青藏高原对亚洲夏季风爆发位置及强度的影响*

梁潇云

（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；
国家气候中心，气候研究开放实验室，北京 100081）

刘屹岷　吴国雄

（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）

摘　　要

通过数值模拟，研究了青藏高原位于不同经度位置时，亚洲夏季风的爆发和演变情况，从动力和热力学角度分析了青藏高原大地形对亚洲夏季风爆发位置的影响。结果表明，青藏高原的“热力滑轮”作用引起：高原东南面热带陆地上空的偏南气流加强，降水增加，凝结潜热加强；高原西南面热带陆地上空出现偏北气流，降水减弱，陆面的感热加热加强。青藏高原对于亚洲夏季风的爆发地点有锚定的作用，在热带海陆分布的背景下，使亚洲夏季风首先在高原东南面的海洋东岸—陆地西岸爆发，并使亚洲季风降水重新分布。

关键词： 青藏高原，亚洲夏季风，爆发地点，热力滑轮。

1　引　言

亚洲季风是大气对海陆热力差异的季节改变的响应[1~7]。亚洲季风区由冬到夏的季节变化以环流和天气型的突变为主要特征[8~10]，它通常发生在 5～6 月，与亚洲夏季风爆发相联系[11,12]。一般认为亚洲夏季风 5 月上旬首先在南海地区爆发，然后逐渐西传。于 6 月上中旬到达南亚次大陆，印度夏季风爆发[13,14]。吴国雄和张永生[15]对 1998 年的研究发现，亚洲夏季风是首先在孟加拉湾东部和中南半岛的西部爆发，其次在南海地区爆发，最后在南亚地区爆发。他们认为青藏高原的热力和机械强迫作用是导致亚洲夏季风首先在孟加拉湾地区爆发的重要原因。最近，毛江玉[16]通过分析 19 a（1980～1998 年）NCEP/NCAR 气候平均资料证实了吴国雄等的观点。毛江玉的研究还表明，孟加拉湾夏季风的爆发不仅仅取决于低层大气经向热力差异，而且更多地取决于高空副热带高压（副高）脊面附近经向温度梯度的反转。这些研究表明，高耸的青藏高原对亚洲夏季风的爆发起着重要的作用。

亚洲季风是全球最强和最为复杂的季风，这不仅与亚洲和太平洋、印度洋构成的大尺度海陆分布格局有关，也与亚洲南部存在着次尺度的海陆交错分布以及青藏高原大地形的存在有着密切的联系。目前关于青藏高原与亚洲夏季风爆发的动力学的许多方面仍不清楚。亚洲夏季风为什么首先在孟加拉湾地区爆发，亚洲夏季风的爆发地点是如何受青藏高原影响的？是本文的研究目的。

2　模式简介和试验方案设计

本文所用的模式是中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室发展的大气环流谱模式（SAMIL）[17]的 R42L9 版本。水平分辨率为 42 波（大约为 2.8125°（经度）×1.66°（纬度）），垂直方向大气部分为 9 层。模式中的陆面过程采用简化的简单生物圈模式[18]，有 3 层土壤，一层冠层。关于模式详尽的动力框架和物理过程可参见文献[17]。该版本的 SAMIL 模式已被

* 初稿时间：2005 年 9 月 12 日；修改稿时间：2005 年 9 月 15 日。
资助课题：资助课题：中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”，国家自然科学基金项目（40475027，40135020，40221503 和 40375022）。
作者简介：梁潇云，女，博士，主要从事青藏高原、季风气象研究工作。E-mail：lxy@cma.gov.cn。

成功地用来模拟全球大气环流和东亚区域的降水情况[19]。

为了分离青藏高原和海陆热力差异对亚洲夏季风爆发的作用，本文设计了两组数值试验，一组是实际的海陆分布条件下青藏高原位于实际位置和青藏高原主体西移到阿拉伯海北部的两个对比试验，另一组是理想的海陆分布下青藏高原中心分别位于90°E和60°E的两个对比试验。以期通过青藏高原位于不同经度位置的试验结果的比较分析，来研究青藏高原大地形对亚洲夏季风爆发地点的影响。表1为试验方案的设计。每个试验积分了12 a，取后10 a的气候平均做分析，这里的积分是有季节变化的。

