

# 分块地形坐标大气环流模式框架的 计算稳定性及数值试验

梁丹青<sup>1</sup> 张 铭<sup>2</sup> 曾庆存<sup>3</sup>

1 空军装备研究院航空气象研究所, 北京 100085

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

**摘 要** 用数值试验方法讨论了分块地形  $\eta$  坐标大气环流模式动力框架的计算稳定性; 采用实际初始场, 该框架能够长期稳定地积分。在积分前 100 d 内总有效能量变化很小, 总质量守恒、各物理量场的数值和波形都得到很好保持, 这表明该框架稳定性好。在分析了该框架的积分结果后可知其合乎物理事实, 与 IAP 2.0 的动力框架相比, 能更好地反映出大地形的环流形势, 这说明有大地形时采用分块地形  $\eta$  坐标要较  $\sigma$  坐标好。另外, 还对青藏高原等大地形的纯机械强迫作了数值试验, 得到了地形强迫平均槽脊的分布特征, 给出了地形纯机械强迫造成的准定常行星波的图像。这些工作表明采用分块地形  $\eta$  坐标处理大地形是合理可行的。

**关键词** 大气环流模式 分块地形坐标 稳定性 数值试验

**文章编号** 1006-9895(2005)03-0354-09

**中图分类号** P435

**文献标识码** A

## A Computational Stability Analysis and Numerical Experiments on the Dynamic Framework of the Atmospheric General Circulation Model in the Partition Terrain Coordinate

LIANG Dan-Qing<sup>1</sup>, ZHANG Ming<sup>2</sup>, and ZENG Qing-Cun<sup>3</sup>

1 *Institute of Aeronautical Meteorology, Air Force Academy of Equipment, Beijing 100085*

2 *Meteorological College, P L A University of Science and Technology, Nanjing 211101*

3 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**Abstract** The computational stability on the dynamic framework of the Atmospheric General Circulation Model (AGCM) in the partition terrain  $\eta$  coordinate is discussed with numerical experiments. It is found that the framework can be run stably for a long time using the real initial field. The change of the total effective energy within 100 days is very small and the total mass is conservative. The magnitude and wave pattern of physical quantity are kept well. It is shown that the framework has better stability. After analyzing the integration results of the framework, it is known that the results agree with physical reality. Compared with the result of IAP 2.0 model, the framework can well represent the general circulation over the high terrain. It also shows that using the partition terrain  $\eta$  coordinate is better than using  $\sigma$  coordinate over the high terrain. The numerical experiments are also carried out on the forced action of the high terrain in the Tibetan Plateau etc. The distribution characteristics on the average trough and ridge of the terrain force are gained. The actions which the pure mechanical force forms quasi-permanent plane-

**收稿日期** 2003-08-04 收到, 2004-01-13 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金重点资助项目 40233027 和国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900

**作者简介** 梁丹青, 女, 1978 年出生, 硕士, 助理工程师, 目前主要从事气候学研究。E-mail: jianlin\_yao@163.com

tary wave are studied. These works also show that it is proper and feasible to deal with the high terrain using the partition terrain coordinate.

**Key words** AGCM, partition terrain coordinate, stability, numerical experiment

## 1 引言

地形的动力和热力作用早已为人们所关注。有关青藏高原对大气环流影响的研究已取得了许多成果, 这些成果表明大地形无论对冬季寒潮活动的路径和强度, 还是对夏季季风低压的形成和相应的季风降水, 均起着重要作用。然而在用大气环流模式对地形进行数值研究时, 目前大多仍选用 $\sigma$ 坐标。当存在陡峭地形时, 倾斜的 $\sigma$ 坐标面会带来较大的计算误差。为适应陡峭地形, 早在1982年和1983年曾庆存<sup>①</sup>和Mesinger<sup>[1]</sup>(1983年作出, 1985年发表)曾分别独立提出分块地形的处理方法。就这两种方法的共性而言, 都是把地形表示为三维阶梯状, 在自由大气内部形成地形侧边界, 避免了在陡峭地形下 $\sigma$ 等值面过于倾斜的缺点; 但就两者不同之处而论, 似乎曾庆存的方法更鲜明简洁, 更能直接和确切地消去计算截断误差。为此, 按照曾庆存的思想<sup>①</sup>, 我们研制了采用分块地形 $\eta$ 坐标的大气环流模式动力框架(简称动力框架)<sup>[2]</sup>。该动力框架中仍然使用了标准层结扣除、IAP变换和可容许替代等先进技术<sup>①</sup>, 这样就可保证完全能量守恒和总有效能量守恒等整体性质, 既可减少模式的计算误差, 也可使模式具有良好的稳定性。目前, 该模式动力框架有9层和21层两个版本, 受计算条件限制, 其水平分辨率仍取 $5^\circ \times 4^\circ$ , 时间积分则采用改进的非线性迭代方案, 时间积分步长取12 min。该模式框架能长期稳定地积分。有关该模式框架的详细情况请参见文献<sup>[2]</sup>, 这里不再赘述。

对模式动力学框架和计算方案进行检验, 最严格的方法是求得方程的分析解, 然后用差分方法得到的数值解与分析解相对比。遗憾地是完全的原始方程组无法求得其分析解。1959年, Phillips<sup>[3]</sup>首次将Haurwitz波用于球面浅水波模式。这种方法很快就成为检验球面大气数值模式的传统工具, 张学洪等<sup>[4]</sup>用大量的理论分析和数值试验对此进行验证, 他们还找到了一类具有弱斜压结构的线性和非

