

IAP T42L9 全球谱模式加热场的诊断*

李双林¹⁾* * 张道民²⁾ 纪立人²⁾ 王盘兴¹⁾

1) (南京气象学院, 南京 210044)

2) (中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 就一次出梅时副高北进过程, 对 IAP T42L9 全球谱模式加热场与利用 ECMWF 同化系统资料根据热力学方程反算的加热场进行了比较。结果表明: 模式参数化加热场的水平分布基本合理, 但低纬和南半球中高纬地区加热偏弱; 参数化加热的垂直分布在北半球比较合理, 但在南半球与反算法的结果有较大差别。这些结果对模式能很好地预报北半球中高纬环流形势演变, 较好地预报西太平洋副高变化及预报的副高系统性偏弱给出了较好的解释。

关键词 全球谱模式 非绝热加热 诊断

1 引言

非绝热加热的非均匀分布是所有大气运动的原因, 但是它不能被直接观测, 只能间接推断。在数值模式中, 它是通过对诸如辐射、感热和潜热输送、水汽相变等物理过程参数化来计算的, 这种参数化计算加热的方法称为正算法, 非绝热加热的计算误差是模式系统性误差的主要来源之一。另一方面, 总非绝热加热又可以通过实况资料根据热力学方程计算出来, 称为反算法。对模式加热场进行诊断就是对模式加热场(包括净辐射加热、凝结潜热、感热等)与反算法的加热场进行比较, 诊断出模式加热场的计算误差, 为改进模式提供参考依据。Klinker 和 Sardeshmukh^[1]将 ECMWF 模式直接计算的加热场与反算法计算的加热场进行比较, 分析了 ECMWF 预报模式的系统性误差。Tiedtke 等^[2]和 Arpe^[3]研究了物理过程参数化方案对 ECMWF 误差来源的重要性。Fortelius^[4]对 1979 年 2 月的 FGGE-II 资料正、反算法加热场和水汽汇进行了定性和定量分析, 发现 ECMWF T63 模式生成的总加热的水平分布定性上是合理的。水汽汇的垂直分布二者也相似。但是, 正、反算法的非绝热加热的垂直分布二者相差较大。在热带对流层低层模式正算法的加热场是强的辐射冷却而反算法是净的加热, 这种不合理的冷却甚至在强烈的净凝结加热的地方也存在。从定量上看, 正反算法的非绝热加热和水汽汇存在较大差别。本文就 1995 年 7 月 5~9 日出梅时西太平洋副高北进天气过程, 对 IAP T42L9 全球谱模式加热场进行了诊断分析, 为模式的进一步改进提供部分依据。

2 预报试验

IAP T42L9 全球谱模式是中国科学院大气物理研究所纪立人等^[5,6]开发的。它相比

1997-10-09 收到, 1998-01-09 收到修改稿

* 本文得到中国科学院大气物理研究所所长基金和国家自然科学基金项目 49775261 共同资助

* * 现作为武汉中心气象台定向培养博士生在中国科学院大气物理研究所学习

ECMWF 同类模式的重大改进是引进了标准层结近似(或称静力扣除法)、垂直方向采用仿地形 σ 坐标。模式包括的主要物理过程有辐射、垂直湍流输送、表面过程、大尺度凝结和积云对流、水平扩散、次网格尺度地形重力波拖曳等,具体参数化方案见文献[6]。

1995 年江淮梅雨的出梅时间是 7 月 9 日。分析 1995 年 7 月 5~9 日北半球 500 hPa 高度场实况图(图略)、7 月 5 日,西太平洋副热带高压 588 位势什米线西端位于华南,西脊点约位于 112°E ,592 位势什米线的北脊点位于 31°N ,离日本主岛南端约 1~2 个纬度,高压主体中心经度约为 142°E 。欧亚地区是典型的双阻型梅雨形势,鄂霍次克海阻高,乌拉尔山阻高及贝加尔湖处的低槽都十分清楚。7 月 6 日,588 线西脊点及跨华南的范围没有明显变化,592 线北界略有北抬,与 7 月 5 日相比,最明显的变化是鄂霍次克海阻高强度有所减弱,不再存在 568 线的闭合中心。到 7 月 7 日,环流的变化十分明显,588 线跨大陆范围明显扩大,592 线北界北抬 2 个纬距以上,已跨到日本岛,592 闭合中心即副高中心西进也十分清楚,鄂霍次克海阻高相比 7 月 6 日减弱非常明显,阻塞形势已崩溃,只是维持一个弱的高压脊,乌拉尔阻高和贝加尔湖低槽也减弱了。7 月 8 日、9 日,基本维持 7 月 7 日的环流形势,588 线北脊点继续稍有北抬,592 线虽有所南落,但副高主体中心西进。总之,7 月 5~9 日环流的演变是一种典型的副高北跳,环流突变的出梅环流形势演变过程。

