# 欧亚地形对夏季南亚大气环流日变化影响的 数值模拟研究

刘新<sup>1,2</sup> 王军<sup>2</sup> 吴国雄<sup>2</sup> 梁潇云<sup>3</sup> 李伟平<sup>3</sup> 刘屹岷<sup>2</sup>

1 中国科学院青藏高原研究所,北京 100085

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029

3 国家气候中心,北京 100081

**摘 要**利用大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)气候模式 F-GOALS 的大气谱分量 SAMIL,设计了有、无欧亚地形的对比试验,并与 NCEP/NCAR 再分析资料进行比较,通过分析其流场、高度 场、温度和涡度的差异,得到欧亚大陆地形对夏季大气环流场日变化的影响特征。结果表明,欧亚大陆地形对大 气环流和气候日变化的影响主要集中在青藏高原地区。由于青藏高原上空大气对太阳辐射加热场的日变化最为 敏感,随着日间加热场的增强,热力适应造成白天高原低层大气气旋性环流加深,相应地使周边地区向高原辐合 增强,引起高原地区日间的上升运动更为强盛,而使大气高层反气旋环流增强,引起高原上空向外辐散气流增 强。也就是地形效应在白天增强了高原"感热气泵"的效率,使其产生明显的日变化,随之带来高原及周边地区 局地环流强烈的日变化。由于上升运动的日变化,引起高原南部地区降水的日变化,同时降水的增加正反馈于上 升运动,使得上升运动在高原南部地区日变化尤为强烈。

关键词 青藏高原 日变化 "感热气泵"(SHAP)

文章编号 1006 - 9895 (2007) 03 - 0389 - 11 中图分类号 P434 文献标识码 A

# Numerical Modeling of the Influence of Eurasian Orography on the Diurnal Change of Summer Atmospheric Circulation

LIU Xin<sup>1, 2</sup>, WANG Jun<sup>2</sup>, WU Guo-Xiong<sup>2</sup>, LIANG Xiao-Yun<sup>3</sup>, LI Wei-Ping<sup>3</sup>, and LIU Yi-Min<sup>2</sup>

1 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 National Climate Center, Beijing 100081

Abstract The NCEP/NCAR reanalysis data and the spectral atmospheric component "SAMIL" of the LASG/IAP (State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics) Climate Model "F-GOALS" are employed to investigate how the Eurasian Orography affects the diurnal change of the Asian atmospheric circulation in summer. The SAMIL is a spectral model truncated at R42 (2, 8125° lon×1, 66° lat) resolution and with nine vertical levels. It is applied to two experiments; one is with full orography (CON) and the other is without Eurasian orography (noEA). Both experiments are integrated with

**收稿日期** 2005-12-29 收到, 2006-05-16 收到修改稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2005CB422000,国家自然科学基金资助项目 40475027,中国科学院创新项目 KZCX3-SW-231

作者简介 刘新, 男, 1955年出生, 理学博士, 副研究员, 主要从事大气动力学及大气边界层研究。E-mail:lx@itpcas. ac. cn

respect to time for twelve model years. The results of the last 10 years are analyzed, together with the real data, to investigate the features and mechanism of the effect of the Eurasian orography on the diurnal change of the Asian atmospheric circulation.

The influence of the Eurasian orography feature on the atmospheric circulation is the most striking, owing to the unique topography effects of the Tibetan Plateau (TP). The atmosphere over the TP is the most sensitive to the diurnal change of heating, and it results in the vivid diurnal change feature over the TP and its surrounding areas. Its diurnal change is consistent with that of the heating field. While the solar radiation gradually enhances in the daytime, the positive vorticity of lower level atmosphere over the TP increases because of the orographic effect, and the ascending motion is strengthened over the TP and the efficiency of "Sensible Heating driven Air Pump (SHAP)" is also enhanced. All these lead to the most significant diurnal change over the TP and its surrounding areas in the Eurasian continent. The features of the diurnal change of the Eurasian atmospheric circulation in the model simulation are in accordance with both theory and data analysis results in their phase and circulation patterns. It is suggested that the diurnal change of solar radiation heating causes more significant circulation variation over the TP, for the mass of the atmospheric column over the TP is much less than other regions.

