

青藏高原表面过程对夏季青藏高压的影响 ——数值试验*

李伟平 吴国雄 刘屹岷 刘新

(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 利用 IAP/LASG GOALS 气候模式设计了两组敏感性试验, 分别考察青藏高原表面感热输送和表面摩擦拖曳对夏季青藏高压的影响。结果表明, 表面感热输送显著增强了高原近地层气柱中正涡度的制造和气旋性环流, 同时增强了高原上空气柱高层的负涡度制造和反气旋性环流。另一方面, 高原表面摩擦拖曳虽然使得低层的辐合略有增加, 但施加给整层气柱以反气旋性涡度。因而高原表面的感热输送和表面摩擦拖曳对夏季青藏高压都有增强的作用。表面摩擦拖曳对上空环流的影响随着高度升高而减弱, 而表面感热输送引起的高层负涡度的增加与低层正涡度的增加在数值上相当甚至更大。

关键词: 表面感热; 表面摩擦; 青藏高原; 高压

1 引言

青藏高原对大气环流的影响研究由来已久。动力方面主要是高原大地的机械阻挡作用^[1-3], 热力方面主要是高原对大气的非绝热加热。关于高原的热力影响, 早在 50 年代叶笃正等^[4]就指出了高原上空气柱在夏季是个热源区。朱抱真^[5,6]用环流资料计算了北半球 1 月和 7 月对流层下半部热源和热汇的分布, 并用小扰动法得到两层斜压模式的解析解。显示考虑了热源和地形共同作用后所得扰乱流型更接近实况, 提出热源和地形作用通过动力过程在大气环流中相互制约的统一性。陈隆勋等^[7]利用 1979 年第一次青藏高原气象科学试验 (TIMEX) 资料重新计算了青藏高原热源强度。研究表明, 陆面上表面感热输送的贡献很大, 在雨季到来之后, 凝结潜热的作用也增强, 尤其是高原东部地区^[8-10]。这个高耸的热源强烈影响东亚大气环流的季节变化, 并维持着亚洲夏季的季风环流^[11]。Wu 和 Zhang^[12]利用观测资料对高原表面感热对大气环流季节变化尤其是夏季风的阶段性爆发进行了详细的讨论。夏季强大的南亚高压位于青藏高原上空就与该地区大气的热源效应有密切关系。张琼^[13]根据观测资料诊断结果将该现象称为青藏高压 (南亚高压偏东的一类平衡态) 的“趋热性”, 即向大气暖中心的位置靠拢。根据数值模拟结果, 吴国雄等^[14]提出了“感热气泵”的概念, 认为春夏季高原表面感热输送造成了低层气流向高原地区的辐合, 形成了夏季高原上空强烈的上升运动, 由此造成的降水凝结潜热加剧了上升运动以及高空的辐散, 维持着高原上空的高压。最近, 吴国雄和

2000-06-16 收到, 2000-08-01 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49805003、49635170、49905002 以及国家重点基础研究发展规划项目 G1998040904 共同资助

刘屹崕^[15]提出“热力适应”的理论,揭示了高原上空非绝热加热的垂直不均匀分布是形成近地层浅薄热低压和中高层深厚的青藏高压的重要因素。刘新等^[16]对 NCEP/NCAR 再分析资料的诊断分析证实了上述推论,并计算了位涡方程的收支情况,认为在高原上空气柱低层,随高度增强的非绝热加热所制造的正涡度由表面摩擦拖曳施加给气柱的负涡度来平衡;高层随高度减弱的非绝热加热所制造的负涡度则由涡度的水平辐散项来平衡。鉴于高原表面感热输送和表面摩擦对大气环流的重要影响,本文设计了两组数值试验以验证上述理论和资料诊断的结果。第2节简单介绍了所用资料、模式以及试验设计,第3节为 NCEP/NCAR 再分析资料的诊断分析,第4、5节分别讨论了表面感热试验以及表面摩擦试验的结果,第6节为总结与讨论。

