根差在有的时次(如傍晚 12:00UTC)有显著下降, 表明了释用订正的重要性; ⑤ 总体看序列预报误差较小, 一般小于 15%, 故可用性强.

(3) 总云量 ① 平均误差为负, 即预报值偏小, 其中初值偏小最明显, 原因是没有将云观测信息加入模式初值, 模式云需经模式自行调整产生; ② 均方根差为 0.26~0.47; ③ 冬季误差明显比夏季小, 主要原因为冬季云少, 且尺度大, 系统性强, 而夏季云多, 局地性强, 预报难度大; ④ 对平均误差进行订正后, 误差明显减小, 表明初值改进及释用的重要性; ⑤ 从误差量值特点看, 云量的局地序列预报是有应用价值的.

(4) 风速 ① 各时效的平均误差均小于 1 m/s, 其中午后 06:00 UCT 风速明显偏小, 夜间有偏大趋势, 分析表明这是由于模式大气的垂直层结在午后垂直混合偏弱, 夜间混合偏强之故; ② 均方根差小于 1.46 m/s, 随预报时效增长不明显; ③ 经平均误差订正后, 可有效减小有关时效的误差.

(5) 地表气压 ① 平均误差小于 2 hPa, 其中夏季明显小于冬季; ② 均方根差小于 2.5

hPa, 夏季小于冬季; ③ 误差随时效有增大趋势; ④ 在 12: 00 UTC 预报中, 平均误差订正对有关时效的误差减小明显, 00: 00 UTC 预报则变化不大, 这与不同时效预报初边值方案差异有关; ⑤ 单点气压时间序列预报误差较小, 可用性较强. 在进行地表气压处理时已滤除地形差异引起的系统性偏差.

(6) 最高、最低温度 由表 3 看到, 均方根差小于 3 K, 最低温度的均方根差明显小于最高温度, 夏季误差小于冬季, 误差随时效有缓慢增长趋势. 平均而言, 最高温度预报偏高, 最低温度偏低, 这与表 1, 2 的分析一致.

表 3 1998 年冬及 1999 年夏最高、最低温度预报检验统计

时效/h	夏季			冬季		
	要素	平均误差	均方根差	要素	平均误差	均方根差
12	$T_{max}$	0.42	2.08	$T_{max}$	0.74	2.54
24	$T_{min}$	- 0.33	1.29	$T_{min}$	- 0.96	1.97
36	$T_{max}$	0.27	2.72	$T_{max}$	0.28	2.98
48	$T_{min}$	- 0.38	1.70	$T_{min}$	- 1.31	2.59

\* 00: 00 UTC 起报.

图 1 a, b 给出了冬夏季不同误差标准下最高、最低温度的预报准确率. 可见, 在不同误差标准下, 准确率分别为 50% 左右、70% ~ 75% 左右和 85% 左右. 总体看, 最高温度准确率低于最低温度, 冬季低于夏季, 准确率随时效有缓慢降低趋势. 其中冬季 12: 00 UTC 预报中短时效的准确率较低与初值质量有关. 可见, 至少在 2.5 K 误差标准下, 广州站最高、最低温度的预报具有明确的可用性.

