

云、辐射对中期数值预报影响的数值试验*

郑庆林 胡一红 古瑜

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

在国家气象中心引进的 EC-T42L9 谱模式的基础上,用模式诊断云和模式水汽场(以下简称 B 方法)代替其中计算辐射时所用的纬向平均的气候云和气候水汽场(以下简称 A 方法),并减少垂直层以节省计算量,从而发展了一个 T42L5 谱模式.此外,在计算云和辐射时,还设计了方法 C,调整云和辐射计算的“时空”分辨率.该文利用改进的 T42L5 谱模式,并以 EC 的 1982 年 7 月 1 日 12 时(UTC)的客观分析为初始场,进行了 A、B、C 三种方法的 5 天中期数值预报试验,较系统地研究了云和辐射在中期数值预报中的作用.

数值试验的结果表明:(1)与 A 方法相比,B 和 C 方法能较正确地模拟出大气中实际云的分布,改进了模式中大气辐射场的计算,提高了预报效果.(2)用 A 方法模拟的中高云量与实际云相比明显偏低,对低压系统预报偏弱.正确考虑云和辐射作用,对天气系统的中期预报效果有明显改进.(3)B 方法和 C 方法能较正确地模拟出 Hadley 环流上升区的高中低云大值区和下沉区的云的小值区,其模拟的 Hadley 环流比 A 方法有明显的加强.

关键词:云和辐射;模式诊断云;中期数值预报.

1 引 言

近年来,云和辐射对中、长期天气过程的影响的研究已越来越被重视. Liou 和郑庆林(1984)^[1]用 7 层谱模式作了 10 天预报,来研究云、辐射和动力学过程的相互作用.结果表明,云和辐射的相互作用对 10 天的中期预报结果在温度和云的预报上有显著影响.之后他们又用 7 层谱模式作了一个 30 天的数值试验^[2],发现在长期数值预报中,云和辐射的相互作用对垂直速度产生影响,它使得 Hadley 环流维持.

本文用模式诊断云方法代替气候云方法,利用改进的 T42L5 谱模式,以 EC 的 1982 年 7 月 1 日 12UTC 的客观分析为初始场,进行了 5 天的数值预报试验.我们对模式中诊断云计算公式的系数做了改进,对比讨论了诊断云和气候云对环流、垂直速度和温度场的不同影响,从而考察了云和辐射在中期数值预报中的作用.

1993 年 4 月 10 日收到,1994 年 3 月 25 日收到再改稿.

* 国家“七五”中期数值天气预报攻关项目及气科院云和辐射作用研究课题.

2 模式简介

本文所用的 T42L5 谱模式是在国家气象中心引进的 T42L9 谱模式的基础上发展而得到的. 模式在垂直方向采用 σ 坐标, 分为 5 层, σ 分别为 0.1、0.3、0.5、0.7 和 0.9. 水平方向为 42 波的五角形截断, 时间积分采用半隐式格式, 时间步长为 30 分钟. 模式基本方程组同文献[3], 在此省略.

模式考虑了较完整的物理过程, 包括地形和地面摩擦, 边界层作用, 次网格效应引起的扩散, 大尺度凝结, 感热, 云和辐射作用, 以及积云对流等. 模式中地表温度由地表热量平衡方程求出, 海温采用的是多年月平均的气候值. 在云和辐射计算中, 采用了模式水汽和模式诊断云方法.

3 试验设计

为研究云和辐射作用, 我们用 EC 的 1982 年 7 月 1 日 12 时的客观分析为初始场, 做了 5 天的中期数值预报试验, 并用 EC 的 1982 年 7 月 2 日 12 时至 6 日 12 时的客观分析为实况场进行逐日预报结果检验.

3.1 模式的初始场

在 T42L5 模式的初值计算中, 我们采用了非线性平衡方程初值化方法^[4], 以得到各等压面上的风场; 再利用郑庆林和 Liou(1986)^[5]提出的初始时刻的 p - σ 迭代插值方法, 减小插值误差, 最后得到模式所需的 σ 面上的初始场.