线性Haurwitz波, 并证明其是球面上斜压原始方程模式的近似解, 可用于大气环流模式计算精度的检验<sup>[5~7]</sup>。然而, 用Haurwitz波做初值, 对模式干动力框架作长时间积分, 进而检验其稳定性, 则必须在无地形的前提下, 而该模式的特色就在于分块地形 $\eta$ 坐标系, 若不考虑地形影响,  $\eta$ 坐标就退化成 $\sigma$ 坐标, 此时用Haurwitz波来检验动力框架就毫无意义, 所以我们采用从框架数值积分的结果中分析总有效能量是否守恒的办法, 用以评估和检测该框架的稳定性。

当前, 国际上采用的检验大气环流模式气候模拟效能的方法有两种, 第一种是模式与观测的比较, 但现在仅有干动力框架, 所有导致全球气候变化和季节变迁的物理过程都还没有被考虑, 故该框架数值结果的优劣与否不能依赖于同观测资料的比较, 而主要看数值试验的结果是否具有物理意义; 另一种是进行不同模式相对性能的比较。我们对分块地形 $\eta$ 坐标系大气环流模式的框架和IAP 2.0的动力框架进行分别积分, 比较两者的积分结果, 以期找出两个动力框架计算结果的差异, 从中发现各模式的误差和存在的问题, 进而增加对模式动力框架的认识, 为进一步完善和优化该模式的动力框架积累经验。

最后, 本文还通过数值试验探讨了青藏高原等大地形的纯机械强迫问题, 给出了地形纯机械强迫造成的准定常行星波的图像。

## 2 稳定性分析

图1a给出了积分100 d天全球动能、有效位能和有效表面位能<sup>[2]</sup>的逐日变化曲线。这里之所以取积分100 d, 是为了便于与IAP 2.0等动力框架作比较。由图1a可见, 有效位能先减后增, 到100 d时基本维持在初始值附近; 动能在开始时总趋势略有增加, 积分到25 d天后则开始减小。总的来说, 动能、有效位能和有效表面位能的变化均较平缓, 其变化小于3%。总有效能量的逐日变化如图1b所示, 总有效能量在积分初期有所减小, 这主要与该时期的动能增加有关。IAP 2.0的框架用Haur-

① 曾庆存等, 跨季度数值气候预测, 2002(手稿, 即将由气象出版社出版)

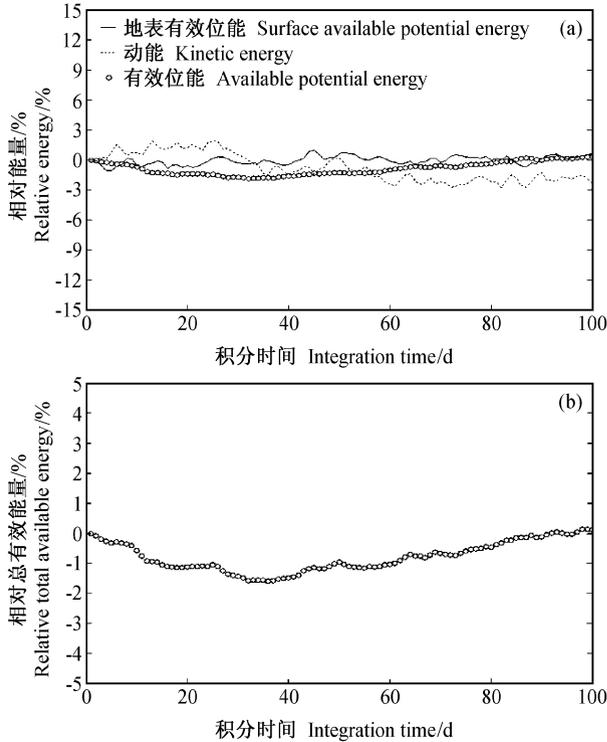


图1 动力框架积分 100 d 各种能量的逐日变化: (a) 动能、有效位能和地表有效位能; (b) 总有效能量  
Fig. 1 Day-to-day variation of energy: (a) Kinetic energy, available potential energy, surface available potential energy; (b) total available energy

witz 波检验, 积分 66 d 总动能的变化小于 3%<sup>[7]</sup>。虽然, 用实际的初始场进行积分本身就存在着较大的系统误差<sup>[8]</sup>, 但动能和总有效能量的变化还是达到了这样的水平, 这说明该模式框架较好地保持了总有效能量守恒的性质。

图 2a~c 是模式动力框架积分 100 d 后纬向平均地面气压、500 hPa 纬向风、500 hPa 纬向平均温度场。从图 2a 可知, 100 d 后的平均地表气压与初始时完全重合, 这说明框架保证了模式大气的质量守恒; 从图 2b、c 还可见到 100 d 后的纬向风场和温度场与初始状态也相当吻合, 但其不如地表气压那样好。

### 3 初始场数值试验结果讨论

该框架积分的初始场是用 NCEP/NCAR 的再分析资料构造出来的, 该初始场含有真实的气候信息(由地形强迫和太阳辐射等造成), 500 hPa 上有明显的槽脊分布, 且南北半球不对称, 南半球的等