对这次以副高北进为特征之一的出梅天气过程,以 7 月 5 日 20 时为初始场,对模式 IAP T42L9 积分 7 天作了预报试验。由 7 月 7~9 日 3 天 500 hPa 高度场形势图可见(图略),模式对中高纬系统的预报相当成功,鄂霍次克海阻高的崩溃,贝加尔湖低槽的填塞都预报得很好。但是副高的预报明显偏弱,与实况相比,平均低 4 位势什米,预报的 584 线位置与实况的 588 线位置相当。如果把 584 作为副高的特征线,可以看到,模式对副高北进的预报还是成功的。对比 7 月 7 日、8 日、9 日 3 天的预报图看副高的演变情况。7 月 7 日,584 线跨大陆的范围较小,西脊点经度约为 118°E ,588 线包围的闭合中心即副高主体中心经度约为 145°E 。7 月 8 日,584 线跨大陆的范围明显增大,584 线西伸,西脊点经度约为 115°E ,588 线包围的闭合中心明显西移,中心经度约为 135°E 。7 月 9 日,584 线跨大陆的范围继续明显增大,西脊点经度约为 105°E ,588 线包围的闭合中心继续西移。相比 7 月 8 日,588 脊线也明显北抬,跨日本岛的范围明显增大。总之,模式预报的 7 月 7~9 日的副高演变是一种清楚的出梅时副高北进形势。

表 1 是这次预报试验 500 hPa 高度场的检验结果。从表可见,北半球热带外地区可用预报 ($\text{ACC} > 0.6$) 是 5 天以上,全球可用预报平均为 4~5 天,热带地区在第 1、2 天预报较差,在第 3~7 天预报反而变好了一些。这与上述 500 hPa 高度场预报分析结果是一致的。

表 1 预报高度场对气候平均值距平与实况对气候平均值距平之相关系数 ACC

预报区域	7 月 6 日	7 月 7 日	7 月 8 日	7 月 9 日	7 月 10 日	7 月 11 日	7 月 12 日
20~90°N	0.9604	0.8650	0.8101	0.7237	0.6391	0.5284	0.4759
20°S~20°N	0.5068	0.4578	0.6479	0.6009	0.5261	0.6196	0.5936
90°S~90°N	0.9292	0.8689	0.8333	0.7342	0.5617	0.4112	0.3890

3 加热场计算方法

在上述预报试验中,模式对中高纬天气系统的预报相当成功,西太平洋副高的变化趋势的预报也很成功,但预报的副高较实况偏弱(平均偏低4位势什米)。为了从加热场的角度分析模式的预报效果,诊断了7月5~12日非绝热加热场的情况。

3.1 加热场诊断原理

大气中的非绝热加热主要是由净辐射加热、水汽凝结释放潜热加热、下垫面输送的感热加热和动能耗散加热四部分组成^[7],用公式表示:

$$Q_1 = R_a + LP + H + F, \quad (1)$$

其中 R_a 是净辐射加热, L 是相变加热率, P 是降水量, H 是下垫面感热通量, F 是动能耗散加热率。所有这些非绝热加热都是不能被直接观测的,IAP T42L9 全球谱模式非绝热加热的参数化方法在前面已经介绍了。

另一方面,一段时间的平均加热可以用实况资料利用热力学方程计算出来^[8]:

$$q = c_p \frac{dT}{dt} - \frac{RT}{p} \frac{dp}{dt}, \quad (2)$$

其中 q 为平均非绝热加热率,经变换可得

$$q = c_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \left[\frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \theta + \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right], \quad (3)$$

其中 $\theta = T(p_0/p)^\kappa$ 位温, $p_0 = 1000$ hPa, $\omega = dp/dt$, $\kappa = (c_p - c_v)/c_p$, c_p 、 c_v 分别是定压比热、定容比热。

由式(2)可知,只要知道一段时间平均的 $\partial \theta / \partial t$ 、 $\omega(\partial \theta / \partial p)$ 和 $\vec{V} \cdot \nabla \theta$,则这段时间平均的加热率便可计算出来。

