

ECMWF 预报模式在不同地形方案下的系统误差检验

刘 还 珠* S. Tibaldi

吴国雄*

(北京气象中心)

(ECMWF)

(大气物理研究所)

提 要

Wallace 等^[1]的研究表明, 由于引进了包络地形方案, 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的中期天气预报有所改善。本文是上述工作的继续。所用的资料为原作者的数值试验结果。检验的对象包括纬向平均风场、温度场和经圈环流, 及不同波数域中的涡旋和经圈环流对角动量的平均经向输送。结果表明, 在冬季, 包络地形方案对低纬地区的温度场和风场的预报略有改进, 对总涡旋动量通量的模拟也较好。然而对天气尺度系统的预报和对热带对流及积云摩擦的参数化却有待更进一步改善。

一、引言

地形对大气运动有重要影响。通过转化纬向动能为扰动动能, 在大气下边界激发出地形波^[2]。依据 Charney-Drazin^[3] (参见 Dickinson, 1980^[4]) 条件, 天气尺度波动在垂直方向衰减; 行星尺度的地形波则能通过从纬向气流吸取能量, 在上传过程中不断放大。波动在水平方向的倾斜使角动量从地表为东风的区域向地表为西风的区域输送^[5]。如 Prestley 等^{[6][7][8]}所指出的, 地形波在大气角动量平衡中起着重要作用。Manabe 和 Terpstra 的数值试验^[9]表明, 机械强迫导致角动量通量在静止波和瞬变波之间的再分配。吴国雄和 Tibaldi 的数值试验^[10]证明, 机械强迫还能使角动量通量在不同波数域及在垂直方向重新分布, 并由此指出, 平均经圈环流是检验地形效应的有效工具。地形力矩的存在也影响着西风的强度。吴国雄^[11]指出, 尽管山脉矩以山脉的存在为前提, 但其强度和分布却受到热力作用的强烈影响。例如叶笃正和朱抱真^[12]发现的副热

带山脉矩强烈的年变化, 就与青藏高原冬季为冷源, 夏季为热源有关。在研究地形的动力效应时, 必须考虑大气的热力结构。

Wallace, Tibaldi, Simmons^[1] (下称 WTS) 和 Tibaldi^[13] 的研究认为, 过多的平滑使模式地形降低, 会导致系统误差。他们通过对原来平滑方案中的地形 $\bar{h}$ 增加一个正比于地形起伏程度 σ 的附加高度, 得到了包络地形 $h = \bar{h} + \alpha\sigma$ 。其中 α 为比例系数, 一般取为 $\sqrt{2}$ 。这样, 与在平滑地形方案中相比, 山脉在包络方案中更高, 范围更大。这可以从青藏高原在此两方案中的不同分布 (图 1.1) 看出来。WTS 采用平滑地形 (下称 SMO) 和包络地形 (下称 ENV) 方案, 用 ECMWF 的格点模式 N_{48} ($1.875^\circ\lambda \times 1.875^\circ\varphi$, 15 层), 对 1981 年 1 月份逐日进行 10 天预报, 得到两组试验结果以进行对比分析。结果表明, 新方案减少了系统误差, 尤其在冬季, 高层及中期时效内, 预报得到明显改进。本文即是对该对比试验的逐日预

* 本文为作者在欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 工作期间的工作。

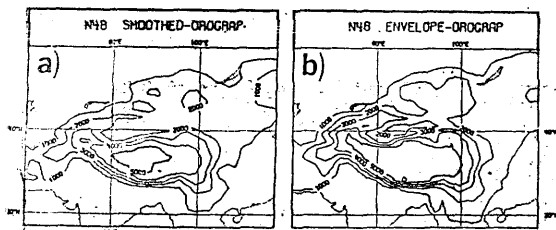


图 1.1 不同地形方案下，青藏高原的高度分布

a为平滑地形，b为包络地形，单位是m

报场系统误差的进一步讨论。

如记每组试验的每个预报日为 $D+i$ ($i=1, 2, \dots, 10$)，则每个预报日有 21 个预报样本相对应。对每一气象要素场 X 的 21 个样本求代数平均，再由逐一预报日的 $\bar{X}_i$ ($i=1, 10$) 减去相应的实况样本 $\bar{X}_0$ ，我们便得到该预报日该场的系统误差 $\delta X_i = \bar{X}_i - \bar{X}_0$ 。