Key words the Tibetan Plateau (TP), diurnal change, "Sensible Heating driven Air Pump (SHAP)"

#### 1 引言

大气环流场的日变化从根本上来说是由于太阳 辐射的日变化引起局地热力状况的变化,从而导致 局地环流的日变化。夏季青藏高原地区的加热状 况、局地环流日变化在全球来看是日变化最明显的 区域<sup>[1]</sup>。沈志宝<sup>[2]</sup>在分析了高原上空的气温演变之 后,指出高原地区地面气温日变化剧烈,较高原外 地区要大1~2倍。而冬季高原地面温度的日变化 最大,高原上部分地区的日变温最大可超过 18℃, 甚至大于沙漠地区的温度日较差。

Flohn<sup>[3]</sup>研究了高原天气系统的发展变化趋势, 估计夏季在70%的情况下高原上会出现日、夜相反 的日变化环流,但限于资料他未能给出明确结论和 动力学机理的合理解释。汤懋苍<sup>[4]</sup>利用 1961~ 1970年10年的资料,在分析了青藏高原区域风场 和气压场的演变后指出高原低层气压场有明显的日 变化,往上则日变化减弱。另外,他还指出高原低 层低压系统与高原北部的南疆高压在日变化中有同 时发展的倾向,认为是相同的局地环流造成的结 果。尹道声[5]和马鹤年等[6]在分析青藏高原气旋波 和切变线的成因与发展时指出它们往往是高原边界 层日、夜加热差异的产物。杨伟愚[7]总结了前人的 工作, 且利用 1979 年 5~8 月的 FGGE 资料分析了 高原环流日变化特征并利用涡度方程进行了讨论, 认为太阳辐射的日变化引起高原加热的日变化,促 进了高原的对流活动,进而影响垂直环流和局地大 气环流。刘新<sup>[8]</sup>利用 NCEP/NCAR 再分析资料和 位涡方程诊断分析了青藏高原地区加热场和环流场 的日变化特征,指出由于白天加热增强,可在高原 大气低层制造大量正位涡,使得周边地区向高原的 辐合增强;而在高原大气上层制造大量负位涡并向 周边地区辐散,进而引起高原及周边地区局地环流 的剧烈日变化。

关于大气环流日变化的研究,大部分工作是基 于环流场和其他物理量场的日较差分析的观测研 究。由于青藏高原及周边地区环流的日变化最为显 著,故对亚洲环流日变化的研究主要集中于青藏高 原及周边地区。本文中我们将使用 NCEP/NCAR 再分析资料分析和讨论夏季亚洲环流场的日变化特 征,并利用气候模式 F-GOALS 的大气谱分量 SAMIL,设计了有、无欧亚地形的对比试验,以分 析、探讨地形对环流场日变化的影响。目的是利用 已有的关于地形热力和动力作用的知识,借助数值 模拟方法来探讨地形在大气环流日变化中的影响作 用,将有助于对环流日变化规律和其动力学机制的 理解。

本文的第2节将利用 NCEP/NCAR 再分析资 料讨论夏季亚洲地区环流场的日变化特征,第3、 4节中将分析有、无欧亚地形的敏感性试验结果, 讨论地形对亚洲环流日变化影响的模拟特征及机 制,第5节将讨论地形对垂直环流和降水日变化 影响的模拟特征,最后一节是结论和一些必要的 讨论。

#### 2 亚洲大气环流场的日变化特征

本节中我们将使用 NCEP/NCAR 再分析资料 分析和讨论亚洲环流场及部分物理量场的日变化特 征。图1给出了7月份200hPa的高度场和垂直运 动场变化,可以看到显著的日变化特征。从10年 平均 (1986~1995)的 7 月份 200 hPa 高度场和平 均垂直运动的分布(图 1a)来看,亚洲大陆上空是 强大的南亚高压, 青藏高原北侧是高空急流。在高 原西侧的高压带控制范围里基本都是下沉运动区, 但位于高压中心带里的高原东南部地区却有明显的 上升运动。其他主要上升运动区分布在印度、孟加 拉湾、中南半岛及南海等季风对流降水强盛区域。 在高度场和上升运动场的日较差图(图 1b)中,可 以看到亚洲环流日变化最强的地区在青藏高原及其 周边地区,高原及其邻近地区基本是正变高区域, 正变高中心位于高原及其西北部,变高中心的最大 值超过 35 gpm。它表明当白天高原上加热增强时 相应的其对流层上部的高压增强,形成强烈的日变 化。