2 资料、模式及试验方案简介

本文所用资料为 NCEP/NCAR 的再分析资料,包括相对涡度和非绝热加热率。非绝热加热率的各个分量是同化模式输出的不同物理过程所造成的温度倾向,虽然这类资料对模式的依赖性较大,但通过与其他常规资料的对照分析,这套加热率资料还是为我们提供了许多有用的信息。它在定量上有很大的局限性,必须小心。不过在定性上,这种同化资料至少在大面积平均(而不是单点比较)是可信的。由于加热率是在 σ 坐标计算的,为与其他常规物理量进行对照,我们按照压力对数的线性插值得到等压面坐标的加热率。

数值试验所用模式为中国科学院大气物理研究所的海-陆-气耦合模式(IAP-LASG GOALS),该模式在气候平均态及不同时间尺度气候变率的模拟方面具有较好的能力^[17]。本文中的试验都是7月份的重复积分,即太阳辐射和海表温度固定为7月15日的气候平均值,模式积分18~24个月,在积分稳定后取12个月作为分析对象。两组敏感性试验是这样设计的:分别去掉3 km以上高原格点对模式底层大气的感热加热和摩擦拖曳,其他过程均保持与控制试验相同,尤其是全球整层大气中的凝结潜热加热率采用控制试验中保留下来的凝结加热,用以突出表面过程的作用。这两组敏感性试验分别称为无感热试验和无摩擦试验。通过与控制试验的对照分析,以考察表面感热输送和表面摩擦的影响。为讨论方便,我们把水平环流分解为涡旋风与辐散风两部分,并分别以300 hPa和600 hPa来表示高原上空高层与低层的形势。分析过程中应用了 t 检验以考察试验结果差异的显著性。在下面的讨论中,差异均指控制试验减去敏感性试验的结果。

3 高原上空气柱的非绝热加热与涡度

在分析数值试验的结果之前,我们先考察一下 NCEP 再分析资料中高原上空大气非绝热加热和涡度的垂直分布,以了解夏季高原上空大气环流的背景。从图1可以看出,总加热在整个气柱内都是正值,即夏季高原上空为一个热源,这与叶笃正等^[4]以及姚兰昌等^[8]早期的观测分析一致。从加热场的各个分量来看,辐射的总体效应是冷却,潜热是主要的加热项。高层主要是深对流造成的潜热加热,大尺度的凝结加热在低层也

有较大贡献。在近地层, 感热的贡献是主要的。这样, 总的非绝热加热在近地层达到最大。按照“热力适应”的理论^[15], 在该最大加热层以下的浅薄层次里有正的涡度制造, 而在该层以上的深厚气柱内, 非绝热加热随高度递减将产生负的涡度。图 2 中 500 hPa 至地面的浅薄的正涡度区对应着气旋性环流, 而该层以上整个对流层都是负涡度, 对应着夏季高原上空深厚的反气旋性环流。这与热力适应理论的分析结果一致, 也符合实际的天气经验。下面我们就来讨论数值试验中无感热试验的结果。

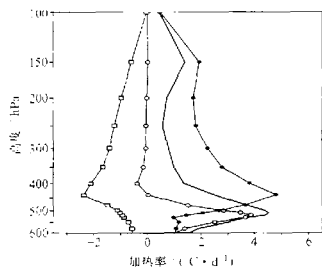


图 1 高原区域 (80°E, 28°N)
平均的非绝热加热及其分量的垂直廓线
空心圆: 感热; 实心圆: 潜热;
方框: 辐射; 实线: 总加热

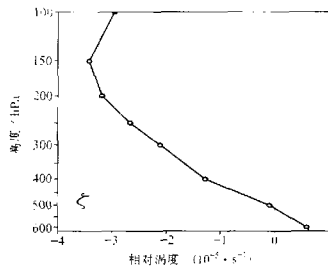


图 2 高原区域 (80°E, 28°N)
平均的相对涡度的垂直廓线

4 表面感热输送的影响

表面感热输送可以直接加热上空大气, 增强高原上空的上升运动。图 3 所示为通过高原中部的控制试验与无感热试验中温度与经向环流差异的垂直剖面。可见, 越贴近地面增温越明显, 这种增温以及异常的上升运动显然是由高原表面的加热造成的, 而 200 hPa 以上的降温则与增强的上升运动有关。虽然表面感热仅直接作用于近地层, 使得气柱中的最大加热层向地面靠近, 其在高层的直接影响很小, 但是按照“热力适应”理论, 上升运动在高层非绝热加热非常小的地方依然存在, 绝热膨胀导致气柱降温, 这就是“过流”现象^[15]。从垂直环流的差异来看, 高原上空异常的上升运动向高原南、北两侧辐散, 分别加强了南侧的季风环流和北侧的热力正环流。有了这个总体印象, 我们再来考察水平环流的变化。