3.2 诊断云方案

在 T42L9 谱模式中, 辐射计算采用了气候云方法, 即采用高、中、低云的沿纬向平均的气候值. 在本研究中, 对此作了改进, 用模式的预报场来诊断出高、中、低云的分布, 称为诊断云方法.

辐射计算中的云量分布 C_L , 由下面的计算公式给出(Geyleyn, 1982)^[6]:

$$C_L = \begin{cases} (\bar{\gamma} - \bar{\gamma}^c) / (1 - \bar{\gamma}^c)^2 & (\bar{\gamma} > \bar{\gamma}^c) \\ 0 & (\bar{\gamma} \leq \bar{\gamma}^c) \end{cases}$$

其中:
$$\begin{cases} \bar{\gamma} = q/q_s \\ \bar{\gamma}^c = 1 - \alpha\sigma(1 - \sigma)[1 + \beta(\sigma - \frac{1}{2})] \end{cases}$$

α 、 β 为经验系数, $\bar{\gamma}^c$ 是与垂直坐标 σ 有关的经验分布.

在本研究中, 给出了一种改进云量计算的方法^[7], 设计了 \hat{q} , 有:

$$\begin{cases} \bar{\gamma} = \hat{q}/q_s \\ \hat{q}_\sigma = \hat{k}(\theta, \sigma)q_\sigma + 0.5 \times (1 - \hat{k}(\theta, \sigma)) \times (q_{\sigma+\Delta\sigma} + q_{\sigma-\Delta\sigma}) \end{cases}$$

这样可以在垂直和水平方向调整 $\hat{k}(\theta, \sigma)$, 以使模式诊断云在垂直和水平的分布与实际云

的分布较为一致. 与 Geleyn 的方法相比, 在云量的计算上有了进一步的改进.

3.3 云和辐射计算的时空分辨率调整

在 T42L9 谱模式中, 每隔 12 小时计算一次辐射. 由于云的时间尺度小, 因而在本文中设计了方法 C, 即在方法 B 的基础上, 调整云和辐射计算的时空分辨率. 考虑到 60°N 以北地区, 经线间的距离明显缩短, 格点相对较密, 因此在计算云和辐射时, 对 60°N 以北地区采用沿纬向跳一个格点计算, 以节省计算量; 对时间尺度, 由原来的 12 小时计算一次改为 8 小时计算一次, 以提高计算精度, 整体上并不增加计算量.

4 云和辐射对中期数值预报影响的数值试验

4.1 预报结果的误差检验

表 1 和表 2 分别给出了不同云模式的北半球范围内 500hPa 等压面的高度场和温度场的 5 天数值预报结果的检验. 表中 r 表示模式预报的变高场(或变温场)和相应的实况变高场(或变温场)之间的相关系数. ϵ 和 ϵ_{per} 分别表示模式预报和持续性预报与所对应的实况之间的均方根误差.

表 1 高度场的预报结果检验 (北半球, ϵ, ϵ_{per} 单位, gpm)

层 次	试 验	24h			48h			72h			96h			120h		
		r	ϵ	ϵ_{per}	r	ϵ	ϵ_{per}	r	ϵ	ϵ_{per}	r	ϵ	ϵ_{per}	r	ϵ	ϵ_{per}
300 hPa	A	0.85	41	77	0.88	50	105	0.77	73	110	0.68	91	114	0.62	107	127
	B	0.86	40	77	0.89	48	105	0.80	69	110	0.72	85	114	0.70	95	127
	C	0.86	40	77	0.89	48	105	0.80	69	110	0.72	85	114	0.70	95	127
500 hPa	A	0.84	28	51	0.86	39	75	0.75	55	80	0.67	65	81	0.65	72	88
	B	0.86	26	51	0.89	35	75	0.79	50	80	0.74	58	81	0.74	62	88
	C	0.86	26	51	0.88	35	75	0.79	50	80	0.74	58	81	0.73	63	88
700 hPa	A	0.77	24	36	0.82	32	56	0.75	41	60	0.70	45	60	0.69	49	64
	B	0.80	22	36	0.85	30	56	0.77	40	60	0.73	44	60	0.70	50	64
	C	0.80	22	36	0.85	30	56	0.77	40	60	0.73	44	60	0.70	49	64

A: 气候云方法 B: 诊断云方法 C: 诊断云方法, 调整时空分辨率

从表 1 可看出, 方法 B 和 C 在各个层次、各预报时刻的 r 和 ϵ 几乎一样, 这说明两种方法在北半球范围内预报效果一样, 方法 C 是可行的. 因此, 以下着重讨论方法 A 和 C 预报结果的差异.