二、纬向平均风场和经圈环流

图 2.1 分别示出 ENV 和 SMO 场合，纬向平均西风的系统性总体误差。为与 WTS 的研究保持一致，只给出 $D+1$, $D+4$, $D+7$ 和 $D+10$ 4 个预报日的误差分布。两组试验中，两半球西风动量在高、低纬减弱；中纬度的西风急流变强。主要误差中心位于平流层。两组试验中，西风急流中心的系统误差及其增长速率大致相当，包络地形的误差略大。两种方案预报的热带东风均偏强，有三个负误差中心。第一个误差中心在北半球 70hPa 赤道附近，ENV 的误差比 SMO 的约大 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。其余两个中心，一个在南半球平流层，另一个在北半球对流层。它们随积分的变化如表 2.1 所示。各预报日 ENV 的预报均比 SMO 有明显改进。例如在第 7 预报日以后 ENV 的误差约只为 SMO 的一半；

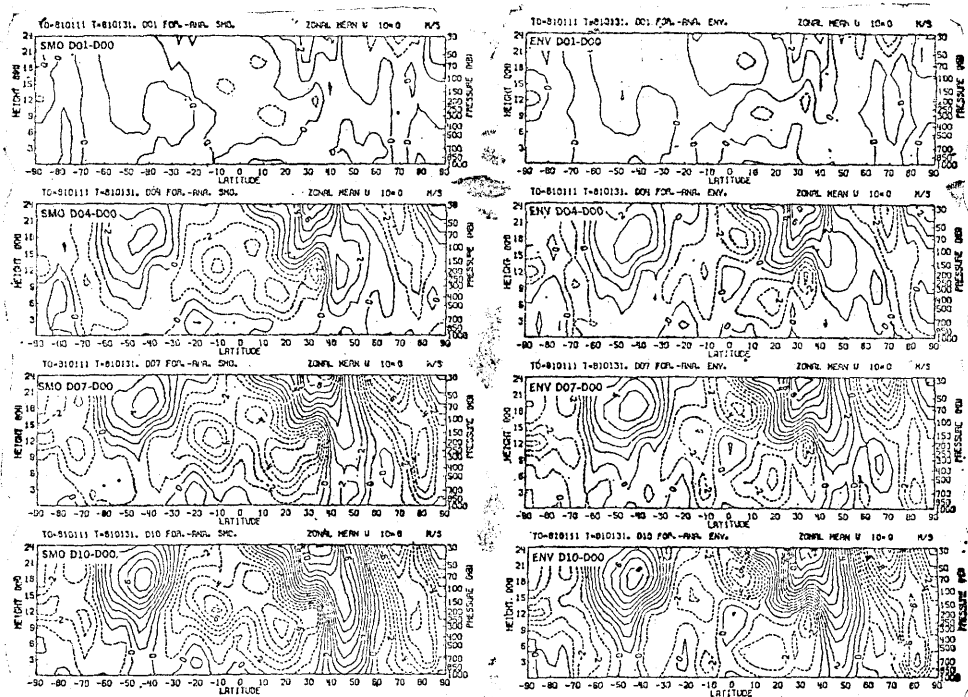


图 2.1 SMO (左) 和 ENV (右) 试验中，第 1、4、7 和 10 预报日纬向平均西风的总体预报系统误差，单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

表 2.1 SMO和ENV试验中热带地区纬向风误差中心随积分的变化, 单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

预 报 日	南半球平流层		中半球对流层	
	SMO	ENV	SMO	ENV
D + 1	-1.38	-0.58	-1.45	-1.33
D + 2	-2.62	-2.17	-1.74	-1.36
D + 3	-3.48	-1.69	-2.93	-2.19
D + 4	-4.35	-2.22	-3.53	-2.60
D + 5	-5.46	-2.70	-4.25	-2.76
D + 6	-5.80	-3.42	-4.90	-3.28
D + 7	-5.95	-3.51	-5.98	-3.40
D + 8	-6.60	-3.60	-6.50	-3.40
D + 9	-7.20	-3.60	-6.30	-3.40
D + 10	-7.30	-3.30	-6.50	-3.20