图 1 7月 200 hPa 位势高度(单位: dagpm)和垂直运动场(阴影): (a) 1986~1995年10年平均; (b) 1200UTC与0000UTC之差 Fig. 1 Geopotential height field (dagpm) and vertical motion field (shadow) at 200 hPa in Jul: (a) 10-year mean (1986 – 1995); (b) the difference between 1200 UTC and 0000 UTC 与高层环流相比,中低层环流在高原及其周边 地区的日变化表现得更加显著,是亚洲大气环流日 变化最显著的地区。但高原大气的中低层大气环流 日变化特征与高层相反,600 hPa 高度的变高和垂 直运动的平均日较差分布与高层环流有很大不同。 在低层平均高度场(图 2a)中高原处于低压区中, 且高原主体区域均为上升运动区。图 2b 指出高原 上也是日变高和上升运动日变化最大的地区。需要 指出的是,高原北部周边地区大部分上升运动日变 化为负值,与图 4 比较,还可看到高原主体的 90°E 地区白天随高原加热增强,在高原北侧(45°N 左 右)下沉的局地环流也大为增强。也就是说日间高 原上升运动增强使得其北部邻近地区下沉的局地补 偿环流也相应增强。

平均日较差图中高原大气低层白天位势高度降低,而高层则位势高度显著升高,明显表现出环流日变化被加热的日变化驱动的性质。就是说随高原加热增强,高原低层低压环流加深,平均日变高在高原上形成了一个很强的减压中心。与之相伴,高原及周边地区大气低层也是强上升运动日较差中心,整个大气低层白天的上升运动都显著增强,而在夜间减弱与感热加热的日变化(图略)一致,表



图 2 同图 1, 但为 600 hPa Fig. 2 Same as Fig. 1, except for 600 hPa

现出被感热加热日变化影响的性质。它表明高原上 白天的感热加热增强,加强了高原"感热气泵"<sup>[9]</sup> 的效率,使得其低层的抽吸和高层的排放作用更强 烈。图 2b 中可与之对照的是孟加拉湾与我国东南 部到南海一带降水潜热释放大的地区,白天上升运 动是减弱的,这与上述地区夜间降水增强的日变化 特征有关。

图 3 和图 4 是沿 30°N 和 90°E 的风场和位温场 日变化对比的垂直剖面图。图 3a 中可见高原上空 10 年平均 1200UTC (北京时间 18 时)上升运动十 分强盛 (图中上升运动扩大了 10<sup>3</sup>倍),强度甚至大 于其东侧的东亚季风区,是同纬度上升运动最强的 地区。分析位温的平均日变化,通过与 0000UTC (北京时间 06 时)的平均位温分布 (图 3b)比较, 可以看到 1200 UTC 高原上空较低层等位温面的下 凹非常明显,远大于 0000UTC。这表明夏季高原 大气低层白天增温很强,使得其位温明显大于高原 外邻近地区。而在 0000UTC (图 3b)的平均风场 和位温的分布中可以看到高原上空环流和位温的日 变化非常显著。夜间高原上空上升运动变得很弱, 高原西部甚至变成下沉运动,主要是由于高原西部 的地表状况造成其上空大气辐射降温很快所致。而 高原东侧的东亚季风区上升运动却增强了,同纬度 带上最大上升运动中心东移到高原东部到太平洋西 部近岸地区,这是由于以上地区夜间降水增加而产 生的。而在亚洲大陆中纬度地区(30°N附近)无论 位温或上升运动的日变化,在青藏高原及其周边地 区(80°E~105°E)表现都是最强烈的。

图 4a 给出了 1200 UTC 沿 90°E 的经向剖面 图,从中可见高原上空白天强烈的上升运动,仅次 于孟加拉湾对流强盛区。结合图 3a 可以看到青藏 高原周边地区低层大气向高原辐合,高原周边有强 烈的辐合气流流向高原上空,通过与图 4b 比较, 可以看出白天高原加热的增大明显增强了周边地区 向高原的辐合气流。另外,图 4a 中还可见到高原 南部地区上升运动大于北部,这在高原大气的高层 表现尤为突出。另外在经向剖面图中仍然可以看到 与纬向剖面图中类似的位温日变化结果。分析图