在表 1 中, C 的 r 值 5 天预报中保持在 0.62 以上, 这表明改进的 T42L5 具有较好的中期预报能力. 还可以看到, C 的 r 值明显地比 A 的高: 如第 1 天在 500hPa 层, C 中 r 比 A 高 2%, 第 4 天已高 7%. 而预报均方根误差 ϵ , 第 5 天 300hPa 层, C 比 A 小 12gpm. 随着预报时效的增长, C 与 A 的差别增大, 方法 C 取得了更好的预报效果.

表 2 温度场的预报结果检验(北半球)

层次	试验	24h	48h	72h	96h	120h
300 hPa	A	0.58	0.66	0.63	0.54	0.49
	B	0.61	0.69	0.65	0.55	0.50
	C	0.61	0.69	0.65	0.55	0.50
500 hPa	A	0.86	0.81	0.66	0.52	0.42
	B	0.87	0.82	0.67	0.53	0.45
	C	0.87	0.82	0.67	0.53	0.45
700 hPa	A	0.77	0.70	0.59	0.48	0.41
	B	0.80	0.74	0.64	0.54	0.50
	C	0.80	0.75	0.64	0.55	0.51
850 hPa	A	0.58	0.56	0.52	0.46	0.41
	B	0.66	0.62	0.57	0.54	0.51
	C	0.66	0.62	0.57	0.54	0.51

与表 1 类似,在表 2 中,模式诊断云方法的预报结果明显优于气候云方法.例如 850hPa 和 700hPa 的温度场,第 5 天 C 的 r 值可比 A 高出 10%.

表 3 给出了 500hPa 高度场在区域 40° — 87.5° N, 140° E— 90° W 的中期预报结果的检验.

表 3 500hPa 高度场的区域(40° — 87.5° N, 140° E— 90° W)预报结果检验 (ϵ, ϵ_{per} 单位: gpm)

试 验	24h			48h			72h			96h			120h		
	r	ϵ	ϵ_{per}	r	ϵ	ϵ_{per}	r	ϵ	ϵ_{per}	r	ϵ	ϵ_{per}	r	ϵ	ϵ_{per}
A	0.88	30	61	0.88	48	91	0.79	59	96	0.80	63	105	0.77	77	119
B	0.89	28	61	0.91	38	91	0.84	52	96	0.82	63	105	0.78	77	119
C	0.90	27	61	0.91	38	91	0.85	50	96	0.82	63	105	0.78	76	119

表 3 中所检验的区域是中高纬地区,包含了方法 C 设计的跳点区.比较表中的 B 和 C 可看到, C 的预报效果可与 B 相比,计算时间也基本相同.这说明,本文设计的在计算云和辐射时调整时空分辨率的方法是可行的.此外,从表中可看出,对于该区域的预报效果, C 比 A 也有了明显的提高.如第 3 天 C 的 r 值比 A 高 6%, 而 ϵ 小 9gpm.

从上述的图表分析中可得到这样的结论:模式诊断云方法的确优于气候云方法,它不仅可以提高预报的准确度,而且有利于延长预报时效.此外, C 与 A 相比,对第 3 天的预报结果提高的幅度比第 1 天大得多,第 5 天提高更多.这说明,云和辐射作用在 3 天以上的数值预报中就已经很重要了.因此,中期数值预报中也必须考虑云和辐射作用.