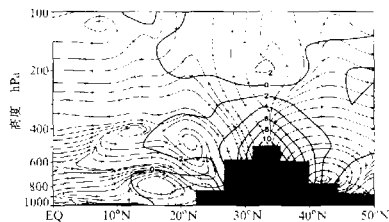


图 3 控制试验与无感热试验通过高原地区中部 (90°E) 的温度与经向垂直环流差异 (控制试验-无感热试验) 垂直剖面
温度的等值线间隔为 2℃, 阴影表示模式中的地形

虽然两种表面过程都使得夏季青藏高压增强,但是也有区别。表面摩擦拖曳使得低层的辐散风为异常辐合,这会增加气旋式环流,只是摩擦拖曳造成的反气旋式的无辐散风更强,总的结果是削弱低层的气旋式环流。而在高层,表面摩擦拖曳造成的涡旋环流和辐散风的变化一致,利于青藏高压加强。表面感热加热使得高原上空气柱的最大加热层靠近地面,根据“热力适应”理论,这使得高原上空大气在最大加热层以下为浅薄的气旋式环流,而在最大加热层以上的高空为深厚的反气旋式环流。无论在低层还是高层,表面感热加热造成的涡旋风与辐散风的异常是一致的,都利于青藏高压加强。

比较两组敏感性试验可以发现,表面感热输送造成的高原上空低层正涡度的增加大约是表面摩擦造成的负涡度增加的两倍(图 8a、b),即表面感热的热力影响要比表面摩擦的动力影响大一些。需要说明的是,这里的动力影响仅指表面摩擦对近地层大气的拖曳,不涉及高原大地的机械阻挡作用。因为表面摩擦的作用依赖于背景流场,可以认为是“被动”的,而表面感热的热力影响则是直接“主动”的。从图 8 还可以看到,表面摩擦对大气环流的影响随着高度升高而减弱,而表面感热输送造成的高层负涡度的制造与近地层正涡度的制造数值相当甚至更大,尽管感热加热主要作用在近地层,这是大气环流“热力适应”的结果^[15]。

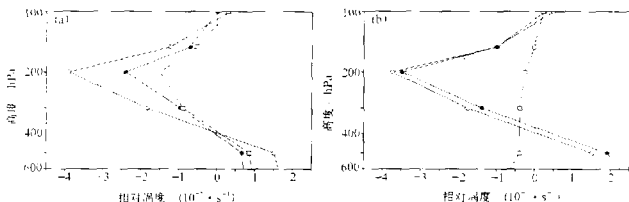


图 8 高原区域平均的相对涡度的垂直廓线

(a) 控制试验与无感热试验(空心圆:控制试验,实心圆:无感热试验,方框:控制试验-无感热试验);

(b) 控制试验与无摩擦试验(空心圆:控制试验,实心圆:无摩擦试验,方框:控制试验-无摩擦试验)

6 总结与讨论

通过数值试验模拟了青藏高原表面感热输送和表面摩擦对夏季青藏高压的影响。主要结果如下:

(1) 表面感热输送加剧了低层气流向高原地区的辐合,增强了高原上空的上升运动以及高空向外的辐散。在科里奥利力的作用下,这将使得高原上空低层的气旋性环流以及高空的反气旋环流增强,从而使夏季的青藏高压加强。

(2) 在夏季高原低层为气旋性环流的背景下,表面摩擦拖曳施加给整层气柱反气旋性的环流,这种影响在近地层最明显。另一方面,表面摩擦力会破坏气压梯度力与科里奥利力的平衡,从而导致近地面的辐合略有增加。但是这不足抵消无辐散部分反气旋式的环流异常。在高空,无辐散风与辐散风的异常是一致的,都使青藏高压得到加强。