又如 ENV 第 10 预报日的误差约与 SMO 第 4 预报日的误差相当。在第 4 节对此将作进一步讨论。

图 2.2 给出两试验中平均经圈环流的分布。中纬度的间接环流在两半球均比实况偏强。由于预报模式中涡旋角动量向极输送(见

图 3.1) 和感热的向极输送(图略)偏强, 且以高层为甚, 为恢复静力平衡和地转平衡, 必然有较强的间接环流强迫产生, 以反抗偏强的涡旋输送。

有意思的是热带 Hadley 环流从第 1 预报日起就比分析场显著偏大, 且以包络地形为甚。包络地形能激发出更强的 Hadley 环流是可以想象的, 因为较高的地形能使涡旋角动量输送更向高层集中^[10], 从而激发出更强的次级环流以保持静力平衡。但预报和实况差别之大是十分惊人的, 分析场在垂直方向存在双 Hadley 环流结构, 而模式预报从一开始就只产生单一 Hadley 环流。Schneider 和 Lindzen^[14] 的数值试验表明, 热带地表温度梯度能产生低对流层 Hadley 环流。而深对流的高层加热、积云摩擦和卷出(detrainment)过程能激发出高层的 Hadley 环流, 其强度可达“观测值”的 75%。吴国雄和刘还珠^[15] 用 ECMWF 的分析资料

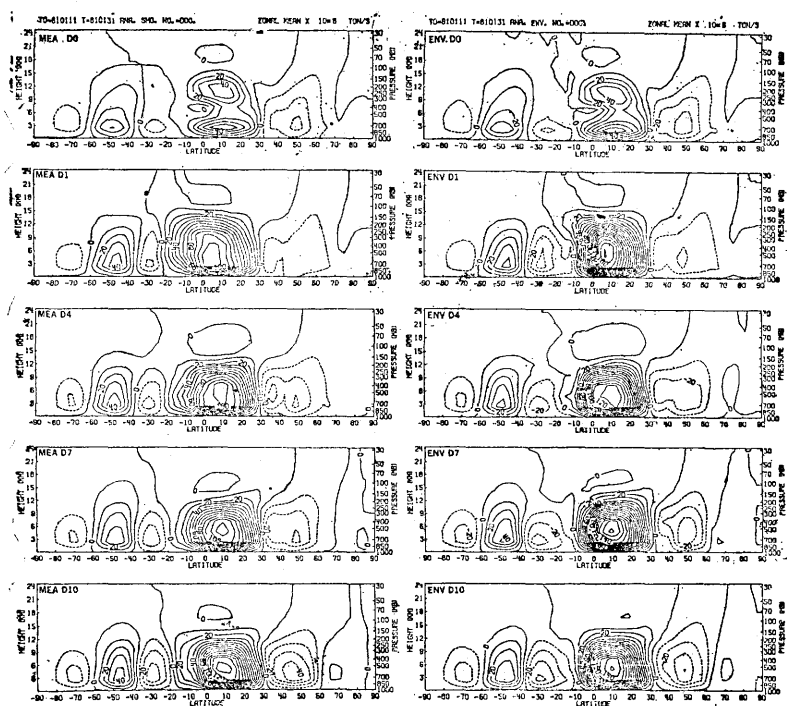


图 2.2 纬向平均经圈质量环流的分析场分布(D0)以及在 SMO (左) 和 ENV (右) 试验中预报场的分布, 单位为 $10^9 \text{ton}\cdot\text{s}^{-1}$

(垂直方向采用 5 个正则模^[16])发现, 热带的 Hadley 环流结构应是双环流而不是经典的单环流。这种双 Hadley 环流结构在冬半球尤其明显。然而, 无论是 SMO 方案还是 ENV 方案都没能报出这种结构。这表明该模式表征 ITCZ 或 CISK 等效应的能力太弱, 亟待改进深对流参数化方案。

三、纬向平均动量通量

图 3.1 显示出两试验中纬向平均动量通量垂直积分的总体误差。虚线表示平均经圈环流量, 粗实线为总涡旋通量, 细实线和点线分别是行星尺度(波数 1—3)和天气尺度(波数 4—9)的涡旋通量。较大的误差发生在中、低纬度。两组试验中的差异可归纳如下:

1. 各预报日中, 低纬度经圈环流的向极通量均偏强, 尤其是冬半球。ENV 的误差比 SMO 的更大。这与 ENV 中 Hadley 环流的预报误差更大是相一致的。

2. 北半球中纬度行星波的通量总是偏大。第 7 预报日后, ENV 的这一误差比 SMO 的明显加大。这可能部分归因于 ENV 中较强的机械强迫作用使行星波在高层进一步加强, 部分归因于 Hadley 环流的过大误差。