4.2 云量的分布

图 1 是预报第 3 天的模式诊断云和气候云的纬向平均的高、中、低云的云量分布.从图 1a 可看到,气候云的高云量除了在 20° N 附近比诊断云的云量大外,其余地区都比它小,这显然与观测时由于常常被低云挡住而对高云量估计不足有关.在中纬度地区,经常有温带气旋产生,因而有大量的高云;在极地有较多的高云这也符合实际.由此可知,本文中方法 B、C 比 A 在高云量的计算方面大有改进.在图 1b 中,同样由于观测误差,气候云的中云量偏小,而模式诊断云的中云量比气候云大,且和高云量有类似的沿纬度分布特点,这些均与实际相符.从图 1c 可看到,气候云的低云量与诊断云相差得小一些,但仍偏小.

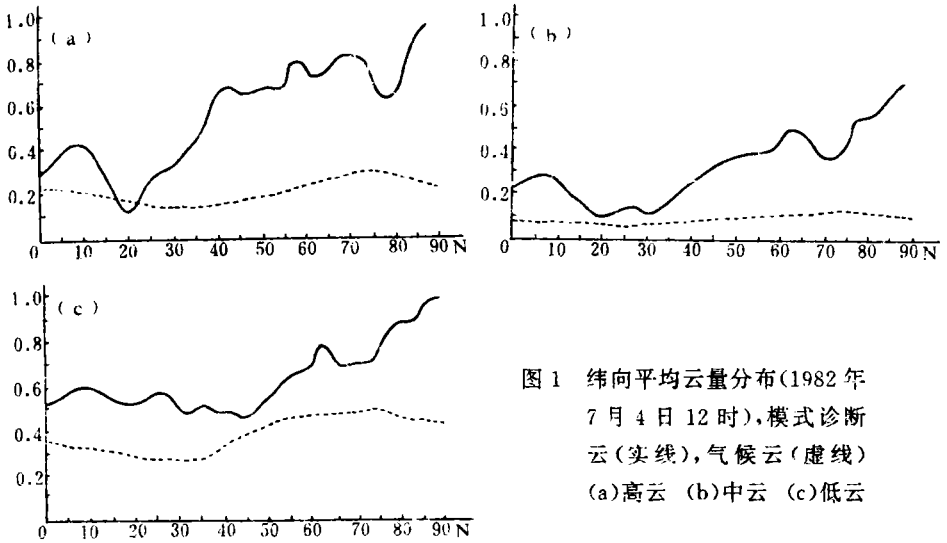


图 1 纬向平均云量分布(1982年7月4日12时),模式诊断云(实线),气候云(虚线)
(a)高云 (b)中云 (c)低云

此外从图 1 还可看到, A 中的高、中、低云在整个北半球随纬度的分布都很均匀,没有明显变化,也就反映不出不同地理位置云量的不同. 而 C 能弥补气候云的不足之处,比较正确地反映了实际云在不同地区、不同高度以及不同时间的分布趋势.

图 2 给出了用改进的 T42L5 谱模式分别以 C 和 A 所作的 48 小时云量预报.