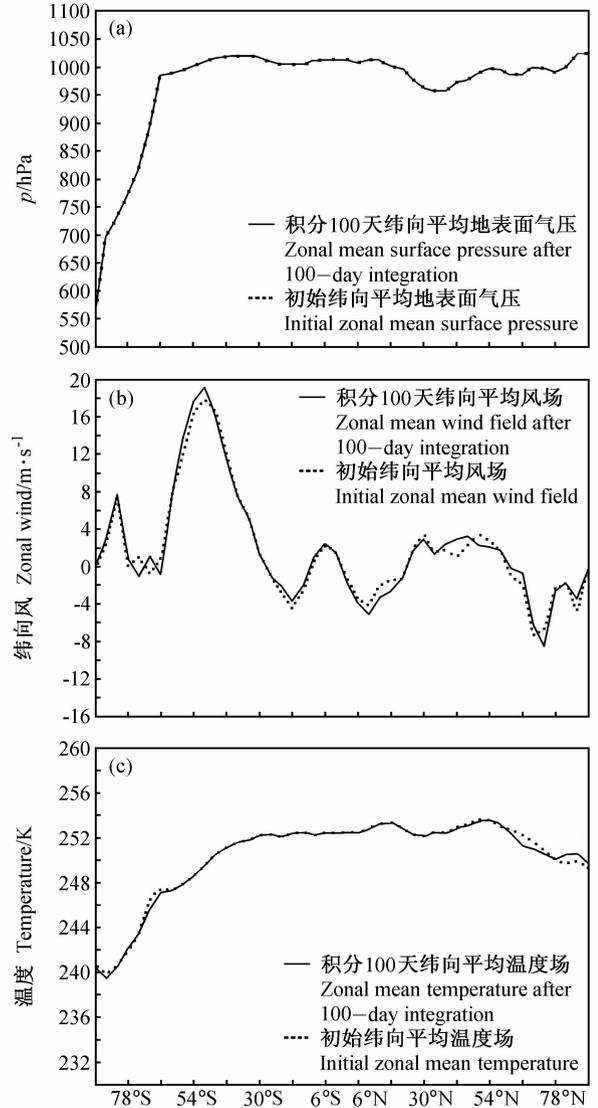


图2 动力框架积分 100 d 后各气象要素的变化特征: (a) 纬向平均地面气压; (b) 纬向平均 500 hPa 纬向风 (负值为东风); (c) 纬向平均 500 hPa 温度  
Fig. 2 Temporal variation of meteorological elements: (a) Zonal mean surface pressure; (b) zonal mean zonal wind at 500 hPa (easterly wind is negative); (c) zonal mean air temperature at 500 hPa

高线较北半球密(图 3a)。相应的纬向西风带南半球也强于北半球, 尤其在中纬度地区, 南半球存在着一个近乎与纬圈平行的强西风带, 风速大于  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而北半球较明显的强西风带则在日本附近和北美东岸, 范围较南半球小(图略)。南极区的温度则明显低于北极区(图略)。以上情况表明, 在此给出的初始场反映的是北半球夏季的大气环流状况, 850 hPa 初始高度场(图 3b)和 200 hPa 初始高度场(图略)的分布也表明了这一点。