图 3 10 年平均 (1986~1995) 7 月风矢量和位温 (单位: K) 沿 30°N 纬向剖面图: (a) 1200 UTC; (b) 0000 UTC Fig. 3 Cross section of 10-year (1986 - 1995) mean wind vector and potential temperature (K) along 30°N in Jul. (a) 1200 UTC; (b) 0000 UTC



图 4 同图 3, 但为沿 90°E 经向剖面图 Fig. 4 Same as Fig. 3, except along 90°E

4b 可以见到夜间随着高原加热变弱,高原上空的 上升运动变得很弱,相应的高原邻近地区向高原的 辐合也变得较弱。这进一步说明由于高原加热场的 剧烈日变化,随之带来局地环流场剧烈的日变化。 这也是造成亚洲大气环流日变化在青藏高原及其周 边地区表现最强烈的原因。相比之下,位于高原南 方的孟加拉湾地区上空则上升运动仍然强盛,甚至 还强于白天的上升运动,这与该地区夜间对流降水 大于白天有关。但显然其日变化远小于高原上空。

# 3 地形对亚洲中低层环流日变化影响 的模拟特征

通过上节的分析,我们看到夏季亚洲环流场的 日变化在青藏高原及其周边地区表现最明显,显然 这与高原的地形效应相关。为了探讨大地形对夏季 亚洲环流日变化的影响机制,本文利用中国科学院 大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟 国家重点实验室(IAP/LASG)的全球海-气-陆系 统耦合气候模式 (GOALS)<sup>[10]</sup>的新版本<sup>[11, 12]</sup>进行 数值研究。其菱形截断的大气环流谱模式的水平分 辨率为 42 波 (大约为 2. 8125°(经度)×1. 66°(纬 度),垂直方向为 9 层(简称为 R42L9)。该模式能 够比较成功地模拟全球大气环流和东亚区域的降水 分布<sup>[13]</sup>。为简单起见,在本文的试验中海洋模式 部分被关闭,海温和海冰是由 AMIP II 提供的 1979年1月至1996年2月有季节变化的气候平均 值给定。模式的辐射收支计算间隔为 3 小时一次。 我们对模式进行了12年积分,取其后10年的积分 结果进行分析,并定义为背景试验(CON)。为分 析欧亚地形对环流影响,我们又设计了无欧亚地形 (noEA)的一组敏感性试验,通过不同时次输出的 对比试验结果(日较差=1200 UTC-0000 UTC)对 比分析地形在亚洲环流日变化过程中的影响作用。

图 5 给出对比试验中 7 月 600 hPa 高度场的日 变化结果,图 5a 是背景试验(CON)的 1200UTC 变高差值分布,值得注意的是青藏高原地区的 600 hPa高度场与周边地区相比位势高度日较差很小,部分地方是负值。其变化趋势与资料分析的结果一致,但不如资料分析明显,这可能是模式位势高度场日间普遍偏强引起的。中亚地区由于夜晚有较强的辐射降温,600 hPa高度有较强的正日较差。图 5b 是去掉欧亚大陆地形(noEA)的敏感性试验结果,从图中可以看出其日变高比较均匀,基本与时差一致,明显表现出与太阳辐射日变化的一致性。比较背景试验和敏感性试验的结果(图 5c),可以看到地形的影响造成了青藏高原上空及其南侧白天有强烈的减压区。这个结果与刘新<sup>[8]</sup>分析的高



图 5 数值试验 7 月 600 hPa 位势高度(单位:gpm)日变化 (1200 UTC-0000 UTC):(a) CON试验;(b) noEA 试验;(c) CON-noEA 差异场。粗线区域代表地形高度大于 1500 m 的 高原主体区域(下同)

Fig. 5 Diurnal geopotential height (gpm) difference between 1200 UTC and 0000 UTC at 600 hPa in Jul; (a) Expt CON;
(b) Expt noEA; (c) CON - noEA. Bold curves denote the Tibetan Plateau areas with height greater than 1500 m (the same below)