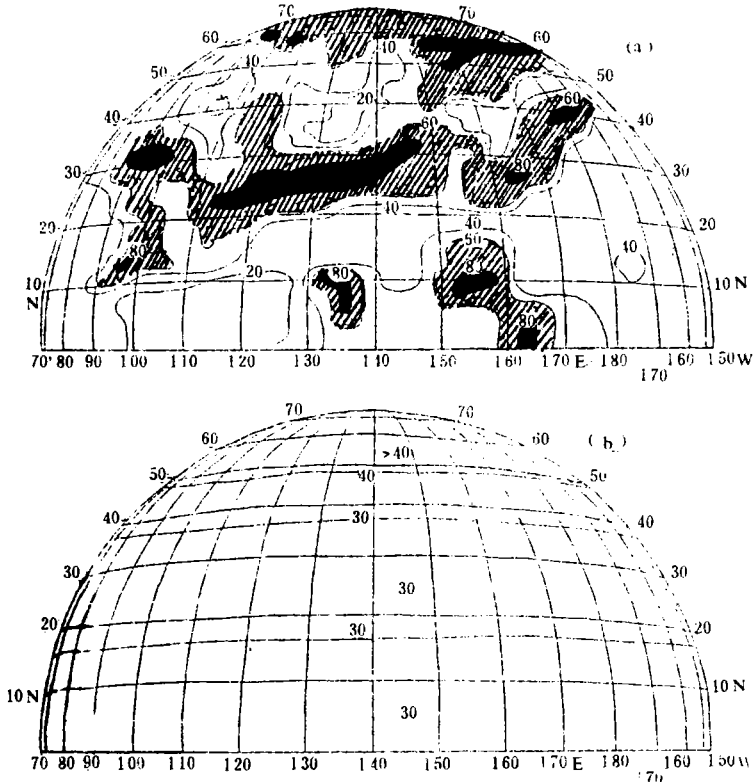


图 2 1982年7月3日12UTC, 0° -- 70° N, 70° E-- 150° W 区域的云量分布(%)
(a)模式诊断云方法的云图 (b)气候云方法的云图

由对应的卫星红外云图可知(图略),从阿留申群岛到日本有一条明显的温带气旋云带,在赤道附近有两块明亮的热带云团,在东南亚一带也有大片的云区,其它地区为零散的云.在用C所作的48小时预报的诊断云图上(见图2a),对于实况中的温带气旋云团、赤道太平洋上热带云团以及其它云区,都对应应有水平覆盖率为40%以上的云区,其中最亮的部分达60%至80%以上,这与实况是比较接近的.图2b是气候云的水平覆盖图,选用云量最大的低云层.气候云的分布较均匀,沿纬圈呈带状分布.在50°N以北,云量为42%—48%,中纬是27%—28%,热带是32%—35%.与卫星云图相比,显然有很大差异,必然造成辐射计算的较大误差,导致A的预报效果逊于C.