(3) 表面感热输送造成的高原上空低层正涡度的增加大约是表面摩擦造成的负涡度

增加的两倍,即表面感热的热力影响要比表面摩擦拖曳的动力影响大一些。表面摩擦对大气环流的影响随着高度升高而减弱,而表面感热输送造成的高层负涡度的制造与近地层正涡度的制造数值相当甚至更大。

虽然表面摩擦的影响在数值上较小,但对整层气柱的积分而言,非绝热加热的影响在气柱的上、下几乎互相抵销。表面摩擦作为气柱的外源强迫,对高原上空整个气柱负涡度源的形成具有重要意义^[15],这在资料诊断中已得到证实^[16]。利用模式结果对此进行分析,并考察其对亚洲季风区乃至北半球大气环流的影响是我们进一步要做的工作。

表面热源的性质与前期冬、春季节的积雪异常有密切联系^[18],探讨冬、春季节的积雪异常与夏季高原表面热源性质的关系,从而预测夏季青藏高原高压的变化以及中国东部降水的异常具有重要的应用价值。

致谢: 刘辉博士在试验过程中提供了许多建议,特此致谢。

参 考 文 献

- 1 Charney, J. G. and A. Eliassen, A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude west erlies, *Tellus*, 1949, 1(2), 38~55.
- 2 Yeh Tu-cheng, The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945~1946, *Tellus*, 1950, 2(3), 173~183.
- 3 杨嘉初等, 西藏高原气象学, 北京: 科学出版社, 1960.
- 4 叶笃正, 罗四维, 朱抱真, 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡, *气象学报*, 1957, 28(2), 108~121.
- 5 朱抱真, 大尺度热源、热汇和地形对西风带的定常扰动 (一), *气象学报*, 1957, 28, 122~140.
- 6 朱抱真, 大尺度热源、热汇和地形对西风带的定常扰动 (二), *气象学报*, 1957, 28, 198~224.
- 7 陈隆勋, 李维亮, 亚洲季风区各月的大气热源结构, 全国热带夏季风学术会议文集, 昆明: 云南人民出版社, 1983.
- 8 姚芸昌, 罗四维, 王安宇, 亚洲地区月平均大气加热场及其年变特征, *高原气象*, 1982, 1(3), 1~11.
- 9 Yanai, M., C. Li and Z. Song, Seasonal heating of the Tibetan Plateau and effects of the evolution of the Asian summer monsoon, *J. Meteor. Soc. Japan* 1992, 70, 189~221.
- 10 Yanai, M. and C. Li, Mechanism of heating and the boundary layer over the Tibetan Plateau, *Mon. Wea. Rev.*, 1994, 122(2), 305~323.
- 11 Ye Duzheng and Wu Guoxiong, The role of the heat source of the Tibetan Plateau in the general circulation, *Meteor. Atmos. Phys.*, 1998, 67, 181~198.
- 12 Wu Guoxiong and Zhang Yongsheng, Tibetan Plateau forcing and the monsoon onset over South Asia and the South China Sea, *Mon. Wea. Rev.*, 1998, 126, 913~927.
- 13 张璟, 南亚高压的演变规律、机制及其对区域气候的影响, 南京大学博士学位论文, 1999, 148pp.
- 14 吴国雄, 李伟平, 郭华, 刘辉, 薛继善, 王在志, 青藏高原感热气泵和亚洲夏季风, 赵九章纪念文集 (叶笃正主编), 北京: 科学出版社, 1997, 116~126.
- 15 吴国雄, 刘屹岷, 热力适应、过流、扩散和副高 I, 热力适应和过流, *气象科学*, 2000, 24(4), 433~446.
- 16 刘新, 吴国雄, 李伟平, 刘屹岷, 夏季青藏高原加热和入尺度流场的热力适应, *自然科学进展*, 2001, 11(1), 33~39.
- 17 吴国雄, 张华洪, 刘辉, 俞永强, 金向洋, 郭裕福, 孙焱芬, 李伟平, 王标, 石广志, IASG全球海洋-大气-陆面系统模式 (GOALS / LASG) 及其模拟研究, *应用气象学报*, 1997, 8 (增刊), 15~28.
- 18 张顺利, 陶诗言, 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究, *大气科学*, 2001, 25(3), 372~390.