原加热造成其上空低层大气的低压系统日变化的结 论一致,这是因为地形对日变化的影响主要是其热 力效应造成的。

600 hPa 风场和涡度场在试验中的表现与高度 场是一致的,图 6 是 600 hPa 等压面的风矢量分 布。从图中可见夏季地形在青藏高原区域造成了强 烈的辐合日变化(见背景试验结果图 6a),在无地 形试验的结果(图 6b)中,风场的日变化较弱且在 高原及周边地区没有明显的辐合区。通过有、无地 形对比分析(图 6c)可以看出地形对风场日变化影 响明显的区域集中在青藏高原及其周边地区,造成 了强烈的向高原辐合的日变化特征。显示出白天随 太阳辐射增强,造成高原加热增大,而使得高原对 周边地区低层大气的抽吸作用更为强烈。从以上分 析可以看出,地形对亚洲中低层大气环流的日变化



图 6 同图 5, 但为 600 hPa 风矢量日变化差异场 Fig. 6 Same as Fig. 5, except for diurnal wind vector difference

影响最显著的地区是在青藏高原及其周边区域,地 形效应造成日间高原低层大气的低压环流加深,使 得日间高原周边地区低层大气向高原辐合增强,也 就是说地形效应日间增加了高原"气泵"的效率。

## 4 地形对高层环流场日变化影响的模 拟特征

上节讨论了地形在亚洲中低层水平环流日变化 中的影响作用。与之对应,我们将在本节中进一步 探讨大地形对对流层高层大气日变化影响的模拟特 征。图7给出试验CON和noEA的7月份200hPa 高度场的日变化。在 CON 试验中 (图 7a),可以看 到高度场的日变化 (1200UTC 与 0000UTC 的高度 差) 差值分布约在 40°N 最大, 可达 20 gpm。变高 差值从西往东到日期变更线大致从20减小到一15, 这是因为本文中我们采用的日较差是 1200UTC-0000UTC 值的结果, 不同经度地区由于时差的因 素使变高差值有不同变化, CON 试验的变差分布 基本反映了时差的影响。但应特别注意的是,在青 藏高原上空也存在一个 20 gpm 的日变高差值中 心,明显大于同经度高原外其他地区上空日变高差 值。此变高中心显然不是仅仅由于时差原因造成, 它使得在高原东部上空形成较强的高度日较差梯 度。在无地形试验(noEA)中(图7b),由时差造 成的日变高从西往东递减的分布趋势仍然存在,大 小与 CON 试验接近但是分布更加均匀, 值得注意 的是, 高原上空不再有日变高中心存在。显然 CON 试验中高原上空日变高中心的产生是由于地 形影响造成的,就是说地形效应造成青藏高原地区 大气上层白天位势高度显著增加,即造成青藏高压 反气旋环流日间更为强盛。

图 7c 是有地形试验(CON)与无地形试验 (noEA)高度场日变化差异的分布图,图中可见两 试验日变化分布的最大差异区位于青藏高原地区上 空,中心差值可达 10 gpm 以上,而欧亚大陆及西 北太平洋除高原外的其他地区上空大气的日变化差 异则很小,差值在 4 gpm 以下。由此可以看出,大 地形对对流层高层环流场的日变化仍有较大的影 响,主要是在青藏高原地区上空,很明显这是与青 藏高原的高大地形的影响有直接关系的。

地形对高层大气温度的日变化也有与高度场相应的影响作用。图 8 是 7 月份 200 hPa 大气温度日



395

图 7 数值试验 7 月 200 hPa 高度场(单位: gpm)日变化 (1200 UTC-0000 UTC): (a) CON试验; (b) noEA试验; (c) CON-noEA 差异场

Fig. 7 Diurnal geopotential height (gpm) difference between 1200 UTC and 0000 UTC at 200 hPa in Jul: (a) Expt CON; (b) Expt noEA; (c) the difference between Expt CON and Expt noEA

变化的分布图。从 CON 试验温度日变化(图 8a) 分布可以看到,日较差最大的地区仍然是青藏高原 上空,可以达到正变温 0.6℃以上。当去除欧亚地 形以后(图 8b),欧亚大陆及西北太平洋上空 200 hPa 大气温度没有显著日变化,其日较差均在 0.3℃以下。比较以上两组试验结果(图 8c)可以 看到,大地形对于对流层高层大气温度日变化的影 响主要表现在青藏高原地区,而对高原外的其他地 区高层大气温度日变化影响较小。