4.3 云和辐射对环流场的影响

图3给出了C和A的72小时500hPa高度场预报及其实况.在实况图3a中,在阿拉

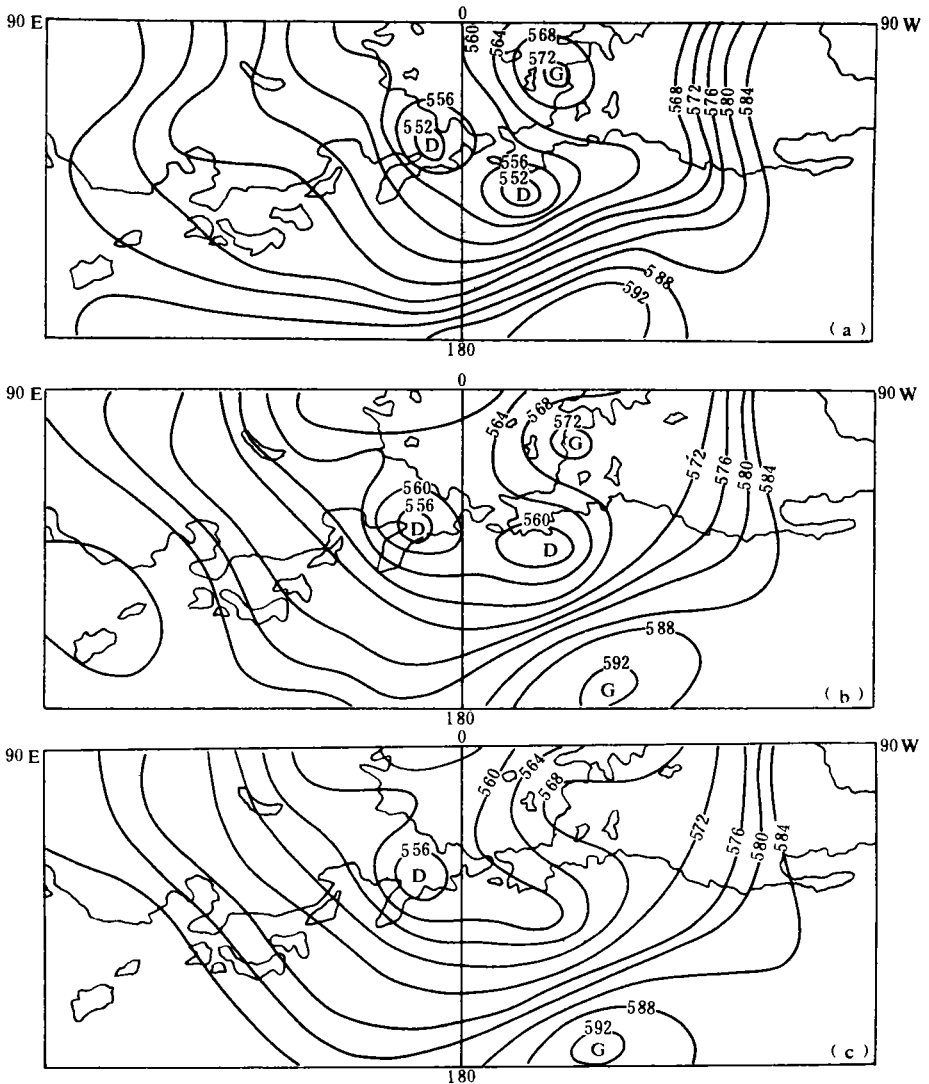


图3 1982年7月4日12UTC,500hPa高度场
(a)实况(用于验证b,c) (b)诊断云模式的预报结果 (c)气候云模式的预报结果

斯加南边和堪察加半岛的北面各有一个低压中心. 在加拿大北部有一高压中心. 从诊断云模式的 72 小时预报结果来看, 高压、低压等系统的位置和强度都与实况接近(见图 3b). 但在图 3c 中可看到, 相应的气候云模式没有报出加拿大北部的高压中心和阿拉斯加南边的低压中心, 系统的强度也偏弱.

4.4 平均经向剖面

图 4 是气候云模式和诊断云模式 72 小时预报的垂直速度的平均经向剖面. 对比图 4a、b 可看到, 在低纬度地区, 诊断云模式预报的上升运动与下沉运动比气候云模式的强

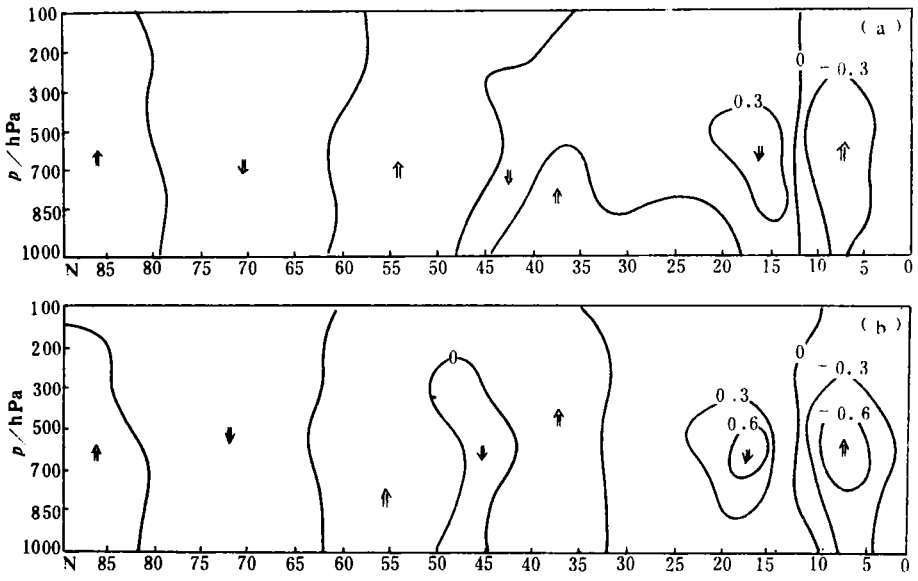


图 4 1982 年 7 月 4 日 12UTC, 垂直速度平均经向剖面(单位: $E-4hPa/s$)