表1 试验方案设计

Table 1 Experimental design

试验名称		试验设计
实际海陆试验	控制试验（control）	实际的海陆分布和地形
	青藏高原西移试验（TP-west）	实际的海陆分布，但青藏高原中心位于(32.5°N，60°E)
理想海陆试验	青藏高原90°E试验（TP-90）	理想的海陆分布，理想的青藏高原中心位于(32.5°N，90°E)，中心高度为5000 m
	青藏高原60°E试验（TP-60）	理想的海陆分布，理想的青藏高原中心位于(32.5°N，60°E)，中心高度为5000 m
	无高原试验（EL）	同TP-90和TP-60试验具有相同的理想海陆分布，但无地形高度

3 青藏高原对亚洲夏季风爆发地点的动力和热力学影响

3.1 实际海陆分布试验结果分析

我们采用对流层中上层(500～200 hPa)平均温度经向梯度($\frac{\partial T}{\partial y}$)，来描述亚洲夏季风的建立和推进过程。已有的工作[16,20,21]表明$\frac{\partial T}{\partial y}$值由负变正能够反映亚洲各季风区夏季风爆发共同的本质特征，用它作为度量季风爆发的指标是合理、可行的。亚洲季风具有显著的地域性差异，因此我们选取了孟加拉湾东部到中印半岛西部(BOB，10°～20°N，90°～105°E)、南海(SCS，10°～20°N，110°～120°E)和印度(IDO，10°～25°N，70°～85°E)3个典型季风区域进行研究，主要原因是这3个地区对北半球的大气环流季节变化和亚洲夏季风爆发具有指示意义[13,15]。

图1分别是control和TP-west试验中BOB，SCS，IDO区域面积平均的季风指数的时间演变情况。由图1a可以看到，control试验中亚洲地区的夏季风建立过程是：5月初，孟加拉湾地区夏季风建立，5月15日左右南海地区的夏季风建立，6月初印度夏季风建立。虽然模式结果中亚洲夏季风建立的时间与资料分析的有些差异，但是模式对整个亚洲夏季风的建立过程的模拟还是和资料分析的结果是一致的[16,22]。当青藏高原主体西移到阿拉伯海北部时，亚洲夏季风则是最早在印度地区建立，随后是孟加拉湾地区夏季风的建立，最后是南海地区夏季风的建立(图1b)。整个亚洲夏季风的建立过程和青藏高原位于孟加拉湾北部时有明显的不同，这说明亚洲夏季风的最早爆发地点与青藏高原有着密切的联系。

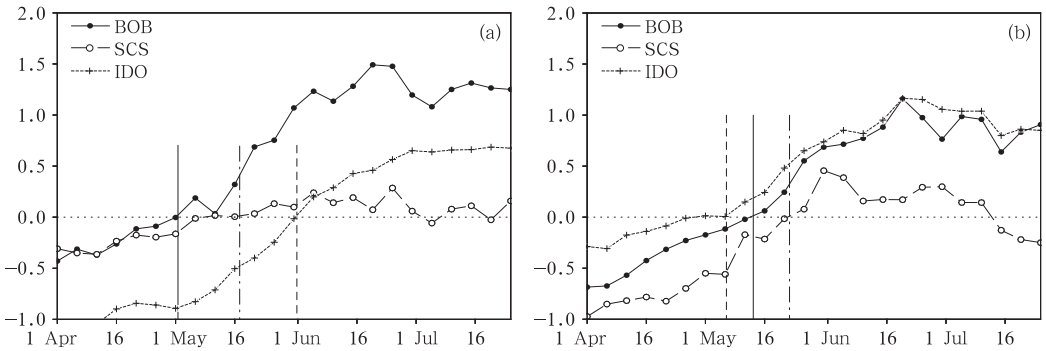

图1 实际海陆分布试验中亚洲季风区对流层中上层(500～200 hPa)平均温度经向梯度($\frac{\partial T}{\partial y}$)的演变($10^{-3}$ K/km)(a. control试验，b. TP-west试验)

Fig. 1 Evolution of meridional temperature gradient in the mid-upper troposphere (500－200 hPa) over the Asian monsoon regions in real land-sea experiments (10^{-3} K/km) (a. control experiment, b. TP-west experiment)