## 5 地形对亚洲垂直环流和降水日变化 影响的模拟特征

以上讨论了地形在亚洲水平环流日变化中的影 响作用。为了解地形对亚洲环流日变化影响的全



图 8 数值试验 7 月 200 hPa 温度(单位: K)日变化(1200 UTC-0000 UTC): (a) CON试验; (b) noEA 试验; (c) CONnoEA 差异场

Fig. 8 Diurnal temperature (K) difference between 1200 UTC and 0000 UTC at 200 hPa in Jul: (a) Expt CON; (b) Expt noEA; (c) the difference between Expt CON and Expt noEA

貌,我们给出了模拟试验结果沿 30°N 和 90°E 位温 和流场的日变化剖面图,以讨论地形对垂直环流场 的影响作用。图 9a 给出背景试验沿 30°N 亚洲垂直 环流和位温场的日变化特征,图中可见高原上空上 升运动的日较差十分强盛(图中上升运动扩大了 10<sup>3</sup>倍),是同纬度上升运动最强的地区。而分析位 温的日变化,可以看到在高原上空有非常明显的等 位温线日变化增值区,其日变化远大于亚洲其他地 区。这表明高原大气白天由于加热增加很大,使得 其位温日较差明显大于高原外周边地区,因此造成 高原上强烈的上升运动日较差。图 9a 指出白天低 层大气向高原辐合更强,近地层大气在高原东西两 边均有辐合气流流向高原上空;高层大气向高原外



图 9 数值试验 7 月份风矢量和位温(单位:K)日变化(1200 UTC-0000 UTC)沿 30°N 纬向剖面图:(a) CON 试验;(b) noEA 试验;(c) CON-noEA 差异场

Fig. 9 Longitudinal cross section of diurnal differences of wind vector and potential temperature (K) between 1200 UTC and 0000 UTC along  $30^{\circ}N_{*}$  (a) Expt CON; (b) Expt noEA; (c) the difference between Expt CON and Expt noEA

辐散更强,从图中可见在 400 hPa 以上高空有明显 的辐散气流向高原外流出。而在对比试验(图 9b) 中平均风场和位温的日较差很小,与亚洲其他地区 基本没有差别。从有、无地形的对比试验结果(图 9c)可以看到,大地形对亚洲上空环流和位温日变 化的明显影响作用,在亚洲大陆中纬度地区(30°N 附近)无论位温或垂直运动的日变化,地形影响在 青藏高原及其周边地区(80°E~105°E)表现都是 最强烈的。地形效应使得夏季白天高原上空上升运 动变得很强,与高原加热的日变化一致;并且在大 气低层增强了向高原辐合,上层向高原外辐散的日 较差,表现出热力驱动的特点。

图 10a 给出了背景试验结果沿 90°E 的经向剖 面图,从中可见垂直环流日变化与纬向剖面的日变 化相同,日变化最大的区域仍是高原上空,远大于 其南部孟加拉湾对流强盛区。在经向剖面图上高原 上空也是位温日变化最大的区域之一,另一个区域 是其南边的孟加拉湾地区,这是由降水的日变化造 成的。结合图 10c 可以看到地形对孟加拉湾地区的 影响远小于对高原地区的影响。图 10a 指出与纬向 的垂直环流日变化相同,日间高原周边低层大气向 高原辐合气流更强,反之高层大气向高原外辐散也 更加强烈。通过与图 10b 比较可以看出地形在高原 大气日变化中的作用,在无地形的试验中,垂直环 流场的日变化很小。比较两者的差值(图 10c)可 见在经向剖面中亚洲大气日变化仍然是在高原地区 最为显著,白天高原加热的增大明显增强了周边地 区向高原的辐合气流。另外,图 10a 中还可见到高



图 10 同图 9, 但为沿 90°E 经向剖面图

Fig. 10 Same as Fig. 9, except for the latitudinal cross section along  $90^{\circ}E$ 

原南部地区上升运动大于北部,这是由于上升运动 带来的对流降水南部大于北部(图 11),而降水释 放的凝结热又促进了上升运动所致。另外,在经向 剖面图中仍然可以看到与纬向剖面图中类似的位温 日变化结果。比较图 11 和图 12 可以看到地形对亚 洲降水分布日变化的影响。CON 试验中白天青藏 高原南部有一个明显的降水增加区域(图 11c),亚 洲其他地区则无明显的降水日变化。而在无地形试 验(noEA)中,降水分布则无日、夜的差别(图 12c),应该注意的是在青藏高原南部日间降水增强 与此区域垂直运动的日变化结果是一致的。