(a)气候云模式 (b)诊断云模式

得多. 如图 4a 中, 在 $5^{\circ}-10^{\circ}N$ 的 ω 为 $-0.3E-4$ (单位 hPa/s , 下同), $15^{\circ}N$ 附近为 $0.3E-4$. 而图 4b 在 $5^{\circ}N$ 附近为 $-0.6E-4$, $20^{\circ}N$ 附近为 $0.6E-4$. 诊断云模式的 ω 比气候云的绝对值大一倍, 也就是说低纬度的 Hadley 环流明显加强. 对比图 1 可得知, 诊断云的高、中、低云量, 都在 $0^{\circ}-15^{\circ}N$ 之间有一极大值, 而在 $20^{\circ}N$ 附近有一极小值, 说明模式在 $0^{\circ}-15^{\circ}N$ 之间产生了深厚的云, 而在 $20^{\circ}N$ 附近则少云. 多云处、少云处分别对应上升和下沉运动中心, 正好与 Hadley 环流对应. 而气候云的云量在 $0^{\circ}-20^{\circ}N$ 之间分布很均匀.

因此, 我们得知, 由于云的不同分布, 影响辐射加热率, 从而对垂直速度产生影响. 云的存在能使低层大气的冷却有所缓和, 因为它能使云底以下的冷却减少, 而在云顶造成强烈的太阳增温. 这就解释了为什么诊断云的低纬 Hadley 环流会加强.

图 5 为气候云模式和诊断云模式 120 小时预报的温度与实况温度之差的平均经向剖面. 从图 5a 可看到, 负偏差最大的中心在 $70^{\circ}N, 850hPa$, 其值为 $-16^{\circ}C$. 而正值最大中心在 $0^{\circ}-45^{\circ}N, 200hPa$, 为 $4^{\circ}C$. 这说明气候云模式的温度预报在中高纬度偏低, 特别是在对流

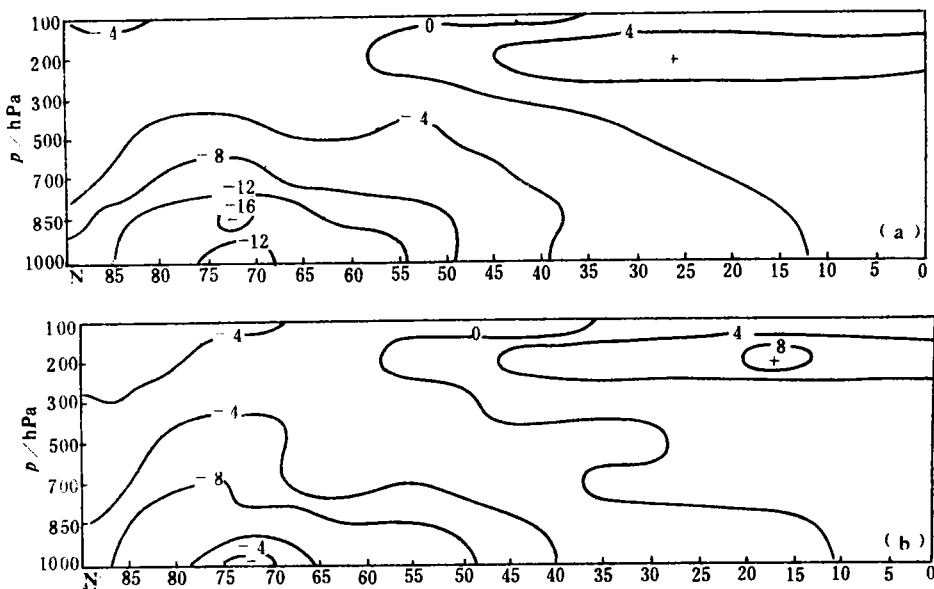


图5 1982年7月6日12UTC,预报与实况温度之差的平均经向剖面(单位:°C)

(a)气候云模式 (b)诊断云模式

层的中下层偏低得最厉害,而在低纬度对流层上层则偏高.由于气候云的中云量在中高纬度偏小,而造成模式在对流层下层温度预报偏低.从图5b可看到,诊断云模式预报的温度在对流层的上层和下层都比气候云的高,说明诊断云模式的中云量和高云量的增加,分别使对流层下层和上层的温度增加.此外,在中高纬度的对流层下层,温度差最大的负值为 -8°C ,比气候云模式提高了 8°C ,说明由于诊断云模式的中云量和低云量的增加,更接近实际的云分布,从而改进了对中高纬地区对流层下层的温度预报效果.