图 2 是对应 control 和 TP-west 试验中亚洲夏季风爆发时的 850 hPa 风场和降水的分布。由图 2a 可以看到在 control 试验中，亚洲夏季风爆发时，青藏高原东南面的孟加拉湾东岸和中南半岛西部上空盛行西南气流，该地区的降水强度达 6 mm/d 以上，而青藏高原西南面的印度半岛上空是西北气流，降水强度不到 2 mm/d。加热场显示（图 3a），中南半岛地区的加热以凝结潜热为主，印度半岛的加热以陆面感热加热为主。在 TP-west 试验中（图 2b 和图 3b），亚洲夏季风爆发时，“青藏高原”东南面的印度半岛和阿拉伯海地区上空盛行西南气流，非绝热加热场以凝结潜热为主，“青藏高原”西南面的阿拉伯半岛上空是西北气流，加热场以陆面感热加热为主。

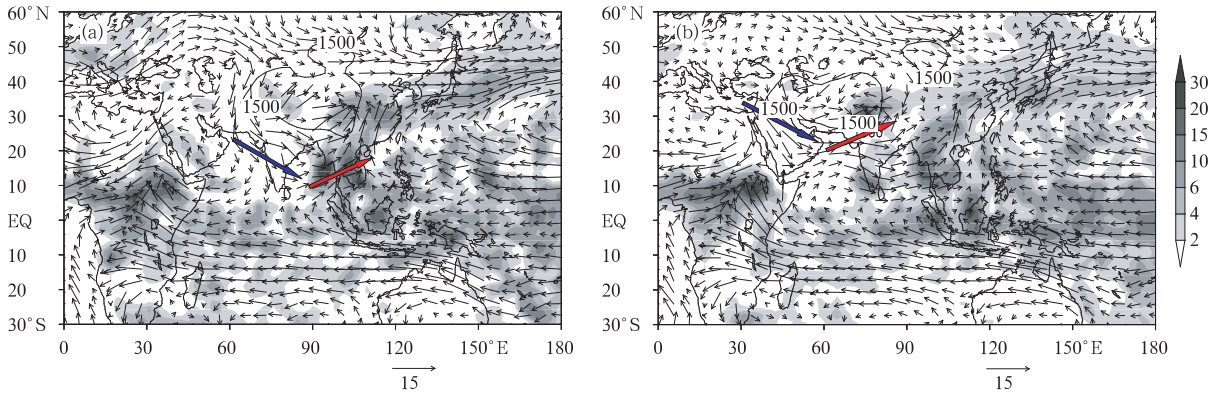

图 2　亚洲夏季风爆发时 850 hPa 的风场（m/s）和降水（阴影；mm/d）

（a. control 试验，b. TP-west 试验；标有 1500 m 的是地形等高线）

Fig. 2　Precipitation (shading; mm/d) and wind vector (m/s) at 850 hPa during the Asian summer monsoon onset time

(a. control experiment, b. TP-west experiment; solid lines with 1500 m are topographty contours)

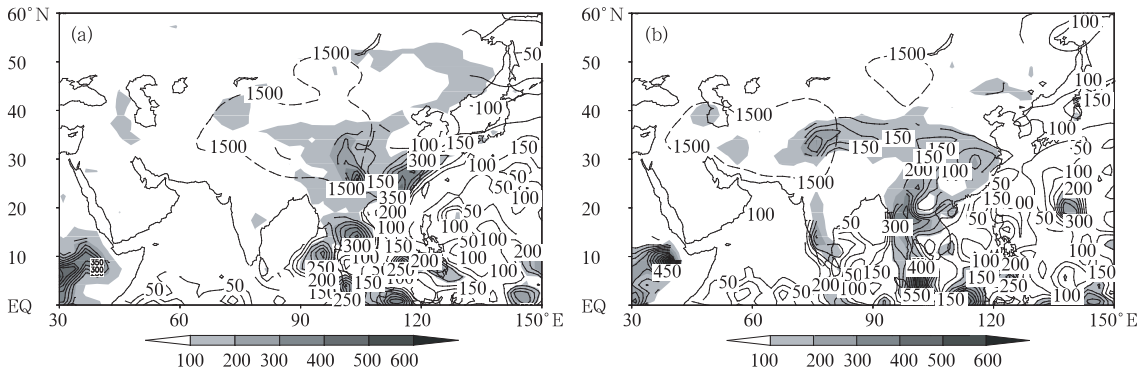

图 3　亚洲夏季风爆发时的非绝热加热场（W/m^2）

（a. control 试验，b. TP-west 试验；阴影区是总的非绝热加热＞100 W/m^2 的地区，实线是凝结潜热加热大于感热加热地区的凝结潜热加热，标有 1500 m 的长虚线是地形等高线）