综合分析图 9 和图 10, 可以给出一个地形对亚



图 11 CON 试验 7 月降水 (单位: mm/d) 分布图: (a) 1200 UTC; (b) 0000 UTC; (c) 1200 UTC-0000 UTC 降水日较差 Fig. 11 Precipitation (mm/d) in Jul in Expt CON: (a) 1200 UTC; (b) 0000 UTC; (c) the difference between 1200 UTC and 0000 UTC



Fig. 12 Same as Fig. 11, except for Expt noEA

洲大气垂直环流日变化影响的全貌:青藏高原上空 大气对太阳辐射加热场的日变化最为敏感,这是由 于高原上空大气柱质量远小于平原地区,故相似的 加热变化在高原可引起较平原地区更加强烈的局地 大气环流的变化。由于加热场的日间增强,热力适 应<sup>[14]</sup>造成白天高原低层大气气旋性环流加深,使 周边地区向高原辐合增强,并使得高原地区的上升 垂直环流日间更为强盛。垂直上升运动的日变化, 引起高原南部地区降水强烈的日变化,同时降水的 增加正反馈于上升运动,使得垂直上升运动在高原 南部地区日变化尤为强烈。此试验的结果与 Guo 和 Qian<sup>[15]</sup>利用数值试验得到的结论是相符的。概 言之,由于日间青藏高原上空大气对太阳辐射的日 变化最为敏感,随着高原加热增强,高原上空的垂 直上升运动变得更强,相应的,高原周边地区低层 大气向高原的辐合,高原上空高层大气向周边地区 的辐散也随之增强。地形效应使得高原"气泵"在 白天能够发挥更大的效率。

#### 6 讨论和结论

通过使用一组有、无欧亚大陆地形的对比试验 分析,可以看到欧亚地形对夏季亚洲环流日变化有 重要影响,其影响最显著的地区是青藏高原地区。 由于青藏高原独特的高大地形,高原地区上空大气 柱平均质量大约仅为沿海地区的60%左右,因此造 成高原地区大气对加热场的变化最为敏感,相同的 加热改变可能造成高原地区大气环流较平原地区有 较强的变化。因此,太阳辐射的日变化对高原大气 造成较平原地区更为强烈的日变化。此数值试验的 结果与我们使用 NCEP/NCAR 再分析资料分析夏 季亚洲地区环流场的日变化特征的结果是高度一致 的。

地形的作用造成夏季高原上空大气低层 (600 hPa)白天局地气旋性环流加深,使周边地区 向高原辐合增强,使得高原地区的上升垂直环流日 间更为强盛。地形效应同样引起降水的日变化,高 原南部的日间降水随对流增强而相应增加。与低层 大气的日变化相对应,在对流层高层 200 hPa 的高 度和温度差异场上,依然可以看到青藏高原上空是 高层环流日变化最显著的地区。地形效应造成青藏 高原上空存在一个大气环流日变化最大的区域中 心,它使得高原上空大气高层的反气旋环流在日间 更强,增强了高原上空高层大气向周边地区的辐 散。对温度场的分析表明,高原上空大气的温度日 较差要明显大于高原外的其他地区,日间高原大气 高层温度也有较明显的升温。

通过地形对高原及邻近地区环流场和部分物理 量场日变化的模拟特征及影响机理的进一步讨论, 看到由于加热场的日间增强(太阳辐射的日变化引起),热力适应<sup>[13]</sup>造成白天高原低层大气气旋性环 流加深,使周边地区向高原辐合增强,并使得高原 地区的垂直上升环流日间更为强盛,增强了高原 "感热气泵"的效率,导致高原及其周边地区大气 的强烈日变化特征。由此看来,欧亚大陆地形对亚 洲大气环流日变化的影响主要呈现热力作用影响的 结果。从动力学角度来看,地形对环流日变化影响 的主要源动力是太阳辐射日变化。本文中对大地形 影响的讨论主要结论还有:白天地形效应增强了高 原地区上升,高原北侧地区(45°N左右)下沉的局 地环流日变化。这对我国西北干旱地区旱因有较大 影响作用。尽管本研究的分析和所揭示的事实是符 合大气动力学原理的,但是地形影响的机制是复杂 的过程,还需要从其他方面的工作,如多圈层的相 互作用等,对其进行更深入的研究。