5 结束语

本文利用改进的T42L5谱模式,用几种不同的云模式进行了5天中期数值预报试验,研究了不同云的处理方法所造成的不同云和辐射作用对中期数值预报的影响,得到了以下主要结论:

(1) 诊断云方法能较正确地模拟出大气中云的实际分布,改进了大气中辐射的计算,提高了预报准确度,并延长了预报时效.从误差检验结果来看,第5天的高度(或温度)的预报倾向场和对应的实况倾向场之间相关系数可提高8%.

(2) 云的不同处理方法使云量分布发生很大变化,必然导致辐射过程的差异.用气候云方法模拟中高云量比实际云明显偏小,导致对低压系统预报偏弱,甚至丢掉低压中心.用诊断云方法则云的分布更为合理.并正确考虑了云、辐射和动力学过程的相互作用,对天气系统的中期预报效果有明显改进.

(3) 诊断云方法能较正确地模拟出对应于Hadley环流的上升区和下沉区的云的大值区和小值区,从而加强了模拟的Hadley环流.

参 考 文 献

- 1 Liou K. N. and Zheng Qinglin. A numerical experiment on the interactions of radiation, clouds and dynamic processes in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41(9):1513-1535.
- 2 Zheng Qinglin and Liou K. N. . The role of cloud/radiation in long-range numerical weather prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 1989, 3(5): 603-617.
- 3 Zheng Qinglin, Gu Yu, Song Qingli and Jiang Ping. Numerical study on effects of the Qinghai-Xizang Plateau on formation of the Ural blocking high. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, 7(4): 61-69.
- 4 郑庆林. 非线性平衡方程初值化方法及其在中期数值天气预报试验中的应用. 气象科学研究院院刊, 1987, 2(2): 113-122.
- 5 Zheng Qinglin and Liou K. N. Dynamic and thermodynamic influences of the Tibetan Plateau on the atmosphere in a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43(13): 1340-1354.
- 6 Geleyn J. F., Hense A. and Preass H. J. A comparison of model generated radiation fields with satellite measurements. *Beitr. Phys. Atmos.*, 1982, 55: 253-286.
- 7 郑庆林. 一个全球七层大气环流谱模式及其 30 天长期数值天气预报试验. 气象科学研究院院刊, 1989, 4(3): 234-246.

NUMERICAL EXPERIMENT OF THE EFFECTS OF CLOUD/RADIATION ON THE MEDIUM-RANGE NUMERICAL WEATHER PREDICTION

Zheng Qinglin Hu Yihong Gu Yu

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

The T42L5 spectral model has been developed on the basis of T42L9 model, with the use of model diagnosed cloud instead of climate cloud. Using EC observed analysis of 12UTC July 1, 1982 as initial field, 5-day medium-range numerical experiments have been carried out in different cloud schemes so as to dynamically investigate the effects of cloud/radiation on the medium-range NWP. The numerical results show that: (1) The model diagnosed cloud can well simulate the real distribution of the cloud in the atmosphere and modify the calculation of radiation, and consequently improve the prediction. (2) The amount of middle and high cloud in the climate cloud is much lower than the real cloud, which results in the weakening of the synoptic system, while the model diagnosed cloud can improve the prediction due to the proper consideration of the effects of cloud and radiation. (3) The model diagnosed cloud scheme is able to successfully simulate the maximum and minimum regions of the middle and high cloud which are responded to the upward and downward areas of the Hadley circulation, respectively. In the meantime, the simulated Hadley circulation of the model diagnosed cloud is much stronger than that of the climate cloud.

Key words: Cloud/radiation; Model diagnosed cloud; Medium-range numerical weather prediction.