模式加热场诊断就是通过上述正、反算法得到的两种加热场的比较来判断模式非绝热加热参数化方案的正确性。

3.2 直接算法加热率的计算

IAP T42L9 积分时间步长是30 min,每积分一步都要得到瞬时加热率,引入辐射、感热输送、重力波阻及降水调整后加热率得到修正,某一非绝热过程参数化之后与之前的瞬时加热率之差即是该过程造成的非绝热加热率,所有非绝热过程造成的加热率之和就是总的非绝热加热率。考虑到加热率在几小时内变化不大,本文每3 h输出一次加热率,把一天中8个3 h瞬时加热率求平均便得到这一天的平均加热率。此处因为垂直坐标是 σ ,模式生成的加热率是在等 σ 面上的,在输出每3 h瞬时加热率时就将它插值到19个等间距等压面(1000, 950, 900, …, 150, 100 hPa)上。

3.3 间接算法加热率的计算

中国科学院大气物理研究所资料中心大气环流数据库存有自1992年以来逐日08时、20时两个时次的1000、850、700、500、400、300、250、200、150、100、70和50 hPa共12层的ECMWF同化系统分析场,包括 H 、 T 、 u 、 v 、 ω 及相对湿度(相对

湿度只有最下面 6 层)。但是, ω 是假定 1 000 hPa 上为 0, 即不考虑地形的情况下通过散度方程计算得出的, 因此, 据式 (3) 计算非绝热加热率时不能使用, 要利用文献[8]的方法计算 ω 。

在计算过程中, 首先将非等距等压面上的 T 、 u 、 v 利用立方样条插值到 1 000~100 hPa 之间等间距 50 hPa 的 19 个等压面上。 $\vec{V} \cdot \nabla \theta$ 的计算取中央差, $\partial \theta / \partial p$ 在最上层 100 hPa 处取前差, 在 1000 hPa 处取后差, 在 1000~100 hPa 之间取中心差。在地表处, 当地面在 1000 hPa 以上时, 利用地形高度与紧邻的两个等压面高度及两层中间的 $\partial \theta / \partial p$ 插值出来; 当地面在 1000 hPa 以下时, 利用 1000 hPa 和 950 hPa 两层的 $\partial \theta / \partial p$ 外插出来。

$t = t_k$ 时刻的某等压面上加热率具体计算公式如下:

$$q_{t_k} = c_p \left(\frac{p_{t_k}}{p_0} \right)^\kappa \left[\frac{\theta_{t_{k+1}} - \theta_{t_{k-1}}}{2 \cdot \Delta t} + \vec{V}_{t_k} \cdot \nabla \theta_{t_k} + \omega_{t_k} \frac{\partial \theta_{t_k}}{\partial p_{t_k}} \right]. \quad (4)$$

也就是说, 计算 7 月 5 日 20 时~6 日 20 时 24 小时平均加热率需用 7 月 5 日 20 时、6 日 08 时、6 日 20 时 3 个时次的资料, 依此可以计算出 7 月 5~12 日共 7 天平均的各层加热率。

3.4 垂直积分的气柱总加热率的计算

垂直积分的气柱总加热率的计算公式如下:

$$Q = c_p \int_{p_t}^{p_s} \left[c_p \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \frac{d\theta}{dt} \right] \frac{dp}{g}, \quad (5)$$

利用梯形积分公式将上面计算的 19 个等压面上和地面的加热率代入便可得到气柱的总加热率。

4 加热场诊断结果分析

由于反算法使用的资料是经过同化系统得到的, 这些资料依赖于具体的同化系统, 不可避免地存在误差, 由它们计算出的非绝热加热场也必然存在误差, 但是由于它是不同于模式正算法得到的, 通过它与模式加热的比较对定性地了解模式能力无疑是有帮助的。

图 1 为垂直积分的 7 月 5 日 20 时~6 日 20 时即模式积分第一天的平均加热率的水平分布, 图中结果未经滤波处理。比较图 1a 和 b 可以看到, 定性上两种方法计算的非绝热加热场有相似的分布, 尤其是极地以外的地区。具体来说: (1) 北半球大陆, 低纬热带海洋对流活跃区及大洋的风暴轴区两者几乎均为正加热区, 北半球其他洋面大部分为冷却区; (2) 南半球副热带以冷却为主, 中高纬冷却区和加热区间隔分布; (3) 东太平洋和东大西洋二者均为较强冷却中心所在地; (4) 大致在印度尼西亚附近洋面、南亚季风区、长江中下游、高原东南部、非洲中部到东北部、南美洲北部至中美洲以及南美东南部地区二者均为较强的加热中心。定量上两种算法主要的加热(冷却)中心的最大加热(冷却)率存在一定的差别。由于结果未经滤波处理再加上前面已指出了的原因, 这些中心值只有相对意义。因此, 总的说来模式参数化的非绝热加热场是基本合理的。