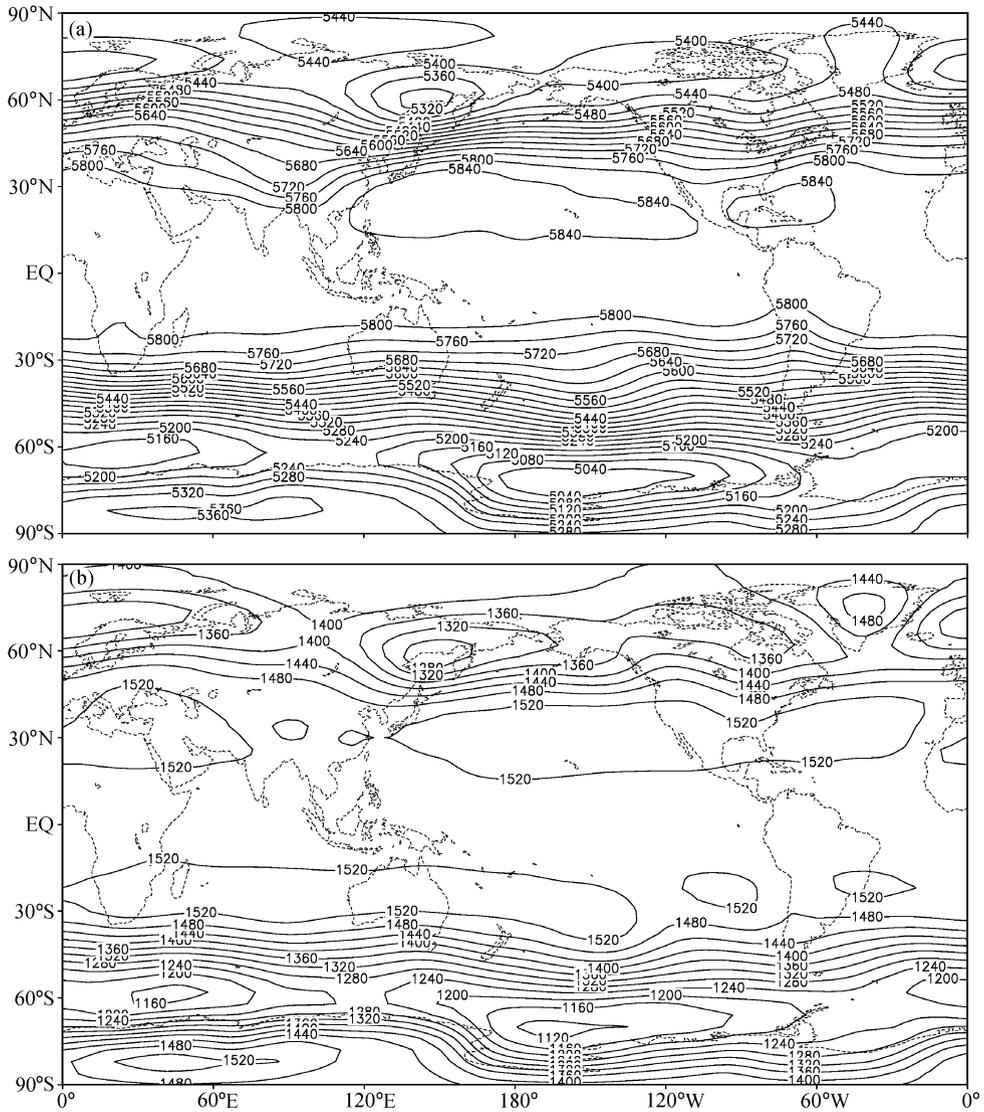


图3 动力框架积分的初始场(单位: gpm): (a) 500 hPa 高度场; (b) 850 hPa 高度场  
Fig. 3 Initial fields of the geopotential height (units: gpm) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa

很明显由于这里仅涉及到模式动力框架而无物理过程,故初始场的某些信息可得以长期保存,这样就可推断该框架积分的结果对夏季实际的大气活动中心 and 平均槽脊会有所体现,但其积分结果也应与一个完整的大气环流模式(包含物理过程和外部强迫)有所不同。下文给出的该框架积分结果则证实了该推断。

为进行具体的分析比较,对该模式和 IAP 2.0 的动力框架(含地形,下同)各积分了一年,以下分析该模式框架的积分结果。

在对流层中层 500 hPa 上,亚洲青藏高原上有冷性低压槽,整个东亚地区有一大槽,北美上空也

有一冷性低压槽,大西洋、太平洋和印度洋上则由暖高压控制;南半球的中纬度地区等高线非常密集(图 4a)。

在对流层低层 850 hPa 上,北半球在青藏高原的南部有一低槽,北部为一弱脊,北美落基山脉附近也有一低槽,格陵兰岛上还有一槽,大西洋、太平洋和印度洋上则由高压区控制;而南半球中纬度地区的等高线则较平直密集(图 4b)。对应的温度场上,东亚和北美附近有弱的冷温度槽,在格陵兰岛为一低温中心,在大西洋、太平洋和印度洋上则为暖区(图略)。当气流遇到高大的山脉时,因山脉的阻挡,迎风坡有空气堆积,气压升高;背风坡空