Fig. 3　Distribution of diabatic heating (W/m^2) during the Asian summer monsoon onset time

(a. control experiment, b. TP-west experiment; shaded areas indicate total diabatic heating; contours are latent heating which are stronger than sensible heating; dasheds with 1500 m are topographty contours)

由青藏高原地区非绝热加热的时间演变（图 4）可以看到，高原地区在 3 月由冬季的冷源转变为热源，在过渡季节高原地区的加热越来越强，在 7 月达到极值。青藏高原的热力适应作用，使得高原周围及其上空低层产生气旋性环流异常，对流层高层产生强反气旋性环流异常（图略）。这种异常环流同位相地叠加在大尺度陆地热力适应引起的低层气旋性环流和高层反气旋性环流上，加强了对流层低层高原东侧及东南侧的偏南气流和高原西侧及西南侧的偏北气流（图 5a），从而引起亚洲夏季风首先在青藏高原东南侧的海陆交界处爆发。青藏高原热源的热力适应作用同时还加强了对流层高层的反气旋性环

流(图5a),使得高层的反气旋性环流中心移到高原南部上空。当青藏高原西移到阿拉伯海北部时,"青藏高原"热源和大尺度陆地热源引起的低层气旋性环流和高层反气旋性环流产生了分离,高低层的环流与control试验结果比较均有所减弱(图5b)。这进一步说明,青藏高原大地形春夏作为一个热源,其不仅对亚洲夏季风的爆发地点具有"锚定"的作用,还对东亚夏季风系统具有加强的作用。

3.2 理想海陆分布试验结果分析

为了更加清楚地了解青藏高原的作用,我们设计了一组理想的海陆分布和青藏高原地形试验。这组试验包括EL、ETP-90和ETP-60 3个试验。第一个试验是在水球上添加了一个形似欧亚非大陆的E-型理想几何陆地的试验,后两个试验是在EL试验基础上分别添加了中心位于(32.5°N,90°E)和

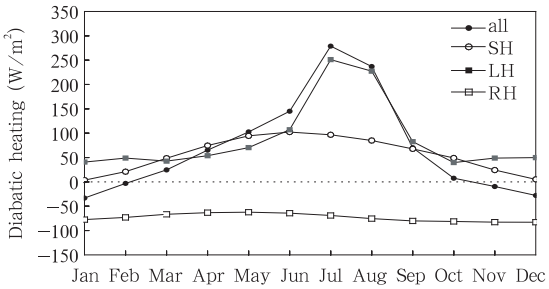

图4 control试验中青藏高原地区(27.5°~40°N,75°~100°E)非绝热加热的季节演变(W/m²)
(实心圆代表总的非绝热加热场,空心圆代表感热加热,实心方框代表凝结潜热加热,空心方框代表太阳辐射加热)
Fig. 4 Evolution of diabatic heating (W/m²) over Tibetan Plateau area (27.5°-40°N,75°-100°E) in control experiment
(Solid rounds indicate total diabatic heating, hollow rounds indicate sensible heating, solid panes indicate latent heating, and hollow panes indicate radiation cooling)