3. 第 4 预报日以前, 天气尺度的通量输送在中纬度偏弱。第 5 预报日以后, 这一负误差在 ENV 中继续发展。在 SMO 中, 虽然副热带的负误差继续存在, 但中纬度已变号为正误差。一般地, ENV 的误差值比 SMO 的略大。

4. 在中纬度, ENV 中行星尺度涡旋输送的正误差部分地为天气尺度的负误差抵消, 而在 SMO 中, 此两误差均为正号。于

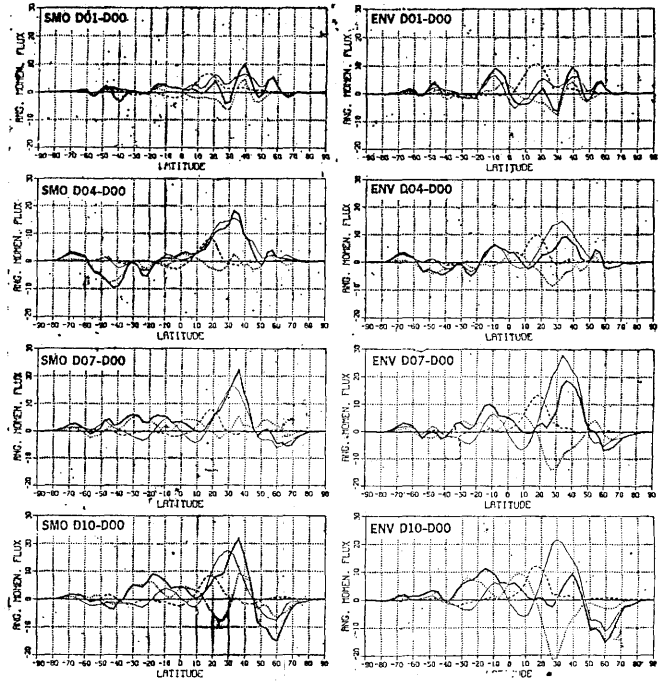


图 3.1 两试验中纬向平均经向动量通量垂直积分的总体误差
单位为 Hadley ($1\text{Hadley} = 10^{18}\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)

是, 在整个中期预报时段, 尤其是前 5 个预报日, 总涡旋动量通量的误差(图 3.1 中粗实线), 在 ENV 中比在 SMO 中明显偏小。因而, 从角动量总平衡的角度看, ENV 方案可能要比 SMO 方案好些。根据 Green^[17]的输送理论, 当一个模式的斜压性变化不大时, 垂直积分的总涡旋动量通量将不会显著变化。于是在 ENV 中, 过大的行星尺度输送误差, 必须由天气尺度的负误差补偿。然而, 此两种误差的因果关系还不十分清楚。

四、纬向平均温度

图 4.1 示出两试验中纬向平均温度的总误差。在中、高纬, 模式存在附加的冷却。在低纬度, 除了平流层和低对流层存在强烈冷却外, 在上部对流层和平流层底部存在明显的增暖。两组试验中, 南北半球平流层的误差中心强度相差无几, 而北半球对流层的