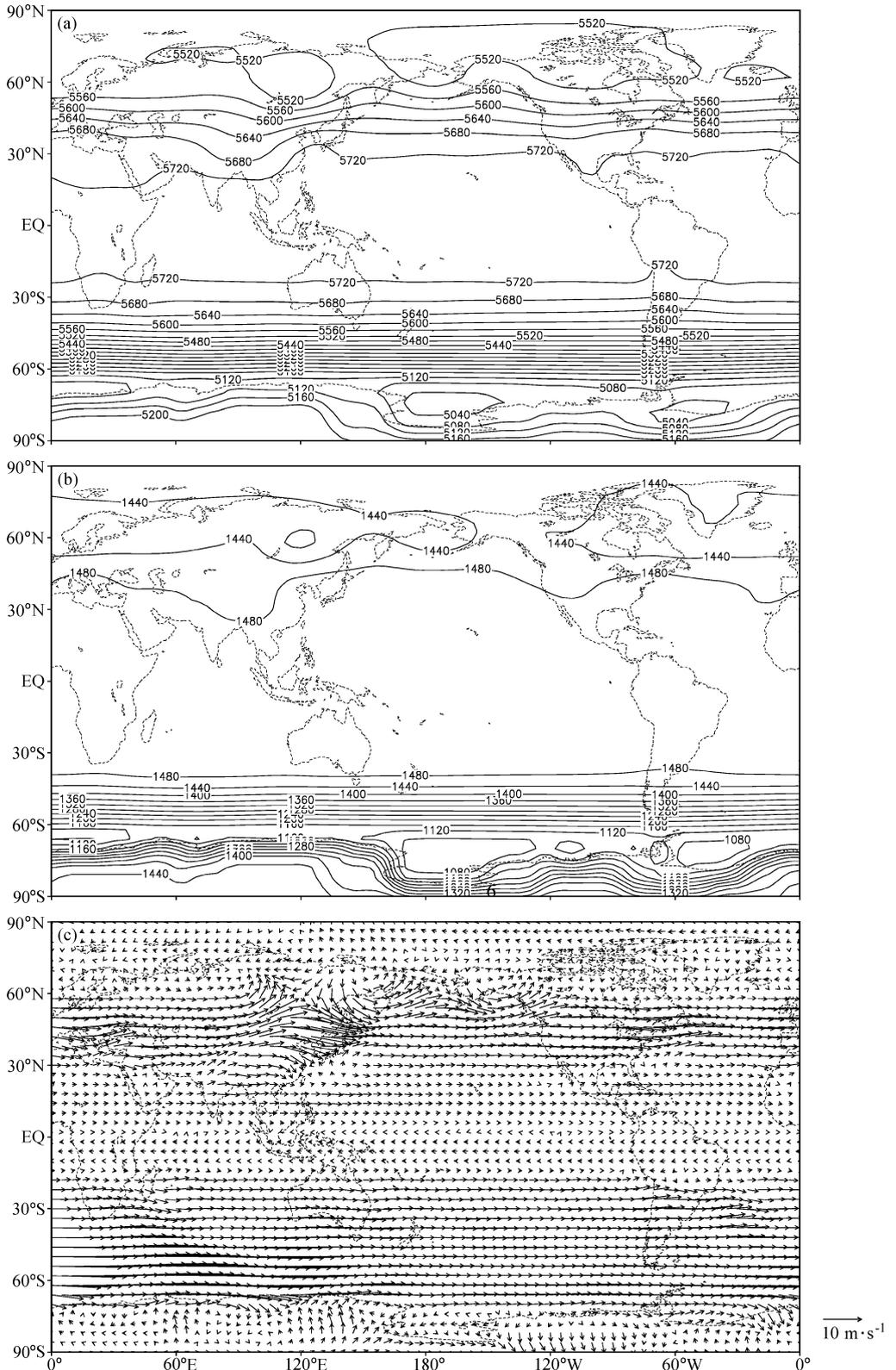


图4 动力框架积分1a后的各气象要素场: (a) 500 hPa 高度场 (单位: gpm); (b) 850 hPa 高度场 (单位: gpm); (c) 850 hPa 二维风矢量场 (单位:  $m \cdot s^{-1}$ )

Fig. 4 Meteorological elements after 1-year integration: (a) 500 hPa geopotential height (units: gpm); (b) 850 hPa geopotential height (units: gpm); (c) 850 hPa wind vectors (units:  $m \cdot s^{-1}$ )

气流散, 气压降低, 因此, 造成了迎风坡的高压脊和背风坡的低压槽, 这就不难解释亚洲青藏高原和北美落基山脉附近的低压槽了。此外, 地形还可迫使气流绕流、爬坡, 从 850 hPa 二维风矢量图可见, 因青藏高原地区大地形的存在, 气流有明显的绕流现象, 而北美落基山脉地区, 绕流则不很明显, 这些均与理论分析和实际观测相吻合(图 4c)。在大西洋、太平洋和印度洋上, 赤道附近为东风且风速很小, 到中纬度地区风向转为西风, 在南半球西风很强, 这与高度图上南半球中纬度地区密集的等高线相对应。

从 500 hPa 的风矢量图中可见在青藏高原上空仍有绕流的现象, 这说明青藏高原迫使气流绕流的作用可以延伸到对流层中层, 而南半球则西风环流强大(图略)。

到了 200 hPa 高度, 除了东亚上空有一低压槽外, 北半球等高线变得平直, 而温度场的分布与低层有明显不同, 北半球中高纬地区有暖中心, 在风矢量场上, 可以看到气流基本以纬向风为主, 强西风环流位于南北半球的中纬度地区(图略)。

由以上计算结果的分析可知, 因所用的是夏季初始场, 故该结果仍保持了该初始场的某些特点, 南半球中纬度地区各层等高线都很密集, 风场上表现为较强的西风环流。北半球各物理量分布较南半球复杂, 系统变化主要集中在青藏高原、落基山脉等有大地形的地区上, 大地形强迫出的低压槽越往高空变得越浅, 这说明若不考虑大地形的热力作用, 大地形的强迫在对流层低层最强, 越往上其影响越弱。

将 IAP 2.0 动力框架模拟的结果与该框架相比后发现, 前者从低层到高层, 青藏高原上空一直由闭合低压中心控制; 南半球模拟的 500 hPa 高度场则基本和该模式框架模拟的高度场接近(图 5a)。在 850 hPa 上, 前者模拟的高度场数值比该框架略有偏高, 北半球低层体现不出气流遭遇地形后应出现的地形低压槽, 仅在青藏高原附近出现一个小的暖性低值中心(图 5b)。另外, 从 850 hPa 风矢量场的分布看, 气流对大地形的绕流作用在 IAP 2.0 动力框架中也体现得不够明显(图 5c)。

比较这两个框架的计算结果后可见其具有以下共同点: 与初始场相比, 两个框架积分 1 a 后的高度场、温度场、风场的大小均比初始状态偏低, 积分

3 a 以后(图略), 大地形处的长波槽脊明显变弱。包宁<sup>[9]</sup>曾用两层模式(IAP 1.0)研究了大地形作用下大气环流的长时期性状<sup>[9]</sup>, 结果证实纬向对称型加热和地面摩擦是使大地形激发的长波槽脊得以维持的重要条件, 这说明如仅有地形强迫, 而无其他物理过程, 那么随着积分时间的增加, 大地形激发出的长波槽脊则会减弱。

## 4 地形对大气环流影响的数值试验

### 4.1 青藏高原对大气环流的动力强迫

青藏高原南北宽度达 15° 纬度, 占中纬度西风带宽度的 1/2; 高原的东西长度有 3000 km, 占所在纬圈长度的 1/10; 青藏高原的平均高度有 4.5 km, 几乎占据了对流层的 1/3~1/2。这样大的障碍物对西风带的机械动力作用是可想而知的。本文在此主要对青藏高原大地形的纯动力强迫作用进行数值试验。

图 6 是该模式动力框架积分 1 a 北半球 500 hPa 和 850 hPa 的温压场, 由图可见, 由于青藏高原的作用, 东亚 35°N 以北的中高纬度出现了两槽一脊的准稳定形势; 而高原下游东亚槽的位置和强度则主要与气流绕流作用有关。但无论爬坡还是绕流都产生冷性槽, 因此, 东亚大槽随高度略向西倾并有所加强。在高原的主体部分则形成了冷性气旋性环流区, 且该系统是个深厚系统, 在 500 hPa 上南支槽也得到很好的描述, 其与高原的绕流作用密切相关。由此, 可认为高原纯动力作用对东亚大气环流的影响主要体现在对西风带的分支和绕流作用。