How the Surface Processes over the Tibetan Plateau Affect the Summertime Tibetan Anticyclone — Numerical Experiments

Li Weiping, Wu Guoxiong, Liu Yimin and Liu Xin

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

Abstract Numerical simulations by using IAP/LASG GOALS climate model are carried out to investigate how the surface sensible heat flux and surface friction force over the Tibetan Plateau affect the summertime South Asia high. It is shown that the surface sensible heat flux enhances both the lower-level convergence in the Plateau area and the upper-level divergence outward, intensifies the rising motion over the Plateau, thus strengthens the South Asia high. The surface friction force exerts abnormal an anticyclonic circulation to the whole air column over the Plateau, hence causes the intensification of the South Asia high in summer. The influence of surface friction on atmospheric circulation decreases with height, whereas the impact of surface sensible heat flux on the circulation at higher level is comparable to that at the lower level.

Key words: surface sensible heat flux; surface friction; Tibetan Plateau; anticyclone

勘 误

刊登在 2001 年 (第 25 卷) 第 4 期 444~454 页钱正安、吴统文、梁潇云的文章“青藏高原及周围地区的平均垂直环流特征”, 其中图 2 和图 4 应互换位置。

由于编辑部工作中的疏漏出现以上差错, 谨向作者和读者致歉。

《大气科学》编辑部

2001 年 9 月

How the Surface Processes over the Tibetan Plateau Affect the Summertime Tibetan Anticyclone — Numerical Experiments

Li Weiping, Wu Guoxiong, Liu Yimin and Liu Xin

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

Abstract Numerical simulations by using IAP/LASG GOALS climate model are carried out to investigate how the surface sensible heat flux and surface friction force over the Tibetan Plateau affect the summertime South Asia high. It is shown that the surface sensible heat flux enhances both the lower-level convergence in the Plateau area and the upper-level divergence outward, intensifies the rising motion over the Plateau, thus strengthens the South Asia high. The surface friction force exerts abnormal an anticyclonic circulation to the whole air column over the Plateau, hence causes the intensification of the South Asia high in summer. The influence of surface friction on atmospheric circulation decreases with height, whereas the impact of surface sensible heat flux on the circulation at higher level is comparable to that at the lower level.

Key words: surface sensible heat flux; surface friction; Tibetan Plateau; anticyclone

勘 误

刊登在 2001 年 (第 25 卷) 第 4 期 444~454 页钱正安、吴统文、梁潇云的文章“青藏高原及周围地区的平均垂直环流特征”, 其中图 2 和图 4 应互换位置。

由于编辑部工作中的疏漏出现以上差错, 谨向作者和读者致歉。

《大气科学》编辑部

2001 年 9 月

How the Surface Processes over the Tibetan Plateau Affect the Summertime Tibetan Anticyclone — Numerical Experiments

Li Weiping, Wu Guoxiong, Liu Yimin and Liu Xin

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

Abstract Numerical simulations by using IAP/LASG GOALS climate model are carried out to investigate how the surface sensible heat flux and surface friction force over the Tibetan Plateau affect the summertime South Asia high. It is shown that the surface sensible heat flux enhances both the lower-level convergence in the Plateau area and the upper-level divergence outward, intensifies the rising motion over the Plateau, thus strengthens the South Asia high. The surface friction force exerts abnormal an anticyclonic circulation to the whole air column over the Plateau, hence causes the intensification of the South Asia high in summer. The influence of surface friction on atmospheric circulation decreases with height, whereas the impact of surface sensible heat flux on the circulation at higher level is comparable to that at the lower level.

Key words: surface sensible heat flux; surface friction; Tibetan Plateau; anticyclone

勘 误

刊登在 2001 年 (第 25 卷) 第 4 期 444~454 页钱正安、吴统文、梁潇云的文章“青藏高原及周围地区的平均垂直环流特征”, 其中图 2 和图 4 应互换位置。

由于编辑部工作中的疏漏出现以上差错, 谨向作者和读者致歉。

《大气科学》编辑部

2001 年 9 月