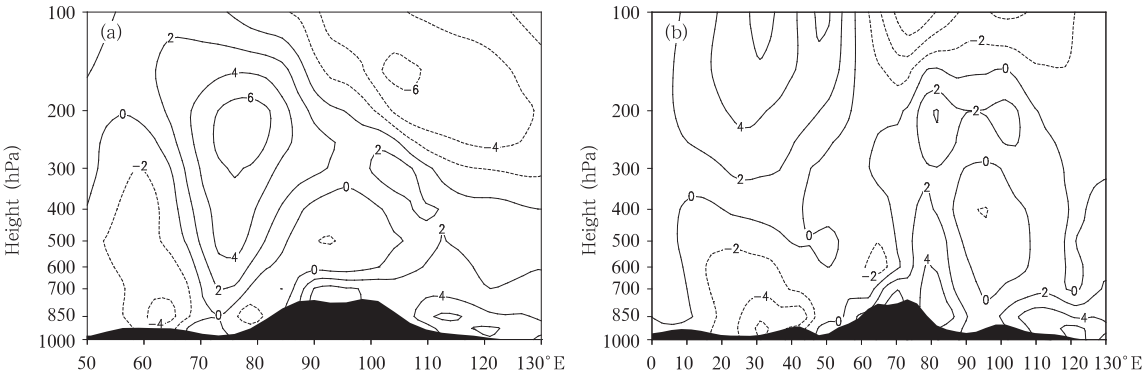

图5 沿27.5°N 5月月平均的经向风(m/s)
(a. control试验, b. TP-west试验;图中阴影是地形的剖面)
Fig. 5 Longitude-pressure section of May mean meridional wind (m/s) along 27.5°N
(a. control experiment, b. TP-west experiment; The terrains are shown in shaded areas)

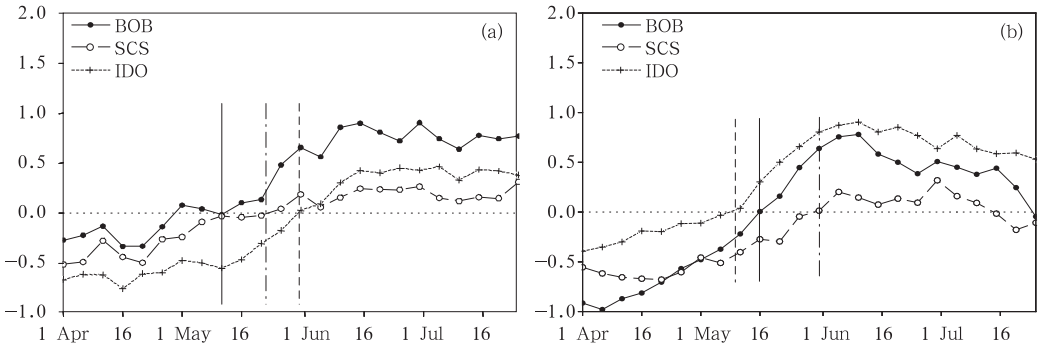

图6 理想地形和海陆分布试验中亚洲季风区对流层中上层(500~200 hPa)平均温度经向梯度($\frac{\partial T}{\partial y}$)的演变($10^{-3}$ K/km)
(a. TP-90试验, b. TP-60试验)
Fig. 6 Evolution of meridional temperature gradient in the mid-upper troposphere (500-200 hPa) over the Asian monsoon regions in ideal terrain and land-sea experiments (10^{-3} K/km)
(a. TP-90 experiment, b. TP-60 experiment)

(32.5°N，60°E)，中心高度为 5000 m 的理想高原，其他条件 3 个试验相同。

图 6 是两个有高原的理想试验中亚洲夏季风的建立过程。可以看到，当青藏高原位于孟加拉湾北部时(图 6a)，亚洲夏季风是首先在孟加拉湾地区爆发，其次是南海夏季风爆发，最后是印度夏季风的建立。虽然这是理想的海陆分布和地形试验，其亚洲夏季风的建立过程与资料分析结果是一致的[16,22]。如果青藏高原位于阿拉伯海北部(图 6b)，亚洲夏季风的建立过程是印度夏季风首先爆发，紧接着是孟加拉湾地区的夏季风爆发，最后是南海夏季风爆发。这两个试验的结果进一步印证了青藏高原对亚洲夏季风爆发地点的“锚定”作用。

ETP-60 和 ETP-90 两个理想的有高原试验和同样的理想海陆分布而无高原试验的差异(图 7)清楚地显示，青藏高原的存在，其热源的作用和机械作用一起，总是引起低层高原的东侧和东南侧产生偏南气流异常，高原的西侧和西南侧产生偏北气流异常，这异常的偏南气流，在春末夏初大尺度海陆热力差异造成的有利背景下，引导南面海洋上的暖湿空气进入高原东南侧的次尺度陆地，产生降水，亚洲夏季风在这里爆发。而异常的偏北气流却是带来了西亚的干冷空气，使得高原西南侧次尺度陆地上空的感热加热增强，那里的夏季风爆发受抑制。青藏高原对亚洲夏季风的建立进程起着重要的影响。