因高原对纬向气流的分支和阻挡作用主要反映在低层, 从 1000 hPa、850 hPa、700 hPa 二维风矢量及垂直速度分布中还可得出以下结论(图略):

(1) 青藏高原的阻挡作用造成了低空气流的分支, 分支起点约在高原以西 50°E 处, 绕过高原后在 110°E 附近汇合, 北支气流较平直, 南支气流呈气旋性弯曲且多小波动;

(2) 青藏高原的动力作用可以产生南支槽;

(3) 气流在高原处也有爬坡现象, 主要发生在高原的南部。

### 4.2 地形强迫波试验

利用分块地形  $\eta$  坐标动力框架研究地形纯机械动力强迫对准定常行星波的形成作用。方法是将有地形和无地形的框架分别积分后, 把积分得到的月

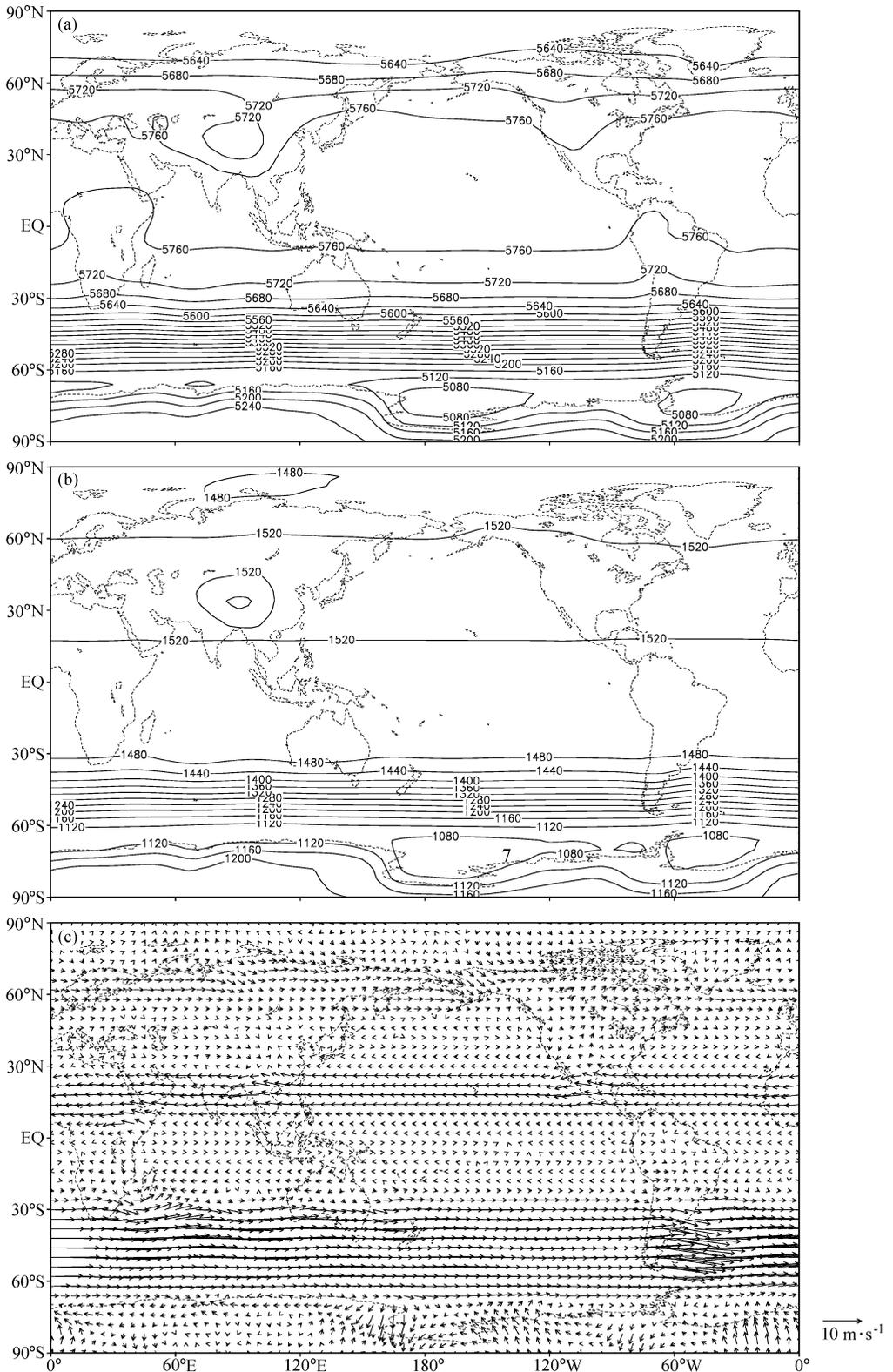


图5 IAP 2.0 动力框架积分 1 a 后的各气象要素场: (a) 500 hPa 高度场 (单位: gpm); (b) 850 hPa 高度场 (单位: gpm); (c) 850 hPa 两维风矢量场 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 5 Meteorological elements after 1-year integration (IAP 2.0): (a) 500 hPa geopotential height (units: gpm); (b) 850 hPa geopotential height (units: gpm); (c) 850 hPa wind vector (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