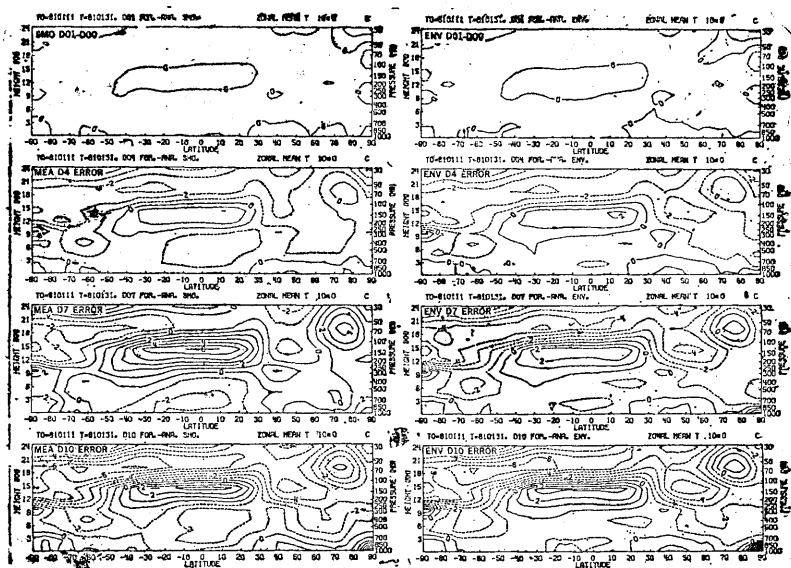


图 4.1 两试验中纬向平均温度的总体误差 单位为 $^{\circ}\text{C}$

负误差中心（见表 4.1）则差异较大。较之 SMO 方案，ENV 的误差在各预报日均较小，且增长较缓慢。例如，第 1、第 4 预报日的误差（ -0.62°C 和 -1.44°C ）约为 SMO 的误差（ -0.90°C 和 -2.11°C ）的 2/3；而第 7、第 10 预报日的误差（ -1.72°C 和 -1.50°C ）则只为 SMO 中相应误差（ -3.23°C 和 -2.91°C ）的一半了。

表 4.1 在 SMO 和 ENV 试验中，北半球低纬度对流层内纬向平均温度的系统误差中心强度随积分时间的变化（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）

预 报 日	SMO	ENV
D + 1	-0.90	-0.62
D + 2	-1.20	-0.73
D + 3	-1.67	-1.19
D + 4	-2.11	-1.44
D + 5	-2.45	-1.61
D + 6	-2.75	-1.72
D + 7	-3.23	-1.72
D + 8	-3.31	-1.65
D + 9	-2.98	-1.59
D + 10	-2.91	-1.50

在两组试验中，两半球的上部对流层均出现低纬增暖和中纬冷却的现象。它导致副热带上层温度梯度增大，与图 2.1 中副热带平流层西风偏强相联系。例如两组试验中的第 7 预报日，在 30°N 附近，100hPa 到 200hPa 之间的温度误差约为 $4^{\circ}\text{C}/17$ 纬距，这可导致每上升 1km，西风增加 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。在图 2.1 中同一地区 100hPa 和 200hPa 之间的西风差异约为 $5-6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，与上述热成风切变量相当。此外，在 SMO 中，低对流层强烈的冷却使 18°N 附近的温度梯度减弱约 $1^{\circ}\text{C}/10$ 纬距，这与该纬带 700hPa 到 400hPa 的 $-2.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速切变也很好地对应。看来，风场的误差与温度场的误差有关。后者既与模式的对流参数化方案不够精确有关，也与次网格物理过程（如湍流、海气相互作用等）的参数化有关。

五、讨 论

在不同的地形方案 ENV 和 SMO 中，副热带西风急流预报过强的现象没有明显差

别。然而, 包络地形的引入减少了原来平滑地形方案中对流层热带东风过强的误差。这与 ENV 中热带对流层的负温度误差比 SMO 中的相应误差明显减小有关。

包络地形减少了中纬度总涡旋角动量通量的误差。这有助于改善模式大气的行为, 至少是在角动量平衡方面。然而, 在包络地形试验中, 行星波和天气尺度波各自的角动量输送误差却较大。换言之, 总涡动输送误差的减少是由于各波段误差增大但符号相反而得到的。在 ENV 方案下, 天气尺度的动量输送在北半球副热带存在着更大的负误差, 这或者是由于天气系统太弱, 或者是系统的水平倾斜太弱所致。那里正是青藏高原所在的纬度。因此, 天气系统的误差加大可能与地形处理不当有关。吴国雄和陈受钧的数值试验^[18]表明, ENV 中地形的强烈水平扩张能导致对 α 尺度天气系统预报的失真。这种过度的水平扩张很有可能对天气尺度系统的预报也有明显影响。然而, 确切的答案还须从更多的数值试验和诊断来得到。

ECMWF 模式对经圈环流, 尤其是 Hadley 环流的预报误差是明显的。看来它与地形方案的直接关系不大。较大的可能是模式对 ITCZ 和热带 CISK 的表征不够确切。所以, 进一步改善对积云摩擦、卷出效应的参数化似乎是不可少的。

经过 10 年的努力, ECMWF 的中期预报水平已达到世界第一, 但正如 Lorenz^[19] 的误差理论所表明的, 还有很大改善的余地。ECMWF 计划在 1994 年把确定性预报 (以 60% 距平相关定义) 从目前的 6 天半提高到 12 天^[20], 克服上述指出的一系列系统误差, 将为实现这一宏伟计划提供可能。