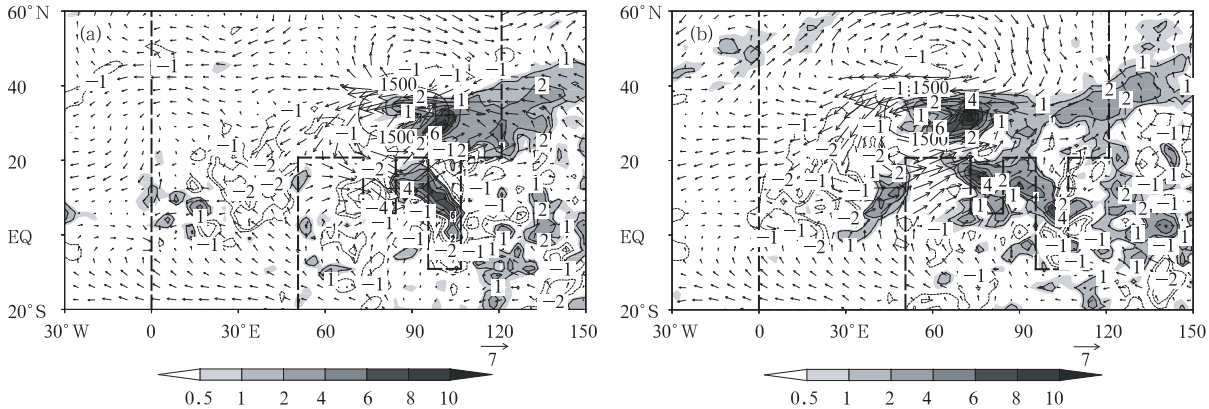

图 7　亚洲夏季风爆发时有、无高原理想试验的 850 hPa 风场(m/s)和降水(mm/d)差(阴影)

(a. TP-90 试验和 EL 试验的差，b. TP-60 试验和 EL 试验的差)

Fig. 7　Differences of precipitation (shading; mm/d) and wind vector (m/s) at 850 hPa between with and without TP experiments during the Asian summer monsoon onset time

(a. differences between TP-90 and EL experiment, b. differences between TP-60 and EL experiment)

4　结论和讨论

本文设计了一系列的数值试验，来研究青藏高原对亚洲夏季风爆发位置和强度的影响。通过研究发现，青藏高原的“热力滑轮”作用引起高原东南面热带陆地上空的偏南气流加强，降水增加，凝结潜热加强；高原西南面热带陆地上空出现偏北气流，降水减弱，陆面的感热加热加强。在热带海陆分布的背景下，使得亚洲夏季风首先在高原东南面的海洋东岸和陆地西部爆发，并使亚洲季风降水重新分布。

Kitoh[23]的研究表明，青藏高原地形的变化对于热带西太平洋和西印度洋的海温有着影响，海温—风—蒸发之间存在着一定的反馈作用，这也就对亚洲季风系统有着影响。本文的工作有待于用海-气耦合模式进行进一步的研究。

参考文献

[1] Murakami T, Ding Y H. Wind and temperature changes over Eurasia during the early summer of 1979. J Meteor Soc Japan, 1982, 60:183－196

[2] Luo Huibang, Yanai M. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979 Part II: Heat and moisture budgets. Mon Wea Rev, 1984, 112:966－989

[3] Luo Huibang, Yanai M. The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding areas during the early summer of 1979 Part I: Precipitation and kinematic analyses. Mon Wea Rev, 1983, 111:922－944

[4] He Haiyan, McGinnis J W, Song Zhengshan, et al. Onset of

the Asian summer monsoon in 1979 and the effect of the Tibetan Plateau. Mon Wea Rev, 1987, 115:1966－1994

[5] Webster P J. The elementary monsoon. In: Fein J S, Stephens P L. Eds. Monsoons. John Wiley, New York, NY, 1987. 3－32

[6] Johnson D R, Yanai M, Schoak T K. Global and regional distributions of atmospheric heat sources and sinks during the GWE. In: Chang C P, Krishnamurti T N, eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987. 271－297

[7] 陈隆勋，朱乾根，罗会邦等. 东亚季风. 北京：气象出版社，1991. 362pp
Chen Longxun, Zhu Qiangen, Luo Huibang, et al. East Asian Monsoon. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 362pp

[8] Ye Duzheng, Tao Shiyang, Li Maicun. The abrupt change of circulation over the northern hemisphere during June and October. The Atmosphere and the Sea in Motion, 1959. 249－267