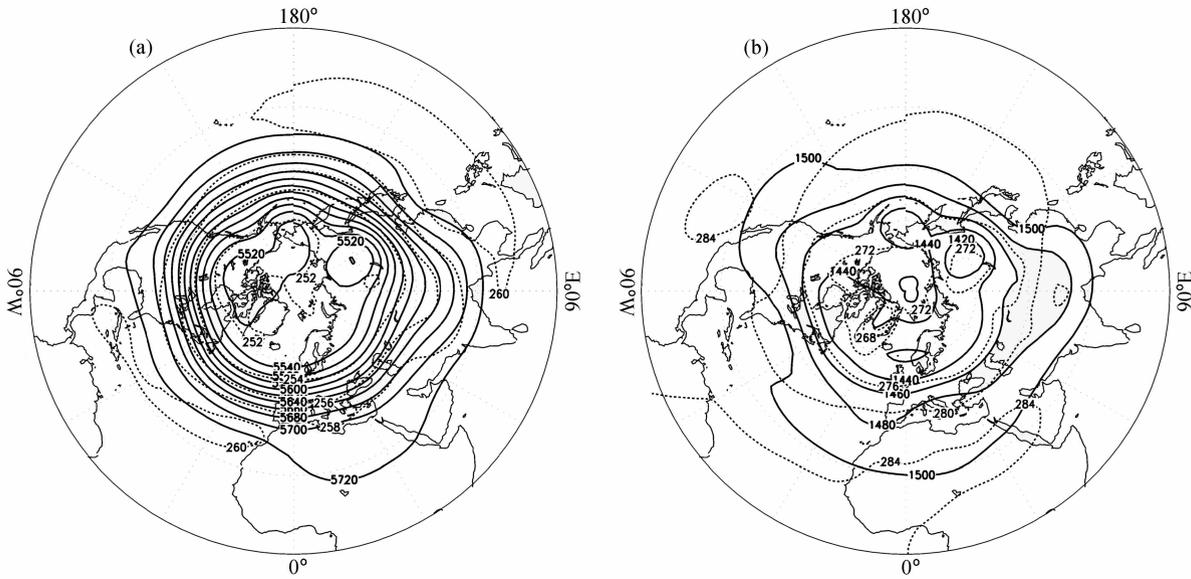


图 6 北半球温压场 (实线: 等高线, 点虚线: 等温线); (a) 500 hPa; (b) 850 hPa

Fig. 6 Temperature and pressure fields in the Northern Hemisphere at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa (Solid line: isohypse, dashed line: isotherm)

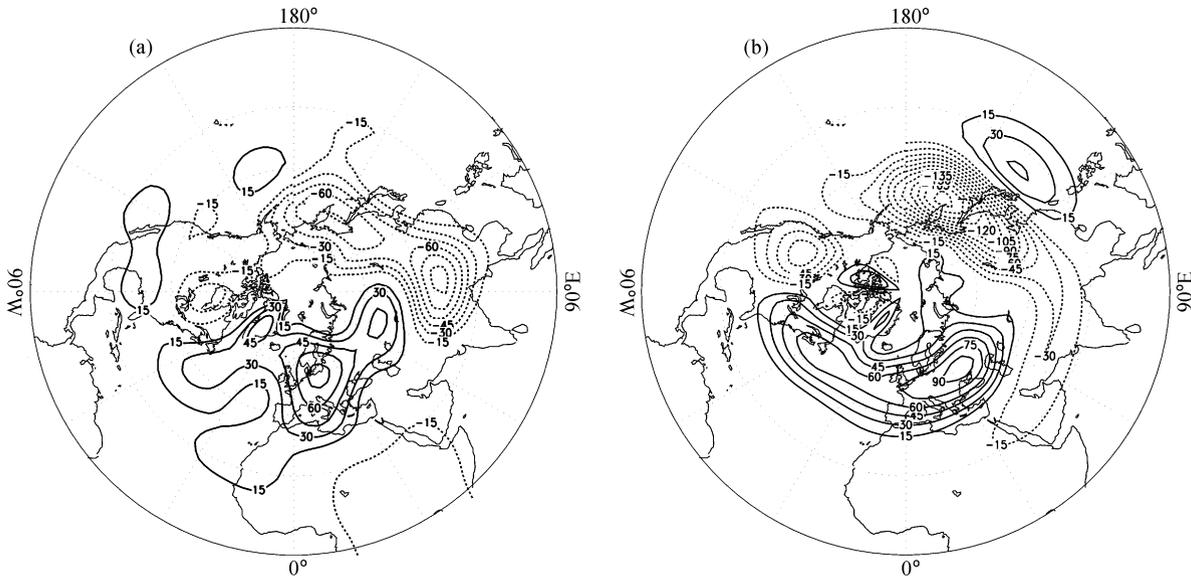


图 7 动力框架积分 3 个月后北半球地形强迫产生的 200 hPa 高度上的准定常扰动系统: (a) 初始场是夏季; (b) 初始场是冬季

Fig. 7 200 hPa quasi-permanent disturbance system forced by the northern hemispheric terrain after 3-month integration. (a) The initial field is for summer; (b) the initial field is for winter

平均高度场相减, 扣除纬向平均场后就可得到地形强迫产生的扰动高度场。采用夏季和冬季的初始场, 对有无地形的该框架各积分 3 个月后, 得到北半球地形强迫产生的 200 hPa 高度准定常扰动系统的分布情况 (图 7a、b)。当初始场为夏季时, 200 hPa 准定常扰动系统在亚洲、北美上空形成低槽,