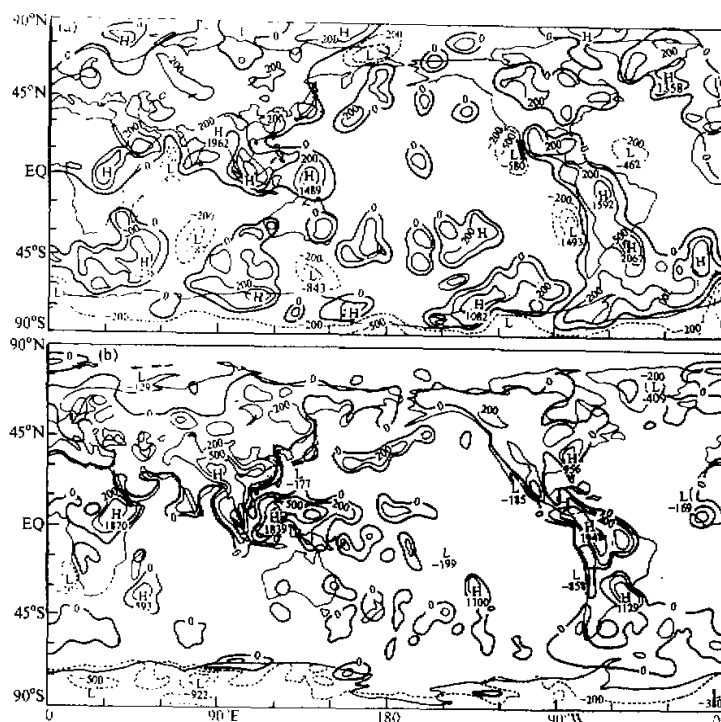


图1 垂直积分的7月5日20时~6日20时平均加热率的水平分布

(a) 正算法; (b) 反算法, 单位: W/m^2

(粗实线为0线, 等值线仅分析0、200、500、1000及-200、-500、-1000)

值得说明的是, 两种算法的加热率在非洲中东部、印缅季风区、印度尼西亚附近洋面对流活跃区、南美洲中北部及东南部等的几个强加热中心最大加热率较强, 都在 $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ 以上, 个别在 $2000 \text{ W}/\text{m}^2$ 左右, 比太阳常数 (约 $1553 \text{ W}/\text{m}^2$) 还大, 这是由于在这天这几个区域都有比较明显的降水。从计算得到的潜热加热 (显水汽汇) 分布图 (图略) 可以看出, 对应这些区域均为强显水汽汇中心, 例如印缅地区的最大水汽汇是 $1021 \text{ W}/\text{m}^2$, 南美洲中北部是 $1471 \text{ W}/\text{m}^2$, 菲律宾附近洋面对流活跃区是 $1235 \text{ W}/\text{m}^2$, 北太平洋中部风暴轴区甚至为 $2277 \text{ W}/\text{m}^2$ 。因此在一天里强降水中心处非绝热加热大于太阳常数也是可以的。

图2是正、反两种算法计算的纬向平均的7月5日20时~12日20时7天平均气柱加热率的经向分布。由图可见, 两种算法有基本一致的分布趋势, 尤其在北半球中高纬度地区, 两者几乎重合, 也就是说模式加热场的计算是比较合理的。但是, 在其他纬度带上两种算法加热场的差别清楚可见: (1) 在低纬热带地区, 正算法的加热率明显低于反算法。尽管最大加热纬度带二者非常一致, 都在 10°N 附近即该季节热带辐合带的