#### 参考文献 (References)

[1] 叶笃正,高由禧,等.青藏高原气象学.北京:科学出版社, 1979

> Ye Duzheng, Gao Youxi, et al. Meteorology of the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979

- [2] 沈志宝. 青藏高原及其邻近地区的温度场. 见: 叶笃正等编. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979. 10~22
   Shen Zhibao. Temperature field over the Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding areas. *Meteorology of the Qinghai-Xizang Plateau* (in Chinese), Ye Duzheng et al., Eds. Beijing: Science Press, 1979. 10~22
- [3] Flohn H. Contributions to a Meteorology of the Tibetan Highlands. Atmos. Sci. Paper, No. 130, Corolado State University, Ft. Collins, 1968
- [4] 汤懋苍. 气压和风. 见:叶笃正等编. 青藏高原气象学. 北京:科学出版社, 1979. 23~38
   Tang Maocang. Pressure and wind. Meteorology of the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese), Ye Duzheng et al., Eds. Beijing; Science Press, 1979. 23~38
- [5] 尹道声.论青藏高原中部的非绝热局地锋生.气象学报, 1979, 37 (4):16~25

Yin Daosheng. On the local diabatic frontogenesis in the central part of Qingzang Gaoyuan. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1979, **37** (4): 16~25

[6] 马鹤年,刘子臣,秦莹,等.青海热低压变性过程的研究.青 藏高原气象科学实验文集.北京:科学出版社,1984.262~ 272

Ma Henian, Liu Zichen, Qin Ying, et al. Research for transformation procedure of Qinghai thermal depression. *Collection for Meteorologic Scientific Experiments of Tibetan Plateau* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1984. 262~272

[7] 杨伟愚. 夏季青藏高原热力场和环流场的诊断分析. 中国科 学院大气物理研究所博士学位论文, 1988. 163~207 Yang Weiyu. Diagnostic studies on the thermal and circulation fields over the Tibetan Plateau in summer. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 1988. 163~207

- [8] 刘新. 青藏高原热状况对亚洲大气环流的影响. 中国科学院 大气物理研究所博士学位论文, 2000. 27~43 Liu Xin. Impacts of the diabatic heating over the Tibetan Plateau on the Asian atmospheric circulation. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2000. 27~43
- [9] 吴国雄,李伟平,郭华,等.青藏高原感热气泵和亚洲夏季
   风.见:叶笃正编.赵九章纪念文集.北京:科学出版社, 1997.116~126

Wu Guoxiong, Li Weiping, Guo Hua, et al. Sensible Heatdriven Air Pump (SHAP) over the Tibetan Plateau and Asian summer monsoon. *Commemorating Collection for Zhao Jiuzhang* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1997. 116~ 126

- [10] Zhang X H, Shi G Y, Liu H, et al. IAP Global Ocean-Atmosphere-Land System Model. Beijing, New York; Science Press, 2000. 252pp
- [11] Wu T W, Liu P, Wang Z, et al. The performance of atmospheric component model R42L9 of GOALS/LASG. Adv. Atmos. Sci., 2003, 20: 726~742
- [12] 包庆,刘屹岷,周天军,等. LASG/IAP 大气环流谱模式对 陆面过程的敏感性试验. 大气科学,2006,30(6):1077~ 1090

Bao Qing, Liu Yimin, Zhou Tianjun, et al. The sensitivity of the spectral atmospheric general circulation model of LASG/ IAP to the land process. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6), 1077~1090

- Wang Zaizhi, Wu Guoxiong, Wu Tongwen, et al. Simulation of the seasonal variation on Asian monsoon with the climate model R42L9/LASG. Adv. Atmos. Sci., 2004, 21 (6): 879 ~889
- [14] 吴国雄,刘屹岷. 热力适应、过流、频散和副高 I. 热力适应 和过流. 大气科学, 2000, 24 (4): 433~446
  Wu Guoxiong, Liu Yimin. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone. I. Thermal adaptation and overshooting. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, 24 (4): 433~446
- [15] Guo H L, Qian Yongfu. Influence of the Tibetan Plateau on cumulative and diurnal change of weather and climate in summer. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 2337~2356