[9] Matsumoto J. The seasonal changes in Asian and Australia nmonsoon regions. J Meteor Soc Japan, 1992, 70: 257－273

[10] Murakami T, Matsumoto J. Summer monsoon over the Asian continent and western north Pacific. J Meteor Soc Japan, 1994, 72:719－745

[11] Krishnamurti T N, Jayakaumar P K, Sheng J, et al. Divergent circulation on the 30 to 50 day time scale. J Atmos Sci, 1985, 42:364－375

[12] Hirasawa N, Kato K, Takeda T. Abrupt change in the characteristics of the cloud zone in subtropical east Asia around the middle of May. J Meteor Soc Japan, 1995, 73(2): 221－239

[13] Tao Shiyang, Chen Longxun. A review of recent research on the east Asian summer monsoon in China. In: Chang C P, Krishnamurti T N. eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60－92

[14] Chang C P, Chen G T J. Tropical circulation associated with southwest monsoon onset and westerly surges over the South China Sea. Mon Wea Rev, 1995, 123: 3254－3267

[15] 吴国雄，张永生. 青藏高原的热力强迫和机械强迫作用以及亚洲季风的爆发Ⅰ. 爆发地点. 大气科学，1998，6：825－838
Wu Guoxiong, Zhang Yongsheng. Heat and dynamic effect of Tibetan Plateau and the onset of Asian summer monsoon I. the onset site. Chinese Atmospheric Sciences(in Chinese), 1998, 6: 825－838

[16] 毛江玉. 季节转换期间副高形态变异和季风爆发机制的研究:[学位论文]. 北京:中国科学院大气物理研究所，2001. 139pp
Mao Jiangyu. Research of the variations of subtropical high in season switch time and mechanism of the monsoon onset:[Ph D dissertation]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 2001. 139pp

[17] 周天军，宇如聪，王在志等. 大气环流模式 SAMIL 及其耦合模式 FGOALS-s. 北京：气象出版社，2005. 288pp
Zhou Tianjun, Yu Rucong, Wang Zaizhi, et al . An Atmospheric General Circulation Model－SAMIL and Its Coupled Model FGOALS-s. Beijing: China Meteorological Press, 2005. 288pp

[18] Xue Y K, Sellers P J, Kinter II J L, et al. A simplified biosphere model for global climate studies. J Climate, 1991, (4): 345－364

[19] Wu T W, Liu P, Wang Z, et al. The Performance of Atmospheric Component Model R42L9 of GOALS/LASG. Advances in Atmos Sci, 2003,(20): 726－742

[20] Li C F, Yanai M. The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast. J Climate, 1996,(2): 358－375

[21] Yanai M, Li C F. Mechanism of heating and the boundary layer over the Tibetan Plateau. Mon Wea Rev, 1994, 122: 305－323

[22] 刘新. 青藏高原热状况对亚洲大气环流系统的影响:[学位论文]. 北京:中国科学院大气物理研究所，2000. 106pp
Liu Xin. The Effects of Tibetan Plateau heating on Asian atmosphere circulation:[Ph D dissertation]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, 2000. 106pp

[23] Kitoh A. Effects of mountain uplift on East Asian summer climate investigated by a coupled atmosphere-ocean GCM. J Climate, 2004, 15: 783－802

EFFECT OF TIBETAN PLATEAU ON THE SITE OF ONSET AND INTENSITY OF THE ASIAN SUMMER MONSOON

Liang Xiaoyun

(*LASG*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029;
China Laboratory for Climate Studies, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081)

Liu Yimin　Wu Guoxiong

(*LASG*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing*, 100029)

Abstract

Based on experiments in different longitudes of the Tibetan Plateau, it is found that the Tibetan Plateau makes a heat pulley function on its surrounding areas in late spring and summer. The function always enhances southerlies and brings heavy rainfall and more latent heating over tropical land to southeast of the Tibet, prevail northerlies, less rainfall and more sensible heating over tropical land to southwest of the Tibet. Therefore, the onset of Asian summer monsoon often takes place on the eastern shore of sea lies to the south of the Tibetan Plateau. These show that the Tibetan Plateau anchor the onset site of Asian summer monsoon. Results also show that the existence of Tibetan Plateau modulates the Asian monsoon, and make the Asian summer rainfall to redistribute.

Key words: Tibetan Plateau, Asian summer monsoon, Site of onset, Heat pulley.