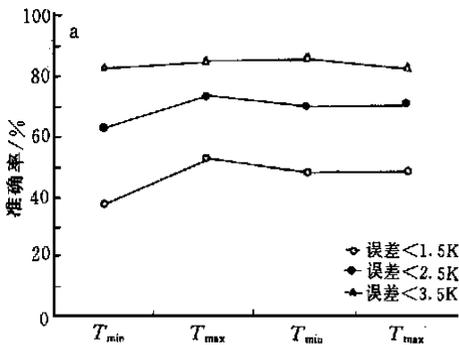


图 1a 广州站 1998 年冬 12: 00 UTC 起报的 0~ 48 h  $T_{max}$  和  $T_{min}$  预报准确率

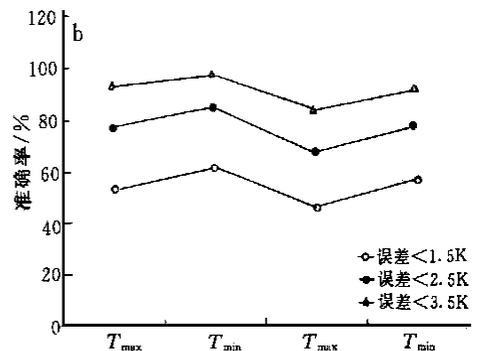


图 1b 广州站 1999 年夏 00: 00 UTC 起报的 0~ 48 h  $T_{max}$  和  $T_{min}$  预报准确率

(7) 云量 将云量分为少 ( $\leq 4$ , 最大为 10), 中 (4~ 8) 和多 ( $> 8$ ) 3 级, 分析预报与实况的拟合情况 (表 4) 可看到冬季云量较少, 预报正确的点数比例较高, 尤其是对少云情况, 而对云量多的情况, 预报易出现偏低. 夏季云较多, 同样预报与实况相拟合的点数比例较高, 但预报偏低偏高的机会差异没有冬季明显. 这表明站点云量预报有较强的应用价值.

表 4 1998 年冬和 1999 年夏华南 46 站总云量预报\* 统计

	预报/mm	12 h			24 h			48 h		
		≤ 4	4~ 8	> 8	≤ 4	4~ 8	> 8	≤ 4	4~ 8	> 8
冬季	≤ 4	749	86	561	737	41	281	687	74	526
	4~ 8	49	12	244	114	23	172	75	22	240
	> 8	38	27	636	69	23	353	64	32	682
夏季	≤ 4	153	85	192	192	102	303	136	96	227
	4~ 8	111	149	534	106	115	669	125	146	712
	> 8	151	227	579	37	74	820	133	198	1408

\* 12:00UTC 起报.

还可以从图 2 来分析站点云量时间序列的预报准确率, 即预报与实况拟合( 处同一等级, 共分 3 级, 标准同表 4) 的点次数与总点次数之比. 由图可见, 冬季各预报时次准确率皆为 0.6 左右, 初始时刻稍低, 为 0.52, 所以预报的可用性很强. 夏季初值准确率较低, 但 6 h 预报后准确率就大大提高, 42 h 以内预报准确率皆大于 0.43, 48 h 降为 0.36. 因此, 可用性仍较强, 因为本文云量共分 3 级, 无用预报的临界准确率为 0.33.

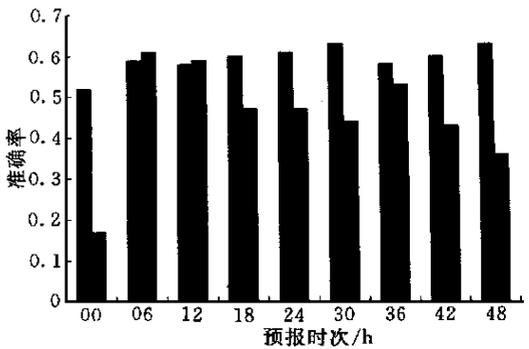


图 2 1998 年冬( 灰框)和 1999 年夏( 黑框)华南 46 站总云量时间序列预报准确率(12:00UTC 起报)

(8) 降水 根据中尺度预报特点, 检验

对象为站点降水时间序列( 每 6 h 降水), 表 5 给出的 12 h 降水预报与单站实况的拟合情况. 其中将 12 h 降水分为 4 个等级, 大致对应无雨、小雨、中到大雨及暴雨以上情况, 由表 5 看到, 预报与实况同等级的点次数比例是比较高的, 尤其是只考虑误差一个等级以内为基本正确, 则拟合准确率大大提高. 总体而言, 对小雨及以下降水预报偏大的机会较多, 而对中雨以上降水预报偏小的机会较多.