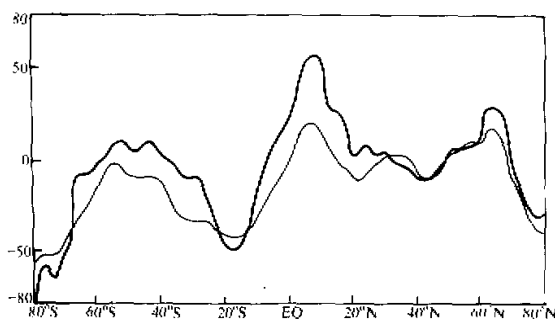


图2 正反算法纬向平均加热率的经向分布
粗线为正算法, 细线为反算法, 纵坐标单位: W/m^2

位置, 但反算法纬向平均加热率约 $60 \text{ W}/\text{m}^2$, 而正算法却只有 $20 \text{ W}/\text{m}^2$, 也就是说, 模式低估了热带地区的加热, 这在一定程度上解释了模式预报副高系统性偏弱的原因。(2) 在南半球中高纬度地区 ($25 \sim 65^\circ\text{S}$) 正算法的加热也明显低于反算法。反算法在其中的 $35 \sim 55^\circ\text{S}$ 纬带平均为净加热的, 而正算法几乎全为净冷却的。(3) 南半球高纬到南极, 反算法冷却弱于正算法;

而北半球高纬到北极, 则是正算法冷却稍弱于反算法。

由图2还可看出, 两种算法都表明纬向平均加热在南北两个半球呈不对称分布, 北半球(夏半球)的加热强于南半球(冬半球)。这从一个侧面说明模式表示出了非绝热加热的季节变化特征。

比较图3a、b可见, 北半球: 两种算法的加热的垂直分布基本相似。热带地区是深厚的加热, 中纬度地区也是加热区, 只是最大加热中心所处高度不一致; 高纬到北极是一致的净冷却。但也存在不一致的地方。反算法在 30°N 附近, 对流层中低层是冷却中心, 该冷却中心与副高中心相对应, 而正算法在该纬度的对流层中低层虽存在冷却中心, 但冷却层不及反算法深厚, 冷却强度也偏弱。副高中心区对流层低层的冷却对气流的下沉是有利的, 是有利于副高加强的。这里模式使得副高区对流层中低层冷却不够从另外一个侧面解释了模式预报副高系统性偏弱。

南半球: (1) 高纬地区 (65°S 以南) 两种算法均为净冷却, 正算法的强冷却主要位于 500 hPa 以下, 反算法的冷却则很深厚。由于数值模式的极区问题, 两种算法都有很大误差, 但从这个结果的定性分析来看, 正算法的结果显得更好一些。(2) 副热带地区 ($30 \sim 10^\circ\text{S}$) 900 hPa 以上两种算法都为净冷却区, 最强冷却中心都在 700 hPa 附近, 强度也相当一致, 所不同的是对流层中高层 300 hPa 附近正算法的冷却比反算法弱。(3) 中纬地区两种算法明显不同, 反算法加热深厚, 而正算法加热仅是 700 hPa 以下。

比较南、北半球, 可以看到两种算法的结果在北半球更相似些。这说明因为南半球主要是海洋, 直接观测资料少, 无论是模式参数化还是资料同化都存在较大误差, 南半球的参数化方案有待进一步改进。

将上述结果同 Fortelius^[5]利用 FGGE-IIb 资料的计算结果进行比较, 发现 IAP T42L9 模式与 ECMWF T63 模式二者都生成了与反算法基本相似的非绝热加热的水平分布, 但这两个模式生成的非绝热加热的垂直分布与反算法的加热垂直分布存在较大区别, 这说明这两个模式有相似的不足之处。