致谢: 欧洲中期天气预报中心为本研究提供了计算条件。第 1 和第 3 作者对 ECMWF 同事们所提供的协助表示感谢。

参考文献

- [1] Wallace, J. M., S. Tibaldi and A. J. Simmons, 1983, Reduction of systematic forecasting errors in the ECMWF model through the introduction of an envelope orography, Quart. J. Roy. Meteor. soc., 109, 683—717.
- [2] Eliassen, A. and E. Palm, 1961, On the transfer of energy in stationary mountain waves, J. Geof. Pube., 22, No. 3, 1—23.
- [3] Charney, J. G. and P. G. Drazin, 1961, Propagation of the planetary scale disturbance from the lower into the upper atmosphere, J. Geophys. Res., 66, 83—109.
- [4] Dickinson, R. E., 1980, Planetary waves, theory and observation. GARP Pub. series, 23, WMO, 51—84.
- [5] White, R. M., 1949, The role of mountains in the angular momentum balance of the atmosphere, J. Meteor., 6, 353—355.
- [6] Priestley, C. H. B., 1951, A survey of the stress between the ocean and atmosphere, Australian J. Sci. Res., 315—328.
- [7] Newton, C. W., 1971, Global angular momentum balance, earth torques and atmospheric fluxes, J. Atmos. Sci., 28, 1329—1341.
- [8] Oort, A. H. and H. D. Bowman, 1974, A study of the mountain torque and its inter-annual variations in the northern hemisphere, J. Atmos. Sci. 31 1974—1982.
- [9] Manabe, S., and T. B. Terpstra, 1974, The effects of mountains on the general circulation of the atmosphere as identified by numerical experiments, J. Atmos. Sci., 31 3—42.
- [10] Wu Guo-xiong (吴国雄) and S. Tibaldi, 1984, The effects of mechanical forcing on the mean meridional circulation of the atmosphere, ECMWF Tech. Memo. 112 pp42. Reading, U. K.
- [11] Wu Guo-xiong (吴国雄), 1984, The nonlinear response of the atmosphere to large-scale mechanical and thermal forcing, J. Atmos. Sci., 41 2456—2476.
- [12] 叶笃正, 朱抱真, 1958, 大气环流的若干基本问题, 科学出版社, pp160.
- [13] Tibaldi, S., 1983, On the relationship between the systematic error of the ECMWF forecast model and orographic forcing, AIP conf. proc., No. 106, 397—417.
- [14] Schneider, E. K. and R. S. Lindzen,

1977, Axially symmetric steady-state models of the basic state for instability and climate studies. part I. Linearized calculations, J. Atmos. Sci., 34, 263—279.

[15] 吴国雄, 刘还珠, 时间平均全球大气环流统计, 气象出版社, 待出版。

[16] Hollingsworth. A. and G. Cats, 1981, Initialization in the tropics. ECMWF workshop on Tropical Meteorology and its Effects on medium range weather prediction at middle latitudes. 105—141.

[17] Green, J. S. A., 1970, Transfer properties of the large-scale eddies and the gene-

ral circulation of the atmosphere, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 96, 157—185.

[18] Wu Guo-xiong (吴国雄) and Show-jun Chen (陈受钧), 1985, The effect of mechanical forcing on the formation of a mesoscale vortex, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111, 1049—1070.

[19] Lorenz. E., 1982, Atmospheric predictability experiments with a large numerical model, Tellus, 34, 505—513.

[20] 吴国雄, 1986, 中期数值天气预报的现状和展望, 气象, 12, No.3, 2—7.

Verification of systematic errors of ECMWF prediction model with different orographic schemes

Liu Huan-zhu*

Beijing Meteorological Centre S. M. A.

Stefano Tibaldi

European Centre for medium-range weather forecasts, Reading, U. K.

Wu Guo-xiong*

Institute of Atmospheric physics, Academia Sinica, Beijing, China

Abstract

The envelope orography scheme developed by Wallace et. al. has been shown to improve medium-range weather forecasts of ECMWF. Their numerical experiment data are used for this research. Verifications include zonal mean westerly wind, temperature and meridional circulation, mean meridional flux of angular momentum due to meridional circulations and planetary and synoptic scale eddies. Results show that the introduction of this scheme improves predictions of zonal temperature and wind fields in tropical troposphere, and simulates better the total eddy angular momentum flux. However predictions of synoptic scale systems and parameterizations of tropical convection and cumulus friction have to be improved further.

* This study was completed when the author was on leave and worked at the ECMWF in 1984.