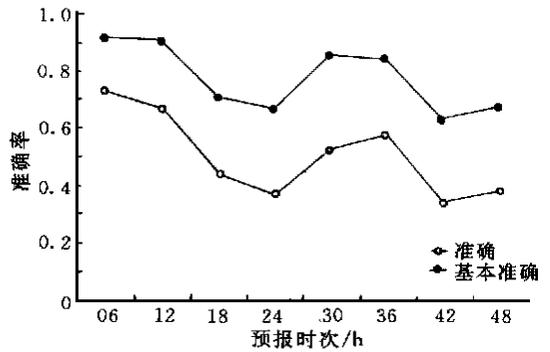
表 5 1999 年夏华南 46 站每 12 h 降水量预报\* 拟合情况统计

预报 (mm)	12~ 24 h				24~ 36 h				36~ 48 h			
	< 0.1	0.1~ 5	5~ 20	> 20	< 0.1	0.1~ 5	5~ 20	> 20	< 0.1	0.1~ 5	5~ 20	> 20
< 0.1	518	141	71	42	800	174	55	31	479	104	61	21
0.1~ 5	398	162	135	60	460	217	74	47	346	125	88	36
5~ 20	314	159	124	55	98	65	25	16	370	222	169	103
> 20	79	50	53	31	9	7	5	3	81	71	75	41

\* 12:00UTC 起报.

同样将 6 h 降水分为 4 个等级, 分别为 < 0.1, 0.1~ 2, 2~ 10 及 > 10 mm. 预报与实况同等级为正确, 二者相差一个等级以内为基本正确, 统计结果见图 3. 可见, 各时效的预报准确率在 0.73~ 0.35 之间, 基本准确率则达 0.92~ 0.64 之间. 准确率随时效有减小趋

势,并且白天明显低于夜间.分析表明,白天准确率偏低主要由于午后容易造成地温偏高(见表1,2分析),易产生虚假对流降水所致.随着温度预报误差的控制,这一现象可望消除.由于本文可用预报的临界准确率为0.25,因此,站点降水时间序列预报具有较好的可用性.尤其是在基本准确标准下,48h时效内的预报准确率都较高,可用性较强.



为便于比较,表6给出了降水预报的TS评分结果.其特点是大雨及以下量级降水TS评分较高,预报雨区总体偏大;暴雨以上评分较低,预报雨区偏小,漏报大于空报;各级降水的预报效率都较高.综合各项指标表明降水预报性能良好.

表6 1999年夏12:00UTC起报的24h累计降水36h预报检验

雨级	TS评分	预报效率	偏差	漏报	空报
小雨	0.766	0.922	0.889	0.188	0.066
中雨	0.449	0.908	2.019	0.290	0.458
大雨	0.298	0.946	1.667	0.527	0.517
暴雨	0.121	0.958	0.331	0.832	0.647
大暴雨	0.014	0.969	0.047	0.985	0.625

### 3 小 结

(1) 本文简要介绍了华南中尺度模式的地表要素的预报诊断方案,站点要素时间序列预报情况及相应的检验方法.

(2) 用适合站点要素时间序列预报的检验方法,检验并分析了各要素时间序列预报的性能.检验分析表明,本中尺度模式的地表要素时间序列预报方案是有效的,站点要素序列预报具有较高的准确性和可用价值.

### 参 考 文 献

- 1 闫敬华. 华南区域中尺度数值天气预报模式及其性能, 首届广东青年科学家论坛论文集, 北京: 中国科学技术出版社, 2000. 404~ 408.
- 2 Research Department. Documentation of the EM/DM-System. Offenbach (Germany): Deutscher Wetterdienst, 1995.

## ANALYSIS ON THE ELEMENT PREDICTION PERFORMANCE OF THE GUANGZHOU MESOSCALE NWP MODEL

Yan Jinghua

(Guangzhou Institute of Tropical & Oceanic Meteorology, Guangzhou 510080)

### Abstract

The surface element prediction/diagnostic scheme of the Guangzhou Mesoscale NWP Model and the situation of its time evolution prediction of station elements are briefly introduced. The time series prediction of station elements is verified and analyzed by using the method suitable for time series verification. Better and sustained performance are shown for time series prediction of most elements, including rainfall, temperature, humidity, wind, pressure and cloud amount.

**Key words:** Mesoscale NWP model Surface element prediction Verification