而在太平洋、大西洋与欧洲上空形成高脊; 当初始场为冬季时, 亚欧大陆形成的低槽很强, 在太平洋上空形成高脊, 在落基山脉上空形成低槽, 在北美东部形成高脊。黄荣辉与岸保勘三郎设计了一个 34 层准地转球坐标模式, 研究地形与定常热源对准定常行星波的形成作用, 得到了北半球实际地形强

迫所产生的定常扰动系统的分布<sup>[10]</sup>。我们的结果与其极为相似。由图 7 还可见, 初始场不同, 地形强迫产生的扰动系统的强弱也不同, 取冬季初始场时, 地形强迫出的扰动系统远强于夏季。

此外, 不论是取冬季初始场还是取夏季初始场, 在进行该框架积分时, 因框架中没有加热项, 故该扰动系统与实际大气中系统的分布有明显差别, 尤其是取初始场为夏季时, 地形强迫所产生的扰动系统与夏季平均季风环流系统的差异比较明显。这说明实际大气中定常扰动系统不仅仅是地形动力强迫的结果, 热力强迫也很重要。

我们还分别取夏季和冬季的初始场对该框架积分 1 a, 与积分 3 个月的结果比较后发现, 扰动系统的分布位置变化不大, 但系统强度明显减弱(图略)。这说明仅有地形强迫而没有加热、地面摩擦等外源强迫, 大地形激发出的长波槽脊则会随积分时间的增加而越来越弱。这点上面已经提到, 不再赘述<sup>[9]</sup>。

## 5 结语

在对该框架的稳定性检测中, 我们用实际初始场进行了长时间积分, 发现其能稳定地积分下去, 在积分前 100 d 内总有效能量变化很小, 总质量守恒, 各物理量场的大小和波形都保持得很好, 这些均表明该框架稳定性好。在分析了该框架积分结果后可知, 其计算的形势场虽不能直接同观测事实相比较, 但计算的结果合乎物理事实。本文还利用该动力框架进行了青藏高原对北半球大气环流影响的数值试验, 并与相应  $\sigma$  坐标的 IAP 2.0 模式的动力框架结果作了对比。在这些试验中, 虽然该框架中的最高阶梯地形取得比 IAP 2.0 动力框架中的最高地形要低(前者为 3587 m 而后者则为 4472 m), 但该框架的确能更好地反映大地形对大气环流的影响, 其计算结果比 IAP 2.0 动力框架的相应结果要更合理些。这也表明对于陡峭地形采用分块地形  $\eta$  坐标要比  $\sigma$  坐标优越, 用其处理大地形是可行的。该动力框架成功地实现了曾庆存提出的分块地形坐标框架的设计思想。

该框架因受网格水平和垂直分辨率的影响, 青藏高原的地理特征与实际尚有些差别, 该框架中的最高地形高度要低于实际地形, 这也会对结果带来一定的负面影响。现在, 我们正用该模式框架的 21

层版本作地形对大气环流影响的数值试验, 其初步结果显示, 21 层版本要比 9 层版本有改善(拟另文发表)。最后要指出的是, 在陡峭地形处, 因在分块地形坐标中地形阶梯很高, 这会给物理过程, 特别是陆面过程和陆气耦合过程的设计带来较大的难度, 对此则应予以足够的重视。

## 参考文献

- [1] Mesinger F, Janjic Z I. Problems and numerical methods of incorporation of mountains in atmospheric models. *Lectures in Applied Mathematics*, 1985, **22**: 81~118
- [2] 梁丹青, 张铭, 曾庆存. 分块地形坐标大气环流模式的动力框架及其整体性质. *大气科学*, 2005, **29**: 301~306  
Liang Danqing, Zhang Ming, Zeng Qingcun. A dynamic framework of the atmospheric general circulation model and its general property in the partition terrain coordinate. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29**: 301~306
- [3] Phillips N A. Numerical integration of the primitive equations on the hemisphere. *Mon. Wea. Rev.*, 1959, **87**: 333~345
- [4] Zhang Xuehong, Zeng Qingcun, Bao Ning. *Proceedings of the International Conference on Nonlinear Mechanics*. Shanghai: Science Press, 1985, 840~846
- [5] 曾庆存, 袁重光, 张学洪, 等. 一个大气环流模式差分格式的检验. *气象学报*, 1985, **43**: 441~449  
Zeng Qingcun, Yuan Chongguang, Zhang Xuehong, et al. A test for the difference scheme of a general circulation model. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1985, **43**: 441~449
- [6] Zhang Xuehong, Liang Xinzhong. Comparison and examination of dynamic frameworks of IAP and OSU AGCM. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1989, **6**: 265~274
- [7] Zhang Xuehong. Dynamical framework of IAP nine-level atmospheric circulation model. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1990, **7**: 67~77
- [8] 张学洪, 包宁, 袁重光, 等. 大气环流模式动力框架对初值的敏感性研究. *中国科学(B辑)*, 1987, (7): 739~750  
Zhang X-H, Bao N, Yuan C-G, et al. Studies on the sensitivity of dynamical frame of a general circulation model to initial conditions. *Scientia Sinica (Series B, in Chinese)*, 1987, (7): 739~750
- [9] 包宁. 包括大地形作用的大气环流模式的长时期性态. 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文, 1988  
Bao Ning. The long-term characteristic of the atmospheric circulation model with macrorelief. M. S. thesis (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1988
- [10] Huang Rong-Hui, Gambo K. The response of a model atmosphere in middle latitudes to forcing by topography and stationary heat sources. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1981, **60**: 78~92