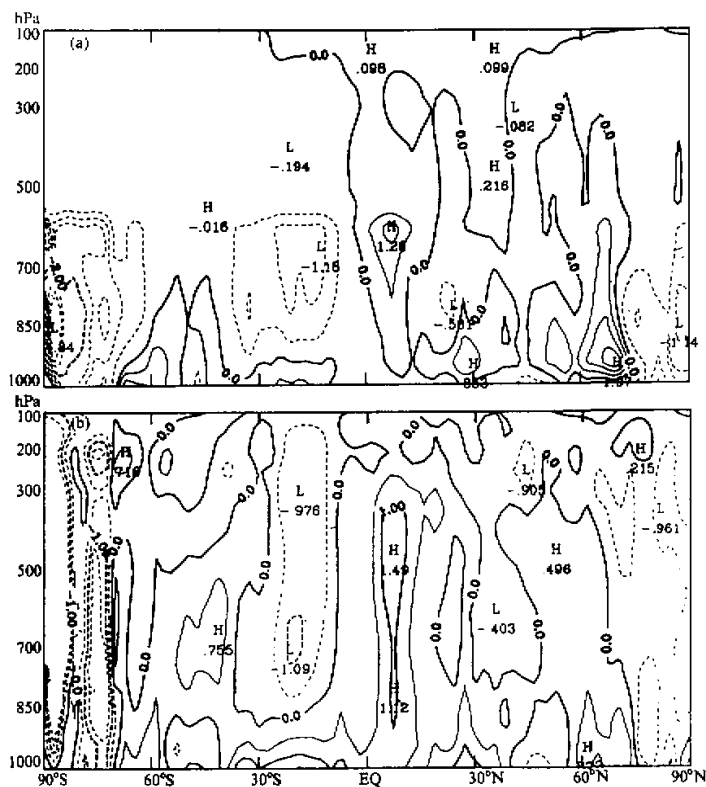


图3 正反算法纬向平均加热率的纬度高度分布

(a) 正算法; (b) 反算法. 单位: K/d

5 主要结论

总结这次过程加热场的诊断结果, 得到如下主要结论:

(1) IAP T42L9 模式加热场水平分布基本合理, 无论从气柱加热的水平分布还是纬向平均加热的经向分布都是如此。但是, 北半球中高纬度地区比低纬地区和南半球更合理一些。模式生成的加热在低纬地区偏弱。

(2) 从加热的垂直分布来看, 模式加热在北半球比较合理, 但在南半球与反算法结果相差较大。

(3) 模式在低纬、南半球及极地的加热计算方案有待进一步改进。

这些结果对模式对于北半球中高纬系统有较强的预报能力、模式能预报副高北进以及模式预报的副高系统性偏弱等给出了较好的解释。应该指出的是, 结论是通过一次副高北进、出梅天气过程的研究得到的, 为了进一步了解 IAP T42L9 全球谱模式的优缺

点, 提高模式的预报能力, 需要进行更多的工作。

致谢: 中国科学院大气物理研究所杨辉副研究员利用她的加热场计算程序计算了7月5日的加热场供作者对比参考, 谨致感谢。

参 考 文 献

- 1 Klinker, E. and P. D. Sardeshmukh, 1987, The diagnosis of systematic errors in numerical weather prediction models. Proc. ECMWF Workshop on Diabatic Forcing, Reading, United Kingdom, 209~214.
- 2 Tiedtke, M., W. A. Heckley and J. Slingo, 1988, Tropical forecasting at ECMWF: The influence of physical parameterization on the mean structure of forecasts and analyses, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **114**, 639~664.
- 3 Arpe, K., 1989, Change in the ECMWF analysis-forecasting scheme and the systematic error of the model, *ECMWF Tech. Memo.*, **161**, 41pp.
- 4 Fortelius, C., 1995, Inferring the diabatic and moisture forcing of the atmosphere from assimilated data, *Journal of Climate*, **8**(8), 224~239.
- 5 纪立人等, 1990, 一个包含非绝热物理过程的全球谱模式及其初步试验结果, 中期数值天气预报研究成果汇编(三), 北京: 气象出版社, 27~40.
- 6 Zhang Daomin, et al, 1995, A global spectral and test of its performance, *Advances in Atmospheric Sciences*, **12**(1), 67~78.
- 7 Yanai, M., et al, 1973, Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moistures budgets, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 611~627.
- 8 He Haiyan, John W. Meginnis, Zhengshan Song and Michio Yanai, 1987, Onset of the Asian Summer monsoon in 1979 and the effects of the Tibetan Plateau, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1966~1989.

The Diagnosis of Diabatic Heating Produced by the IAP T42 L9 Global Spectral Model

Li Shuanglin¹⁾, Zhang Daomin²⁾, Ji Liren²⁾ and Wang Panxing¹⁾

1) (Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044)

2) (Institute of atmospheric physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract As far as one synoptic process is concerned, during which the subtropical high over the western Pacific shifted to northwest and Meiyu at the Yangtze River valley terminated, the diabatic heat parameterized by the model of IAP T42L9 is compared with that derived from assimilated data by means of the "budget" method. It is concluded that the horizontal distribution of the diabatic heat of the model is substantially reasonable, but the heat is smaller than that from "budget" method in the tropical area and middle and high latitude areas in the Southern Hemisphere. And the vertical distribution of the heat in the Northern Hemisphere is also reasonable, but there exists difference between the two kinds of heat in the Southern Hemisphere. These results give an proper explanation that the model can predict variation of synoptic system at middle and high latitudes in the Northern Hemisphere and the subtropical high over western Pacific, and that the subtropical high predicated by the model is lower than that in the real data.

Key words global spectral model diabatic heating diagnosis